

Información geotécnica como elemento de análisis en la planeación y diseño de obras civiles en Bogotá

Geotechnical information as an important element when planning and designing civil engineering work Bogotá

Denisse Cangrejo Aljure¹, Carlos Gustavo Infante²

RESUMEN

La ciudad de Bogotá constituye un escenario de gran dinamismo en cuanto a la construcción de obras civiles se refiere, y es fundamental contar con información relevante para una adecuada planeación y evaluación de las obras, tanto desde el punto de vista estructural como presupuestal. La humedad del suelo se convierte en una variable de gran interés dada su alta incidencia en el fenómeno de asentamientos de las estructuras en Bogotá, razón por la cual se abordó en este trabajo la zonificación de la ciudad de acuerdo al porcentaje de humedad del suelo, como instrumento de análisis para orientar la planeación y diseño de obras de ingeniería civil. Mediante técnicas de análisis geoestadístico se usó la información de 43.000 muestras iniciales, para hacer la predicción de la humedad en todo el territorio a cuatro rangos de profundidad y establecer la correlación de esta variable con otras variables físicas, encontrando resultados que constituyen un insumo para el análisis propuesto. Adicionalmente, se identificaron los factores que permiten explicar y entender los resultados encontrados en relación con la humedad, haciendo posible la comprensión del comportamiento de la misma en el área de estudio. En esencia, se encontró la predominancia de zonas con altos porcentajes de humedad del suelo al noroeste de Bogotá, y zonas de menor humedad del suelo hacia el sureste y el oriente cerros orientales. Finalmente, se encontró un comportamiento diferente de la variable humedad después de seis metros de profundidad.

Palabras clave: geoestadística, geotecnia, humedad del suelo, autocorrelación espacial, kriging, semivariograma experimental, estacionariedad.

ABSTRACT

The city of Bogotá provides a dynamic scenario re civil construction work; it is thereby essential to have relevant information available for the suitable planning and evaluation of engineering work from both the structural and budgetary points of view. The moisture content of soil has become a most important variable, given its great impact on placing structures in Bogotá. This is why this work on city zoning aimed at orientating planning and designing civil engineering work has been done according to the percentage of moisture in soil. Information from 43,000 initial samples was used for geostatistical analysis to predict soil moisture content through the whole area. Four ranges of depth were used for establishing this variable's correlation with other physical variables. Factors were identified which led to understanding results regarding soil moisture content and its behaviour in the area being studied. Areas were found having high percentages of moisture content in soil in the northeast of Bogotá and less moist areas in the soil towards the southeast and the east of Bogotá (Bogotá's eastern heights). Different behaviour was found for moisture content at depths greater than 6 meters.

Key words: geostatistics, geotechniques, soil moisture content, spatial autocorrelation, kriging, experimental semivariogram, time of year.

Recibido: noviembre 30 de 2004
Aceptado: septiembre 20 de 2005

¹ Ingeniera de sistemas, Universidad Nacional de Colombia, especialista en sistemas de información geográfica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Especialista en teledetección, cartografía y Sistemas de Información Geográfica, Universidad de Alcalá. Docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional, e-mail: ldcangrejoa@unal.edu.co

² Ingeniero de sistemas, Universidad Nacional de Colombia, y especialista en gerencia de proyectos, Universidad Piloto de Colombia.

Introducción

En una ciudad como Bogotá, con cerca de 42 km² de área urbana, la construcción de obras civiles juega un papel preponderante, y es perentorio desarrollar mecanismos e instrumentos que coadyuven a aumentar la eficiencia de los procesos de planeación de las mismas y garanticen obras con los niveles de calidad y las características de diseño estructural adecuadas.

Si bien es cierto que hay múltiples variables que inciden en el desarrollo de estas obras de ingeniería, es la naturaleza del suelo uno de los factores con mayores implicaciones, y es por ello que en este trabajo se planteó como objetivo la zonificación de la ciudad según la humedad del suelo, una variable física de gran incidencia en la compresibilidad³ del terreno, característica asociada en forma directa con los procesos de asentamiento de las obras civiles.

Uno de los factores relacionados con las dificultades que se presentan en el desarrollo de los proyectos de ingeniería es la ausencia de estudios suficientes que permitan caracterizar los suelos desde el punto de vista geotécnico.

Es de anotar que una caracterización geotécnica supone la consideración de variables biológicas y químicas del suelo, además de las físicas, que son las que tradicionalmente se consideran en los procesos de planeación y cimentación de las obras.

Es de anotar también que el cambio que presenta este tipo de variables, ocasionado por la dinámica propia del ambiente, plantea adicionalmente la necesidad de conocer el comportamiento de estas variables, en contextos y en momentos específicos; es decir, el conocimiento de la variabilidad espacial y temporal de las propiedades del terreno.

Es necesario, entonces, implementar mecanismos que permitan, en primera instancia, obtener de manera clara la información de las variables físicas, químicas y biológicas de los suelos, y en segundo lugar, realizar estudios de variabilidad espacial y correlación de estas variables, que constituyan indicios para el constructor, del tipo de suelo y el comportamiento de las diversas variables, al momento de decidir la estructura y demás características de la obra a desarrollar.

Se evidencia entonces la demanda de un alto índice de estudios del terreno, debido a los orígenes del mismo y a las condiciones ambientales (climáticas y atmosféricas) particulares que presenta la región.

La importancia del tema la demuestra la abundante literatura existente en diversos ámbitos, y la justifica, por otra parte, la gran cantidad de aplicaciones que se generan a partir del conocimiento de la distribución espacial de la humedad del suelo.⁴

Algunos estudios existentes ofrecen respuestas al respecto; por ejemplo, existen estudios que permiten zonificar un territorio y ofrecer con ello pautas a los diferentes profesionales a quienes interesa el conocimiento del terreno para abordar sus proyectos.

En el contexto internacional, se pueden mencionar estudios como el proyecto del Centro de Geociencias Aplicadas de la Facultad de ingeniería de Argentina, en el cual se usa la técnica de fotointerpretación y procesamiento digital de imágenes, en la caracterización geotécnica del suelo, para usos ingenieriles (Sotelo, 2003), o bien el trabajo desarrollado por el Grupo de Investigación Geoambiental del Departamento de Geografía de la Universidad de Extremadura, en el cual se proponen el uso de redes neuronales artificiales para determinar la distribución espacial de la humedad del suelo (Maneta y Schnabel, 2003).

A nivel local, en el Distrito, se han realizado diversos esfuerzos que vale resaltar, dentro de los cuales se encuentran, en el ámbito académico, un buen número de trabajos, y en el ámbito institucional, diversos proyectos que se han abordado desde la empresa privada y entidades estatales.

Algunos de estos trabajos están orientados a la zonificación geotécnica para sectores específicos de Bogotá (Casas, Moreno y Rodríguez, 1997; Salamanca, 1995).

A nivel institucional, la Empresa de Acueducto de Bogotá inició la recolección de información con miras a la conformación de una base de datos geotécnica, y ha emprendido diversos proyectos con la Universidad de los Andes y la Pontificia Universidad Javeriana.

Adicionalmente, debe mencionarse que algunas entidades distritales y nacionales han dado aportes concretos para el desarrollo de este tipo de estudios, desde el levantamiento y la geo-referenciación de las coberturas de base, hasta información temática agrológica y geológica del suelo, entre otras.

Finalmente, resulta oportuno hacer mención de puntos de vista alternativos, como el que plantea el Grupo de Investigación Geoambiental de la Universidad de Extremadura (Maneta y Schnabel, 2003), quienes afirman: *"La distribución espacial de la humedad superficial del suelo se ha determinado tradicionalmente mediante técnicas de interpolación o mediante métodos geostatísticos a partir de valores de humedad medidos*

3 El coeficiente de compresibilidad es un parámetro que define la deformabilidad del suelo y se obtiene de la relación entre la deformación unitaria vertical y el incremento de presión efectiva vertical.

4 Son múltiples las aplicaciones que se pueden mencionar adicionales a la construcción de obras civiles. Algunas de ellas son: el análisis de estabilidad y refuerzo de taludes, estudios sobre la reserva de agua útil en el suelo, el desarrollo de balances hídricos, el uso en contenciones, refuerzo de rellenos, refuerzo de base de pavimentos, entre otras.

puntualmente. Los valores interpolados son casi siempre función exclusiva de los valores vecinos conocidos...

