

CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO A PARTIR DE DATOS GEOFÍSICOS EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Andrés Felipe Armero-Santander¹; Joselito Sibó-Albarracín¹; Jhonnathan Alexis García-Beltrán¹

Forma de citar: Armero-Santander, A.F., Sibó-Albarracín, J., García-Beltrán, J.A. 2017. Caracterización del subsuelo a partir de datos geofísicos en el campus de la Universidad de Pamplona

RESUMEN

La Universidad de Pamplona se encuentra ubicada en el municipio de Pamplona, Norte de Santander en el interior de sus instalaciones existen zonas de las cuales no se tiene información georreferenciada del terreno, ni de sus propiedades geotécnicas y geofísicas. El presente estudio se realizó con el fin de conocer las características capa somera del terreno existente en la zona de ladera de la parte anterior del laboratorio de morfología, por lo cual se realizaron ensayos como levantamiento topográfico, ensayo de refracción sísmica, MASW y resistividad eléctrica. Los datos de refracción sísmica y MASW se obtuvieron a través del software Seismidaq v3; para la adquisición de los datos de resistividad eléctrica se realizó a través del Terrameter LS 04-064-250. Donde se obtienen velocidades de onda p entre 926-2069 m/s, velocidades de onda s en el rango de 163-292 m/s con un total de seis capas y resistividades eléctricas de los materiales de 164-893 Ohm-m para zonas de alta resistividad, clasificando el subsuelo con respecto al Decreto 926 de 2010 se obtienen dos tipos de perfiles suelo E y D, con las velocidades de onda P se obtiene parámetros dinámicos del suelo como la capacidad portante última y admisible, módulo de rigidez, coeficiente de Poisson, módulo elástico y ángulo de fricción, con los resultados obtenidos se concluye que en la zona se presenta una capa de material superficial meteorizado en la parte superior y un depósito coluvial de matriz arcillosa en la parte inferior. Finalmente se relaciona el gráfico de aceleración espectral para el tipo de suelo identificado y la gráfica de los diferentes estratos de suelo presentes en la zona de estudio.

Palabras claves: Georreferenciación, geofísica, geotecnia, geoelectrica.

CHARACTERIZATION OF THE SUBSUELO FROM GEOPHYSICAL DATA IN THE CAMPUS OF THE UNIVERSITY OF PAMPLONA ABSTRACT

The University of Pamplona is located in the municipality of Pamplona, Norte de Santander. Inside its facilities there are areas of which there is no georeferenced information about the land, nor its geotechnical and geophysical properties. The present study was carried out in order to know the characteristics of the shallow layer of the terrain existing in the hillside area of the anterior part of the morphology laboratory, for which tests such as topographic survey, seismic refraction test, MASW and electrical resistivity were carried out. The data of seismic refraction and MASW were obtained through the software Seismidaq v3; for the acquisition of the electrical resistivity data was performed through the Terrameter LS 04-064-250. Where p-wave velocities are obtained between 960-2400 m / s, wave velocities s in the range of 163-292 m / s with a total of six layers and electrical resistivities of materials of 164-893 Ohm-m for zones of high resistivity, classifying the subsoil with respect to Decree 926 of 2010, two types of soil profiles E and D are obtained, with P-wave velocities, dynamic soil parameters are obtained as the ultimate and admissible bearing capacity, modulus of stiffness, coefficient of Poisson, elastic modulus and angle of friction, with the obtained results of it concludes that in the zone a layer of weathered surface material is presented in the upper part and a colluvial deposit of clay matrix in the lower part. Finally, the spectral acceleration graph is related to the soil type identified and the graph of the different soil strata present in the study area.

Keywords: Georeferencing, geophysics, geotechnics, geoelectricity.

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Pamplona; Norte de Santander, Colombia. (*) andresarmero2105@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

Con el transcurrir de los años y los avances técnicos y tecnológicos que se han alcanzado en el ámbito geotécnico, se ha observado que la tendencia al desarrollo de análisis de la mecánica de suelos básica o tradicional se basa en análisis estáticos lo cual debe ser complementada con análisis dinámicos, buscando la optimización en el análisis del suelo se hace necesario la implementación de nuevas técnicas las cuales no afecten o deterioren el terreno existente es ahí donde cobran importancia los métodos no invasivos y es donde los métodos geofísicos son los más apropiados puesto que se basan su estudio en el análisis de ondas sísmicas y la diferencia de potencial eléctrico. Previamente en la Universidad de Pamplona se han realizados estudios relacionados donde se efectuaron adquisición y análisis de datos en 5 zonas diferentes, allí se utilizaron métodos de refracción sísmica. De éstos, se determinó un suelo arcilloso predominante en el área de estudio. Con los resultados del trabajo realizado, se llegó a la conclusión que la capacidad portante del suelo no es la adecuada para soportar las cargas a las que se encuentra sometido, por otra parte, se encontraron fallas en el terreno estudiado (Gutiérrez y Buitrago, 2016).

Este estudio se realiza con el fin de conocer las propiedades y características geotécnicas y geofísicas de la capa somera del subsuelo en las laderas de la Universidad de Pamplona, mediante la implementación de métodos geofísicos y geoelectrónicos no invasivos como el Análisis multicanal de ondas superficiales MASW mediante el cual determinamos la velocidad de onda de corte (V_s), El ensayo de refracción sísmica permite determinar la estratigrafía del subsuelo, basándose en el cambio de las propiedades elásticas de los materiales que lo conforman. Este método consiste en la medición de los tiempos de viaje de las ondas compresionales (Ondas P) y el ensayo de resistividad el cual emplean una fuente

artificial de corriente, la cual es introducida en la tierra a través de electrodos. La medición de la diferencia de potencial eléctrico en la vecindad del flujo de corriente así como también la corriente inyectada, hace posible determinar la resistividad aparente del subsuelo.

Los métodos geofísicos, nos han permitido determinar en forma indirecta los espesores, velocidades y las características estratigráficas de los suelos que se encuentran a diferentes profundidades, de esta manera encontrar su valor de velocidad promedio que se relaciona con la Norma Sismo Resistente (Decreto 926, 2010). En el presente estudio se realizó una línea de refracción sísmica de 90 metros, una línea de MASW que alcanzo un total de 22.5 metros y una línea de resistividad eléctrica con un total de 105 metros.

En estos ensayos se optó por realizar líneas más cortas para el buen funcionamiento de los instrumentos y mayor precisión en los datos obtenidos, ya que de acuerdo a la ubicación de la línea de estudio N°3 se encuentran en su final obras civiles.

MARCO GEOLÓGICO

La geología del área de estudio está constituida por unidades geológicas de edad Devónica a Cuaternaria.

Rocas metamórficas de alto y medio grado, pertenecientes al Ortoneis, representan parte del basamento metamórfico del Macizo de Santander que aflora en el área. Sobre este basamento metamórfico descansan discordantemente rocas sedimentarias del Cretáceo correspondientes a las formaciones Tibú-Mercedes y Aguardiente. La Falla de Pamplona representa el accidente tectónico de mayor importancia en el sector estudiado.

La Falla de Pamplona se extiende desde el norte, y al oeste del Municipio de Pamplona, continúa con dirección sur a sur-suroeste, hasta terminar en la Falla de Morro Negro. A lo largo del trazo de esta falla, rocas metamórficas de la Formación Ortoneis en el bloque oriental están en contacto con una faja delgada de rocas sedimentarias del Cretáceo en el bloque occidental. Hacia el sur de Pamplona, esta falla corta al Granito de Durania, y más al sur pone en contacto a este cuerpo intrusivo con la Formación Silgará (Rodríguez y Cantillo, 2006).

Formación Aguardiente: El Miembro Aguardiente se compone casi enteramente de areniscas glauconíticas, muy duras, calcáreas, de color verdoso o grisáceo, de grano fino a grueso y con estratificación cruzada. En los sondeos se ha observado que los 10 m superiores suelen no ser glauconíticos, pero el resto del miembro es rico en glauconita.

Existen interestratificadas algunas capas finas de shale negra, carbonosa y micácea y en la parte inferior se encuentran bien algunas capas finas de caliza. Localmente las areniscas son tan calcáreas que casi son calizas arenosas. El espesor varía entre 148 y 160 m tanto en los sondeos como en la Quebrada de Sta Elena.

