

ANEXO 1

INFORME DE GEOFÍSICA

CONVENIO INTERADMINISTRATIVO No. 12 ENTRE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA Y EL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Calle 44 No 45-67. **UNIDAD CAMILO TORRES** 2° piso Oficina 203
Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 10260
Correo electrónico: convensgc_fabog@unal.edu.co
Bogotá, Colombia, Suramérica

1. OBJETIVOS DE LA EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

La exploración geofísica realizada para el proyecto “Centro de Excelencia en Estudios de la Tierra de manejo mutuo entre el Servicio Geológico Colombiano y la Universidad Nacional de Colombia” realizada en el campus de la Universidad Nacional en la ciudad de Bogotá D.C tiene como objetivos:

- Estimar la velocidad de onda S como un indicador de la estratigrafía para tomar como base en la construcción del modelo geológico geotécnico del sitio.
- Establecer un modelo de la variación lateral y en profundidad de la velocidad de onda P que permita identificar características del subsuelo de interés con énfasis en la detección del nivel freático en la zona de estudio.

2. LOCALIZACIÓN

El proyecto se desarrolla en la esquina nororiental del campus de la Universidad Nacional de Colombia ubicada en la intersección de la Avenida Norte Quito Sur (Av K 30) y la diagonal 52BIS, zona donde se encuentran localizadas las instalaciones del Servicio Geológico Colombiano como se muestra en la Figura 1.

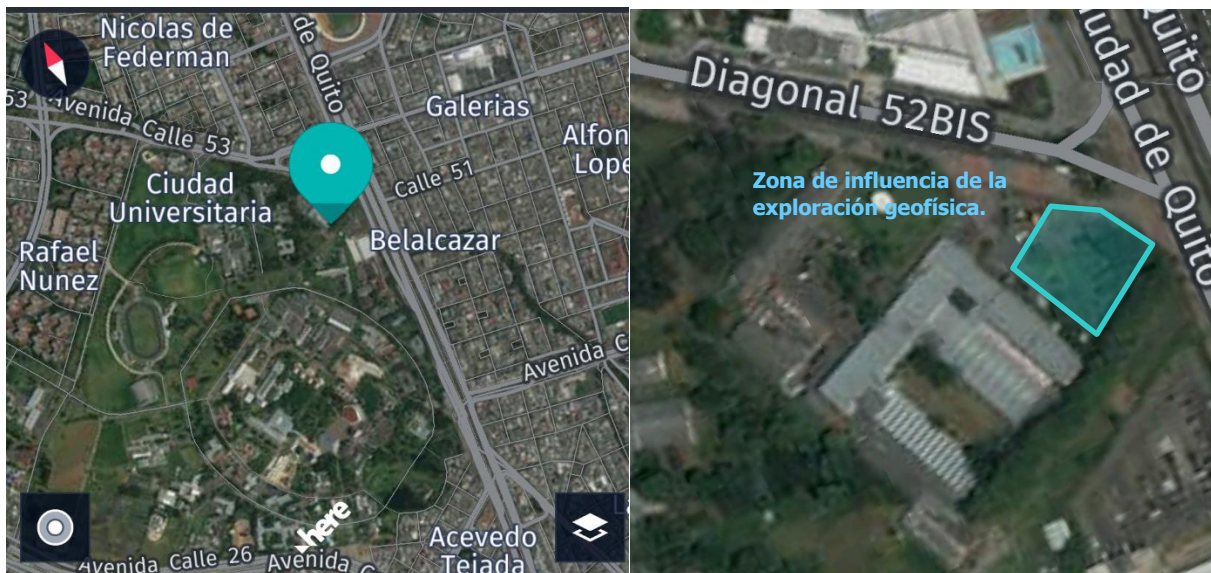


Figura 1. Localización de la zona de estudio en la ciudad de Valledupar. Here Maps 2017

3. PROGRAMA DE EXPLORACIÓN

La campaña de exploración realizada en este proyecto consiste en la realización de:

- Un arreglo espacial triangular para la medición de microtremores con aperturas de 40m, 20m, 10m y 5m para la estimación del modelo de velocidad de onda S, ubicado en el jardín anexo a la entrada vehicular de la diagonal 52Bis como se muestra en la Figura 2.
- una línea sísmica tipo MASW con extensión de 46 m con separación de canales cada 2m y separación fuente-primer canal de 8 m y un arreglo espacial triangular con aperturas de 15m, 7.5m, 3.25m y 1,6m como se muestra en la Figura 3.



