

Factores geológicos que afectan las excavaciones en Bogotá D.C., Colombia

Alberto Lobo-Guerrero Sanz, Geólogo, M.Sc., Min.Ex., Ph.D.
Vice-Presidente Operaciones, LOGEMIN S.A., Bogotá, Colombia
ageo@logemin.com, www.logemin.com

RESUMEN

Comprender los procesos geológicos que generaron el perfil y las propiedades del suelo que involucra una excavación es fundamental para el diseño ingenieril y la construcción de fundaciones para estructuras pesadas. Aquí se incluyen algunas observaciones sobre la adquisición y procesamiento de información del subsuelo. También se presentan las características de las principales unidades estratigráficas que conforman el subsuelo de Bogotá y algunos cortes que explican la relación entre unidades. Al final se plantean detalles sobre los procesos geológicos que formaron el subsuelo.

Palabras-clave: Andes, Bogotá, Colombia, coluvión, estratigrafía, formación Sabana, formación Tunjuelo, geología, geología para ingeniería, geología urbana, geotecnia, historia geológica, investigación del subsuelo, suelo, Sabana de Bogotá.

ABSTRACT

Geological factors that affect excavations in Bogotá D.C., Colombia

Understanding geological processes that produced the soil profile exposed in an excavation and determined properties of the soil is fundamental for sound engineering design and building foundations of heavy structures. This paper describes ways to sample and process information about soils. It also presents characteristics of the main stratigraphic units that lie underneath Bogota, as well as some cross sections that explain relations between the units. Ideas on geological processes that formed the sediments beneath the city.

Key-words: Andes, Bogota, Bogota Sabana, Colombia, colluvium, engineering geology, geology, geological history, geotechnics, Sabana Formation, soil, stratigraphy, subsurface investigation, Tunjuelo Formation, urban geology.

CONTENIDO

Resumen

Abstract

1. Introducción

2. El Problema Geológico en Obras de Ingeniería

3. Evaluación del Perfil del Subsuelo

4. Tipos de Sondeos y Adquisición de Información del Subsuelo

4.1. Generalidades

4.2. Problema de Perforar Materiales Mixtos

4.3. Problemas del Muestreo

4.4. Anotaciones Sobre los Métodos Para Registrar Información del Subsuelo en Bogotá

4.5. Características del Personal que Tomó Originalmente la Información de la Fuente

5. Convenciones Alfabéticas Para Descripción Estratigráfica de Sondeos

6. Cortes del Subsuelo

6.1. Importancia de la Orientación de los Cortes del Subsuelo

6.2. Linealidad de los Cortes

7. Definición de Unidades Litológicas

7.1. Formación Sabana (QTs)

- 7.1.1. Descripción
- 7.1.2. Cenizas Volcánicas y Diatomita
- 7.1.3. Unidades Estratigráficas de la Formación Sabana
- 7.1.4. Conjunto de Unidades Fluviales (A HASTA E)
 - 7.1.4.1. Unidad A Relleno Antrópico Mixto
 - 7.1.4.2. Unidad B Capa Vegetal
 - 7.1.4.3. Unidad C Nivel de Oxidación
 - 7.1.4.4. Unidad D Limo Negro Orgánico
 - 7.1.4.5. Unidad E Arcilla Limosa Gris Verdosa
- 7.1.5. Conjunto Superior de Unidades Lacustres (F hasta I)
 - 7.1.5.1. Unidad F Arcilla Limosa Café
 - 7.1.5.2. Unidad G Arcilla Limosa Orgánica Café-Turba
 - 7.1.5.3. Unidad H Limo Café Claro
 - 7.1.5.4. Unidad I Limo Arcilloso Orgánico Café con Turba
- 7.1.4. Unidad J de Exposición Subaérea Lacustre/Aluvial Limo Arcilloso Rojizo Claro
- 7.1.5. Conjunto Inferior de Unidades Lacustres (K hasta N)
 - 7.1.5.1. Unidad K Arcilla Limosa Café Oscura con Materia Orgánica
 - 7.1.5.2. Unidad L Arcilla Limosa
 - 7.1.5.3. Unidad M Arcilla con Materia Orgánica
 - 7.1.5.4. Unidad N Arcilla Limosa Homogénea
- 7.1.6. Conjunto de Unidades Fluviales Arenosas (O hasta S)
 - 7.1.6.1. Unidad O Arena
 - 7.1.6.2. Unidades P-S
- 7.2. Formación Tunjuelo (Qpt)
 - 7.2.1. Definición
 - 7.2.2. Acuíferos en la Formación Tunjuelo
- 8. Unidades Estratigráficas Menores Depositadas en el Cuaternario
 - 8.1. Depósitos Glaciales
 - 8.2. Coluviones
 - 8.3. Depósitos Aluviales
- 9. Acuíferos Principales e Interconexión Entre Ellos
- 10. Conformación del Lago de Bogotá y Dinámica Lacustre
- 11. Secuencia de Eventos Geológicos que Llevó a la Depositación de las Unidades A Hasta O en el Subsuelo de Bogotá
- 12. Conclusiones
- 13. Recomendaciones
- 14. Referencias

LISTA DE FIGURAS

1. Muestreo de perforaciones efectuadas para el Metro de la ciudad de Washington, D.C.
2. Comparación de cortes en línea recta, versus cortes zigzagueantes
3. Columna estratigráfica generalizada del material no-consolidado en el subsuelo del NE de Bogotá
4. Columna estratigráfica de los metros superiores en parte plana del subsuelo de Bogotá
5. Corte 2, W-E por la Calle 140N atravesando el Cerro de Suba
6. Corte 3, W-E por Avenida Rodrigo Lara Bonilla (Calle 127A)
7. Corte 3-1, W-E por la Calle 127 (K 13-9)
8. Corte 8, SW-NE aproximadamente entre barrio Los Rosales, Estadio "El Campín" y Universidad Nacional
9. Corte E, correlacionando pozos profundos, S-N entre Universidad Nacional y Calle 170N
10. Caricatura de los personajes que diseñaron/construyeron la Torre de Pisa, Italia

1. Introducción

Según el Censo-93, el área metropolitana de Santafé de Bogotá tiene 6'314,305 habitantes, lo que constituye una quinta parte de la población colombiana. La población bogotana crece en unos 120,000 habitantes cada año, lo que equivale en tres años a la población de Neiva o Manizales [21]. Con el auge de la construcción de grandes edificios, puentes, metro y obras en general en Bogotá, y con obras de ingeniería cada vez de mayores dimensiones, evaluar bien las condiciones del subsuelo antes de emprender las obras reviste enorme importancia.

2. El problema geológico en obras de ingeniería

Las estructuras de ingeniería son hechas "a la medida"; su eficiencia y economía depende de la manera como se adaptan a las peculiaridades del lugar: topografía, agua superficial y subterránea, y composición física del subsuelo. Todos los factores anteriores se combinan para generar problemas que deben resolverse para construir estructuras permanentes, dentro de un presupuesto determinado.

El primer paso para resolver cualquier problema de geología para construcciones es identificar todos aquellos factores geológicos que puedan generar dificultades ingenieriles. Hay que evaluar fallas, pliegues, estratigrafía, petrografía, geomorfología e hidrogeología. El segundo paso es traducir el significado de todos los factores anteriores en términos que entienda el ingeniero y le sean útiles para responder preguntas como:

- ¿Ese material será estable en pendientes con tal ángulo?
- ¿Esta cimentación se asentará, cuánto y qué tan rápidamente?
- ¿Estos suelos servirán de soporte para la cimentación planeada?
- ¿Si excavo aquí, qué tanta agua saldrá?
- ¿El agua de esas rocas será corrosiva?
- ¿Qué tan uniforme será ese coluvión en profundidad?
- ¿Cuánto espesor de material debo remover para llegar a la capa de buena calidad?

Una comprensión precisa de los principios geológicos es la base para interpretaciones sólidas de las aplicaciones ingenieriles en cualquier obra.

Como afirmaba Karl Terzaghi, "En la ingeniería de obras como cimientos de grandes edificios, túneles, taludes cortados y presas de tierra, una gran parte del esfuerzo va para la obtención de valores aproximados de las constantes físicas que aparecen en los planos de diseño; muchos parámetros como el grado de continuidad de las rocas, o las condiciones hidráulicas de los suelos permanecen desconocidas. Por lo tanto, los cálculos efectuados son sólo hipótesis de trabajo, sujetas a replanteo y modificación durante la construcción" [9]. Si se enfocan más esfuerzos en evaluar la continuidad espacial de los materiales, se puede lograr mayor precisión en el diseño.

3. Evaluación del perfil del subsuelo

Uno de los pasos fundamentales en cualquier investigación de cimentaciones o en cualquier excavación es describir el perfil del subsuelo [24]. El único límite que se conoce con certeza es la superficie del terreno. La ubicación inferida de las rocas o materiales en el subsuelo normalmente se deriva por interpolación y extrapolación lógica a partir de sondeos bastante espaciados. Allí los principios de geología para ingeniería son herramientas fundamentales. En esos momentos surge siempre la pregunta: Cuáles son las probabilidades de encontrar irregularidades o "sorpresas" entre sondeos?

Como ejemplo, asumamos que los sondeos han perforado antiguos materiales de relleno que no han sido colocados ordenadamente, y contienen trozos de concreto, cartón y fragmentos metálicos. De dónde vino ese material? Cómo fue colocado allí? Cuándo fue colocado allí? Qué eventos tuvieron influencia sobre su composición y propiedades físicas? Tendrá selección vertical o lateral? Estos interrogantes deben plantearse para cada tipo de roca o suelo del perfil del subsuelo. Afortunadamente, la mayoría de los materiales naturales fueron depositados sistemáticamente. Los procesos geológicos generalmente explican por qué un material de cimentación posee ciertas propiedades, el rango probable de variación de esas propiedades, y la distribución tridimensional de las unidades geológicas significativas en el subsuelo.

En ese contexto, es importante establecer la secuencia de eventos (o historia geológica) que llevó a las condiciones observadas en cada porción del perfil de suelo.

A continuación se incluyen algunas de las preguntas que deben plantearse para los materiales del subsuelo de Santafé de Bogotá.

- ¿Cómo era la salinidad de las aguas en que se depositó el material?
- ¿El material es producto de la acumulación de ceniza volcánica (piroclastos)?
- ¿El suelo sufrió congelación cuando estaba en superficie?
- ¿Fue sometido a climas áridos o muy secos por períodos prolongados?
- ¿Sufrió sucesivas inundaciones y sequías que produjeron grietas de desecación?
- ¿Formó parte de fondos de pantano, lago, río, llanura de inundación, turbera, abanico aluvial, o delta lacustre?
- ¿Formó parte de un antiguo fenómeno de remoción en masa debido a un terremoto o a fallamiento?
- ¿El material fue sobrecargado por acción glaciario?

La respuesta de cada una de las preguntas anteriores implica un ambiente de depositación distinto. Los materiales en cada caso difieren en composición, granulometría, selección, contenido de humedad, materia orgánica, y arcillas de tipo expansivo, entre otras cosas. Otros factores para tener en cuenta aparte del ambiente de depositación inicial del material, son los procesos posteriores de consolidación, meteorización, alteración química y física [14]. Todo eso debe tenerse en mente al caracterizar el subsuelo de un sitio de obra para hacer excavaciones o para diseñar cimentaciones apropiadas [2, 7].

El perfil del suelo no debe observarse solo tridimensionalmente, sino cuatri-dimensionalmente [22]. La dimensión temporal es sumamente importante y no debe despreciarse (Ver capítulo 11).