El nombre procede del Filo del Aguardiente; allí el Miembro Aguardiente es más grueso que en la Concesión Barco y unos 25 km más al Sur, en el Río Peralonso alcanza los 275 m.

Formación Tibú-Mercedes: El Miembro Tibú es el inferior de los tres miembros (Tibú, Mercedes, Aguardiente) de la división de la Formación Uribante. En la base, el miembro Tibú presenta un banco de arenisca de 5 a 12m con pequeños cantos de cuarzo y que se hace calcárea y más fina hacia el techo. Por encima se encuentra una caliza gris compacta de 95 a 160 m de espesor, con alguna capa de shale y de arenisca hacia su parte baja; los 50 m superiores del Miembro Tibú están formados prácticamente sólo por caliza lo cual da lugar al

carácter neto que tiene el límite superior de este miembro. El espesor total del miembro varía entre 107 y 117 m según datos de los sondeos, pero en la Quebrada de Santa Elena parece alcanzar los 166 m (FIGURA 1).

FIGURA 1

El Miembro Tibú aflora en la cabecera del Río Tibú (en la Concesión Barco), del cual toma su nombre. En la región de la Concesión Barco el Miembro Tibú se apoya discordante sobre el basamento paleozoico; su límite superior es concordante con el Miembro Mercedes; se trata de un límite neto. El Miembro Mercedes está formado por una alternancia de calizas en parte arenosas, areniscas y shales en capas oscilando entre 3 y 20 m. Las shales forman gran parte del tercio inferior del miembro. Las areniscas son grises, de grano fino a medio en parte muy calcáreas y generalmente glauconíticas. Son más abundantes hacia la parte superior.

El límite inferior del Miembro Mercedes es neto ya que la parte alta del Miembro Tibú está formado por 50 m de calizas prácticamente sin intercalaciones lutíticas; el límite superior es gradual. El espesor, de acuerdo con los datos de los sondeos varía entre 149 y 201 m y es de unos 160 m en la Quebrada Santa Elena. El nombre del miembro deriva del Valle Mercedes a lo largo de cuya vertiente W aflora (Ortiz, 2013).

Unidades morfológicas

La geomorfología determinada por Ortiz (2013), identifica las geoformas presentes en el municipio y las agrupa en dos grupos; denudacional con control estructural (s) y de origen fluvial (f).

Las unidades de origen denudacional con control estructural están asociadas a rocas sedimentarias, constituidas por intercalaciones de areniscas, lodolitas y calizas fosilíferas y metamórficas de origen ígneo; entre las que se encuentran las formaciones Aguardiente, Tibú Mercedes, las cuales fueron afectadas por la fuerte tectónica compresiva, enmarcada dentro de la evolución de la cordillera Oriental, lo que generó un fuerte control estructural. En la zona de estudio se ubican la unidad denudacional S10C5NHR.

S10C5NRH: En esta unidad se encuentra depósitos de coluvión de matriz areno arcilloso a areno limosa, los cuales están en contacto con un macizo rocoso fracturado y conformado por rocas calcáreas y areniscas de la Formación Tibú-Mercedes, con pendientes suaves a altas (16° a 30°) a una altura que varía aproximadamente de 2300 a 2600 m.s.n.m., disección moderado con forma recta a un relieve ondulado accidentado. En general se presenta asociados a procesos de remoción de masa con reptación y deslizamientos rotacional retrogresivo, locales. (Ortiz, 2013).

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Universidad de Pamplona se encuentra ubicada en el municipio de Pamplona, Norte de Santander en el kilómetro 1 de la vía Pamplona-Bucaramanga como se observa en la FIGURA 2. La línea de estudio N°3 se encuentra localizada en la parte anterior del laboratorio de morfología la cual comprende una longitud aproximada de 105 m desde el punto inicial hasta su punto final, la cual se puede apreciar en la FIGURA 3.

FIGURA 2

FIGURA 3

LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Para obtener los datos del levantamiento topográfico se realizó la visita y reconocimiento del terreno donde se va a realizar el estudio, con el GPS MAP 64s Garmin se georreferencio la zona de estudio y con la estación total GEOMAX zoom 30 pro (FIGURA 4 A) se obtuvo las coordenadas, alturas y distancias reales de la Línea N°3 (FIGURA 4 B).

Los datos obtenidos fueron procesados en el software AutoCAD Civil 3D 2017 para obtener el perfil longitudinal y la longitud de la línea (FIGURA 5).

FIGURA 4

FIGURA 5

ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)

El Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), es un método no destructivo, se usa para evaluar la velocidad de onda de corte (V_s). Este método analiza las propiedades de dispersión de los modos fundamentales de las ondas Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie desde el punto de impacto a los receptores (Park *et al.*, 1999).

Las ondas superficiales son ondas que viajan sobre la superficie y las interfaces de la tierra, desplazándose a menor velocidad que las ondas de corte V_s . De estas ondas hay dos tipos: ondas Rayleigh y ondas Love. Las ondas superficiales tienen la característica de que cambian de forma mientras viajan, debido a que las diferentes componentes de las frecuencias que las constituyen se propagan a diferentes velocidades, lo cual se conoce como dispersión de onda. Los patrones de dispersión son indicativos de la estructura de velocidad a través del cual viaja la onda (Casalena, 2011).

MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA

Es un método de prospección general, especialmente adaptado para trabajos de Ingeniería Civil. Se utiliza para la medición de espesores de recubrimiento, profundidad de nivel freático, prospección petrolera y en la realización estudios hidrogeológicos. Este método permite la localización (profundidad del sustrato), posición del acuífero bajo ciertas condiciones, así como la caracterización de suelos.

Las leyes que rigen la propagación y la trayectoria de las ondas sísmicas en la refracción, son las mismas que se utilizan en óptica: Principio de Huygens, Principio de Fermat, Ley de Snell. Como consecuencia del Principio de Huygens y del principio de Fermat, la ley de Refracción dice que el seno del ángulo incidente es al seno del ángulo de refracción como la velocidad de la onda incidente es a la velocidad de la correspondiente onda refractada (López *et al*, 2008).

TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La tomografía eléctrica es un método prospectivo, geoelectrico no destructivo que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico, diferenciándola de la resistividad eléctrica; propiedad de los materiales que indica su grado de oposición a conducir la corriente eléctrica; La resistividad de las rocas va a depender de su naturaleza y composición, además de factores como la porosidad, disposición geométrica de los poros, proporción de poros rellenos de agua frente a huecos secos y la resistividad del agua. Por lo tanto, su textura más o menos alterada y el contenido en fluidos de sus poros o fracturas condicionan la concentración de iones; cuya mayor movilidad tiene como consecuencia una menor resistividad o lo que es lo mismo, una mayor conductividad (Orellana, 1982).

METODOLOGIA

Refracción sísmica

En el trabajo de campo para el ensayo de refracción sísmica primero se define la línea de inspección, para este ensayo en particular se optó una longitud total 90 metros en la cual se espera alcanzar una profundidad de 30 m que equivale a un tercio de la longitud de la línea, luego la instalación de los geófonos (10Hz) a una separación de 6 metros y seguidamente se realizó el tendido e instalación de los cable de conexión al equipo de adquisición de datos (seismeX16), posteriormente se dispone a definir los puntos de disparo los cuales se llevan a cabo en los geófonos 1,4,8,12,16 y a una distancia de 6 y 12 metros dicha distancia aplicada a partir del geófono N°1 en una lectura negativa y a partir del geófono N°16, estos disparos se realizaron golpeando una placa de 0,25X0,25 metros con una masetta o maso de 16 libras. De dichos disparos se realizó una lectura por medio del software seismidaq_ v3 con un intervalo de tiempo de 2 ms, una longitud de registro de 0.5 s cada 60 s para cada lectura (FIGURA 6).