Figura 2. Implantación de las líneas sísmicas para la ejecución del programa de exploración geofísica. Google Inc.



Figura 3. Implantación de las líneas sísmicas para la ejecución del programa de exploración geofísica. Google Inc.

3.1. Equipo empleado

El equipo de exploración sísmica está compuesto por:

- **Sismógrafo** marca Geometrics tipo Geode 3000 (1 Unidad de procesamiento).
- **Geófonos o receptores** marca Geometrics de frecuencia resonante igual a 4.5Hz (24 Unidades).
- **Línea o Cable de adquisición** marca Geometrics de 120m de longitud (2 Unidades)
- **Batería de 12 V** (1 Fuente de Poder).
- **Martillo de acero de 15 lb** y placa de acero de 5cm de espesor
- **Computador portátil** para visualización de datos y control del montaje experimental (1 Unidad de almacenamiento).
- **Herramienta menor**

4. ADQUISICIÓN DE DATOS

Como aspecto general durante la adquisición de datos no se emplearon filtros especiales ni se emplearon ganancias generales ni particulares para los geófonos empleados.

4.1. Ensayo de microtemores tipo SPAC

Para este ensayo se emplearon los parámetros de adquisición presentados en la Tabla 1

Tabla 1 Parámetros de adquisición de los registros para el ensayo SPAC

DESCRIPCIÓN	VALOR
Separación máx entre vertices L (m)	40
Relación de Separación entre anillos	2
Intervalo de muestreo (ms)	4
Longitud registro sísmico (s)	240
Número de registros adquiridos	4

4.2. Línea tipo Refracción Sísmica

Con el montaje diseñado para la medición de tiempos de arribo de la onda P generada por una fuente impulsiva se ejecutaron 2 tipos de ensayos sísmicos; ensayo de refracción sísmica y ensayo MASW complementado con medición de microtemores.

4.2.1. Ensayo de refracción sísmica

Para la ejecución del ensayo refracción sísmica se adquirieron registros sísmicos con las especificaciones mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de adquisición de los registros para el ensayo de Refracción Sísmica

DESCRIPCIÓN	VALOR
Separación entre canales b (m)	2
Longitud de la línea s (m)	54
Intervalo de muestreo (ms)	0.125
Longitud registro sísmico (s)	60
Peso del martillo (lb)	15
Posición del Golpe de inicial (geófono)	24
Número de posiciones para golpes (un)	4

4.2.2. Ensayo MASW + MICROTREMORES

Para la ejecución del ensayo MASW se adquirieron registros sísmicos con las siguientes especificaciones mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de adquisición de los registros para el ensayo MASW complementado con medición de microtemores

DESCRIPCIÓN	VALOR
Separación entre canales b (m)	2
Longitud de la línea s (m)	48
Intervalo de muestreo (ms)	0.125 – 4 ^b
Longitud registro sísmico (s)	1 – 240 ^b

Peso del martillo (lb)	15
------------------------	----

^b Adquisición utilizada en medición de microtemores para arreglo lineal.

4.3. Ensayo de microtemores tipo SPAC

Para este ensayo se emplearon los parámetros de adquisición presentados en la Tabla 1

Tabla 4 Parámetros de adquisición de los registros para el ensayo SPAC

DESCRIPCIÓN	VALOR
Separación máx entre vertices L (m)	15
Relación de Separación entre anillos	2
Intervalo de muestreo (ms)	4
Longitud registro sísmico (s)	240
Número de registros adquiridos	4

4.4. Adecuación del terreno

Debido a las condiciones del sitio de estudio no fue necesario la remoción de parte de la capa vegetal para la implantación los geófonos.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Ensayo SPAC

A partir del cálculo de las correlaciones entre estaciones en las que se basa el método SPAC (Aki, 1957) se estimó la curva de dispersión para la zona de estudio y fue esta utilizada como vector de observaciones en el proceso de inversión.