4. Tipos de sondeos y adquisición de información del subsuelo

4.1. Generalidades

Las perforaciones para investigar el subsuelo se desarrollan con una variedad de métodos que permiten muestrear los materiales para luego analizar las características encontradas. Perforar tiene una desventaja sobre la investigación directa en afloramientos, y es que el observador no puede ver las condiciones in situ, sino debe conformarse con analizar "muestras representativas" tomadas cada cierta distancia preestablecida. Rara vez se puede muestrear toda la extensión completa de un sondeo, pues esto es muy lento e incrementa los costos exorbitantemente. Debe existir una razón válida para justificar ese sobrecosto. Lo ideal sería perforar pozos de tal diámetro que permitieran a un individuo bajar hasta el fondo describiendo los materiales como si se tratara de un afloramiento bien expuesto. Con las excavaciones de los "caissons", se logra algo parecido, pero tienen un alto costo y no se pueden excavar fácilmente por debajo del nivel freático.

4.2. Problema de perforar materiales mixtos

Perforar materiales mixtos en la zona de transición entre suelo y roca es complejo, en especial cuando hay grandes bloques de roca englobados por material arcilloso plástico. Esa situación dificulta interpretar registros de perforación. Más aún, debido a la enorme variabilidad lineal de ese tipo de depósitos, hacer correlaciones demanda intervalos de muestreo bastante finos y no es tan evidente como en materiales que conforman verdaderos estratos.

Por otro lado, cuando se presentan interdigitaciones de materiales diferentes, se dificulta la toma de muestras. Los lentes de grava y bloques entre capas de limo y arcilla constituyen una pesadilla para los perforadores. Ver por ejemplo la parte inferior de los Sondeos 737 y 167 en la Figura 7. Allí la Formación Tunjuelo se interdigita con limos.

4.3. Problemas del muestreo

Son raros los sondeos que tienen registro continuo. Por eso, la interpretación de los datos obtenidos debe hacerse con sumo cuidado. El muestreo del ensayo normalizado de penetración, por ejemplo, registra intervalos y no toda la columna del sondeo, lo que da pie para que se puedan hacer interpretaciones erróneas. Durante el estudio de factibilidad del Metro de la ciudad de Washington D.C., se presentó un caso interesante al respecto. En el muestreo normal espaciado matemáticamente a tramos fijos, no se detectaron unas capas de arena que contenían agua y podían generar problemas durante el blindaje del túnel; entonces se optó por tomar muestras

continuas a lo largo del tramo que iba a ser atravesado. Con la investigación del subsuelo, que incrementó notablemente los costos de exploración del proyecto, se ahorraron millones de dólares por imprevistos en manejo del agua subterránea durante el proceso de construcción (Fig 1).

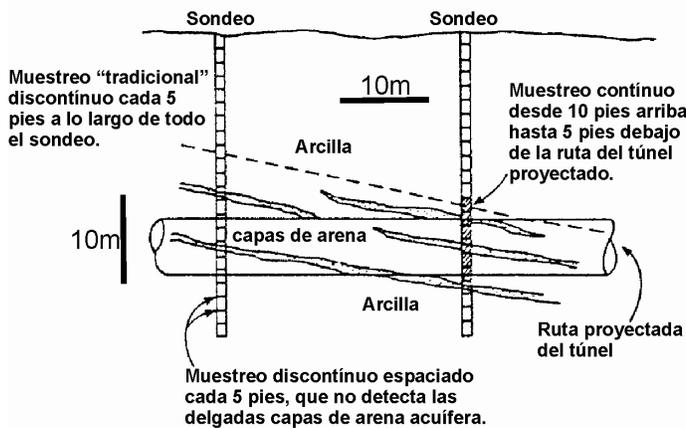


Fig 1. Muestreo de perforaciones efectuadas para el Metro de la ciudad de Washington, D.C. El espaciamiento de muestreo tradicionalmente empleado para estudios de suelos en la ciudad (5 pies) no fue suficiente para detectar los delgados niveles de arena. Esto se aprecia en el sondeo de la izquierda. Para asegurar la detección de estos niveles, en el sondeo de la derecha se muestreó continuamente todo el tramo donde se esperaba excavar el túnel. (Traducido de BOCK, C.G. (1981) "The Interrelationship of Geological Conditions with Construction Methods and Costs, Washington Metro", en *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, v. 18, No. 2, mayo, pp. 187-194, según aparece en JOHNSON & DeGRAFF (1988), P. 324.)

4.4. Anotaciones sobre los métodos para registrar información del subsuelo en Bogotá

Desde el punto de vista netamente estratigráfico, que es el que puede juzgar el autor con mayor idoneidad, durante una investigación típica se encuentra gran cantidad de prácticas para consignar información del subsuelo [13, 17]. Desde columnas estratigráficas de sondeos cuyos límites litológicos corresponden siempre con números pares o múltiplos de cinco, y descripciones litológicas de molde que colocaron dibujantes directamente sobre la interpretación pintoresca del perforador, hasta descripciones porcentuales detalladas, con granulometría definida y minerales accesorios minuciosamente detallados cada cincuenta centímetros. Los términos utilizados por los perforadores resultan bastante simpáticos, a veces hasta incoherentes. En algunas ocasiones se observan maestros perforadores que inventan registros de perforación, o los reconstruyen de memoria al final de la jornada de trabajo, "porque refundí el cuaderno". El autor encuentra algunos ingenieros y geólogos registrando meticulosamente el avance de la perforación del sondeo que tienen encargado. También ha observado ingenieros recogiendo numerosas muestras en bolsas plásticas y tubos *shelby*, que marcados inadecuadamente, terminaron confundiendo; en esa circunstancia, optan por inventar una estratigrafía "lógica".

4.5. Características del personal que toma la información de la fuente

Describir las características del subsuelo es una labor compleja. Los parámetros de clasificación son tan subjetivos en algunos casos, que para describir las muestras, algunos ingenieros confían ciegamente en las apreciaciones de su perforador o laboratorista. Normalmente esos perforadores son obreros de edad, que tienen gran experiencia en perforación, o mecánicos de taladro que se conocen todos los trucos para mantener una máquina perforando. No cuentan con estudios superiores, rara vez son bachilleres, y sorprende ver como escriben sus carteras de campo, con ortografía fonética, léxico sencillo, y caligrafía infantil. En algunas ocasiones se hallaron descripciones como esta: "Arcilla café, gris clara, blanda, rojiza, negra, con moteado verde y piscas de materia orgánica y turba en descomposición." Otro caso interesante es un nivel de "Limo arcilloso carmelito gris-verde-rosado".

5. Convenciones alfabéticas para descripción estratigráfica de sondeos

Para uniformizar y simplificar el proceso de descripción de las muestras de material sin consolidar, se sugiere implementar el uso de la tabla de convenciones alfabéticas que aparece en [16]. Existe un margen de error apreciable en este procedimiento, pero ahorra mucho tiempo en el procesamiento de información y lo hace más preciso [16]. Por ser en castellano, simplifica la lectura de información estratigráfica, y su aprendizaje requiere

poca práctica¹. Con el fin de ilustrar el proceso de transferencia de datos, la Tabla 1 incluye la descripción original que hizo un perforador para un sondeo específico. Al lado se presenta la codificación del mismo sondeo, utilizando las convenciones alfabéticas para simplificar los términos del perforador.

Tabla 1. Comparación de la manera de describir un sondeo.
(La primera columna registra la base de cada estrato, en metros a partir de la superficie.)
El Código completo se puede consultar en [16].

Profundidad	Descripción del sondeo, según palabras del perforador [13,14]	Codificación de datos
-0.6	CAPA VEGETAL	Cv
-1.0	LIMO arcilloso café claro, con vetas oscuras	LCFcl c/vetas osc
-1.6	ARCILLA limosa, café oscura, con óxido	CLFosc c/X
-2.5	ARCILLA limosa, gris café clara, con vetas de óxido y raíces	CIGFcl c/vetas X y Z
-3.4	ARCILLA limosa, gris y azul clara	CLG y azul cl
-4.0	LIMO arcilloso café claro, con vetas verdes y motes blancos	LCFcl c/vetas V y motes B
-15.0	LIMO arcilloso, gris café claro, con vetas oscuras, rastros de madera	LCGFcl c/vetas osc c/<M
-16.2	TURBA café clara	TFcl
-18.4	LIMO arcilloso café oscuro, con rastros de madera, con lentes de arena fina, gris clara	LCFosc, c/<M c/lentes AfGcl
-23.0	LIMO arcilloso café claro	LCFcl
-24.0	ARENA fina, con limo café claro	Af c/LFcl
-25.0	TURBA	T
-30.0	LIMO arcilloso, gris café claro	LCGFcl
-35.0	LIMO arcilloso, gris café con vetas de arena fina, con turba	LCGF c/vetas Af c/T
-38.0	LIMO arcilloso, gris café claro, con vetas de arena fina	LCGFcl c/vetas Af
-50.0	LIMO arcilloso, gris café con vetas de arena fina, con turba	LCGF c/vetas Af c/T

6. Cortes del Subsuelo

6.1. Importancia de la Orientación de los Cortes del Subsuelo

En la parte oriental de Bogotá, la fisiografía y la historia geológica confirman el hecho de que cortes con dirección E-W son más uniformes que cortes en cualquier otra orientación. El fenómeno se debe a que la mayor parte de las corrientes van en esa dirección. Un corte N-S tiene numerosas variaciones por cambio de facies (tipo de material a lo largo de un estrato). Esto no es necesariamente cierto en las zonas más planas de la Sabana, donde influyen otros factores (como la dirección de corrientes de agua y la pendiente del terreno) en la conformación estratigráfica del subsuelo [13].

6.2. Linealidad de los Cortes

Los cortes pueden dibujarse llevando la información de cada sondeo específico hasta una línea, o uniendo cada sondeo con el siguiente para aprovechar la información de mejor calidad. De esa manera, se obtiene un corte que aparece zigzagueante en vista de planta, manteniendo la verdadera distancia entre sondeos contiguos (Fig 2). La longitud total del corte resulta un poco mayor que la verdadera distancia lineal, y está conformada por la sumatoria de todos los segmentos individuales.

Es importante anotar que una línea en cualquier mapa o en un corte no puede dividir dos zonas completamente distintas. Por lo general, la transición de los materiales en la naturaleza es gradual, especialmente en los depósitos sedimentarios continentales que no presentan discordancias angulares. La descripción de un sondeo también implica un cierto grado de interpretación subjetiva para definir el tope y base de los estratos, y una línea representa el punto de cambio porcentual en la composición del material.

¹ Ese sistema de convenciones se viene usando en varias entidades latinoamericanas desde 1994 para la descripción de afloramientos, ripo de perforación de pozos de agua subterránea, y sondeos para estudios de suelos [15].