FIGURA 6

Para el procesamiento inicialmente se convirtieron los datos obtenidos en campo de formato .LVM a .SGY, posteriormente en el software IXSeg2Segy versión 3.40 se exportaron los datos en formato .Seg2 para en el software Pinkwin versión 4.2.0.0 (Pinck Firts Break or Dispersion Curves) (SeisImager, 2011) poder visualizar la gráfica distancia versus tiempo de los disparos hechos en campo a los cuales se realizaron sus respectivos picados en sus primeros arribos. Al terminar los picados los abrimos en el software Plotrefa versión 2.9.1.9 (Refraction Analysis) (SeisImager/2D, 2010) donde observamos los arribos obtenidos en una gráfica de distancia

versus tiempo, a los cuales les asignamos capas de acuerdo a los cambios de pendiente en este caso se seleccionaron 3 capas (FIGURA 7). Al cual le aplicamos el método Time-Term de inversión para observar las 3 capas con sus respectivas velocidades (FIGURA 8) que genero un error de 1.37 ms al ingresar la topografía del terreno. Al modelo anterior se le genero un modelo inicial al cual le realizamos una inversión con parámetros predeterminados que nos muestra el comportamiento de las diferentes velocidades de onda P (FIGURA 9). Al finalizar se realizó una comparación entre el dato observado y el dato calculado por el software, el cual genero un error de 2.59 ms el cual se encuentra dentro del rango permitido por el manual de usuario que lo califica como un procesamiento optimo (FIGURA 10).

FIGURA 7

FIGURA 8

FIGURA 9

FIGURA 10

Análisis multicanal de ondas superficiales

En el ensayo de MASW la línea de inspección es de menor longitud (22,5 metros) del cual se espera alcanzar una profundidad del 50% de la longitud de la línea (11.25 m), la instalación de los geófonos (10Hz) se realizó a una separación de 1,5 metros (FIGURA 11 A), el equipo de adquisición de datos fue seismeX16, posteriormente se dispone a definir los puntos de disparo los cuales se realizan al 10%, 30% y 40% de la longitud total de la línea sísmica dicha distancia aplica a partir del geófono N°16, estos disparos se realizaron golpeando una placa de 0,25X0,25 metros con una masetta o maso de 16 libras (FIGURA 11 B) de dichos disparos se

realizó una lectura por medio del software seismidaq_ v3 en un intervalo de tiempo de 0.25 ms, una longitud de registro 1 s cada 60 s.

FIGURA 11

En el procesamiento de datos se convirtieron los datos obtenidos en campo de .LVM a .SEG2 igual que en el método de refracción sísmica, con el software Pinkwin versión 4.2.0.0 (Pinck Firts Break or Dispersion Curves) (SeisImager, 2011) se visualizó la gráfica distancia versus tiempo de la ondas S a una distancia de disparo de 24.75 m (FIGURA 12) y se realizó la transformada de fase de velocidad-frecuencia en donde se realizó un picado en puntos rojos por la curva de dispersión (FIGURA 13)

FIGURA 12

FIGURA 13

Al tener realizado el picado se importó este archivo al software WaveEq versión 2.4.0.7 (Surface Wave Analysuus) (SeisImager, 2011), donde observamos la curva de velocidad de fase (FIGURA 14). Con el cual se generó el modelo inicial en 1D, que nos muestra la profundidad y número de capas facilitando su visualización y una aproximación al comportamiento del suelo. Después se creó el modelo invertido con 10 interacciones generando un error entre 6.9 – 1.7 por ciento en el que se obtiene un modelo final del comportamiento de las ondas S en las capas del subsuelo y sus velocidades aparentes (FIGURA 15) para establecer la incertidumbre del modelo.

FIGURA 14

FIGURA 15

Tomografía de resistividad eléctrica

Para esta práctica se utilizó el equipo Terrameter LS de 41 electrodos (FIGURA 16 A) los cuales se colocaron a un espaciamiento de 2.6 m para una distancia total de 105m (FIGURA 16 B) del cual se espera alcanzar una profundidad de 21 m (equivalente al 20 % de la longitud de la línea), se trabajó un arreglo de tipo gradiente, la corriente del transmisor mínima se configuro de 1- 1000 Amperios.

FIGURA 16

Para el procesamiento de los datos primero en Notepad se eliminó los valores de cargabilidad menores a 0.1 mV/V y se le agrego la topografía de la línea al archivo. La tomografía de resistividad eléctrica se realizó con el software Res2dinvx64, en cual para obtener los datos de buena calidad se eliminaron los puntos malos (FIGURA 17) y se configura los parámetros de inversión que se observan en la TABLA 1, al realizar la primera inversión se recomienda eliminar los puntos que estén por fuera del 20 por ciento del error cuadrático medio de las resistividades aparentes (FIGURA 18), realizamos una nueva inversión para visualizar la pseudosección de resistividad aparente medida (FIGURA 19 A), calculada (FIGURA 19 B) y la sección de resistividad del modelo inverso (FIGURA 19 C), visualizando el perfil longitudinal con las resistividades reales (FIGURA 20).

FIGURA 17

TABLA 1

FIGURA 18

FIGURA 19

FIGURA 20

RESULTADOS OBTENIDOS

Mediante la inversión por tomografía sísmica en el método de refracción sísmica se observa una variación de las velocidades de onda P entre 926-2177 m/s en una profundidad máxima aproximada de 19 m. En el ensayo de MASW las velocidades de onda S oscilan entre 163-272 m/s generando un error aceptable de 1.7 % donde se observan 6 capas de suelo a 7.4 metros con una buena incertidumbre (FIGURA 15) visualizando dos perfiles de suelos según la TABLA 2.

TABLA 2

Con las ecuaciones descritas en la TABLA 3 se calcularon los parámetros dinámicos del suelo, donde en la TABLA 4 se utilizaron las velocidades de onda P del método de refracción sísmica.

TABLA 3

TABLA 4

Relacionando los perfiles de suelo obtenidos en la TABLA 2 y con el capítulo A.2 del decreto 926 del 2010 se hallan los periodos aproximados de la estructura y del tipo de terreno (TABLA 5), con los cuales se grafica el espectro de diseño de la posible estructura FIGURA 21.

TABLA 5

FIGURA 21

En el método de tomografía de resistividad eléctrica se obtuvo rangos de resistividades entre 2.35-893 Ohm.m con una profundidad máxima de aproximadamente 20 m (FIGURA 20) y un porcentaje de error óptimo del 3%.

ANALISIS DE RESULTADOS

Según los resultados obtenidos en los resultados con refracción sísmica se identifican dos capas según sus rangos de velocidad de onda P, donde la primera una capa corresponde a material superficial meteorizado el cual se encuentra entre 1-5 metros de espesor con unas velocidades de onda P que varían entre 926-1065 m/s con una capacidad de carga admisible 512-1390.36 KPa, una segunda capa que corresponde al depósito coluvial de matriz arcillosa cuyo espesor varía entre 4-15 m con velocidades entre 1065-2039 m/s con una capacidad de carga que oscila entre 1390.36-2077.68 KPa y a una profundidad aproximada de 19 m se encuentra rocas de edad cretáceo que posiblemente puede ser la base del depósito con una velocidad de onda P de 2177 m/s.

El ensayo de MASW nos arroja 6 capas las cuales presentan unas velocidades que oscilan 163-292 m/s de las cuales clasificando por el decreto 926 del 2010 nos da como resultado dos tipos de perfiles de suelo de los cuales se realizó sus respectivos de espectro elástico de aceleraciones de diseño FIGURA 21 para una posible edificación o estructura con grado de importancia 1 donde se ubican estructuras de ocupación normal (edificaciones inferiores a dos pisos donde no se presente gran presencia de personas).

FIGURA 21

Con los resultados de tomografía tenemos una mejor visión de la presencia de agua y cantos o rocas de pequeños tamaños presente en los horizontes del subsuelo explorado en el cual se puede identificar zonas con presencia de nivel freático entre los 30 - 33 metros de la longitud de la línea debido al aire acondicionado y desagüe de aguas lluvias del anfiteatro las cuales tienden a infiltrarse siguiendo la inclinación del terreno donde se observa una zona con baja resistividad en la cual puede presentarse saturación del terreno y entre los 65 - 67 metros podemos observar la zona donde pasa la quebrada en la cual se presenta una gran infiltración a una profundidad de 7 m y la saturación que se presenta en sus alrededores y en la cual al momento de presentarse precipitaciones en la zona estas se unen con el caudal de la quebrada debido a la inclinación de sus laderas la cual contribuye más en la saturación del terreno debido a que en el momento de la adquisición y días anteriores de los datos hubo precipitación en la zona de estudio. Se puede observar que el peso de la estructura del anfiteatro y la vía principal inciden en la compactación del terreno ya que se observa mayores resistividades a 10 m de profundidad que en el resto de la línea (FIGURA 20).