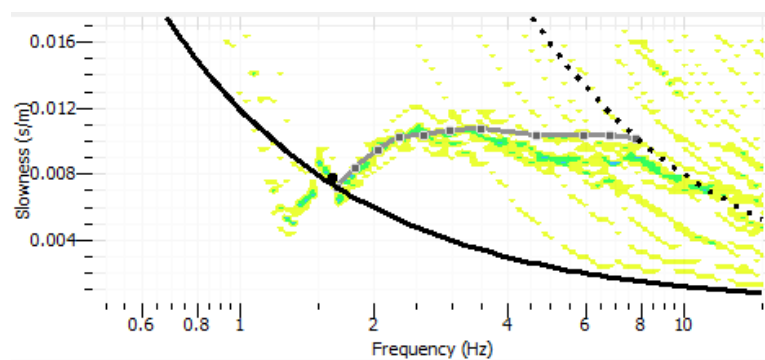


Figura 4. Curva de dispersión obtenida a partir de las correlaciones de la metodología SPAC.

Para la parametrización inicial de los modelos V_p y V_s de la curva de dispersión se definió como velocidad máxima de onda P el valor de 1400 m/s y como velocidad mínima de 500 m/s, el intervalo de búsqueda de la relación de Poisson se estableció en 0.35 a 0.48. Como característica especial se empleó el perfil de densidad encontrado en el estudio de suelos para realizar la inversión de los datos empleando el software *dinver* del paquete *Geopsy* (Wathelet, 2008). Los resultados se presentan en la Figura 5, fijándose como máxima profundidad de exploración 70m.

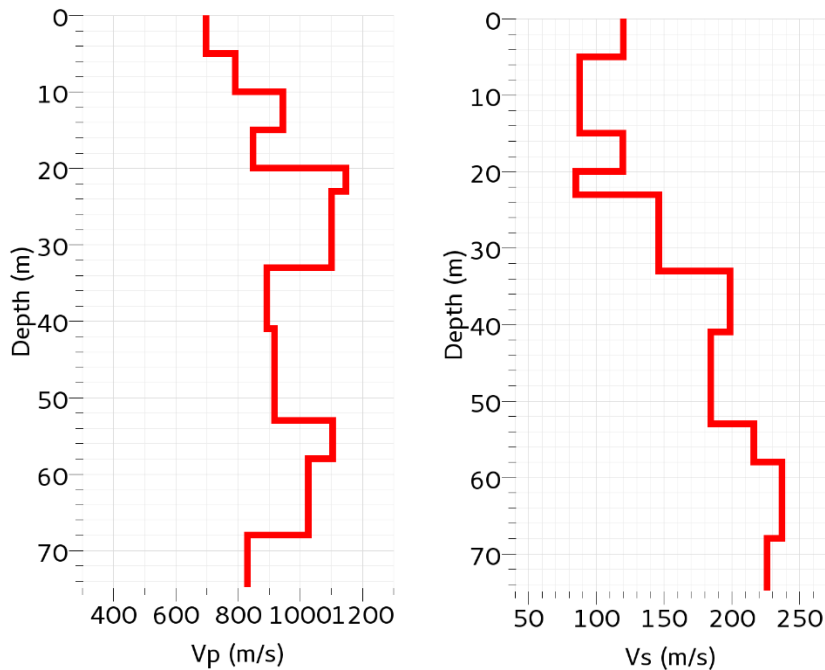


Figura 5. Modelo de velocidad de onda S obtenido de la inversión para el método SPAC.

La Tabla 5 resume los valores de velocidades mostrados en la figura anterior:

Tabla 5. Modelo de velocidad de onda P y onda S obtenido de la inversión de la curva de dispersión.