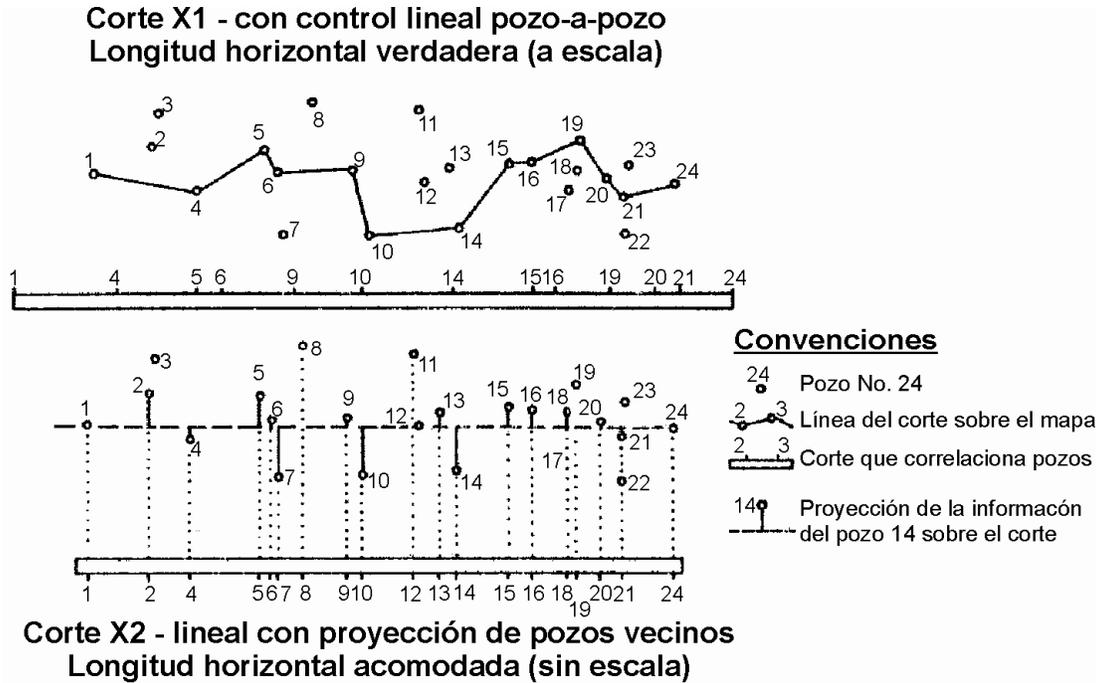


Fig 2. Comparación de cortes en línea recta, versus cortes zigzagueantes. El Corte X1 se hizo yendo de pozo a pozo, y sigue la trayectoria indicada arriba. El Corte X2 se trazó por la línea discontinua indicada abajo, y a esta se proyectó la información de las perforaciones vecinas.
Modificado de LOBO-GUERRERO S., 1994 [13].

7. Definición de Unidades Litológicas

En la Fig 3 se incluye la Columna Estratigráfica Generalizada de la Ciudad de Bogotá. La columna se basa en un estudio sobre el subsuelo de la ciudad que evaluó 820 sondeos para estudios de suelos y perforaciones de agua subterránea; durante el estudio se construyeron 17 cortes geológicos del subsuelo de la ciudad (Ver Figs 5 a 9) [13]. Identificar las unidades arcillosas del Terciario (Formaciones Bogotá, Guaduas, Usme) en el subsuelo de la ciudad por medio de muestras de perforación es un proceso complejo, dada la litología tan semejante que presentan.

7.1. Formación Sabana (QTs)

7.1.1. Descripción

La Formación Sabana representa la parte superior del relleno lacustre del antiguo gran lago de la Sabana de Bogotá. La unidad "está compuesta en su mayor parte por capas horizontales, poco consolidadas, de arcilla plástica gris y verde, y en menor proporción por lentes y capas de arcilla turbosa, turba, limo, arena fina hasta gruesa, restos de madera y capas de diatomita. También hay numerosas capas de ceniza volcánica." [19]

La Formación Sabana incluye además los suelos negros, humus, los fondos actuales de ríos y lagunas, los materiales del borde de la Sabana, el limo que forma las terrazas en el interior de la Sabana, los restos de antiguas terrazas, y sedimentos lagunares alterados. La sedimentación lagunar fue continua desde el Plioceno hasta la actualidad. Diferenciar las Formaciones Tilatá y Sabana, es algo que resulta complejo.

Ya en la primera mitad del siglo XX se tenía una concepción bastante completa de los depósitos que conforman el relleno de la Sabana de Bogotá. Wolfgang Diezemann, un competente geólogo alemán, afirmaba que algunos de los sedimentos de las orillas del lago, compuestos preferencialmente por material grueso, se han formado por acumulación de partículas de rocas, erodadas de las orillas por el oleaje. En otros casos, el material acarreado por ríos y arroyos forma conos de deyección, que se depositan principalmente por encima del

nivel del agua, conformando pequeños deltas que entran al lago. Dentro del lago mismo, se depositan sedimentos finos con baja pendiente; y en las zonas alejadas de la costa, donde la profundidad es mayor, se deposita fango fino de lago, mezclado con fango de río. Estos tapizan toda la superficie del fondo, según las corrientes del agua en superficie. En las temporadas de avenidas torrenciales, los cursos de agua llevan grandes cantidades de material grueso hacia el lago, que se interdigitan con los lodos depositados entre avenida y avenida. En las partes más alejadas de las costas, solamente se depositan las partículas finas, el material coloidal, restos de animales, vegetales flotantes, algas y otros materiales flotantes que fueron transportados lago adentro [modificado de 3 y 4].

También hay antiguos flujos de escombros y de detritos disparados por sismos (asociados al levantamiento de la Cordillera Oriental y a otros eventos tectónicos de los Andes colombianos), que produjeron movimientos en masa del material rocoso de los Cerros Orientales hacia el lago. A diferentes profundidades se encuentran capas de turba y arena, lo cual indica que en muchas ocasiones el lago se volvió en parte pantano o se desecó completamente, pasando a ser llanura de depositación aluvial. La mayoría de los fenómenos descritos se observan en la actualidad, y esas inundaciones todavía son comunes en las zonas más deprimidas de la Sabana.

7.1.2. Cenizas Volcánicas y Diatomita

Diezemann no menciona la presencia de material volcánico², un componente importantísimo en los depósitos del Lago de Bogotá. Ese material vino de volcanes de la Cordillera Central y de focos volcánicos ubicados en Boyacá³. Debido a la rápida alteración o asimilación orgánica de algunos de los constituyentes de la ceniza volcánica [6], en ocasiones se dificulta su identificación. Esto hace que rara vez se mencione ceniza en los sondeos. Las capas de diatomita de la Sabana están asociadas con ceniza volcánica, como sucede en la ayoría de los yacimientos de ese material [26:7]. Este hecho generalmente refleja la abundancia de SiO₂ en el agua, por aporte volcánico periódico, que además llevaba nutrientes y fertilizantes al lago. La columna estratigráfica de la sede principal de la Universidad Nacional de Colombia, que se incluye en la Fig 4, tiene once capas de diatomita y ceniza volcánica en los primeros treinta metros.

7.1.3. Unidades Estratigráficas de la Formación Sabana

Con base en numerosos cortes geológicos, se identificaron varios conjuntos estratigráficos de la Formación Sabana en el subsuelo de Bogotá [13]. Las principales unidades se denominan con letras, en orden alfabético según su profundidad relativa (Fig 3). A continuación se presenta una breve descripción de las unidades superficiales, que son de mayor interés en excavaciones. Las descripciones se basan en datos de la Formación Sabana bajo el nororiental de Bogotá, pero pueden aplicarse con criterio geológico a otras localidades de la ciudad [14]. Las Figuras 5, 6, 7, 8 y 9, presentan cortes con la ubicación de sondeos y distribución geométrica de las unidades.

Es importante anotar que las descripciones que siguen corresponden al promedio generalizado del material que se encuentra en cada estrato. Si varían significativamente las condiciones de depositación, cambia también el material que se deposita. Por ejemplo, si hay mayor aporte de material en los bordes de la cuenca, es probable que aumente el tamaño de grano que compone un estrato. Si el viento deposita una gran cantidad de ceniza volcánica por metro cuadrado de la cuenca durante un corto tiempo, o si deposita poca ceniza por metro cuadrado durante un tiempo prolongado, se formará una capa gruesa de ceniza, tapizando toda la cuenca.

Además, dentro de un mismo estrato se pueden presentar significativas variaciones laterales. En cualquier superficie, como por ejemplo la superficie actual, se presentan al mismo tiempo variados ambientes de depósito. Al hacer una transecta recta en dirección este-oeste desde los Cerros Orientales hasta el Cerro de Suba (Fig 6), bajo la capa negra de suelo orgánico se hallarán sucesivamente rocas consolidadas, gravas y bloques de roca, limo habano, arcilla habana, en algunos lugares arcilla negra y turba, arena, en otros se encontrarán lagos y pantanos con fondo de arcilla y turba, en otros habrá riachuelos con fondo de grava y arena, luego más arcilla habana, y al acercarse al Cerro de Suba nuevamente arena, gravas y bloques, y

² La ceniza volcánica (en diferentes grados de alteración) está compuesta por vidrio, minerales amorfos, minerales arcillosos y algo de arcillas expansivas.

³ En los alrededores de Paipa e Iza, hay varios cuerpos ígneos félsicos, así como depósitos de piroclastos de carácter riolítico. La composición de esos materiales, y la ausencia de conos volcánicos hace pensar que en el Cuaternario hubo explosiones de grandes dimensiones, que produjeron abundantes cenizas. Algunas de estas llegaron al Paleo-Lago de la Sabana de Bogotá.

Hasta (m)	Litología	Hasta (m)	Litología	Hasta (m)	Litología
3.05	Arcilla de inundación	19.05	Arcilla lacustre	28.35	Diatomita
5.70	Arcilla lacustre	19.12	Diatomita	28.60	Arcilla lacustre
5.76	Diatomita	19.65	Arcilla lacustre	28.64	Diatomita
12.90	Arcilla lacustre	19.68	Diatomita	29.00	Arcilla lacustre
13.97	Diatomita	22.50	Arcilla lacustre	30.50	Capa húmica negra turbosa, > arcilla q' hasta 24m.
18.45	Arcilla lacustre	24.00	Diatomita	30.85	Capa de diatomita con ceniza volcánica
18.49	Diatomita	24.85	Arcilla lacustre	31.00	Capa húmica negra turbosa, > arcilla q' hasta 24m.
18.75	Arcilla lacustre	24.92	Diatomita	32.20	Arena arcillosa
18.80	Diatomita	28.30	Arcilla lacustre		

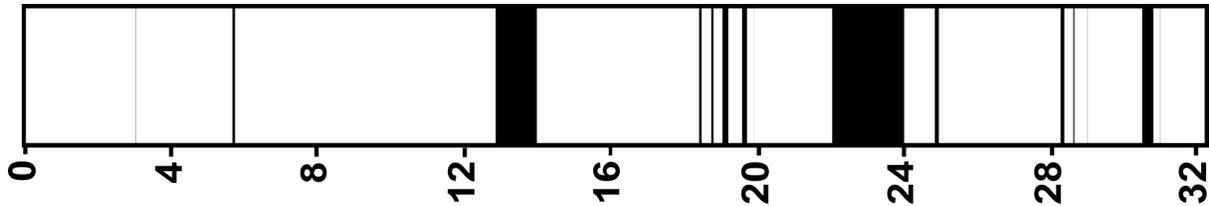


Figura 4. Columna estratigráfica de los metros superiores en parte plana del subsuelo de Bogotá. Ejemplo del pozo Ciudad Universitaria X, perforado en predios de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. El diagrama de abajo muestra la columna estratigráfica a escala. Durante todo el tiempo, la sedimentación se presentó en ambiente lacustre. Nótese la cantidad de capas de material derivado de ceniza volcánica (marcados en negro). El espesor de las capas volcánicas tiene relación directa con la cantidad de ceniza que cayó en el lago en un momento dado. Los nutrientes producidos por el aporte volcánico producen un florecimiento de la fauna del lago. Eso se manifiesta como capas de diatomita (conchas silíceas). Los minerales zircón y apatito dentro de las capas volcánicas se pueden datar, para precisar mejor la historia geológica. (Modificado de [13]).

finalmente roca consolidada. Todo eso estuvo en superficie, durante los anteriores mil años en que se formó el actual suelo orgánico.