La equivalencia entre los ensayos anteriormente estudiados se establece como la relación entre ellos donde correlacionando los ensayos de refracción sísmica y resistividad eléctrica en la zona donde se realizó el ensayo de MASW nos brindan una similitud en los resultados a una profundidad de 7 m la cual fue alcanzada con MASW ya que las resistividades (164-382 Ohm.m) y velocidades de onda P(926-2069 m/s) obtenidas en esta zona indican que se presenta una delgada capa de material meteorizado en la parte superior y un depósito coluvial de matriz arcillosa con bloques de arenisca de acuerdo a la geología de la zona de estudio. Con los resultados anteriores generamos un posible perfil de suelo ubicado en la línea de estudio como se observa en la FIGURA 22.

FIGURA 22

CONCLUSIONES

Con los datos obtenidos de los tres ensayos podemos realizar una caracterización del subsuelo que se encuentra en la línea de estudio donde podemos observar dos capas, se concluye que la primera está compuesta por material superficial meteorizado, una segunda capa donde se observa un depósito coluvial de matriz arcillosa y finalmente se localiza roca de edad cretácea que puede pertenecer a la formación Tibú-mercedes y la formación aguardiente. Se caracteriza en base a las diferentes formaciones y falla geológicas presentes en la línea de estudio y sus alrededores las cuales forman depósitos coluviales de diferentes tamaños en toda la zona.

Los perfiles de suelo con los cuales se graficó un espectro para una posible edificación donde estos varían entre un $T_0=0.208$ s, $T_c=1.0$ s, $T_l=7.2$ s para un perfil de suelo tipo E y un $T_0=0.132$ s, $T_c=0.633$ s, $T_l=4.56$ s para un perfil de suelo D con un periodo de $T=0.134$ aproximado de una posible estructura, de acuerdo a los espectros es recomendable al momento de construir una estructura, los cimientos se recomienda a una profundidad mayor de 1.5 m ya que a esta profundidad se encuentran suelos más compactos y cohesivos en el cual se presentan menos asentamientos con menor riesgo de fallas en la estructura.

En el ensayo de resistividad a lo largo de la zona de estudio predominan resistividades de 164-863 Ohm.m, exceptuando la zona de saturación donde está ubicada una quebrada la cual presenta un gradiente hidráulico elevado motivo por el cual se presenta poca infiltración en el terreno, la zona donde están localizados los desagües de los aires acondicionados del laboratorio de morfología conllevan a que se presente resistividades bajas debido a que estos están en funcionamiento gran parte del día por lo cual esta agua se infiltra por el costado de un

bloque de areniscas que está ubicada una profundidad más baja y este presenta poca permeabilidad generando que esta agua se infiltre hacia la zona de ladera.

Con el debido análisis de datos de los datos obtenidos tanto en refracción sísmica como en MASW y resistividad eléctrica donde su velocidad de onda P varía entre 926 a 2069 m/s y la velocidad de onda S varía entre 163 y 292 m/s y su resistiva oscila entre 164 y 893 Ohm.m exceptuando las zona de saturación. Clasificando cada uno de estos parámetros el terreno presente en su mayor parte de extensión presenta una capa de material superficial no meteorizado, un depósito coluvial con matriz arcillosa y bloques de areniscas, estos diferentes tipos de suelos que se hallaron en su mayoría pertenecen a la formación aguardiente que se encuentra ubicada en la ladera de la parte superior de la Universidad de Pamplona la cual está conformada calizas arenosa, areniscas.

AGRADECIMIENTO

Al grupo de investigación en geología y geofísica Pangea de la Universidad de Pamplona, por poner a disposición de la investigación sus instalaciones.

Al Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), a la Universidad Industrial de Santander por el apoyo técnico prestado.

Al director, ingeniero Manuel Antonio Contreras, al director de programa de ingeniería civil Ing. Víctor Hugo Vergel, al Físico Jairo Alberto Torres, al Geólogo Janner Rafael Cantillo por su conocimiento aportado en este proyecto.

REFERENCIAS

Casalena G. Mauro R. 2011. Caracterización geofísica del suelo somero mediante la aplicación del método de refracción por microtemores (ReMi) en la ciudad de Maracay-estado Aragua. Caracas, Venezuela. Trabajo especial de grado. Universidad central de Venezuela, 22-24.

Park C, Miller R, and Jianghai Xia 1999, Multichannel analysis of surface waves, GEOPHYSICS.

Decreto 926, 2010. Requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismo resistentes NSR10, título A, Pag A-21 – A-174.

Gutierrez K. y Buitrago L. 2016. Caracterización geofísica del subsuelo mediante las técnicas de refracción sísmica, MASW, y REMI en depósitos superficiales y zonas críticas de la universidad de pamplona. Trabajo de grado. Universidad de Pamplona. Departamento de ingeniería civil y ambiental, Facultad de ingeniería y arquitectura. Pamplona. Colombia, 130-131.

López J, Mejía J y Vega N, 2008. Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P. San Salvador, El Salvador. Trabajo de grado. Universidad de el Salvador, 40-44.

Orellana E, 1982. Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua. Madrid, España. Paraninfo, pag 20-25. Vol 1.

Ortiz R, 2013. Interpretación geológico estructural de la zona norte de municipio de Pamplona Norte de Santander. Trabajo de grado. Universidad de Pamplona.

Pegan E, Liu H, 2016. Application of near-surface seismic refraction tomography and multichannel analysis of Surface wavws for geotechnical site characterizacions: Acase study, Engineering Geology.

Rodríguez, A. y Cantillo, M. 2006. Caracterización geotecnia de los suelos del campus de la Universidad de Pamplona y los barrios el Buque, Juan XXIII, Santa Marta, Tinto Redondo, Chichira y el Progreso, en el municipio de Pamplona Norte de Santander. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología, Facultad de ingenierías físico-químicas. Bucaramanga Colombia, 82.

SeisImager, Manual, 2011. Pickwin™ v. 4.0.1.5, WaveEq™ v. 2.3.0.8, Plotrefa v. 2.9.1.9