De esta manera, y a diferencia de las interpolaciones clásicas, se tienen en cuenta factores que alteran el principio de autocorrelación espacial tales como cambios bruscos en la cubierta vegetal debidos a cambios en los usos del suelo.

... los procesos de distribución del agua en el suelo y los métodos para predecir el contenido de humedad edáfica siguen estando abiertos al estudio debido a la gran variabilidad espacial y temporal de este parámetro y a la cantidad de factores que lo determinan y que se influyen mutuamente...

... Hacer estudios a través de todo el rango de escalas, condiciones antecedentes y el mayor número de lugares de condiciones climáticas e hidrológicas diferentes, es importante para poder determinar con mayor exactitud la influencia real de cada elemento y poder así superar las conclusiones contradictorias a las que diferentes autores han llegado".

Al respecto, debe mencionarse que es oportuno abrir espacios para el desarrollo de nuevos estudios que consideren estos aspectos adicionalmente al análisis tradicional que se ha llevado a cabo en este trabajo, donde se asume la autocorrelación espacial como un principio que da soporte a la predicción de valores de la variable en puntos sin información, a partir de valores conocidos de la variable en los puntos vecinos usando técnicas geoestadísticas.

El principio de autocorrelación espacial, conocido como la primera ley de la geografía, fue formulado por Waldo Tobler, y afirma que "*Todas las cosas se parecen, pero las cosas más próximas en el espacio, se parecen más*"; permite comprender la forma en que una variable, medida en puntos diferentes de un territorio, se relaciona con ella misma.

Se dice que en los casos en que la presencia de un hecho en un lugar facilita que ese mismo hecho ocurra en los lugares próximos, existe *autocorrelación espacial positiva*; si ocurre lo contrario, se habla de *autocorrelación espacial negativa*, y en caso de no existir relación entre la presencia de un hecho en un lugar y su aparición en el entorno inmediato, se habla de *autocorrelación espacial nula* (Bosque, 1992).

Datos y metodología

Con el fin de conseguir el objetivo central de hacer la predicción de la humedad natural para Bogotá a diferentes profundidades, es necesario abordar el análisis de los datos, su origen, su naturaleza, y delimitar la zona de estudio, para exponer seguidamente los instrumentos conceptuales y metodológicos utilizados para el tratamiento de los datos y la obtención de resultados.

Descripción y origen de los datos

La base de datos objeto de análisis en este estudio fue provista por la Empresa de Acueducto de Bogotá, EAB, la cual compiló los datos provenientes de más de 1000 proyectos de estudios geotécnicos⁵ esencialmente; contiene información de cerca de 7400 puntos (perforaciones), con un total de casi 43000 muestras, para las cuales se calcularon mediante ensayos de laboratorio y campo, la humedad natural, el nivel freático y la resistencia a la compresibilidad del suelo, entre otros, a diferentes profundidades.⁶

Al restringirse de manera exclusiva al área urbana de Bogotá, quedaron 6000 puntos aproximadamente para las diferentes profundidades, de tal manera que el tamaño de la muestra para los rangos definidos de profundidad, osciló entre 1000 y 3500.

Aunque en una sección posterior se amplía la idea, es oportuno mencionar aquí que todas estas muestras no fueron tomadas bajo las mismas condiciones ambientales, ni temporales, ni de exactitud, ni por el mismo equipo de geotecnia, sino que por el contrario fueron diversos equipos de expertos los que tomaron las muestras, en diferentes fechas y bajo diferentes condiciones, generando incertidumbre e imprecisión en el análisis.

No obstante, esta situación se subsana con la revisión previa que sobre la base de datos utilizada realizó la Empresa de Acueducto de Bogotá, entidad distrital que como alternativa para este tipo de problemas desarrolló recientemente la *Norma de servicio para la toma de información geotécnica NS-010*, con la cual se pretende garantizar el uso de procedimientos estándar para los trabajos de levantamiento y análisis de datos del suelo y la incorporó en el Aplicativo del Sistema de Información Geotécnica SISGEO, disponible en el portal de esta entidad.

Delimitación de la zona de estudio

En este proyecto se realizó la predicción de la humedad natural para el territorio comprendido dentro del perímetro urbano de Bogotá.

En la base de datos de la Empresa de Acueducto se tenían datos de Bogotá y de algunos municipios aledaños como Soacha, Chía, La Calera y Sibaté, datos que fueron excluidos del análisis por estar fuera de la zona de interés.

La zona en estudio se extiende desde la coordenada este inferior: 83.789, y coordenada norte inferior: 82.255, hasta la coordenada este (superior): 107.336, y coordenada norte (superior): 125.934.

⁵ La geotecnia es el área de la ingeniería civil que estudia el comportamiento de suelos bajo la intervención de cualquier tipo de obra civil. Su finalidad es la de proporcionar interacción suelo/obra en lo que se refiere a estabilidad, resistencia (vida útil compatible) y viabilidad económica (Maccaferri América Latina, 2002).

⁶ En este proyecto se concentró la atención, como ya se mencionó, en la humedad natural del suelo, solamente.

Descripción de la variable de estudio

Siendo la variable de interés en el estudio la humedad natural, es necesario hacer una descripción de la misma, de manera formal.

Se define como Humedad natural del suelo (w), la relación entre el peso del agua y el peso del suelo seco constante a una temperatura comprendida entre 105 y 110 grados centígrados (Jiménez y de Justo, 1980).

El fenómeno de humedad natural del suelo se comprende mejor considerando la capacidad del suelo para atrapar y almacenar agua en forma peculiar y capilar, es decir, la capacidad de las partículas que conforman el suelo para almacenar humedad (el agua se adhiere a las partículas del suelo); una vez satisfecha esta capacidad, el exceso de agua infiltrada en el suelo, drena en forma vertical o en forma paralela a la superficie; en forma vertical, hasta encontrar una capa impermeable del suelo, o bien un depósito de agua subterránea y en forma paralela a la superficie muy cercana a ella, o en forma subsuperficial o hipodérmica (Silva, 1998).

Este comportamiento de la humedad en el suelo suscita una distribución diferente de la variable, a diferentes profundidades del suelo, razón por la cual en el estudio se definieron cuatro rangos de profundidad para el análisis, comprendidos en total entre 0 y 15 metros, profundidad de interés para la EAB debido al desarrollo de proyectos de tendido de redes y construcción de estructuras hidráulicas que ejecuta la empresa.

La información sobre los rangos de profundidad analizados y la cantidad de perforaciones y muestras utilizadas en cada caso, se presenta en la Tabla 1, Información muestral por rangos de profundidad.

Tabla 1. Información muestral por rangos de profundidad

PROF. INICIAL (m)	PROF. FINAL (m)	NÚMERO DE SONDEOS	NÚMERO DE MUESTRAS
0	2	3451	10426
2	4	3371	8253
4	6	1836	4289
6	15	1345	7291

Información complementaria

Como se mencionó en la sección anterior, no es correcto el uso de una sola variable para deducir conclusiones que puedan aplicarse a un proyecto de ingeniería; es importante contextualizar la información y analizarla conjuntamente con otras variables que tengan correlación con la variable en estudio.

Para tal fin, se usó además de la base de datos con la humedad natural w (%) del suelo, la información de

tipos de suelo, a partir de una zonificación general para el Distrito, ya que dicha variable tiene correlación directa con el fenómeno de compresibilidad y por supuesto con la humedad.

Esta información tiene sustento en los siguientes estudios de zonificación: "Zonificación geotécnica del Distrito Especial de Bogotá" realizado por Ingeominas (1988) y el trabajo de grado: "El subsuelo de Bogotá, zonificación y propuesta de investigación" (David, 1990), donde se define esencialmente una configuración de suelos blandos con mayor concentración de arcillas y limos en la parte noroeste, como consecuencia de su origen lacustre y suelos de mayor dureza por la presencia de arenas y gravas en la parte sur, con afloramientos de roca en los cerros orientales y en los de Suba y Niza.

Con el fin de contextualizar la información, se utilizaron tanto el límite urbano de la ciudad de Bogotá como el de las Unidades de Planeación Zonal que estableció el Departamento Administrativo de Planeación Distrital, DAPD.

Para la interpretación de los resultados, en particular de los mapas de predicción, se usaron como información de apoyo una ortofotografía y un plano geo-referenciado de Bogotá.