Si por alguna razón tectónica se eleva el nivel de desagüe de la Sabana, esta se llenará de agua, y se formará un enorme lago. En los bordes del lago se presentará erosión de las rocas de la costa, y habrá aporte de los ríos y quebradas (arena, grava, bloques y algo de limo) en forma de abanicos o deltas. En las partes del lago alejadas de la costa, se irá depositando únicamente arcilla, y cualquier material transportado por el viento, incluyendo pedazos de hojas, polen, polvo y ceniza volcánica. También caerán al fondo los esqueletos de los animales que habiten el lago, como peces, aves acuáticas y plankton, junto con su excremento.

Una vez que se llene el lago con sedimentos varios hasta su nivel de desagüe, los ríos correrán libremente por la superficie, depositando material de arrastre encima de la arcilla lacustre.

Si se presenta una sequía prolongada, se secará por completo el lago, la arcilla seca del fondo se cuarteará, y se oxidarán los sedimentos tomando color rosado o naranja. Habrá pisadas de animales en la arcilla. Si el clima lo permite, lentamente comenzarán a crecer plantas sobre la arcilla, y se formará una capa de suelo orgánico negro.

Poco a poco, los sedimentos que se acumulan en la cuenca se irán compactando por su propio peso, el fondo de la cuenca irá profundizándose, y habrá espacio para nuevos estratos.

7.1.4. Conjunto de Unidades Fluviales (A HASTA E)

Las unidades superiores son materiales de origen fluvial depositados en momentos tardíos del Lago de la Sabana de Bogotá (Fig 3). Son suelos compuestos por material volcánico, con espesor que oscila entre 1 y 5 metros. Con frecuencia forman lentes entrelazados, y posiblemente corresponden a variaciones en el régimen de lluvias. Poseen materia orgánica y una alta proporción de ceniza volcánica alterada. En este conjunto se incluyen las unidades A hasta E.

7.1.4.1. *Unidad A Relleno Antrópico Mixto*

El primer estrato de superficie, también denominado "Recebo", está compuesto por materiales locales, materiales de construcción, residuos de obras antiguas o desechos agrícolas, movidos con maquinaria para nivelar el terreno. En ocasiones estos depósitos contienen algo de basura, y a veces son agregados seleccionados que conforman la base y subbase de avenidas principales. Esto último se observa en la descripción de la mayoría de sondeos para estudios de suelos de puentes viales. Por su misma naturaleza, el espesor de la Unidad A es muy variable (oscila entre 0 y 5 m); sin embargo, tiene un promedio de 1.5 m. El mayor espesor de relleno se encuentra cerca de los canales, y está compuesto por una mezcla de materiales acarreada por la corriente y llevada allí por el hombre.

7.1.4.2. *Unidad B Capa Vegetal*

En ocasiones, esta unidad se encuentra a la misma altura que la Unidad A, o aflora en superficie cuando no hay Relleno; pero la mayoría de las veces está por debajo. Se compone de la llamada "tierra negra" agrícola, utilizada en jardinería, y tiene un alto porcentaje de arcilla no-orgánica, de origen volcánico. Su espesor generalmente es menor de un metro, y aumenta hacia el centro de la cuenca, donde hay mayor espesor de sedimentos lacustres y donde parece haber sido superior la tasa de subsidencia. Esta unidad no se encuentra en todos los sondeos, por haberse erodado o porque nunca se formó (En muchas localidades se mantuvo el ambiente lacustre hasta hace poco tiempo, sin influencia subaérea que permitiera la formación de suelo orgánico).

7.1.4.3. *Unidad C Nivel de Oxidación*

Esta unidad se encuentra cubierta por la Capa Vegetal o el Relleno, y se distingue por su coloración anaranjada debida a oxidación. Es común encontrar raíces o restos de ellas, y también fisuras. Su espesor es bastante uniforme y promedia un metro. A veces no es fácil su identificación, y en general, no se menciona en los pozos de agua subterránea. Muestra una enorme variación de color y textura, presentándose como :

- Limo arcilloso café oscuro con raíces, moteado amarillo y fisurado poroso
- Limo café claro con vetas amarillas y raíces
- Arcilla amarilla clara
- Arcilla limosa habana con vetas amarillas

El origen de esta unidad puede tener que ver con la presencia de ceniza volcánica con alto contenido de minerales de hierro. Al estos meteorizarse en ambiente húmedo y con ayuda de las raíces de plantas, pudieron generar la tonalidad amarillenta.

7.1.4.4. *Unidad D Limo Negro Orgánico*

Se compone de limo negro orgánico, muy blando y húmedo, que a veces muestra manchas de oxidación y raíces o marcas de las mismas. Tiene un espesor variable, con promedio de 80 cm. Representa un paleosuelo, que refleja un período de relativa estabilidad con desarrollo de vegetación en ambiente subaéreo.

7.1.4.5. *Unidad E Arcilla Limosa Gris Verdosa*

La Unidad E está conformada por capas de arcilla limosa gris clara-verdosa o gris azulosa, y llama la atención la variedad de colores que se le adjudican⁴:

- Arcilla limosa gris oscura-habana oscura, fisurada
- Limo arcilloso gris claro
- Limo arcilloso gris-café claro
- Arcilla gris, café y verde, agrietada
- Arcilla gris fangosa

Esta unidad se distingue bastante bien en casi todos los sondeos, y posee un espesor promedio de tres metros; el máximo puede alcanzar 6.5 m (Ver Figs 7 y 5). Presenta variaciones locales de espesor. Sin embargo, mantiene sus características generales en una apreciable extensión areal, que cubre todo el NE de Bogotá [13]. La Unidad E siempre se halla sobre un material de color café oscuro o gris oscuro con materia orgánica, que conforma la Unidad F; el contacto entre las dos está a una profundidad de 5 m en promedio, bajo la superficie del terreno relativamente plano del área estudiada, y aparece en la mayoría de los sondeos analizados. Constituye un buen horizonte estratigráfico. En algunos sitios, se identificó un estrato con alto contenido orgánico entre los dos niveles.

⁴ Las descripciones de estratos que se incluyen en esta contribución fueron tomadas literalmente de la columna del perforador de cada sondeo, según se transcribió en la ficha correspondiente.

La unidad fue depositada en un ambiente de llanura de inundación fluvial, durante las crecientes de caños y ríos en las estaciones húmedas; su color se debe a los períodos de oxidación y meteorización subaéreas.

En muchos sondeos la Unidad E puede dividirse en estratos de menor espesor, que se extienden por cientos de metros. Las unidades menores están compuestas por variaciones de arcilla limosa gris-habana en la parte superior y arcilla limosa gris-verdosa en la parte inferior, siendo esta última, la descripción más difundida.

7.1.5. Conjunto Superior de Unidades Lacustres (F hasta I)

7.1.5.1. Unidad F Arcilla Limosa Café

Como se indicó arriba, debajo de la Unidad E se encuentra otra unidad compuesta por arcilla limosa y limo arcilloso que contiene algo de materia orgánica, cuyo color varía entre café oscuro y gris claro, pasando por varios tonos de habano. Lo más característico de esta unidad no es su color sino su espesor: llega a tener más de veinte metros en algunos sondeos, pero casi nunca es menor de nueve metros (Figs. 7 y 9). En la base es común hallar sedimentos agrietados. En algunos sondeos, presenta "motes blancos y pequeños rastros orgánicos". Corresponde a depósitos de arcillas lacustres. La Unidad F se ha separado en varios horizontes. La Fig 4 presenta numerosos niveles delgados de ceniza volcánica en esta unidad, que tal vez debido a su espesor, no se detectan en todos los sondeos.

7.1.5.2. Unidad G Arcilla Limosa Orgánica Café-Turba

Esta unidad se compone de arcilla limosa café oscura o café clara, con materia orgánica, que grada en ocasiones a niveles de turba fáciles de identificar. Presenta un espesor de 4.5 m en promedio, aunque cuando grada a turba, se reduce considerablemente. Los procesos de compactación y deshidratación de la turba juegan aquí un papel importante. En algunos sondeos no está presente la unidad; es probable que se hubiera erodado o quizás nunca se depositó (Ver Figs 5, 6 y 7). El cambio de espesor de algunas unidades estratigráficas ha causado severas deformaciones del terreno en superficie.

7.1.5.3. Unidad H Limo Café Claro

Esta unidad con espesor aproximado de 10 m, ha sido descrita como:

- Arcilla limosa habana oscura fisurada
- Limo arcilloso café y gris claro
- Arcilla café y gris clara
- Arcilla fangosa más dura [que la unidad anterior]

En algunos niveles se encuentran delgadas capas de turba. La unidad parece ser bastante homogénea, sobre todo en sectores alejados de los cerros, donde la acumulación del depósito se presentó en ambiente lagunar.

7.1.5.4. Unidad I Limo Arcilloso Orgánico Café con Turba

Está compuesta por limo arcilloso café con materia orgánica, o limo café claro, que grada a niveles bastante continuos de turba (Figs 5, 6 y 7). Hacia el tope, es común hallar una delgada capa de turba. Tiene un espesor promedio de tres metros en las áreas de depositación lagunar, y las capas de turba miden entre veinte y treinta centímetros. Presenta buena extensión lateral, especialmente en dirección norte-sur, paralela a los Cerros Orientales (Fig 9). En los sondeos del puente de la Calle 170 con Autopista Norte se encontró vivianita⁵ hacia el tope del unidad I.

En algunos lugares, esta unidad presenta agrietamientos. Las grietas pueden ser un indicio de exposición subaérea (grietas de desecación fosilizadas); por otro lado, pueden reflejar un alto contenido de arcilla (probablemente volcánica) que al perder humedad se contrae irreversiblemente, generando fracturamiento en el subsuelo. Ese tipo de grietas ayuda en los procesos de migración del agua subterránea a través de estratos arcillosos.

7.1.6. Unidad J de Exposición Subaérea Lacustre/Aluvial Limo Arcilloso Rojizo Claro

Esta es una unidad característica de color café-rojizo claro, que ha sido descrita así:

- Limo arcilloso con manchas rosadas
- Limo habano-rosado
- Limo arcilloso rojizo claro

⁵ Asociación mineral de color azul, rica en fósforo.

- Arcilla habana rojiza, con vetas grises, fisurada
- Arcilla gris habana con manchas de oxidación

Por las descripciones es posible seguirla en la mayoría de los sondeos, ya que se halla bajo la Unidad I, que está bastante extendida y es rica en materia orgánica (Figs 6, 7 y 9). Esta unidad casi siempre se encuentra por debajo de los treinta metros desde la superficie, aunque se profundiza progresivamente hacia el centro de la cuenca. Su espesor es variable e incrementa levemente hacia el occidente. Presenta un espesor máximo de 14 m y mínimo de 1.1 m. El cambio de espesor puede ser evidencia de erosión.

En algunos lugares se puede dividir en unidades menores. En dos niveles de diferente profundidad se presenta "moteado blanco"⁶, que parece corresponder a ceniza volcánica gruesa (piedra pómez). Puede también tratarse de paleosuelos blancos, que han sido lavados y/o lixiviados de forma superficial selectiva, o ser evidencia de un período interglacial. En algunas ocasiones se emplean las expresiones "con moteado blanco", o "con vetas gris claro" para referirse al material, cuya identificación no es segura, pero puede tratarse de ceniza volcánica. En algunos sondeos no se describe el color rojo.