FIGURAS Y TABLAS

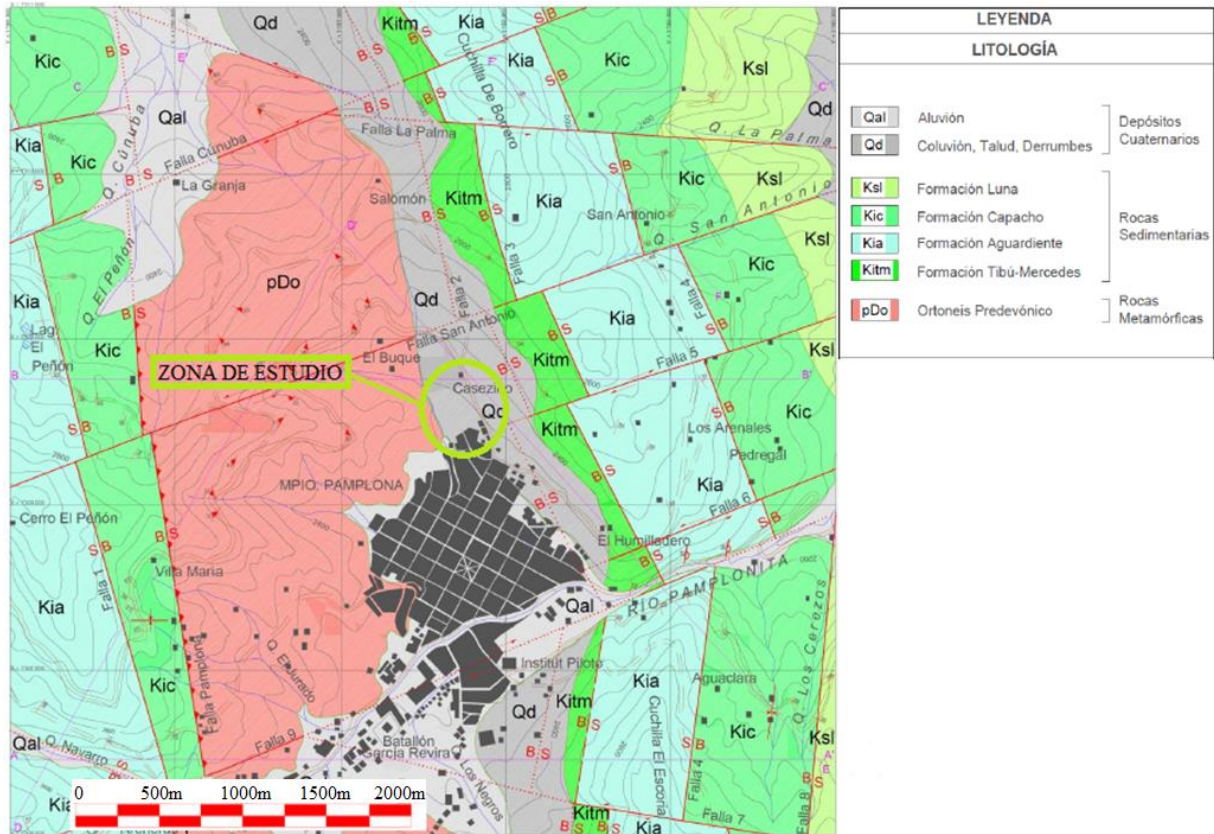


FIGURA 1: Mapa geológico y estructural de la zona norte de Pamplona, con un círculo verde señalada la zona de estudio. Fuente: Ortiz, 2013

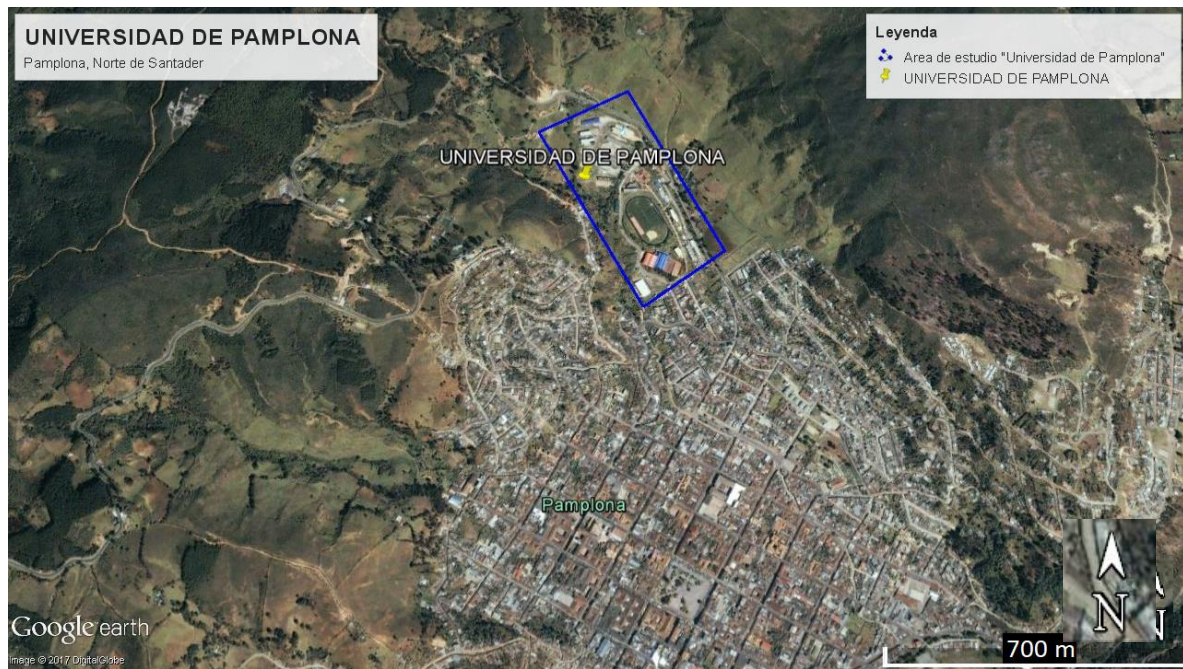


FIGURA 2: Localización geográfica del área de estudio donde el rectángulo azul representa el área de la Universidad de Pamplona. Fuente: Google Earth, 2017

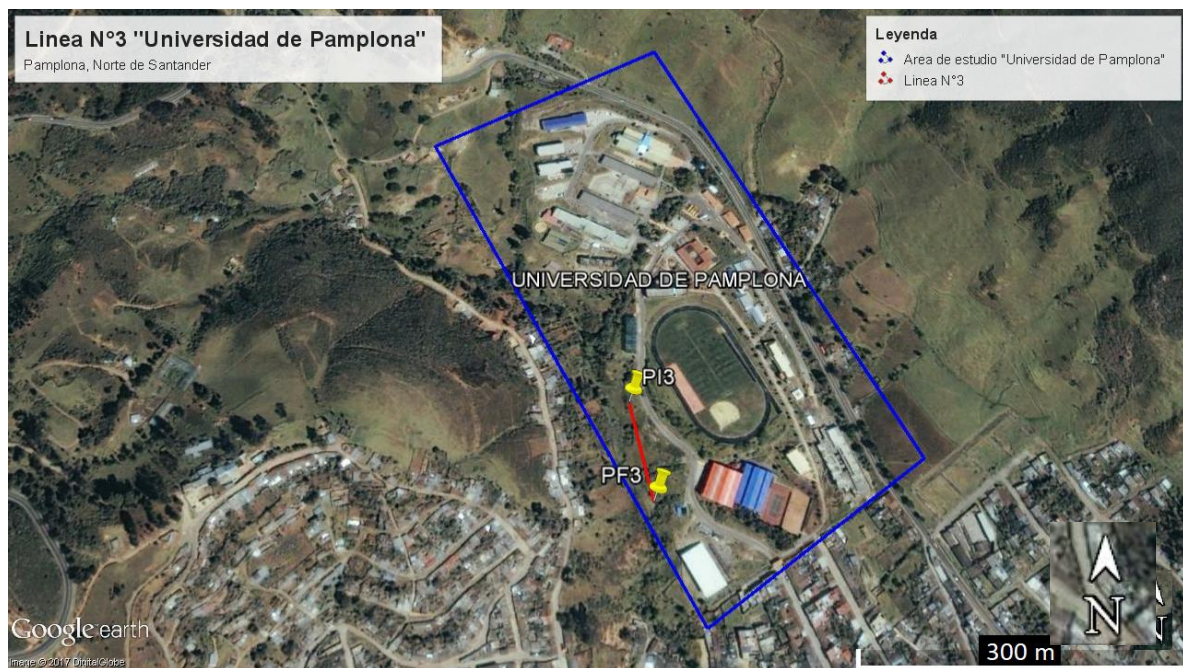


FIGURA 3: Línea de estudio N°3 señalada en rojo dentro del área de estudio. Fuente: Google Earth, 2017



FIGURA 4: levantamiento topográfico. A) Georreferenciación de la Estación Total GEOMAX zoom 30 pro con el GPS MAP 64s Garmin. B) Levantamiento topográfico de la línea de estudio N°3. Fuente: Autores