Metodología

La metodología utilizada, conducente a obtener la predicción de la variable aleatoria regionalizada, humedad natural, abarca las siguientes etapas:

- Extracción y depuración de la información georreferenciada para la humedad natural.
- Análisis exploratorio de los datos.
- Análisis estructural de los datos.
- Aplicación de técnicas geoestadísticas para la interpolación espacial con el método de *Kriging*.
- Generación de los mapas de predicción.
- Interpretación de los resultados.

Se entiende por variable aleatoria regionalizada aquella que puede tomar cualquier valor dentro de un rango determinado y está referida a una posición en el espacio (Matheron, 1970). En este trabajo, la variable regionalizada en estudio es la humedad, que puede tomar cualquier valor de 0 a 300 en términos porcentuales, en cualquier punto de la zona en estudio.

A continuación se hace la descripción de las etapas metodológicas empleadas:

Extracción y depuración de información geo-referenciada de la humedad natural

La base de datos de la EAB contiene originalmente información de múltiples variables del suelo, como resisten-

cia a la compresibilidad, límites de Atteberg,⁷ nivel freático, etc., de tal manera que el primer paso fue filtrar la información para extraer solamente los ensayos en los cuales se identificó la variable humedad, generando así una tabla que luego se restringió al Distrito, con cerca de 42700 muestras en cerca de 7000 perforaciones.

Posteriormente, se independizó la información correspondiente a cada rango de profundidad, conservando la información de las coordenadas de cada punto y procediendo luego a depurar los datos de cada rango de profundidad, eliminando los de ocurrencias extremas de la variable y posibles errores de digitación. Para la extracción y depuración de la información de humedad, específicamente se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- Conocimiento de la estructura de almacenamiento: la cual está basada en un modelo entidad-relación donde está contenida toda la información de proyectos, sondeos, estratos, muestras y perforaciones.
- Generación de un script para la extracción de los datos: se creó una consulta utilizando SQL (Standard Query Language) para la configuración de una tabla con toda la información de los sondeos, a partir de la cual se construyó una base de datos Acces para facilitar la manipulación de la información.
- Representación geográfica: utilizando la herramienta ArcGis se representaron los sondeos de la base de datos y se identificó la información de los municipios anexos como Sibaté, La Calera y Chía, entre otros, para ser excluida, dejando estrictamente los puntos que están dentro del límite urbano de Bogotá.

Análisis exploratorio de los datos

Los resultados obtenidos para los parámetros estadísticos descriptivos de la variable en cada rango de profundidad se presentan en la sección de resultados. Esencialmente se calcularon y analizaron los parámetros de localización: media y mediana, y los parámetros de variabilidad: varianza, desviación estándar y el coeficiente de variación.

Esta "primera aproximación" a los datos resulta de altísima utilidad, ya que permite caracterizar la información a partir de la cual se pretenden hacer los análisis, conocer qué tan homogéneos son los datos, identificar el valor en torno al cual oscilan la mayoría de estos, e identificar valores extremos o "fuera de rango", esencialmente.

Análisis estructural de los datos

Este análisis involucra el cálculo del semivariograma experimental y el ajuste a un modelo teórico conocido.

El variograma $\gamma(h)$ es una función matemática que mide la variabilidad, es decir, la desemejanza de una variable, cuando sus valores se observan en puntos que están separados una distancia concreta: (h) (Bosque, 1992).

En particular, tomando de (Samper, J., 1996):

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{i=1}^n (Z(x_i + h) - Z(x_i))^2}{2n}$$

Donde:

$\gamma(h)$: es el semivariograma experimental

$Z(x_i)$: son los valores experimentales en los puntos x_i en los que se dispone de datos en x_i , tanto como en x_{i+h} ;

n : es el número de pares de puntos separados por una distancia h

El variograma de la humedad del suelo, que fue construido para cada rango de profundidad, constituye un instrumento para determinar la forma concreta de la autocorrelación espacial de la humedad, es decir, su estructura espacial (Bosque, 1992).

En cada variograma se identificaron los parámetros esenciales que lo describen:

- Rango (o alcance): que indica la distancia h , a partir de la cual el valor de $\gamma(h)$ se estabiliza; el rango indica la influencia espacial de la autocorrelación en la humedad, o bien, la distancia hasta la cual influye cada punto en su entorno. A partir del rango, no existe correlación espacial para la variable.
- La meseta o *sill*: que es el valor estable de $\gamma(h)$; es el valor que toma la función de semivarianza en el rango.
- El efecto pepita o *nugget*: que se denota por C_0 , y representa la discontinuidad puntual del semivariograma en el origen (Giraldo, 2002).

Se representa en cada variograma la nube de puntos experimentales y la línea (variograma teórico) con la cual se pueden ajustar estos datos, cuya pendiente refleja la continuidad espacial de la variable, de tal forma que una pendiente alta indica una baja continuidad espacial (ver la Figura 1), mientras que una pendiente más suave indica una alta continuidad espacial de los datos (ver Figura 5), como lo demuestran algunos variogramas que se presentan en los resultados.

El semivariograma experimental carece de una función matemática precisa que la describa, por lo cual se hace necesario ajustar el semivariograma a un modelo teórico, de comportamiento conocido, que adicionalmente permite extender los valores más allá de la distancia máxima definida (Moral y Marques, 2002).

⁷ Los límites de Atteberg marcan una separación (arbitraria pero funcional) entre los cuatro estados que puede presentar un suelo con algo de cohesión, según su naturaleza y la cantidad de agua que posea, a saber: sólido, semisólido, plástico, y semilíquido o viscoso (Jiménez Salas y Justo Alpañes, 1980).

Aunque puede haber varios modelos que se ajusten a los puntos de un semivariograma, la selección cuidadosa de uno o una combinación de ellos, permitirá una mejor simulación del fenómeno. El proceso empleado llevó al uso de combinaciones de modelos, para ajustar de mejor manera los semivariogramas.

Finalmente, el análisis de la profundidad del suelo en varias direcciones permite identificar las profundidades a las cuales se presenta anisotropía (ver Figura 11).

La herramienta utilizada para la generación de semivariogramas fue el SURFER⁸, con el comando VARIOGRAM,

Aplicación de técnicas geoestadísticas para la interpolación espacial con el método Kriging

De acuerdo con el objetivo central de este trabajo, que pretende hacer la predicción de los valores de la humedad en toda la zona de estudio a partir de los valores disponibles para una cantidad limitada de puntos, es necesario aplicar una técnica de geoestadística para hacer la interpolación espacial.

El método utilizado fue el *kriging*, llamado así en honor al ingeniero de minas sudafricano G. Krige (Cressie, 1990).

(Chang, 2002) define el *kriging* como un método de interpolación lineal que asume que la variación espacial de un atributo incluye una componente correlacionada espacialmente que representa la variación de la variable regionalizada.

Existen varios tipos de método *kriging* que se pueden aplicar de acuerdo con la naturaleza de los datos y el comportamiento que se detecte en el variograma, asociado a factores como la estacionariedad (análisis de tendencia) y la disponibilidad de información como la media o la matriz de covarianzas.

En este proyecto se utilizó el método *Kriging* universal, en el cual se asume que la variación espacial en los valores de z , tiene una tendencia o una componente estructural adicional a la correlación espacial entre los puntos muestreados conocidos (Chang, 2002).

Se empleó este tipo de krigeado, dado que algunos datos parecen tener cierta tendencia, pues el fenómeno de la humedad está muy ligado con factores geográficos actuales y pasados, como la existencia de un lago hace un siglo, por ejemplo, que lleva a que la variable regionalizada (humedad del suelo), además de presentar valores altos en una región determinada, presente un comportamiento no estacionario, asociado a una cierta tendencia.

El *Kriging* universal se realizó a diferentes profundidades (ver Tabla 1) para generar el mapa de predicción de la variable de estudio en cada rango y el mapa con la varianza del error de predicción.

El software especializado en el análisis geoestadístico que se utilizó fue SURFER, y con el comando SURFACE se obtuvieron los modelos digitales de terreno que muestran en tres dimensiones la distribución de la humedad del suelo.

Se usó ARCMAP⁹ Geostatistical Analyst para la generación de mapas de predicción de la variable. El cálculo del error de predicción se realizó con el procedimiento CROSS VALIDATION del ARCMAP, que calcula el error asociado a la predicción, con base en el error detectado en los puntos para los cuales se conoce el valor de la variable, el cual calcula con base en la información de la variable en los puntos vecinos (en este caso se usaron diez), aplicando una vez más el principio de autocorrelación espacial de Tobler.