Espesor (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
5	698.2	120.0
10	792.4	87.9
5	849.4	119.7
3.0	1,146.5	85.0
10.0	1,101.5	146.3
8.0	893.9	199.0
2.4	918.3	184.4
2.4	918.3	184.4
2.4	918.3	184.4
2.4	918.3	184.4
2.4	918.3	184.4
5.0	1,104.8	216.4
10.0	1,026.1	237.5
INF	831.8	226.2
Vs30 (m/s)		111.9
Vs50 (m/s)		141.5

5.2. Ensayo de Refracción Sísmica.

5.2.1.1. Proceso de filtrado

Durante la ejecución del ensayo se registró una componente de ruido importante ocasionada por el tráfico de la vía que se encuentra al costado sur de la zona de estudio, para mitigar el efecto de estos sobre los primeros arribos de la onda p se empleó un filtro pasa banda tipo Butterworth High pass 5Hz - low slope (dB/Oct) 18.

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos de la inversión de las curvas tiempo distancia empleando el método de la tomografía sísmica. Este modelo puede explicarse como un modelo sencillo de 3 capas planas horizontales; la primera capa corresponde a un material no consolidado en estado de saturación que sostiene la cobertura vegetal, posiblemente asociado a materiales finos tipo arcilla con presencia de pequeños fragmentos de roca hacia la zona más occidental de la zona de estudio. Para esta capa los valores de velocidad se encuentran cercanos a los 500 m/s. La siguiente capa corresponde posiblemente a una capa de arcilla o limo con un grado de saturación entre el 90% y 95%, dentro de esta capa se encuentra la posición del nivel freático, estimada para este caso alrededor de los 3 o 4 m de profundidad. Finalmente, se presenta una capa que puede representar materiales arcillosos o limosos completamente saturados.