Es importante interpretar el origen de la Unidad J. Al parecer, corresponde a un depósito en el que la saturación de agua subterránea era muy superficial y el clima seco. Hubo exposición subaérea de los sedimentos, y se presentó erosión, como lo demuestra la inclinación de los estratos infrayacentes. Otra alternativa es que la unidad sea producto de la erosión preferencial de alguna de las formaciones arcillosas del Terciario, que tienen color rojo.

7.1.7. Conjunto Inferior de Unidades Lacustres (K hasta N)

7.1.7.1. Unidad K *Arcilla Limosa Café Oscura con Materia Orgánica*

Esta unidad no es fácil de seguir en todos los cortes (Ver por ejemplo Figs 6 y 7). No se distingue en las Figs 8 y 9. Su presencia se hace evidente cuando está compuesta por turba o arcilla limosa café oscura con materia orgánica. También se ha descrito como "limo arcilloso gris verdoso con materia orgánica". Posee un espesor que puede variar entre cero y 5.5 m.

7.1.7.2. Unidad L *Arcilla Limosa*

Se trata de una unidad arcillo-limosa bastante monótona, sin mayores características distintivas, lo cual se refleja en las descripciones poco detalladas:

- Limo arcilloso gris y café claro
- Arcilla limosa habana oscura
- Arcilla gris verdosa

Su espesor promedio oscila entre 5 y 7 m, aunque los valores extremos son 3 y 14 m. Tal cambio de espesor quizás no se deba a simple subsidencia de la cuenca, ya que puede representar un nivel erosivo en algunos lugares, o aún constituir el relleno de una leve paleotopografía.

7.1.7.3. Unidad M *Arcilla con Materia Orgánica*

Por debajo de la Unidad L se encuentra otra bastante conspicua, relativamente oscura, compuesta por arcilla con materia orgánica, turba y madera. Tiene un espesor reducido cuando aparece como turba y "madera" en los cortes; el espesor es mayor cuando está conformada por arcilla café orgánica. Varía entre 0 y 4 m.

7.1.7.4. Unidad N *Arcilla Limosa Homogénea*

Esta unidad estratigráfica se encuentra pobremente caracterizada. Se trata de una arcilla limosa café clara, con espesor promedio de 19 m. Parece no ser muy homogénea, aunque la información del subsuelo puede resultar insuficiente para definirla mejor y subdividirla. Presenta un marcado cambio de espesor. Al respecto, se puede pensar en una ligera discordancia por encima de la Unidad L, aunque no es claramente diferenciable, ya que que en algunos lugares se presenta un contacto entre las unidades L y N, ambas de carácter arcilloso. Al parecer, se produjo erosión parcial de las unidades L, M y N. Ver el Capítulo 11, donde se explica la erosión.

⁶ Los niveles con "moteado blanco" generalmente aparecen en la base de las secuencias lacustres y por encima de una capa de arena (Ver el sondeo B-321).

7.1.8. Conjunto de Unidades Fluviales Arenosas (O hasta S)

7.1.8.1. Unidad O Arena

A una profundidad entre 60 y 80 m, según el lugar, se encuentra la Unidad O, que constituye un marcador estratigráfico bastante llamativo y extendido. Está conformada por gruesas capas de arena de color gris hasta habano, de grano medio, muy limpia y bien seleccionada, compuesta por cuarzo hialino con algo de lidita negra-verdosa; se observa granoderecencia en profundidad. Alcanza un espesor de 20 a 22 m en promedio. Constituye un horizonte del subsuelo que puede portar gran presión, y sirve para cimentaciones profundas de grandes estructuras.

El Corte E, que reúne exclusivamente pozos profundos para aguas subterráneas, cruza de sur a norte el área del trabajo; en él se ilustran la geometría, variación de espesor y características faciales de la Unidad O (Fig 9). La arena parece tener un patrón lineal, alargado en dirección norte-sur. En algunos sondeos cambia de facies y se convierte en arcilla arenosa con granos de lidita negra; sin embargo, conserva su espesor aproximado y ubicación estratigráfica, lo cual ayuda en la correlación. Primordialmente es una unidad de arena, pero contiene niveles de arcilla limo-arenosa. La pendiente que se observa en la arena podría corresponder al leve buzamiento regional que ésta presenta.

La arena de la Unidad O se ha explotado por su contenido de agua subterránea. Los pozos que la atraviesan tienen caudales del orden de 1.5 l/s y producen agua de buena calidad. En varios cortes esta unidad presenta ondulaciones, lo cual puede ser indicio de un ligero plegamiento.

Las unidades P hasta Y no se describen en este artículo, porque son demasiado profundas y carecen de importancia inmediata para usos ingenieriles [13, 14 y 15].

7.2. Formación Tunjuelo (Qpt)

7.2.1. Definición

Los sedimentos de los ríos y quebradas en el extremo oriental de la Sabana consisten predominantemente de material grueso que ha sido depositado en forma de delta o abanico aluvial (Figs 5 a 8). Hacia los Cerros Orientales, el complejo de conos fluvio-glaciales de los ríos Tunjuelo, San Cristóbal, San Francisco y Arzobispo y de las Quebradas Las Delicias [1], La Vieja, Los Rosales, Chicó y otras más al norte, conforma la Formación Tunjuelo, que es una sucesión de abanicos coalescentes, compuesta predominantemente de gravas, arenas redondeadas y limo, con espesores de hasta 150 m (Figs 5 a 8). Fue inicialmente descrita como formación por LOBO-GUERRERO U. [19]. La localidad típica es el cono fluvio-glacial del bajo Río Tunjuelito, al suroriente de Bogotá [20]. Allí el cono se divide en tres niveles, según su granulometría que va desde grandes bloques hasta arenas finas y arcillas que se interdigitan con los depósitos de la Formación Sabana [19]. El material de la Formación Tunjuelo en el NE de Bogotá, contiene intercalaciones delgadas de arcilla, arcilla con arena de grano fino, material fluvio-glacial retrabajado por las olas y arcillas interglaciales lagunares. El piedemonte del Cerro de Suba también tiene materiales de la Formación Tunjuelo (Figs 5 y 6).

Informalmente, Diezemann describió una de las localidades típicas de la Fm. Tunjuelo, como se incluye a continuación.

"Un delta fluvial se formó en el lago (Lago de la Sabana) cerca del Colegio de la Enseñanza en la Avenida Chile por debajo de la Carrera 7a, como lo demuestra el material encontrado en un pozo que se perforó en ese lugar. Allí desemboca hoy en la Sabana la Quebrada La Vieja. En ese pozo se cortaron arenas y gravas, cuyos intersticios están llenos de limo; el espesor de estos sedimentos deltáicos alcanza 120 metros. El subyacente consiste en arcillas duras de color gris-rojo pertenecientes a la Formación Bogotá." [3:17]

El Cantón Norte está ubicado sobre un cono de deyección [23]. "El cono empieza al emerger la quebrada de la angostura formada por los cerros y se inclina suavemente en forma de abanico hacia la Sabana. En el límite con esta, los sedimentos fluviales se entremezclan con sedimentos lacustres. El cono de deyección se compone de cantos rodados de areniscas, cascajo, arena fina y de vez en cuando lentes de arcilla. Naturalmente el material más grueso se halla quebrada arriba, en tanto que hacia la Sabana, más lejos de los cerros, la quebrada sedimentó cantos rodados de diámetro menor y arenas finas (...) Las condiciones de composición del cono de deyección son muy favorables a la captación y conducción de agua. Una permeabilidad relativamente grande se mantiene casi en toda su extensión y aún en la superficie." [5:2]

No es fácil hacer correlaciones confiables en los abanicos aluviales, cuando la distancia entre las perforaciones es mayor de veinte metros en dirección perpendicular a la máxima pendiente. Obsérvese en las Figs 5 y 6 donde los depósitos coluviales se interdigitan con depósitos lacustres de limo, arcilla y turba. En el piedemonte de los Cerros Orientales y en el del Cerro de Suba es muy importante contar con la elevación relativa de las bocas de cada sondeo, para poder intentar alguna correlación. De todos modos, es complejo correlacionar unidades tan variables en el sector, mientras que en la parte "plana", o relativamente plana, es más sencillo hacerlo.

7.2.2. Acuíferos en la Formación Tunjuelo

Los estratos de arena y grava dentro de la Formación Tunjuelo son acuíferos de diferentes clases. "Originalmente la recarga a dichos acuíferos, genéticamente relacionados con los ríos y quebradas del pie de monte, era directa, a partir de la infiltración en las partes altas de los abanicos. Con la progresiva urbanización y el recubrimiento de materiales impermeables, cada vez la recarga es más difícil." [18] En numerosos sondeos el agua mana de la Formación Tunjuelo, y a menudo lo hace como agua saltante.

8. Unidades Estratigráficas Menores Depositadas en el Cuaternario

En el Cuaternario se han desarrollado diferentes depósitos por fenómenos de movimientos en masa en los Cerros Orientales y en el piedemonte del Cerro de Suba. En los Cerros Orientales se encuentra además, que algunos depósitos fluvio-glaciares se han ido mezclando con los de remoción en masa, lo que en ocasiones hace difícil distinguir entre uno y otro. También ha sucedido que el material que fue inicialmente movido por un fenómeno es removilizado luego por otro, lo cual mezcla las partículas constituyentes, complicando su caracterización de campo. Por otro lado, en el piedemonte de los Cerros Orientales, la acción urbanizadora ha enmascarado bastante las características geomorfológicas, que son de gran ayuda para analizar los depósitos cuaternarios.

8.1. Depósitos Glaciales

El material de morrenas que se encuentra por encima de los 2,800 m.s.n.m. está constituido por bloques angulares de arenisca, lidita y arcillolita, muy mal seleccionados. Los bloques mayores pueden tener más de tres metros de diámetro. La matriz está compuesta por arcilla, limo y arena de color entre amarillo y gris claro, con frecuentes oxidaciones. Estos depósitos no se pueden correlacionar con base en sondeos, debido a su enorme variabilidad lateral y vertical. En el valle alto de la Quebrada El Chicó, por la Vía Circunvalar, por caminos arriba de ésta y por la Vía a la Calera, pueden hallarse depósitos de origen glaciar, especialmente tilitas y morrenas. Sobre los sedimentos glaciares a veces se encuentran delgadas capas fluviales.

8.2. Coluviones

En las laderas de los Cerros Orientales de Bogotá es común encontrar gruesos mantos de coluvión, producto de la meteorización y lento reptamiento gravitacional de bloques, trozos y partículas provenientes de las formaciones cretáceas y terciarias. Están conformados por grandes fragmentos rocosos angulares de arenisca y arcillolita, algo meteorizados, sueltos, englobados en una matriz de arena, limo o arcilla; poseen alta permeabilidad, poca compactación y presentan abundante óxido de hierro. Los bloques no muestran orientación alguna y su tamaño es heterogéneo; algunos pueden alcanzar decenas de metros cúbicos. El espesor del material, que es muy variable, puede llegar a más de 30 m. El material coluvial es inestable, y tiende a reptar rápidamente en época de lluvias fuertes. Puede que fragmentos de coluvión lleguen a mezclarse con los depósitos de la Formación Tunjuelo, y hasta con depósitos de borde del lago de la Sabana.