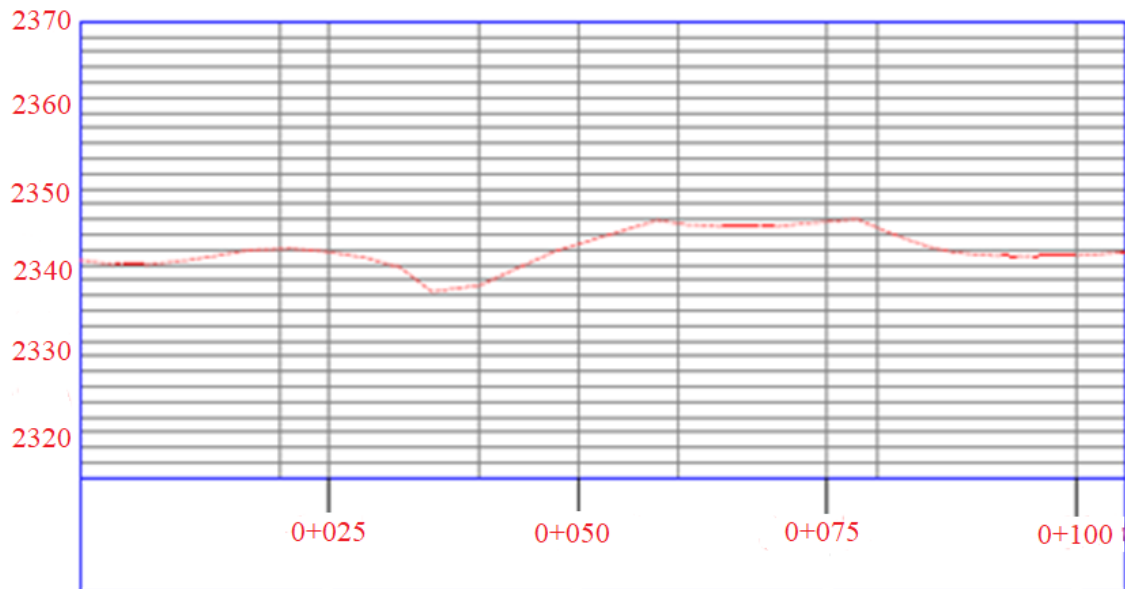


FIGURA 5: Perfil longitudinal de la línea N°3 de la Universidad de Pamplona. Fuente: Autores



FIGURA 6: Adquisición de datos refracción sísmica. A) Sismógrafo conectado a un ordenador para la adquisición de los datos. B) Tendido de adquisición de Refracción sísmica. Fuente: Autor.

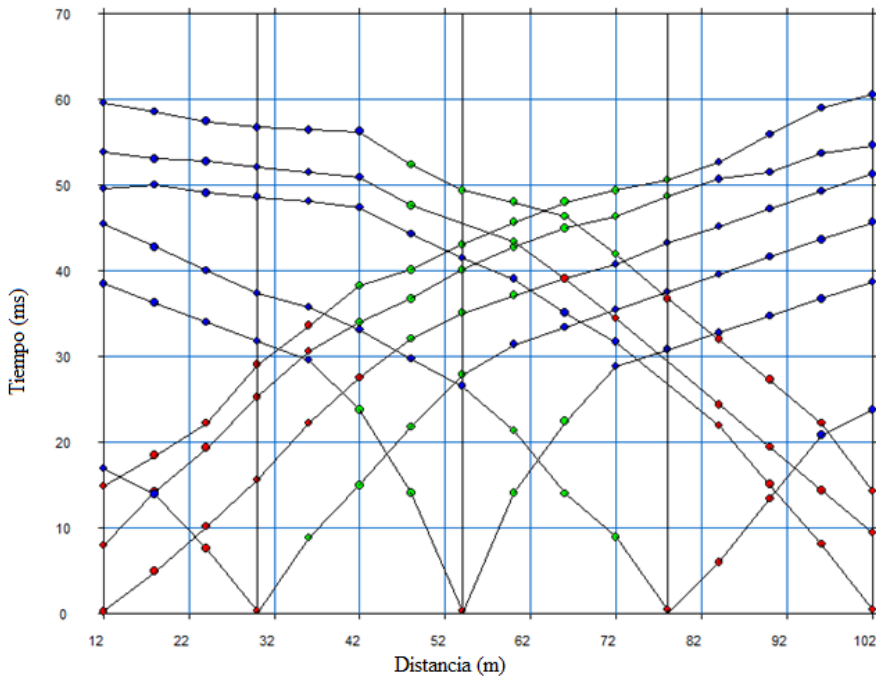


FIGURA 7: Datos crudos con los picados de los primeros arribos de todas fuentes con una asignación de dos capas identificadas con los colores rojo y verde. Fuente: Autores.

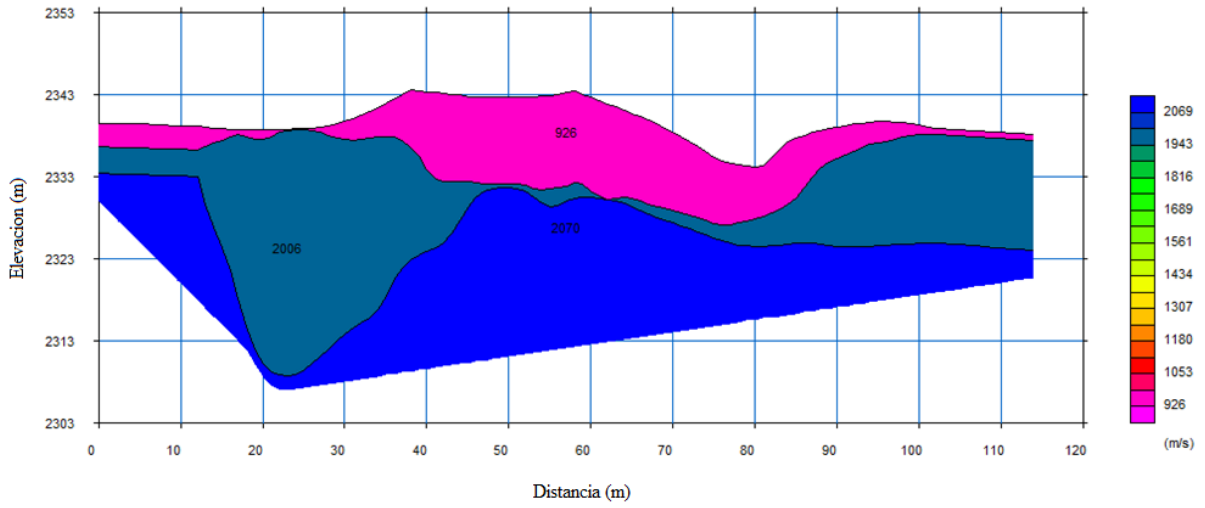


FIGURA 8: Modelo preliminar de inversión, con velocidades promedio en cada capa establecida. Fuente: Autores.