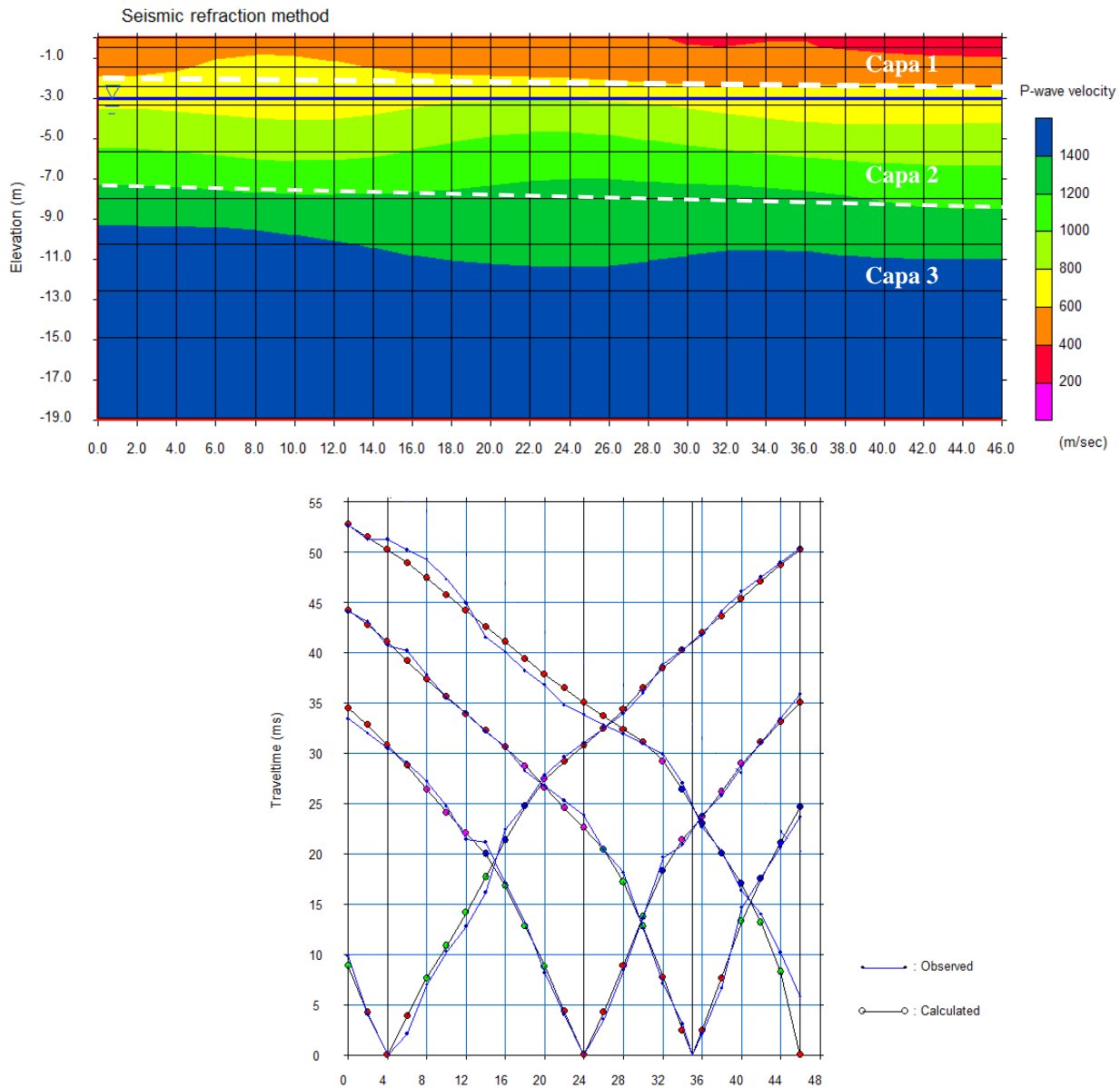


Figura 6_ Modelo de velocidad de onda P para la zona de estudio. La posición del nivel freático estimada para este sitio se encuentra entre los 3 y 4m en el momento de realizar la adquisición de los datos.

5.3. Ensayos de ondas superficiales MASW y SPAC

A partir del cálculo de las correlaciones entre estaciones en las que se basa el método SPAC (Aki, 1957) se estimó la curva de dispersión para los arreglos lineal y espacial realizados en la zona de estudio y además se empleó el método F-K en el arreglo lineal para medición de microtremores disponibles en el software GEOPSY. Para el método MASW se empleó el método SPACE - SHIFT y el método F-K en arreglo lineal para el cálculo de la curva de dispersión.

La Figura 7 muestra la curva de dispersión obtenida por medio de la metodología SPAC (línea negra) para el arreglo espacial sobre la figura del método FK en el arreglo lineal empleado en el ensayo MASW (línea blanca punteada). Se observa una buena correspondencia entre las dos metodologías teniendo presente que para mediciones de microtremores en arreglos lineales no es posible tomar como curva de dispersión el valor máximo de amplitud encontrado, sino que es necesario reducirlo para evitar sesgos causados por el arribo de ondas superficiales con incidencia perpendicular u oblicua sobre el arreglo. Para la realización de la inversión se utiliza la curva obtenida por la metodología SPAC

Shot at (56, 0, 0), time=2017-01-06 00:00:00

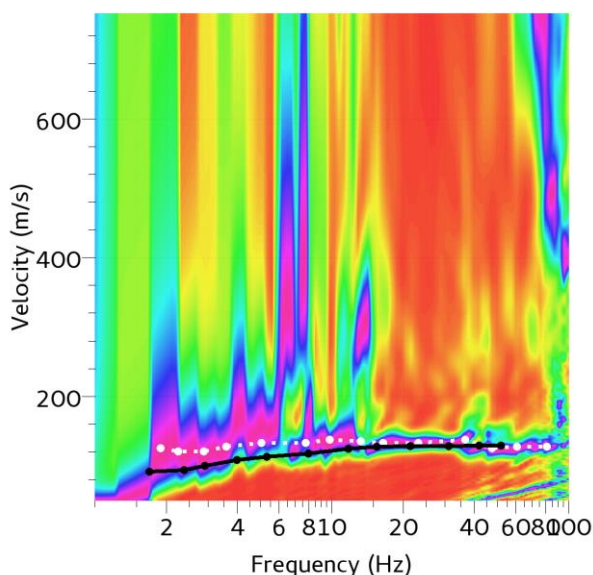


Figura 7. Curva de dispersión obtenida a partir de las correlaciones de la metodología SPAC sobre la Figura obtenida por la metodología FK.