Interpretación de los resultados

Una vez obtenidos los mapas de predicción para cada rango de profundidad, se complementaron con la información de contexto a la luz de la cual fue posible comprender la ocurrencia de valores altos de la humedad en determinadas zonas de Bogotá, incluso a nivel de UPZs y barrios catastrales, considerando también el tipo de suelo existente y sus características de permeabilidad.

El mejor aprovechamiento de los resultados lo puede hacer un experto en geotecnia, por lo cual esta etapa se realizó con la asesoría de expertos en geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia¹⁰ y la Empresa de Acueducto de Bogotá.¹¹

Resultados y análisis

Una vez expuesta la metodología a emplear, queda la revisión y análisis de los resultados, lo cual constituye el fin de este proyecto, dado que provee la información que pueden utilizar los profesionales que desean abordar obras civiles en la planeación y diseño de las mismas.

Enseguida se presenta para cada rango de profundidad, el procedimiento expuesto en la sección anterior, iniciando con el análisis exploratorio, hasta llegar a la interpretación de resultados.

La variable humedad del suelo se presenta en unidades porcentuales, y por tanto, los parámetros estadísticos y mapas de distribución y del error se manejarán (cuando aplique), en unidades porcentuales también.

8 SURFER Versión 8.00, Golden Software Inc, herramienta para análisis estadístico de geoinformación (3D).

9 ARC MAP versión 8.3, Enviromental System Research Institute, ESRI 1999 - 2002.

10 Ingeniero Félix Hernández, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia.

11 Ingeniera Laura Rodríguez, Empresa de Acueducto de Bogotá, Ingeniería Especializada.

Análisis de la humedad en un rango de profundidad de 0 a 2 metros

La muestra utilizada en este rango fue la de mayor tamaño: 3192 puntos, para la cual se obtuvo una media de 36.25% y una mediana de 26.33%, que equivalen a los menores valores de los obtenidos en los diferentes rangos. Este comportamiento se justifican si se tiene en cuenta que en la superficie es mayor el efecto de factores exógenos al suelo como la evaporación y que afectan en forma directa el comportamiento de esta variable.

En relación con la variabilidad de los datos, se puede decir que la dispersión de los mismos es relativamente alta, con una desviación estándar de 28.05% y un coeficiente de variación de 0.77, que equivale a la más alta dispersión de los rangos de profundidad analizados. La influencia de los factores exógenos puede ser una justificación también de la mayor dispersión en los datos.

Para el análisis estructural, a fin de analizar la autocorrelación espacial de la humedad del suelo entre 0 y 2 metros, se construyó el variograma en diferentes direcciones, para analizar la isotropía, encontrando que el comportamiento de la variable no depende de la dirección en este rango de profundidad, es decir, es isotrópico.

El modelo teórico que mejor se ajustó al variograma experimental fue el esférico, combinado con un modelo efecto pepita, como se presenta en la Figura 1.

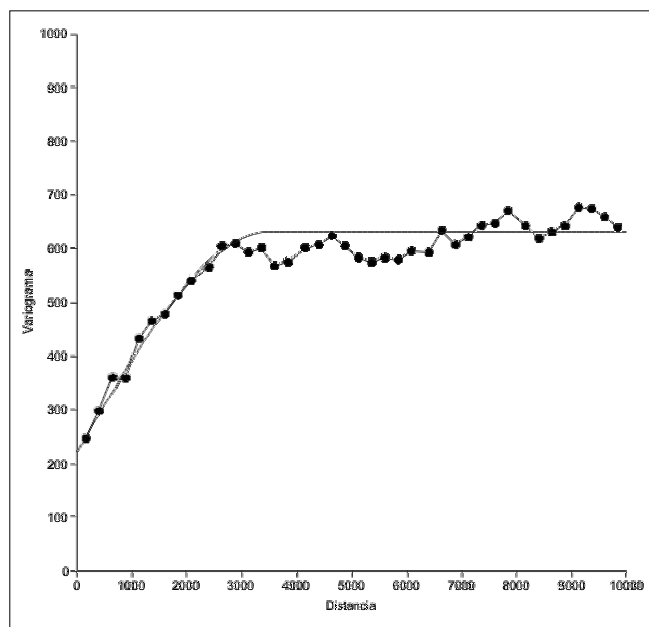


Figura 1. Variograma experimental (puntos) y teórico (línea): Autocorrelación espacial de la humedad del suelo en Bogotá a profundidad de 0 a 2 metros

Acorde con la metodología propuesta, se generó el modelo de elevación de la humedad presentado en la Figura 2, que permite identificar una cierta tendencia de sur a norte, de valores bajos a altos, en términos generales, y de manera más precisa desde el suroeste con valores

menores de la variable hacia el noreste del perímetro urbano de Bogotá, con valores más altos.

Como lo muestra el modelo 3D, se presentan valores que van desde 0% hasta 160% para la humedad, interpolación que se obtiene a partir de los puntos muestrales estrictamente, pero que no constituye una predicción, sino la distribución de los puntos muestreados en el terreno.

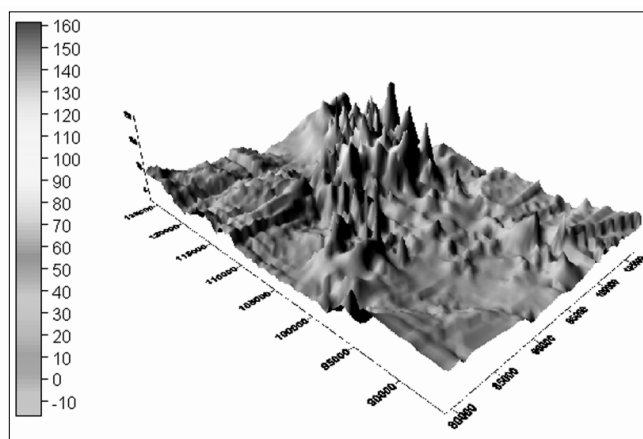


Figura 2. Modelo de elevación digital de la humedad del suelo de Bogotá a profundidad de 0 a 2 metros

La identificación de la posible tendencia que presenta el modelo de elevación de la humedad condujo a la elección del método *Kriging* universal, explicado en la sección anterior, que se aplicó con base en el semivariograma experimental ajustado. El resultado de la aplicación del *Kriging* universal se presenta en la Figura 3.

Siendo la predicción del valor de la variable humedad en toda la zona en estudio el objetivo central del proyecto, el análisis de resultados se concentra en el mapa de predicción obtenido con ARCMAP⁹, que se presenta a continuación.

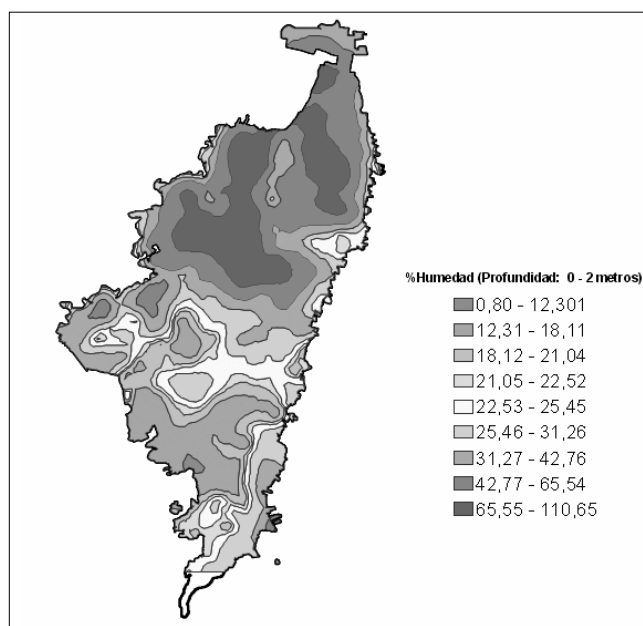


Figura 3. Predicción de la humedad del suelo usando *Kriging* universal (rango 0 - 2 metros)

Como ya se mencionó, en este rango de profundidad hay alta influencia de los factores externos a las características de la variable. Sin embargo, se observa que hacia la parte norte, desde la calle 13 hasta la calle 200 y cementerios, y desde la carrera séptima hasta la 120, la humedad oscila entre 65% y 110% debido al tipo de suelo limo arcilloso; además se localizan la mayor cantidad de humedales de la ciudad, como son el Juan Amarillo, La Conejera y los de la autopista Norte. En el sur de Bogotá se observan valores bajos para la variable humedad del suelo, debido al tipo de suelo, con abundancia de gravas y arenas que son altamente impermeables. En general, en la parte occidental de la ciudad se concentran valores de la variable humedad de medianas a altas, debido a la influencia de los ríos Bogotá y Juan Amarillo, esencialmente.