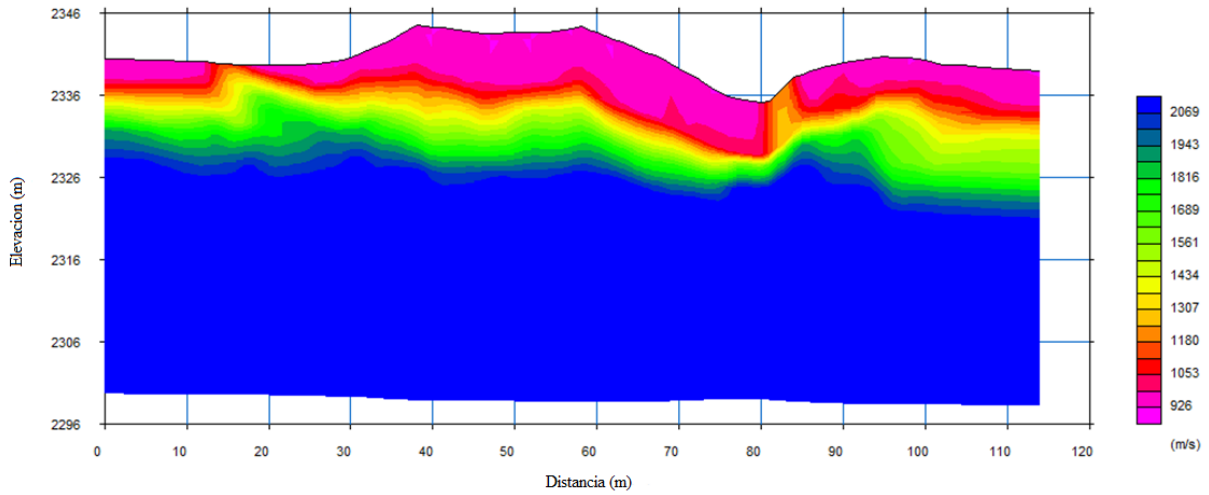


FIGURA 9: Modelo inversión por Tomografía Sísmica. Fuente: Autores

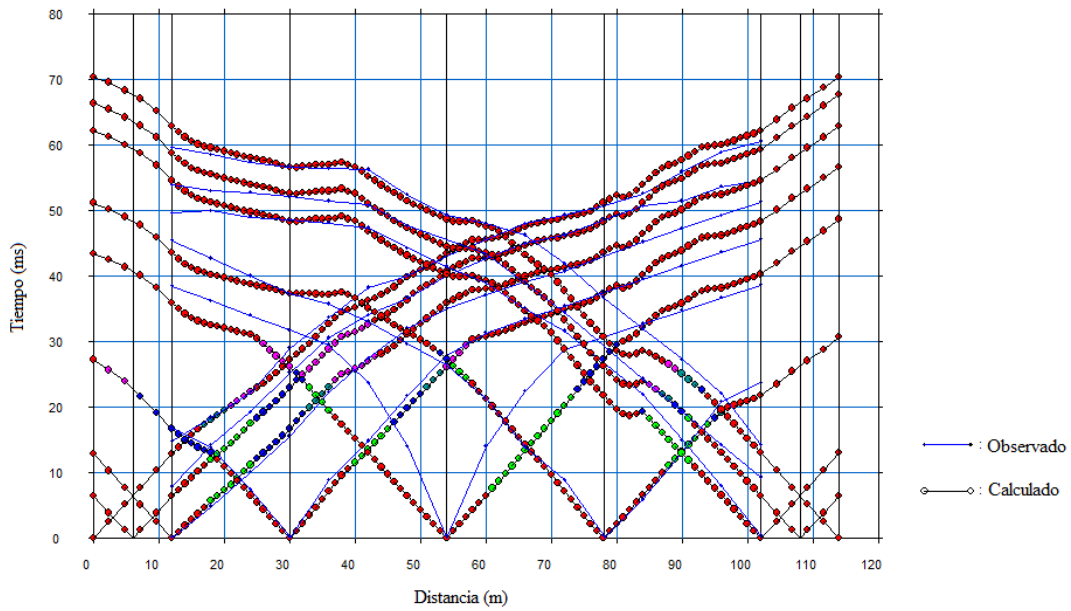


FIGURA 10: Curva de tiempo observado versus tiempo calculado para determinar el error del procedimiento. Fuente: Autores.



FIGURA 11: Adquisición de datos MASW. A) Tendido de adquisición de MASW. B) Disparos generados con maso de 16 lb. Fuente: Autor.

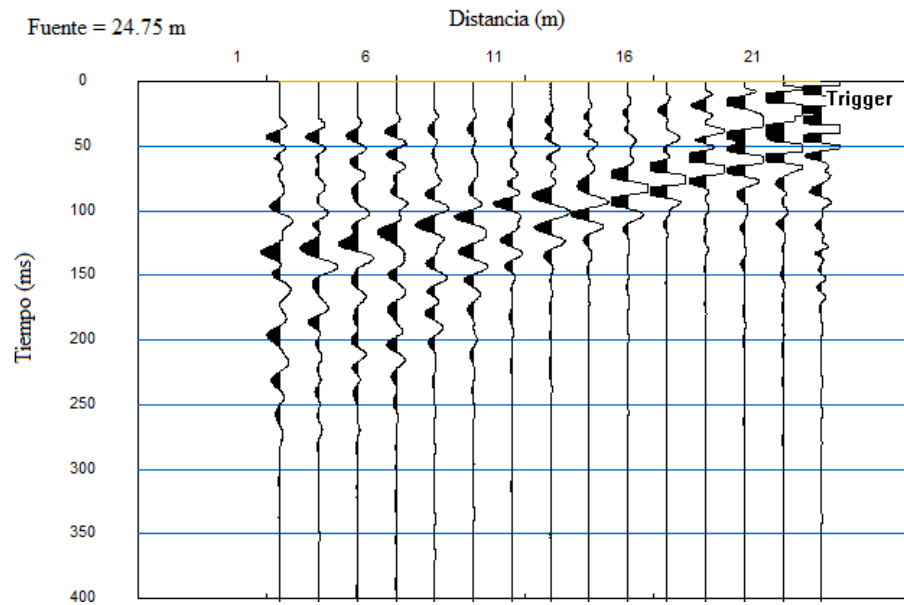


FIGURA 12: Dato crudo adquirido en campo, para una fuente ubicada en la posición de 24.75 del geófono 1. Fuente: Autores.

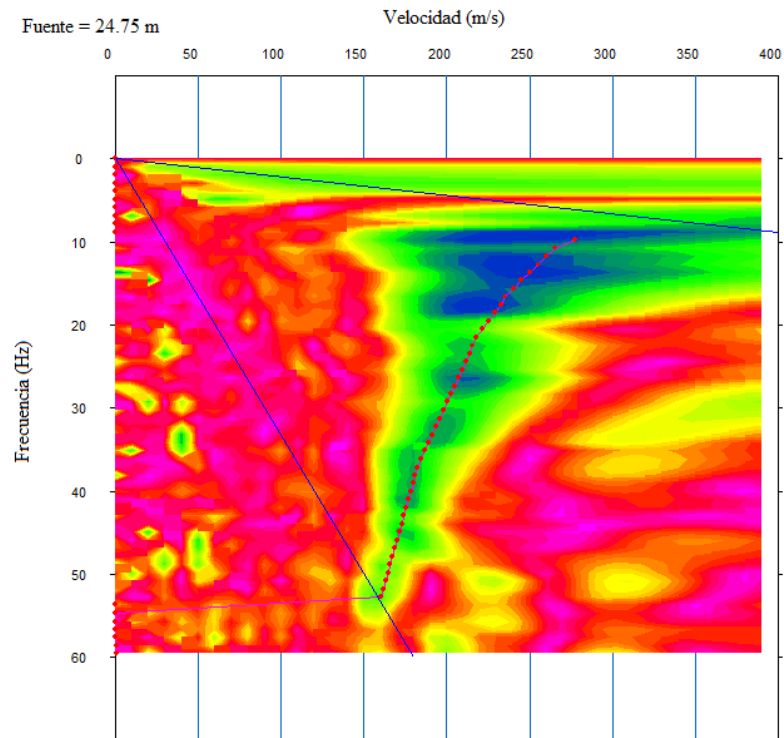


FIGURA 13: Curva de dispersión con sus respectivos picados (puntos rojos), pendiente de longitud de onda máxima (línea azul parte superior) y pendiente de longitud de onda mínima (línea azul parte inferior), para una fuente ubicada en la posición de 24.75 m del geófono 1. Fuente: Autores.

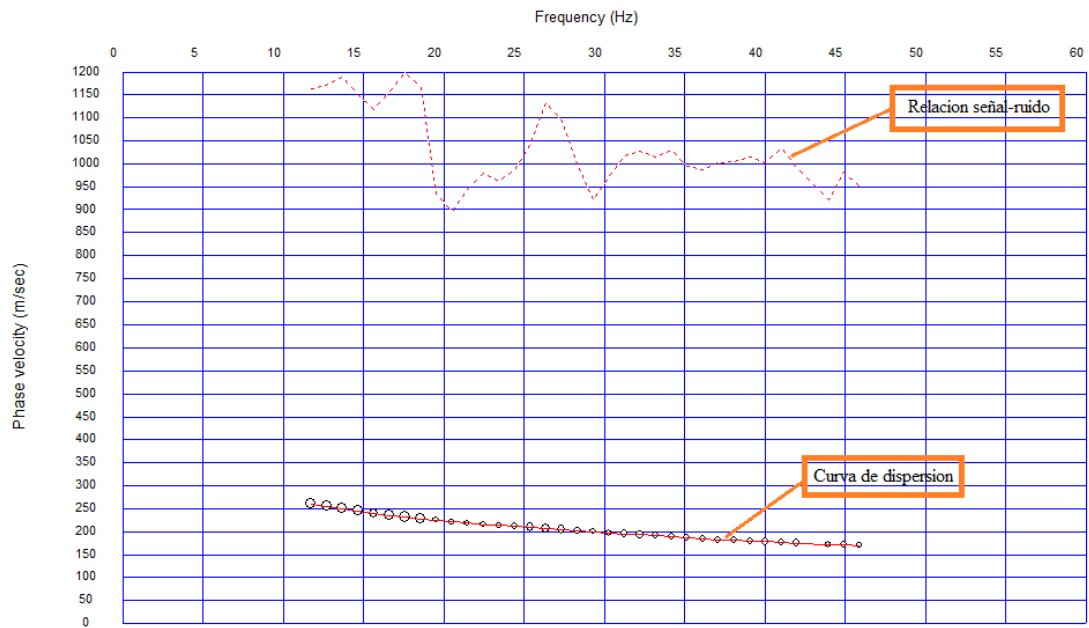


FIGURA 14: Curva de dispersión (parte inferior), donde se observa señales con velocidades de fase altas que indican ruido al momento de la adquisición del dato. Fuente: Autores.