En la parametrización empleada para la obtención de los modelos V_p y V_s de la curva de dispersión define como velocidad máxima de onda P igual a los 1400 m/s y como velocidad mínima se fijan los 500 m/s. Se emplea una densidad media del depósito de 1500 kg/m^3 para realizar la inversión de los datos cuyos resultados se presenta en la Figura 5. Se fija como máxima profundidad de exploración 60m.

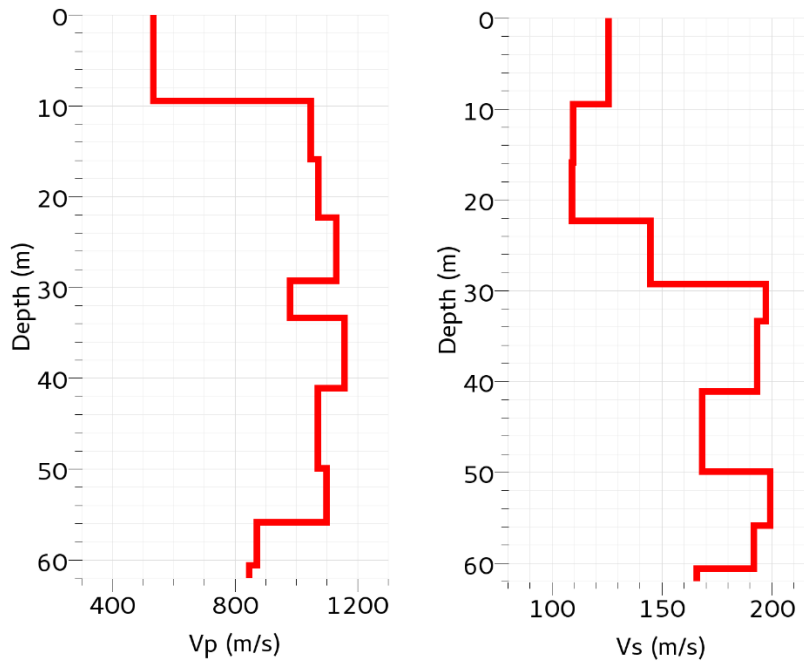


Figura 8. Modelo de velocidad de onda S obtenido de la inversión para el método SPAC.

La Tabla 5 resume los valores de velocidades mostrados en la figura anterior:

Tabla 6. Modelo de velocidad de onda P y onda S obtenido de la inversión de la curva de dispersión.

Esesor (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
5.0	534.1	125.0
10.0	1047.8	109.6
6.4	1073.3	109.1
7.0	1130.5	145.0
4.1	980.9	197.2
7.7	1158.0	193.3
8.9	1070.1	168.4
5.9	1099.3	199.4
4.7	872.7	191.8
5.0	847.7	165.8
7.1	932.2	193.2
0.0	1094.9	133.6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del ensayo de refracción sísmica se establece que la posición del nivel freático en la zona de estudio se encuentra entre los 2 y 3 metros separando materiales parcialmente saturados de los que se encuentran en un estado de saturación total. Los valores de velocidad encontrados en la parte superior sugieren la presencia de materiales finos tipo arcilla de consistencia media. Debajo del nivel freático se pueden correlacionar materiales finos tipo arcilla de consistencia blanda.