De forma particular notamos una baja humedad en el oriente de la ciudad, debido a los afloramientos rocosos (cerros orientales). En el noroeste se observan dos sitios de baja humedad por el mismo motivo, que son los cerros de Suba y Niza, y una mayor concentración de humedad, con valores entre 90% y 110% entre la avenida Suba (calle 145) a la calle 125, entre carreras 112 y 98, en cercanías al humedal de Juan amarillo, en los barrios Lisboa, Tibabuyes y Prados de Santa Bárbara entre otros, y la autopista Norte, entre la calle 170 y la 134 (Carmen Club, Las Margaritas, Cedritos).

Entre la carrera 30 y la avenida 68, de la calle 53 a la 63, sector donde se localiza el Parque Simón Bolívar, la Universidad Libre, el Centro de Alto Rendimiento y el Parque El Salitre, se presentan valores que oscilan entre 80% y 110% de humedad. La explicación inmediata que arroja la información complementaria es la presencia de diversos lagos artificiales en la zona.

Hacia el sur se presentan valores de 30% y 45% de humedad en barrios como Juan Rey, San Rafael, Valparaíso y Fátima, entre otros. Valores más altos, entre el 42% y 65%, en los barrios Patio Bonito, Santa Fe del Tintal, Bosa, El Porvenir, entre otros, debido probablemente a la cercanía de estos barrios al río Bogotá.

Estos datos no constituyen una pauta de gran relevancia para los constructores, por tratarse de un nivel muy superficial que puede ser afectado por una diversidad de variables.

A continuación se presenta el mapa de error de la predicción (ver Figura 4) obtenido con el método de validación cruzada, que proporciona la extensión de geoestadística de ARCMAP⁹ en el cual se observan esencialmente errores que van desde el 14,57%, hasta el 21,51%, lo que significa que el valor medido puede oscilar entre un valor determinado de $\pm 14,57\%$.

Los errores más altos de predicción se presentan, al norte, entre las calles 68 hasta la calle 100, desde la carrera 7ª a los cerros, y en general, en el sur, cerca al perímetro urbano, sectores donde hay muy poca información disponible.

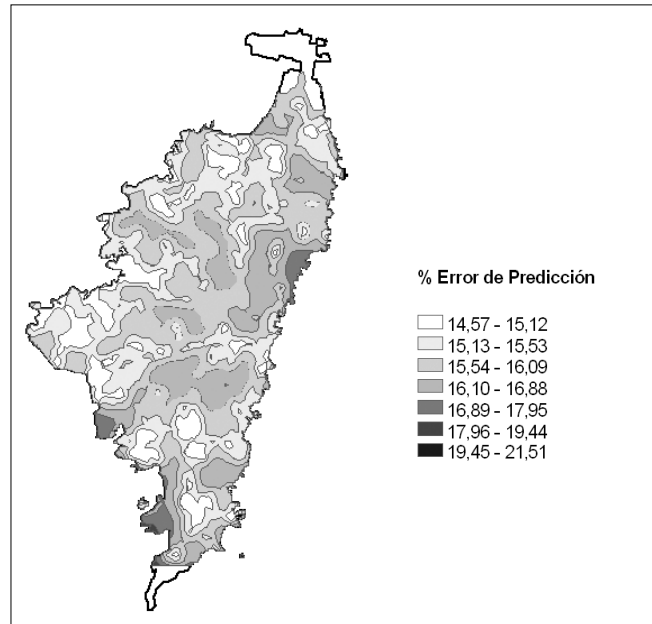


Figura 4. Error de predicción de la humedad del suelo

Análisis de la humedad en un rango de profundidad de 2 a 4 metros

En este rango de profundidad se trabajó con una muestra de 3081 puntos con una media de 47.68% y una mediana de 32.6%, parámetros ligeramente mayores a los obtenidos en el rango de profundidad anterior.

Los parámetros de variabilidad también se mantienen (son muy similares), lo cual se explica en la poca profundidad del terreno, que es fácilmente influenciada por agentes exógenos. Se obtuvo una desviación estándar del 35.7% y un coeficiente de variación de 0.75, ligeramente menor al encontrado en el rango anterior de profundidad, debido a que el aumento de profundidad muestra una leve tendencia de los datos de humedad del suelo a homogeneizarse.

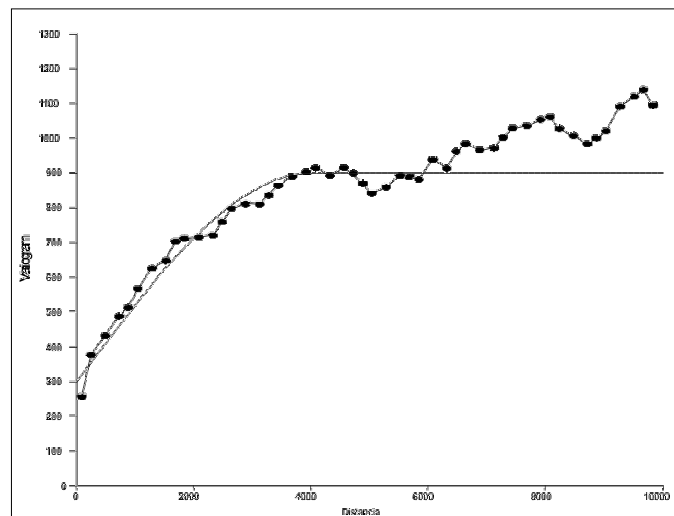


Figura 5. Variograma experimental (puntos) y teórico (línea): Autocorrelación espacial de la humedad del suelo en Bogotá a profundidad de 2 a 4 metros

Para el análisis de la autocorrelación espacial de la humedad del suelo entre 2 y 4 metros se construyó el variograma en diferentes direcciones, encontrando también que el fenómeno de humedad del suelo sigue siendo isotrópico, ya que no depende de la dirección.

El modelo teórico utilizado para el ajuste del variograma experimental (ver Figura 5) fue también el modelo esférico, en combinación con un modelo efecto pepita.

Al generar el modelo de elevación de la humedad presentado en la Figura 6, se observa que la tendencia se atenúa en la parte sur-occidental y se mantiene en el sector noreste.

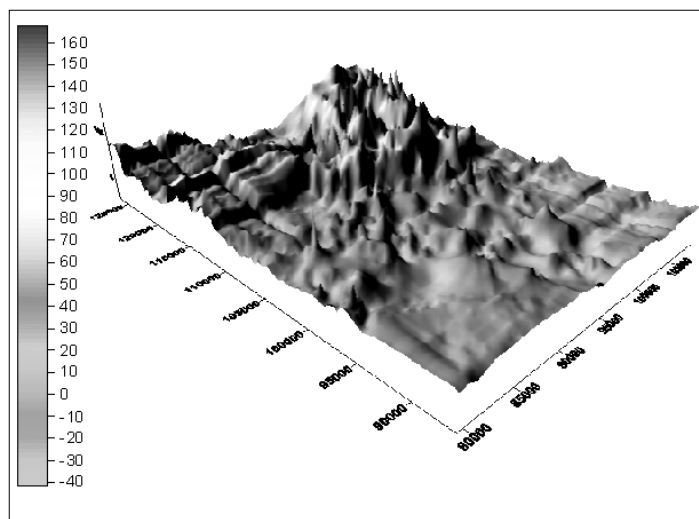


Figura 6. Modelo de elevación digital de la humedad del suelo de Bogotá a profundidad de 2 a 4 metros

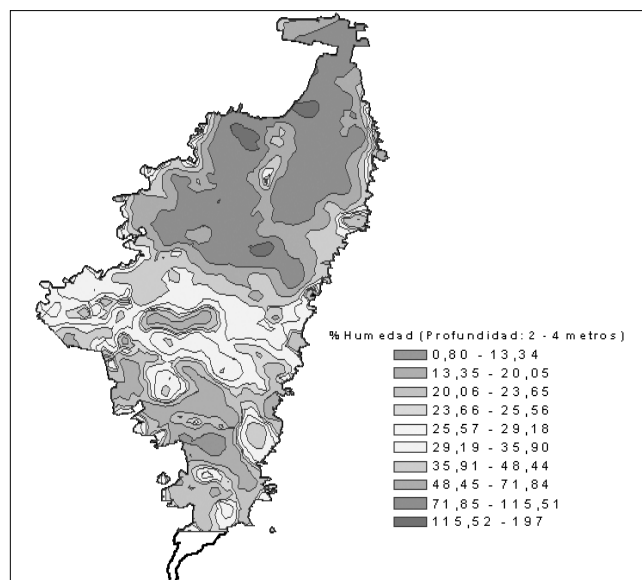


Figura 7. Predicción de la humedad del suelo usando Kriging universal (rango 2 - 4 metros)

Al igual que en el rango anterior, se optó por el *Kriging* universal, obteniendo el mapa de predicción de la humedad que se presenta en la Figura 7, donde se observa la ocurrencia de valores superiores a 100% de humedad,

en la zona noroeste, de manera similar al rango anterior, con una zona intermedia mejor definida hacia el centro de la ciudad, en sentido oriente-occidente, que presenta valores intermedios de humedad.