8.3. Depósitos Aluviales

En los costados de los ríos y quebradas que atraviesan la ciudad se encuentran sedimentos aluviales, y los cauces de las principales quebradas tienen depósitos aluviales de pendiente, compuestos por cantos rodados gruesos. Son bloques angulares hasta subredondeados de arenisca, y en menor proporción de arcillolita y lidita. Es difícil distinguir el límite entre depósitos coluviales y depósitos aluviales de pendiente, puesto que unos gradan en los otros. En el terreno, los cantos de depósitos aluviales de ladera se encuentran más redondeados que los de coluvión, y presentan algo de selección y gradación, especialmente entre los granos de tamaño grava fina hasta arena.

El material granular de tamaño grava gruesa hasta arena fue transportado hacia la parte plana de la Sabana, formando deltas, y las demás partículas formaron depósitos aluviales finos. En la Fig 10 se observan depósitos acumulados en terreno menos pendiente por los canales de Callejas y Córdoba. Son materiales depositados a lo largo del cauce, y emplazados allí discordantemente. Los canales han sido excavados por cursos de agua, y pueden seguirse los estratos a lado y lado. En la Fig 9 se observó la presencia del Canal de Córdoba alteró las capas de los primeros diez metros, oxidándolas, y transformándolas fuertemente. Esta puede ser la razón de la variabilidad de los estratos que han sufrido intemperismo o épocas de exposición subaérea.

9. Acuíferos Principales e Interconexión Entre Ellos

Bajo la ciudad de Bogotá existen cuatro acuíferos principales: La Formación Tunjuelo, las capas arenosas relativamente superficiales de la Formación Sabana, la Formación Tilatá y, en profundidad, la Formación Guadalupe. No hay certeza sobre interconexión entre los diferentes acuíferos, y es posible que sean independientes. Sin embargo, pueden estar conectados por medio de fallas, grandes fracturas, contacto directo, y/o a través de pozos de agua. Dentro de las unidades sin consolidar, los principales niveles acuíferos son las que se encuentran por debajo de la Unidad N (Fig 3). Para las excavaciones profundas de obras de ingeniería, las unidades J, K, M y O deben tenerse en cuenta como acuíferos (Fig 9).

El nivel freático es muy variable en los metros superiores de la Formación Sabana, especialmente hacia los cerros, por tratarse de tablas de agua colgadas (Fig 5, Unidad L a la altura del pozo 501). Las capas de arena y turba, que a veces son lenticulares, conducen agua: por lo tanto existen diversos tipos de acuíferos, que en algunos lugares presentan tabla de agua saltante. Hay casos donde se presentan acuíferos confinados y sobrepresionados por enterramiento.

10. Conformación del Lago de Bogotá y Dinámica Lacustre

Con las diferentes etapas de cabalgamiento y plegamiento, fallamiento de bloques de dirección NW-SE, fluctuación de la precipitación atmosférica anual y deshielos, también variaba el nivel del antiguo Lago de Bogotá y se depositaban diferentes materiales. El lago podía estar completamente lleno, o en ocasiones, transformarse parcialmente en una región pantanosa. En las orillas se iban formando pequeños deltas con el aporte de los ríos y quebradas provenientes de los cerros, que desembocaban en el lago dejando materiales granulares gruesos y arenosos. La fluctuación del nivel generó capas de turba, intercaladas con arcillas lagunares, y arenas y arcillas aluviales en los períodos de colmatación. A lo anterior, se sumó el constante suministro de material acarreado por los vientos, polvo atrapado por la lluvia, y sucesivos aportes piroclásticos de grandes eventos volcánicos de la Cordillera Central y del centro de Boyacá, que quedaron atrapados entre el relleno del lago. La cuenca lacustre, cerrada, era un receptáculo ideal de materiales, y de ésta sólo salían algunas partículas en suspensión.

En los ambientes "costeros" del lago, se formaron turberas y horizontes de oxidación que constituyen buenos marcadores estratigráficos. Sin embargo, cuando los cambios de composición se dan en distancias cortas (como sucede en el piedemonte de los Cerros Orientales, o en los conos de derrubio y abanicos aluviales), los depósitos tienen extensión lateral muy escasa, y la distancia entre sondeos (o "intervalo de muestreo") no permite seguir las variaciones litológicas.

Algunos depósitos fluvioglaciares se han ido mezclando con los de remoción en masa, lo que en ocasiones hace difícil distinguir entre uno y otro. También ha sucedido que el material que fue inicialmente movido por un fenómeno es removilizado luego por otro, lo cual mezcla las partículas constituyentes, dificultando así su identificación de campo.

11. Secuencia de Eventos Geológicos que Llevó a la Deposición de las Unidades A Hasta O en el Subsuelo de Bogotá, D.C.

A partir de la secuencia estratigráfica hallada en los cortes, y usando otras observaciones, se organizó la secuencia probable de eventos geológicos que se describe a continuación. Nótese que las condiciones

descritas son las predominantes en la mayor parte de la cuenca, durante la depositación de cada estrato. Sin embargo, en los bordes de la cuenca siempre se presentaron pantanos y abanicos aluviales depositando bloques, gravas y arena hacia la cuenca [13, 14].

A. Vino un período de fallamiento y plegamiento en la Cordillera Oriental, que levantó rocas de la Formación Guadalupe y rápidamente fueron erodadas para constituir la Unidad O (Fig 9). Posiblemente en este momento se levantaron los Cerros Orientales. La granulometría y selección de las arenas debe ser heredada de unidades arenosas del Terciario, con baja consolidación, y de los miembros Arenisca Tierna y de Labor y Plaeners. Algunas arenas presentan lidita gris oscura, verdosa y negra, indicando diferentes grados de meteorización del miembro Plaeners. Hubo influencia menor de llanuras de inundación, cuando cesó la 'inercia del levantamiento'.

B. La cuenca se llenó de agua y se depositaron sedimentos lacustres, con algunas variaciones locales a otros tipos de depósito (Unidad N).

C. Vino un momento en el que el lago se colmató, formándose pantanos y turberas, con depositación de arcillas lacustres ricas en materia orgánica (Unidad M,) para ser cubiertas nuevamente por depósitos lacustres (Unidad L) y de pantano (Unidad K).

D. Durante un período de exposición subaérea, parte de los anteriores depósitos sufrieron oxidación y/o lixiviación superficial selectiva. En algunos lugares se depositaron delgados niveles de arena fina, con costras de hierro. El clima en general debió ser seco (Unidad J).

E. Inmediatamente encima de la unidad anterior, el clima se hizo nuevamente húmedo, generando turberas en los bordes y acumulación de lodos oscuros. Para ese momento hubo aporte volcánico, lo que indujo la precipitación de asociaciones minerales ricas en fósforo (Unidad I)⁷. Más adelante, cuando se alteraron las cenizas volcánicas en arcillas expansivas y de compresión anisotrópica, se formaron abundantes grietas y fisuras en esta unidad.

F. El ambiente lagunar se extendió por toda el área de trabajo (Unidad H) y luego se volvió a secar parcialmente, dejando pantanos y turberas (Unidad G) en áreas muy extensas.

G. Durante un período el lago tuvo gran extensión, y por toda la cuenca se depositaron secuencias monótonas de arcillas lacustres, con variable contenido orgánico, y abundante aporte volcánico (Unidad F). Hacia la base de la unidad hay arcillas expansivas y numerosas intercalaciones de diatomita.

H. Hubo un predominio de ambiente fluvial, y las inundaciones de los ríos (en dos temporadas al año) depositaron sedimentos arcillosos y arenas. La exposición subaérea generó oxidación de los sedimentos y algo de meteorización (Unidad E).

I. Siguió un período de relativa estabilidad, se secó buena parte de la superficie y se formó un suelo orgánico en gran parte de la cuenca (Unidad D).

J. Luego vino un tiempo relativamente seco, en el que hubo oxidación y formación de costras duras ferruginosas ("hardpan") en algunos lugares de la cuenca (Unidad C). Sin embargo, quedaron algunas zonas con lagos, en las que se depositaron turberas y arcillas paludales.

K. Se fue formando una capa de suelo orgánico, con la extensión de arbustos y gramíneas por buena parte de la Sabana (Unidad B).

L. En los últimos años, el hombre se dió a la tarea de cultivar y posteriormente urbanizar la Sabana, moviendo tierras y rellenando las zonas bajas, para conformar la Unidad A. En algunas partes del NE de la ciudad de Bogotá aún quedan lagos, pantanos y valles aluviales. También hay variados movimientos en masa que forman coluviones.

⁷ La concentración de fósforo se dió bien por aporte directo de fósforo en la ceniza, o por aporte de otros nutrientes al agua, lo que indujo una explosión de vida.

12. Conclusiones

Existen muchas situaciones en las cuales un ingeniero de suelos puede errar su apreciación sobre los requisitos de fundación o comportamiento ingenieril del suelo o roca sobre la que se va a construir una obra, si no cuenta con una evaluación apropiada de la geología local y una apreciación de los procesos geológicos.

No sobra advertir sobre la importancia de invertir en estudios del subsuelo para la construcción de obras. Para el efecto, basta ver la Fig 10.



**Fig 10. “... y nos podemos ahorrar 700 liras si no hacemos estudios de suelos.” Aquí están los diseñadores y constructores de la Torre de Pisa, en presentación del proyecto ante el propietario.
© Engineers Testing Laboratories, en Legget & Karrow, 1983 [11].**

13. Recomendaciones

Es importante estudiar en detalle la geología del Cerro de Suba y de los Cerros Orientales de Bogotá, lo más pronto posible, ya que existen pocos mapas geológicos detallados de esas zonas, y con la progresiva urbanización, se dificulta cada vez más hacer allí geología de campo.

Hace falta que los jefes de taladro (especialmente las personas que describen las muestras) reciban entrenamiento técnico en petrografía macroscópica (descripción de muestras), ortografía, caligrafía, mantenimiento y cuidado de herramientas, contabilidad, física aplicada, mecánica especializada de los equipos que manejan, e instrucción sobre el desgaste de herramientas, manejo apropiado de motores, soldadura, etc. Tal vez el gremio de perforadores e ingenieros de suelos aunara esfuerzos, preocupándose por el bienestar de sus trabajadores, su productividad y eficiencia, podría organizar con el SENA cursos cortos y/o capacitación progresiva para su personal. De esa manera, tendrían personal idóneo. Tal vez podría exigírsele a todo perforador un carnet de vigencia anual o bienal, para poder laborar en taladros, y de esa manera, uniformizar los resultados de los sondeos.

Es importante organizar una base de datos sistematizada de los sondeos realizados para estudios de suelos en la ciudad de Bogotá, que incluya la información mecánica. Toda la información del subsuelo puede archivar en un sistema de información geográfica eficiente, que permita la consulta pública, completa y económica. Eso facilita ejecutar el plan de desarrollo y simplifica la investigación del subsuelo para realizar obras de todo tipo. Tal base de datos puede integrarse en un gran mapa digital con las redes subterráneas de conducción de agua dulce y de aguas negras, teléfonos, alumbrado público, vías y predios, para facilitar el uso en cualquier excavación y evitar costosos imprevistos. Primero hay que uniformizar los sistemas de adquisición de datos y la forma de registrarlos. El proceso puede iniciarse, obligando por ley que todos los estudios de suelos usen un sistema estandarizado para la descripción de sondeos (por ejemplo el descrito en [16], con ciertas mediciones físicas mínimas.

La nomenclatura de los lugares geográficos es útil para estudiar la geología del subsuelo. Buscando explicar el origen de los nombres, pueden hallarse ideas sobre el ambiente geológico. Términos como Río Salitre, Parque del Salitre, Río Arzobispo, La Chucua, Barrio Venecia, Barrio El Lago, Lagos de Córdoba, etc. tienen su origen en la calidad de las aguas, en su coloración rojiza, o en las inundaciones periódicas del terreno.