El perfil de velocidad de ondas obtenido bajo el bloque 1 se caracteriza por la presencia de intercalaciones de capas de diferentes propiedades pero que presenta una tendencia de aumento de las velocidades conforme se avanza en profundidad. La capa localizada entre los 0 y 6 metros de profundidad aproximadamente puede relacionarse con la arcilla sobre consolidada que se encuentra en el campus de la Universidad Nacional, seguida por una capa que puede relacionarse con material fino tipo arcilla de consistencia blanda (valores de velocidad menor a 100m/s), la caída de velocidad que se encuentra alrededor de los 19 a 20 metros de profundidad posiblemente obedezca a la presencia de turbas o materiales orgánicos característicos de las zonas lacustres de la ciudad Bogotá. Por último, las capas de más alta velocidad, encontradas alrededor de los 33 a 34 metros y entre los 55 a 60 metros de profundidad pueden corresponder a lentes de arenosos o materiales finos con un importante contenido de arena.

El perfil de velocidad de ondas obtenido bajo el bloque 3, presenta una tendencia de aumento de las velocidades conforme se avanza en profundidad. La capa localizada entre los 0 y 10 metros de profundidad aproximadamente puede relacionarse con la arcilla sobre consolidada que se encuentra en el campus de la Universidad Nacional, seguida por una capa que puede relacionarse con material fino tipo arcilla de consistencia blanda (valores de velocidad cercanos a 100m/s). Particularmente en este perfil no se registran caídas de velocidad alrededor de los 20 m, profundidad habitual donde se presentan turbas en el campus universitario. El aumento de velocidad presente cerca de los 30 metros hasta los 33 metros puede estar relacionado con un estrato de arena o un material con un contenido de arena importante de la misma forma que el estrato presente alrededor de los 50 metros. Entre estas dos capas (alrededor de los 40 metros) se puede presentar la intercalación con un material arcilloso de consistencia media.

Hay que tener presente que los perfiles de velocidad obtenidos tienen un grado de incertidumbre asociado a las suposiciones de la técnica empleada y sumado a las características de los suelos propios del sitio, por lo que debe ser considerado al momento de establecer las profundidades de los contactos litológicos, niveles freáticos, etc. Las velocidades aparentes, en especial los contrastes de estas, pueden emplearse para la identificación de materiales y asignación de un carácter geológico siempre y cuando se empleen estos junto con técnicas de exploración directa como perforaciones mecánicas o apiques. La asociación de materiales realizada en este informe sirve como guía y apoyo para el profesional en Geología o Geotecnia a quien llegue este informe, y será este el que tenga la última palabra a la hora de establecer qué tipo de materiales componen el subsuelo con base en la información recopilada en el estudio.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aki, K. (1957). *Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors*. Bulletin of the earthquake Research Institute, University of Tokio, Vol 35, 412-457.
- Bhudu M. (2007) *Soil Mechanics and Foundations*. 2nd Edition, John Wiley & Son, Inc
- Bourbié T., Coussy O., Zinszner B. (1987). *Acoustics of Porous Media*, Institut français du pétrole publications, Gulf Publishing Company, Book Division.
- Geometrics Inc. (2011) *Seisimager Reference Manual V 3.3*. Geometrics Inc.
- Ikouo CHO, T. T. (2006). *new methods of microtremor exploration: the new methods of microtremor exploration: the method*. Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion Grenoble, France, 1-10.
- Lippus C. (2007) *Fundamentals of Seismic Refraction: Theory, Acquisition, and Interpretation*. Short Course Geometrics Inc.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Desarrollo, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS (2010). *Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes - NSR 10*. Colombia
- Park C., Miller R., Xia J., (1999). *Multichannel analysis of surface waves*, *Geophysics*, vol. 64, no. 3 (may-june 1999); p. 800-808.
- Park Seismic LLC. *Página web: <http://www.masw.com/> [Online 6 de Febrero de 2016]*
- Wathelet, M., Jongmans . D., and Ohrnberger, M. (2004). *Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements*, *Near Surface Geophysics* **2**, p. 211-221.
- Wathelet, M. (2008). *An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling*. *Geophysical Research Letters*, **35**, L09301.