Se mantiene la misma tendencia del anterior tanto en la parte norte, con porcentajes que oscilan entre 71% y 115%, aumentando ligeramente con respecto a los valores presentados en el rango anterior. En el centro de la calle 13 y la avenida 1º de Mayo se observan humedades intermedias entre 29 y 35%, y en el sur mantiene el porcentaje de humedad entre 10% y 30%.

De forma particular, aparecen humedades focalizadas de 110% a 140% en cercanías al cerro de La Conejera, donde se localizan barrios como San José de Bavaria, Mirandela, Vilanova (entre calle 184 y la 170, entre transversal 51 a transversal 59), sector en desarrollo urbanístico actual, entre la avenida 19 a la transversal 83, entre calles 110 a la calle 127, valores que oscilan entre 105 y 132, sector caracterizado además por el hundimiento de las vías (avenida 19 entre 127 y 134). La presencia de valores altos para la humedad en este sector se puede explicar por el tipo de suelo que presenta, con alta permeabilidad.

Entre la carrera 30 y la 68, y entre la calle 53 a 63, sector donde se localiza el Parque Simón Bolívar, la Universidad Libre, el Centro de Alto Rendimiento y el Parque El Salitre, se presentan también valores altos de la variable, justificados quizá por la presencia de algunos cuerpos de agua en el sector.

Hacia el sur surgen pequeños focos de humedad en barrios como El Tintal, Tunjuelito, El Palmar, Bosa, Tairona y barrios de las UPZs Los Libertadores y Patio Bonito.

El mapa de error de predicción en este rango de profundidad, al igual que en los dos rangos restantes, presenta un comportamiento similar al de 0 a 2 metros, con mayor error hacia la periferia, en lugares, donde no se cuenta con suficiente información. En este caso, el error osciló entre $\pm 15\%$ y 32% .

Análisis de la humedad en un rango de profundidad de 4 a 6 metros

Los parámetros obtenidos en este rango, son: el tamaño de la muestra, de 1645 puntos con una media de 58.3% y una mediana de 38.2%, que dejan ver cómo existen mayores valores de humedad porcentual del suelo a medida que se aumenta la profundidad.

Los parámetros de variabilidad nuevamente se mantienen. La desviación estándar obtenida fue 43.5% mayor que la anterior, pero respecto a valores mayores también, de tal manera que el coeficiente de correlación continúa siendo de 0.75.

El variograma construido en este rango igualmente, mostró isotropía y se ajustó con el modelo esférico en combinación con el efecto pepita, como muestra la Figura 8.

La tendencia se evidencia de manera más clara en la parte noreste, donde adicional a la presencia de valores altos de la variable se detecta un sentido hacia el cual crecen los valores de manera progresiva, como lo presenta el modelo de elevación de la humedad en la Figura 9.

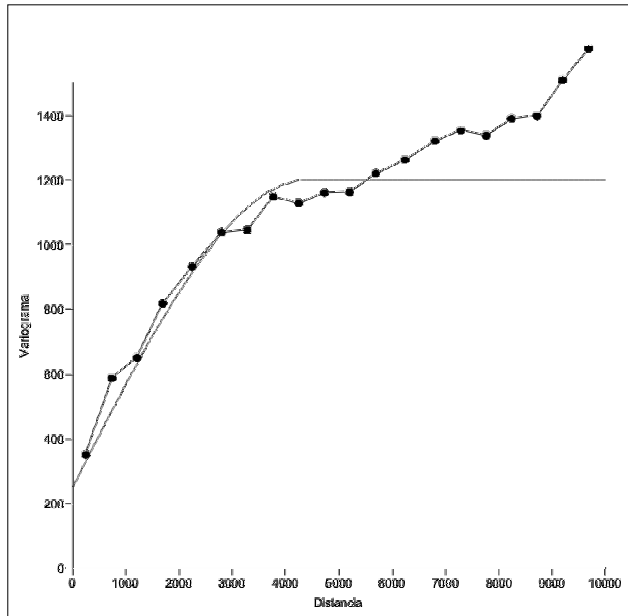


Figura 8. Variograma experimental (puntos) y teórico (línea): Autocorrelación espacial de la humedad del suelo en Bogotá a profundidad de 4 a 6 metros

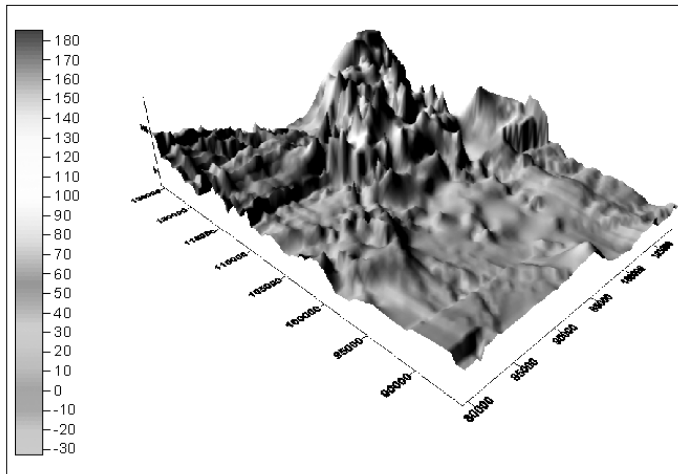


Figura 9. Modelo de elevación digital de la humedad del suelo de Bogotá a profundidad de 4 a 6 metros

Luego de aplicar nuevamente el método *Kriging* universal, se aprecia en el mapa de predicción, para este rango, una mayor homogeneidad de la variable en la parte norte. Los mayores valores de la variable aumentan levemente hasta 117%, en tanto que en la parte sur empiezan a evidenciarse valores de la humedad intermedios, aunque predominan todavía los valores bajos, como se presenta en la Figura 10.

De forma particular puede notarse que aumenta la humedad de 140% a 199% en el sector de San José, Mirandela y Vilanova. Entre las calles 128 y 112 y entre la carrera 44 y transversal 57, donde se encuentran los barrios Niza,

Lagos de Córdoba y Pontevedra, se presentan valores de la humedad entre 117% y 140%.

Se consolida un sector en el norte de alta humedad desde la calle 138 a la 200 (cementeros), entre la autopista Norte y el perímetro urbano occidental de la ciudad y un sector que comprende, entre otros, los barrios El Pinar de Suba, Tibabuyes, Aures, Bolivia Real, Molinos, Álamos Norte, Zarzamora, y el sector de Engativa, cerca a la cabecera de la pista del Aeropuerto El Dorado, entre la avenida 91 y la calle 67 y entre carreras 96 y 81, y en general Engativa, donde la humedad supera un 110%.