14. Referencias

- 1) ALVARADO, B. & ROYO Y GOMEZ, J. [1940] Agrietamientos de Edificios en Chapinero, Bogotá, Departamento de Cundinamarca, informe No. 34, Servicio Geológico Nacional, 6 pág., Bogotá.
- 1) BELL, R.A. & DARRAGH, R.D. [1987] "Foundations for Heavy Structures", en *Subsurface Geology*, quinta edición, editado por L.W. LeRoy, y otros, Colorado School of Mines Press, pp. 928-938, Golden, Colorado.
- 3) DIEZEMANN, W. [1949A] Agua Subterránea en Bogotá y sus Alrededores, Departamento de Cundinamarca, Informe No. 707, Instituto Geológico Nacional, Bogotá.
- 4) _____ [1949B] El Suelo Lacustre de la Sabana de Bogotá, Informe No. 674, Instituto Geológico Nacional, 9 pág., Bogotá.
- 5) DIEZEMANN, W. & LOPEZ CASAS, J. [1953A] Condiciones Geohidrológicas para la Construcción de un Acueducto de Aguas Subterráneas en los Cuarteles de Usaquén, Departamento de Cundinamarca, Informe No. 942, Instituto Geológico Nacional, 6 pág., Bogotá.
- 6) HAY, R.L. [1978] "Volcanic Ash-Diagenesis", en *Encyclopedia of Sedimentology*, pp. 851.
- 7) HENKEL, D.J. [1971] "Geology and Foundation Problems in Urban Areas", en *Environmental Planning and Geology*, editado por Nichols & Campbell [1971], Memoria del Simposio sobre Geología para Ingeniería en el Medio Ambiente Urbano, U.S. Department of Housing and Urban Development--U.S. Department of the Interior, DCPD-32, pp 28-35, Washington D.C.
- 8) JOHNSON, R.B. & DeGRAFF, J.V. [1988] *Principles of Engineering Geology*, John Wiley & Sons, 497 p., Nueva York.
- 9) JOHNSTONE, J.G. [1987] "Soil Engineering" en *Subsurface Geology*, quinta edición, editada por LeROY, L.W., LeROY, D.O. et al., Colorado School of Mines Press, Colorado School of Mines, pp. 756-767, Golden, Colorado.
- 10) JULIVERT, M. [1974a] "Formación Sabana", en *Lexique Stratigraphique - Amérique Latine*, v. V, fascículo 4b, COLOMBIA, Terciario y Cuaternario, editado por Jaime de Porta, Centre National de la Recherche Scientifique, pp. 483-489, París.
- 11) LEGGET, R.F. & KARROW, P.F. [1983] *Geology in Civil Engineering*, McGraw-Hill Book Co., Nueva York.
- 12) LeROY, L.W., LeROY, D.O., SCHWOCHOW, S.D. & RAESE, J.W. [1987] *Subsurface Geology*, quinta edición, Colorado School of Mines Press, Colorado School of Mines, 1002 p., Golden, Colorado.
- 12) LOBO-GUERRERO SANZ, A. [1994] Geología del Subsuelo del Nororiente de la Ciudad de Santafé de Bogotá, D.C., trabajo de grado de Geólogo, Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, 142 p. (resumen de 9 páginas en <http://www.logemin.com/eng/art12.html>).
- 13) _____ [1996] "Estratigrafía del material no-consolidado en el subsuelo del nororiente de Santafé de Bogotá (Colombia) con algunas notas sobre historia geológica", *I Seminario sobre el Cuaternario, VII Congreso Colombiano de Geología*, Bogotá, agosto 26 de 1996, 23 p. Versión abreviada en *Memorias del II Foro Sobre Geotecnia de la Sabana de Bogotá*, VIII Jornadas Geotécnicas de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, septiembre, 1995, pp II-14-35. (en <http://www.logemin.com/eng/art11.html>)
- 14) _____ [1996] Excursión Geológica por la Sabana de Bogotá, VII Congreso Colombiano de Geología, Sociedad Colombiana de Geología, Bogotá, agosto 26 de 1996, 26 p. (<http://www.logemin.com/eng/art24.html>)
- 15) _____ [2000] "Código alfabético para descripción de sedimentos y rocas sedimentarias en sondeos, excavaciones y afloramientos", 6 p. También publicado en *Ponencias, XIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil*,

Colegio de Ingenieros del Perú, Puno, 5 al 9 de noviembre, 2001, pp. G07-22-24.

www.logemin.com/eng/Download/pdf/Codigo_alfabetico_sedimentos_1997.pdf)

16) _____ [2008] "Factores geológicos que afectan las excavaciones en Bogotá, Colombia", versión anterior publicada en *Memorias del Primer Seminario de Geotecnia "Problemas de Excavaciones, Estabilidad y Deformaciones"*, Universidad de La Salle, noviembre 1994, Bogotá; 22 p.

(www.logemin.com/eng/Download/pdf/35_Excavaciones_subsuelo_Bogota)

17) LOBO-GUERRERO USCATEGUI, A. [1989] Estudio Geológico del Area de los Edificios Alto Chicó y La Peña (Chicó Alto, Bogotá, D.E.), informe de Lobo-Guerrero Geología Ltda. presentado a Maldonado Ingeniería S.A., Bogotá, 06-05-89; 18 p. + 2 planchas, 20 fotos, Bogotá.

18) _____ [1992] Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana, VII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana, 22 p. + 8 fig., Bogotá. (<http://www.logemin.com/eng/art16.html>)

19) _____, LOBO-GUERRERO SANZ, A., & ROBLES, E. [2006] Estudio Hidrogeológico en la Mina de "Manas" (Valle del Río Tunjuelo, Bogotá, D.C.), Informe inédito para HOLCIM (COLOMBIA) S.A.

20) PEÑALOSA, E. [1993] "A Quién le Importa Bogotá?", en diario El Espectador, 9 de mayo p 4a., Bogotá.

21) ROBB, G.L. [1987] "Geologic Techniques in Civil Engineering", en *Subsurface Geology*, quinta edición, editado por L.W. LeRoy, y otros, Colorado School of Mines Press, pp. 837-844, Golden, Colorado.

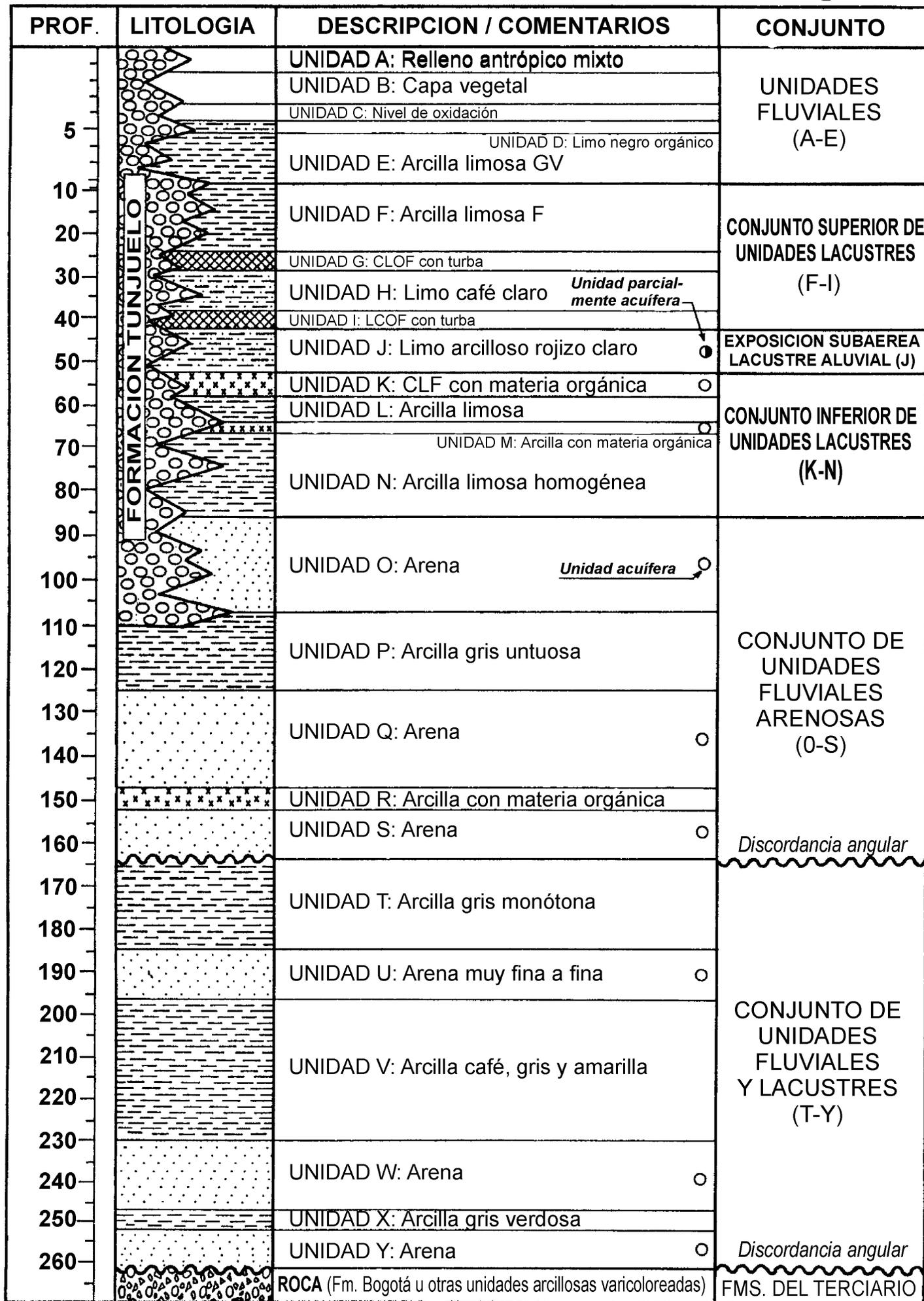
22) ROYO Y GOMEZ, J. [1953] Informe Sobre la Influencia de las Nuevas Obras de la Escuela de Caballería en las Variaciones del Caudal de la Quebrada "Santa Ana" y en la Seguridad del Suelo, Informe No. 332, Instituto Geológico Nacional, 6 pág., Bogotá.

23) RUSSELL, H.A. [1981] "Instrumentation and Monitoring of Excavations" en *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, v. 18, no. 1, pp. 91-99.

24) SOCIEDAD COLOMBIANA DE INGENIEROS & SOCIEDAD COLOMBIANA DE GEOTECNIA [1992] Conclusiones Principales del Foro Sobre Geotecnia de la Sabana de Bogota, realizado el 30 de octubre, dentro de las VII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana, de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, 5 pág., Bogotá.

25) van der HAMMEN, T. & PARADA, F.A. [1958] Investigaciones de Algunos Importantes Yacimientos de Diatomita, Caolín y Arcillas de la Sabana de Bogotá, Informe No. 1271, Instituto Geológico Nacional, 29 pág., Bogotá.

Columna estratigráfica generalizada del material no-consolidado en el subsuelo del nororiente de Bogotá Fig. 3



FORMACION TUNJUELO

Geología del subsuelo del NE de la ciudad de Bogotá

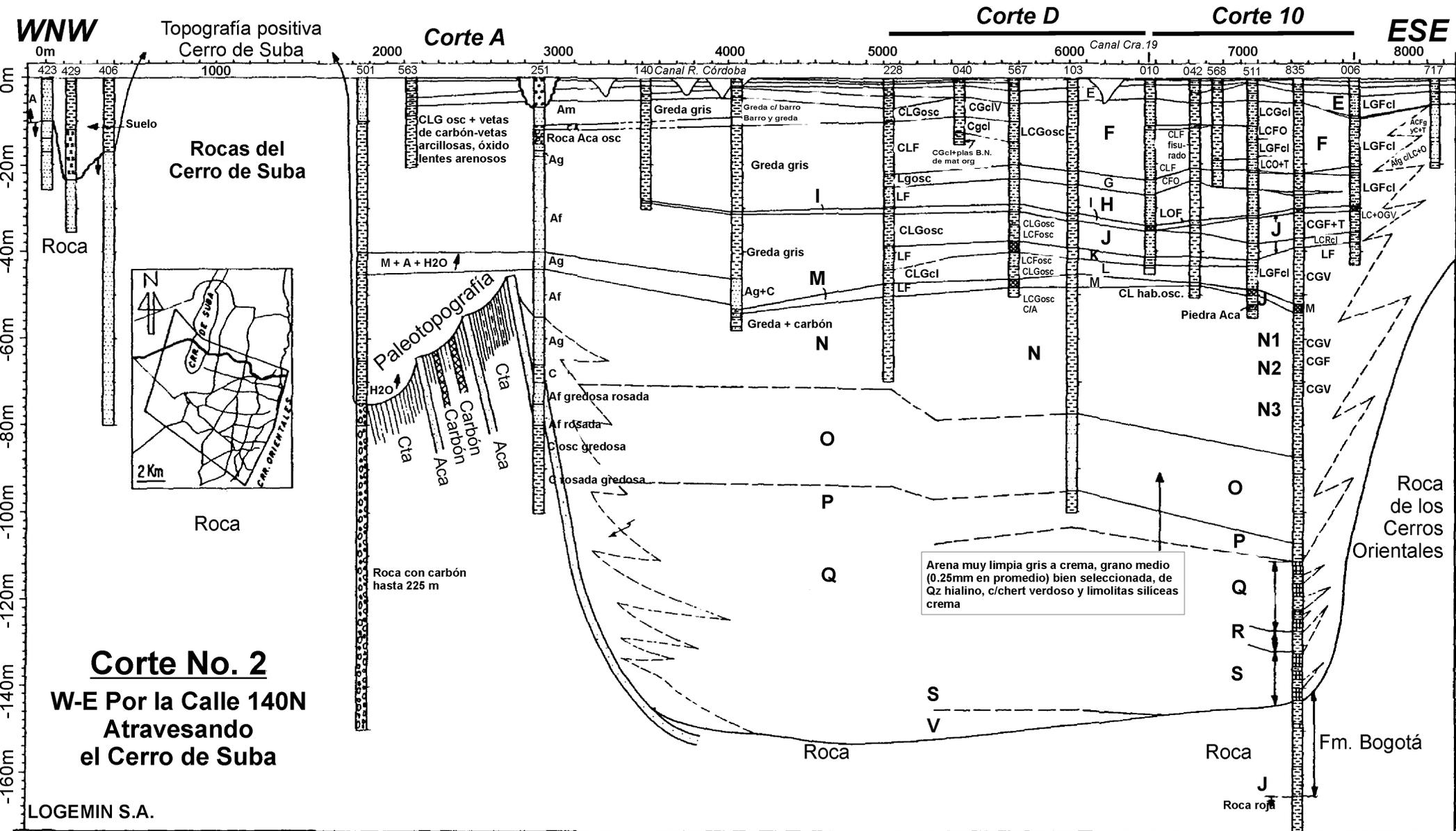
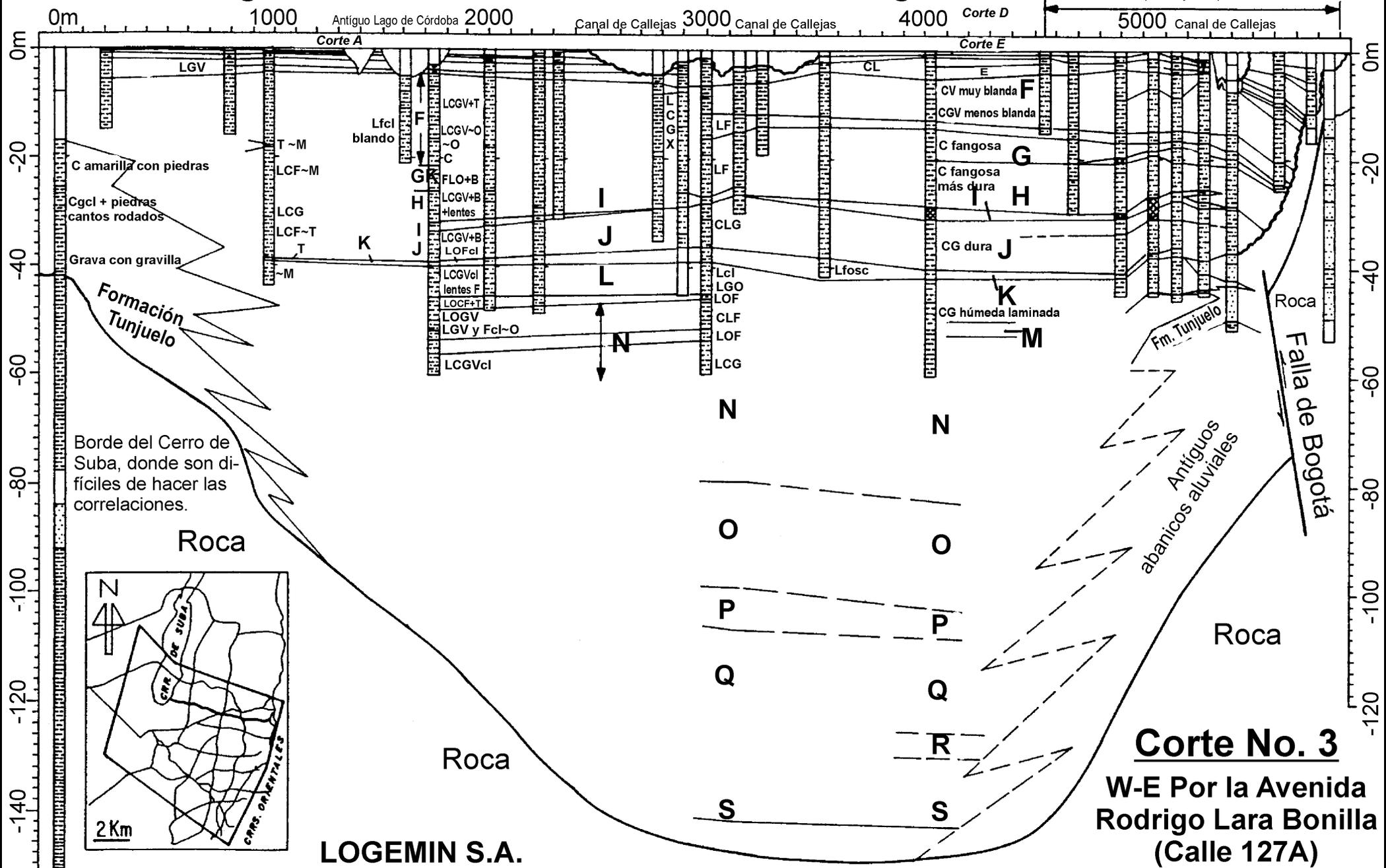


Fig. 5

Geología del subsuelo del NE de la ciudad de Bogotá

Ver Corte 3-1, ampliado y con pendiente del terreno



Corte No. 3
 W-E Por la Avenida
 Rodrigo Lara Bonilla
 (Calle 127A)

Fig 6

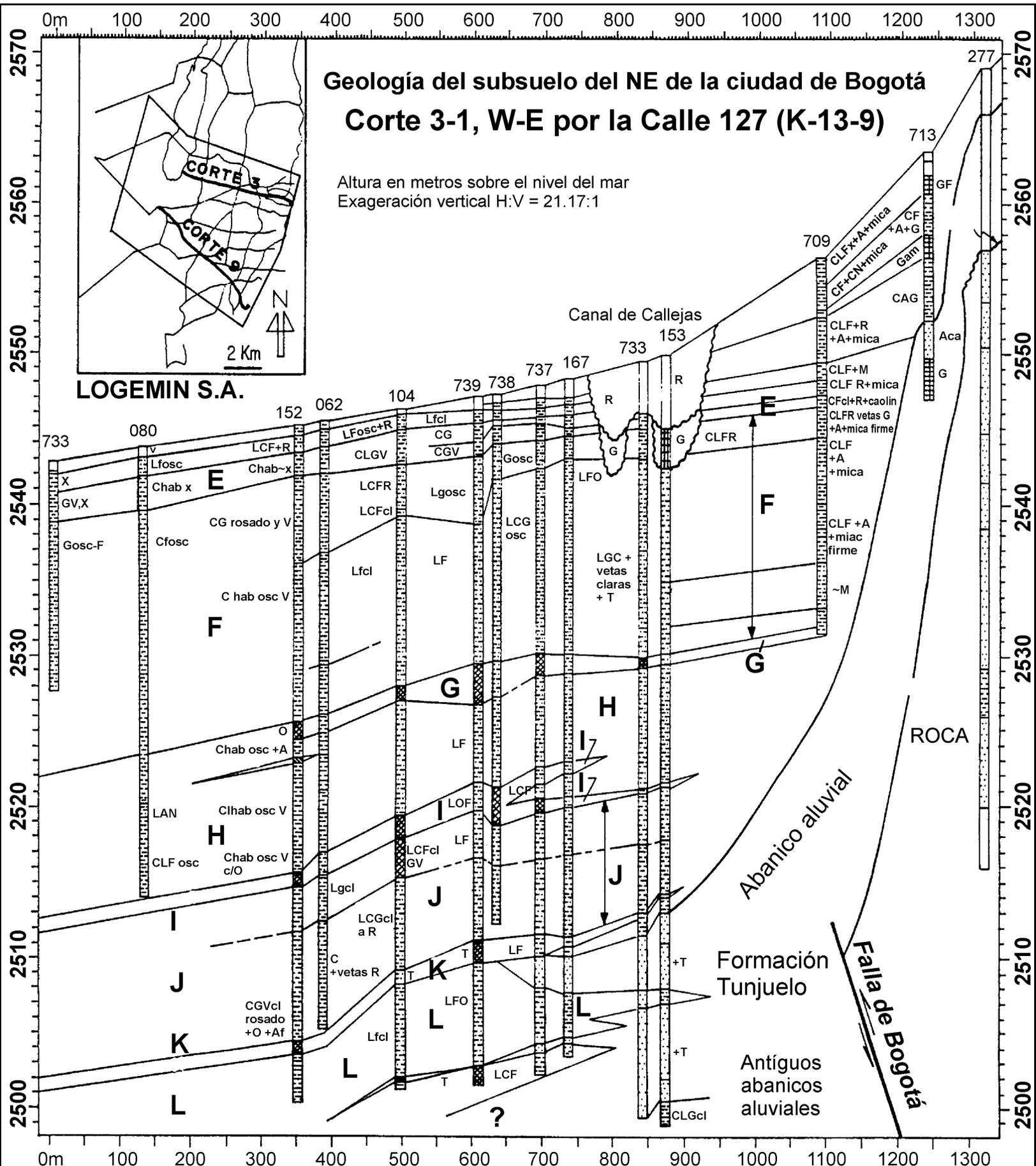


Fig 7