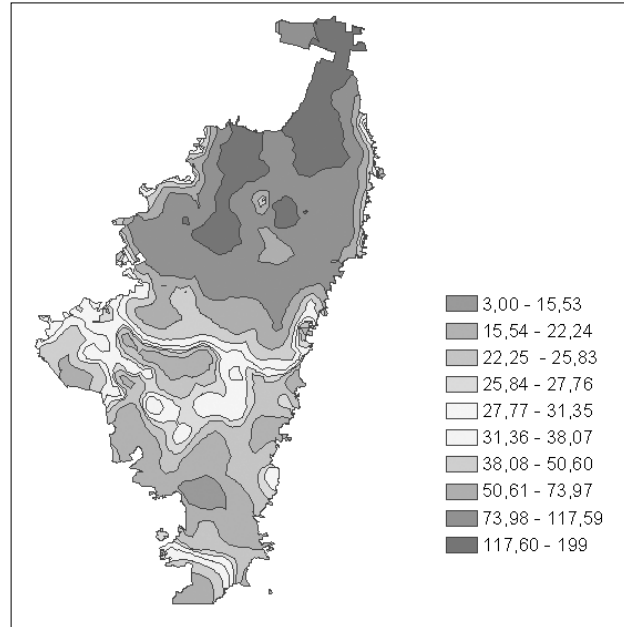


Figura 10. Predicción de la humedad del suelo usando *Kriging* universal (rango 4 - 6 metros)

Para este rango, el error calculado estuvo entre $\pm 16\%$ y 35% , con los valores más altos del mismo, se presentan nuevamente hacia la periferia, por ausencia de información suficiente, principalmente.

Análisis de la humedad en un rango de profundidad de 6 a 15 metros

En este rango de profundidad es donde menor cantidad de información se encuentra en la base de datos de la EAB. Se trabajó con una muestra de 1143 puntos y se obtuvieron los siguientes valores para los parámetros estadísticos: media de 79.56% y mediana de 70.83%, que permite ver un incremento importante en la cantidad porcentual de humedad del suelo, a esta profundidad, con pocos valores extremos, ya que hay cercanía entre la media y la mediana.

Las medidas de dispersión de los datos presentan una desviación estándar de 53.55% mayor que el anterior, pero nuevamente asociada a valores mayores en los datos; el coeficiente de correlación bajó a 0.67.

En el análisis estructural se generó el semivariograma y se analizó en diferentes direcciones, lo cual permitió identificar la existencia de anisotropía geométrica para la hu-

medad del suelo en este rango de profundidad, que se presenta en la Figura 11.

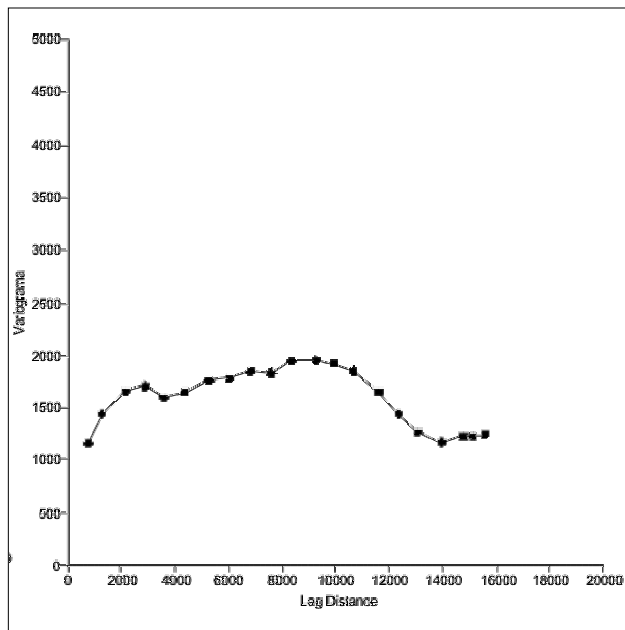
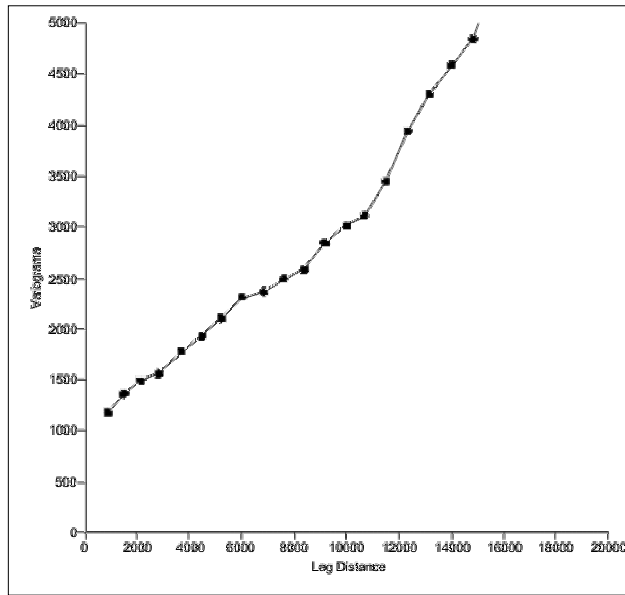


Figura 11. Análisis de anisotropía (rango 6 - 15 metros)

Se calculó el coeficiente de anisotropía a partir de la relación entre los rangos para máxima y mínima continuidad espacial, con un valor de 1.92.

Posteriormente, para el ajuste se utilizaron modelos teóricos anidados como un recurso propuesto para manejar la anisotropía geométrica del fenómeno. Se ajustó con la combinación del modelo efecto pepita, un modelo esférico y un exponencial. (ver la Figura 12).

El modelo de elevación digital (ver la Figura 13) de la humedad para el rango de profundidades superiores a 6 metros e inferiores a 15 metros, muestra una tendencia diferente a la de los modelos revisados en profundidades menores.

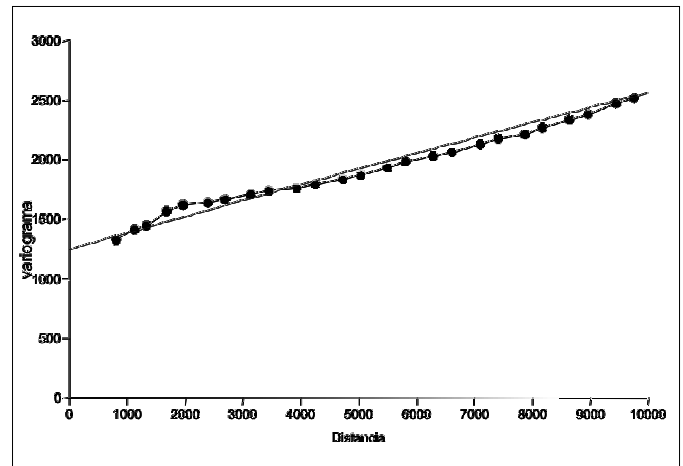


Figura 12. Variograma experimental (puntos) y teórico (línea): Autocorrelación espacial de la humedad del suelo en Bogotá a profundidad de 6 a 15 metros

La tendencia es una característica algo subjetiva, pero en estos modelos se puede apreciar con mayor claridad la orientación de los datos hacia un valor creciente en dirección norte.

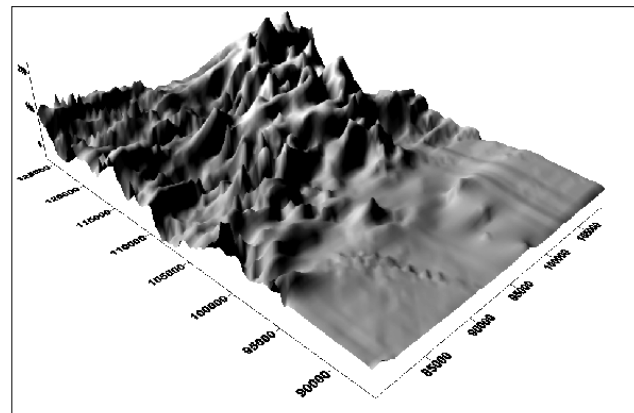


Figura 13. Modelo de elevación digital de la humedad del suelo de Bogotá a profundidad de 6 a 15 metros

Finalmente, se presenta el mapa de predicción de la humedad para profundidades en el rango (6 - 15).

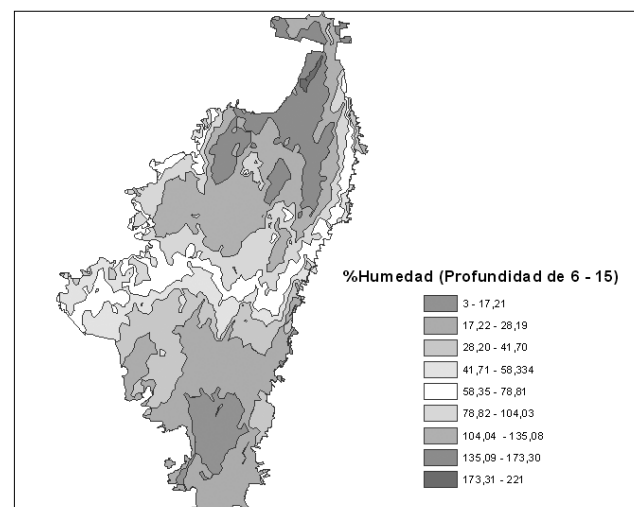


Figura 14. Predicción de la humedad del suelo usando Kriging universal (rango 6 a 15 metros)

El mapa de predicción presenta un comportamiento un poco más homogéneo de la variable en esta profundidad, pero con valores más altos para la humedad.

Se mantienen humedades notablemente altas, superiores al 180%, en el sector de los cementerios, en el de Huevos de Oro, en Suba, y en Lagos de Córdoba, Niza, Pontevedra y Club los Lagartos.

El error de predicción aumentó notablemente, llegando a un rango de 26 a 37.

Análisis general de resultados

Hay algunos análisis generales que se desprenden del estudio en los cuatro rangos de profundidad, como son:

- Hay buena coincidencia de los resultados obtenidos con zonas de reconocidas dificultades derivadas de su alta compresibilidad y baja resistencia.
- Se realizó una exhaustiva recopilación del factor "humedad", que puede verse como sustancial en las labores de zonificación. Es importante que las zonificaciones geotécnicas, o de otra índole, se realicen con información geo-referenciada complementaria.
- El tratamiento estadístico y probabilístico cobra su mayor trascendencia al establecer las relaciones entre factores de la misma naturaleza al realizar zonificaciones. Cada factor por sí solo, resultado de procesos naturales muy complejos, actuando en escenarios muy variados, puede llegar a tener una naturaleza más estocástica que probabilística. No obstante, en un escenario relativamente homogéneo como el área de estudio de este proyecto, el tratamiento es significativo.

Validación de los resultados

El análisis de los resultados en este proyecto necesariamente debe ir acompañado de una validación de los mismos, considerando la presencia casi inevitable de incertidumbre en la geoinformación.

El conocimiento del fenómeno humedad del suelo y los resultados de diversos estudios que han sido reseñados en secciones previas, permiten identificar la existencia de un nivel de incertidumbre inherente a la geoinformación, que se concreta en el error de predicción calculado para toda la región de estudio y que es necesario conocer y asumir en los análisis que se realicen.

Algunas fuentes de incertidumbre identificadas en este estudio, son:

El origen de los datos, tomados en diferentes momentos y bajo condiciones diversas, que impiden garantizar la exactitud de los valores obtenidos en la medición.

El tamaño de la muestra resulta insuficiente, si se tiene en cuenta no solo la extensión del territorio, sino la com-

plejidad del mismo y la heterogeneidad de los diversos factores que afectan el comportamiento de la humedad.

El desarrollo urbano de Bogotá se ha realizado de manera irregular e ilegal en muchos casos, y como consecuencia no se realizan los correspondientes estudios geotécnicos al momento de construir las obras, estudios que constituyen la fuente de información para la base de datos de la EAB sobre la cual se trabajó en el proyecto. Esta situación se agudiza en las zonas del sur y los barrios de estratos 1 y 2, en donde con más frecuencia ocurren desarrollos ilegales.

Se reitera la importancia de valorar los resultados asociados a la humedad, junto con otras variables que son complementarias, ya que el conocimiento de la distribución de la humedad solamente constituye un punto de partida para la toma de decisiones en la construcción de obras civiles.

Conclusiones

Este estudio demuestra que la predicción de los valores de una variable regionalizada, como la humedad del suelo para una zona determinada, requiere la selección de una técnica de interpolación adecuada a partir del ajuste de un modelo teórico escogido cuidadosamente, de cara a las características propias del fenómeno en estudio.

El análisis de un único parámetro del suelo no es suficiente para tomar decisiones respecto al diseño de las obras civiles; este debe estar acompañado del estudio de otros parámetros, tanto geotécnicos, como de otra índole.

En el sur de Bogotá el desarrollo urbano se ha llevado a cabo en forma desordenada y no planificada, y esto repercute en la cantidad y calidad de la información geotécnica con que cuentan las entidades distritales, pues en muchos casos no se realizan los estudios geotécnicos que exige una obra civil.

Es importante propiciar la toma de muestras de las variables físicas del suelo a profundidades de 15 metros y superiores, ya que la información disponible actualmente está a niveles muy superficiales.

Para algunas zonas de Bogotá que de acuerdo a este estudio presentan un alto porcentaje de humedad en el suelo y que se encuentran en procesos intensivos de desarrollo urbano y construcción de infraestructura, los resultados de este estudio tienen relevancia.

Bibliografía

Bosque Sendra, J. Sistemas de información geográfica. Ediciones Rialp, pp. 191, 195, España, 1992.

Casas, H.; Moreno Z. Y Rodríguez, L. "Zonificación geotécnica por compresibilidad del sector norte de Santa Fe de Bogotá," trabajo de grado para ingeniería civil, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1997.

Chang, Kang-tsung, Geographic Information Systems, McGraw-Hill Higher Education, EEUU. pp 256, 255 y 257. 2002.

Cressie, Noel. *Geostatistics: A Tool for Environmental Modelers. Environmental Modeling with GIS*, Capítulo 41, Oxford University Press, 1993.

David, J, "El subsuelo de Bogota, zonificación y propuesta de investigación", proyecto de grado, Universidad de los Andes, Bogotá, febrero de 1990.

Jiménez Salas, J.A. y De Justo Alpañes, *Geotecnia y cimientos*, Tomo I, Propiedades de los suelos y las Rocas, segunda edición, 1980.

Ingeominas, "Zonificación geotécnica del Distrito Especial de Bogotá", Convenio N° 200-86 con el Departamento Administrativo de Planeación del Distrito Especial de Bogotá, 1988.

Giraldo, H., Ramón, "Introducción a la geoestadística", Simposio de Estadística, 2002.

Maneta, M. y Schnabel, S, "Aplicación de redes neuronales artificiales para determinar la distribución espacial de la humedad del suelo en una pequeña cuenca de drenaje". Grupo de Investigación Geoambiental del Departamento de Geografía de la Universidad de Extremadura, España, 2003. <http://www.zonanosaturada.com/publics/V6/p295-304.pdf>

Matheron, G., "La Théorie des Variables Regionalisées et ses Applications", Les Cahiers du Centre de Morphologie

Mathematique de Fontainebleau, Fascicule 5, Ecole de Mines de Paris, 212 pp. 1970.

Moral García, F. y Marques Da Silva, J., "Ejemplo de una representación gráfica de una variable regionalizada", XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, España, 2002.

Salamanca, Gabriel., "Microzonificación del Area II P de Santa Fe de Bogotá, tesis de grado para el magíster en geotecnia, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1995.

Samper, F. Javier y Carrera, Jesús, *Geoestadística, aplicaciones a la hidrogeología*, segunda edición, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, España, 1996.

Sotelo, Rubén., "Fotointerpretación y procesamiento digital de imágenes, en la caracterización geotécnica del suelo para usos ingenieriles, Centro de Geociencias Aplicadas - Facultad de Ingeniería, Argentina, 2003, <http://www1.unne.edu.ar/cyt/2003/comunicaciones/07Tecnologicas/T-023.pdf>

Silva Medina, Gustavo A., *Hidrología básica*, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería I, "Propiedades de los suelos y las rocas", segunda edición, 1998.



**CORPORACIÓN PARA EL FOMENTO DE LA
INVESTIGACIÓN Y EL DESARROLLO
TECNOLÓGICO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE
LA UNIVERSIDAD NACIONAL -FIUN**

- Consultoría con el respaldo de la UN y cortos tiempos de respuesta

- Administración eficiente Recursos humanos y financieros

- Servicios de Apoyo
 - Sala de Informática
 - Centro de Impresión de documentos
- impresionesfiun@yahoo.com.mx

TELÉFONO 3165000 EXT. 20106-20107-TELÉFONO DIRECTO: 3153111-TELEFAX 3155869
KR. 50 No 27-70 CIUDAD UNIVERSITARIA Edif. CAMILO TORRES B-6 OFICINAS 6-61/ 6-64
e-mail: corfiun@andinet.com BOGOTÁ D.C. COLOMBIA