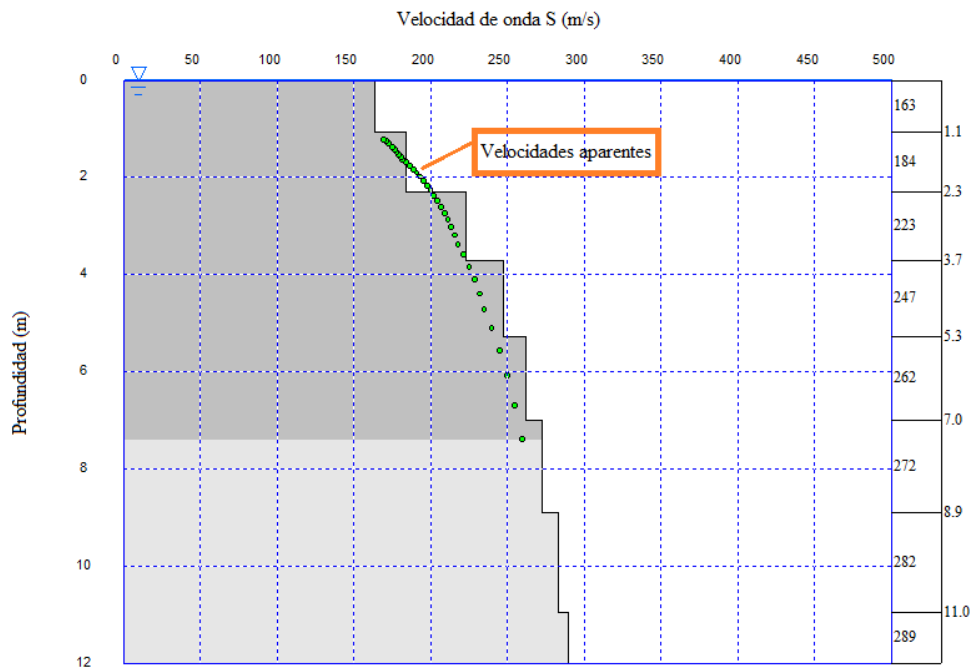


FIGURA 15: Modelo invertido de velocidades de onda S, con las velocidades aparentes punteadas en color verde. Fuente: Autores.



FIGURA 16: Adquisición de datos de métodos de geoelectrica. A) Equipo de adquisición de datos Terrameter LS (ABEM, 2012). B) Tendido de la línea con separación de electrodos de 2.6m. Fuente: Autores.

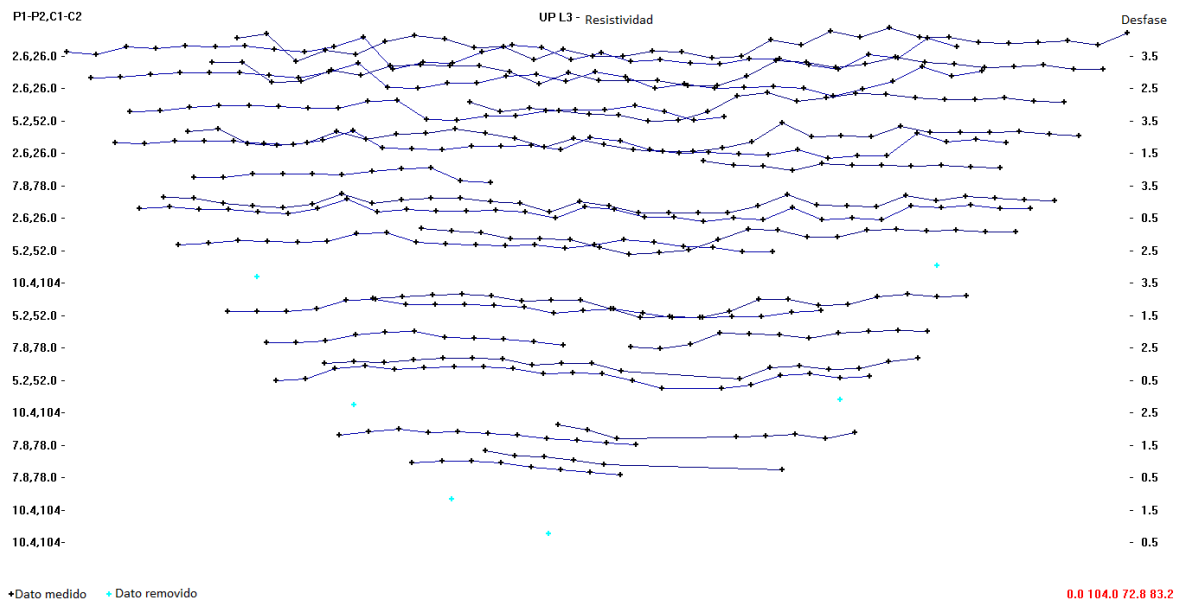


FIGURA 17: Distribución de puntos de datos de resistividad para eliminar puntos de datos malos en forma de perfiles. Fuente: Autores.

TABLA 1. Configuración de parámetros de inversion. Fuente: Autores

PARAMETRO	L3 Universidad de Pamplona
Interacciones	7
Factor amortiguamiento inicial	0.15
Factos de amortiguamiento mínimo	0.02
Límite de convergencia para cambio relativo de error	1
Numero de nodos entre electrodos adyacentes	4
Tipo de modelado topográfico	S-C
Tipo de malla	Normal
Contraste de datos robustos	Si
Usar elementos finitos	Si
Usar amortiguamiento alto en la primera capa	No

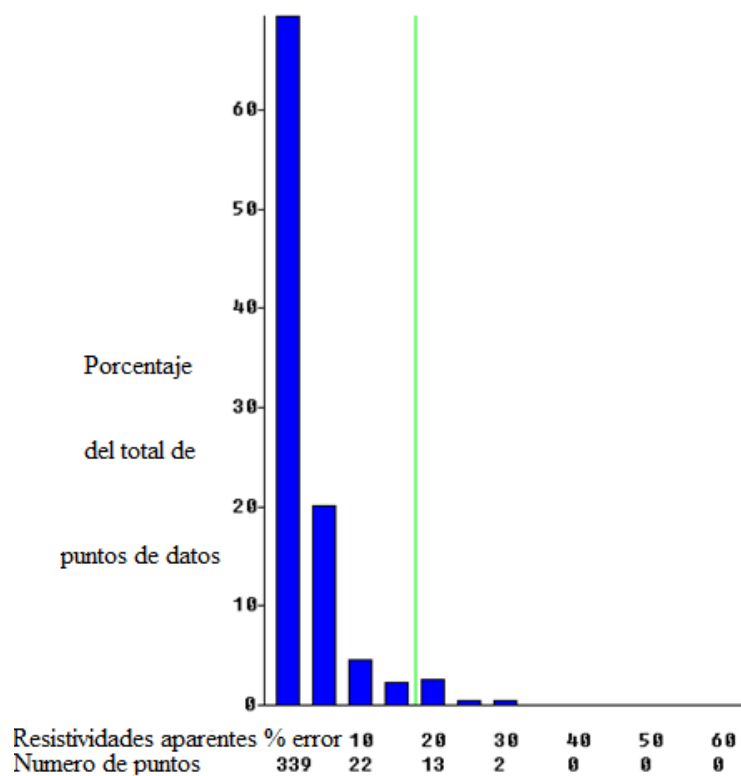


FIGURA 18: Porcentaje total de puntos dentro del 20 % de error de resistividades aparentes. Fuente: Autores.

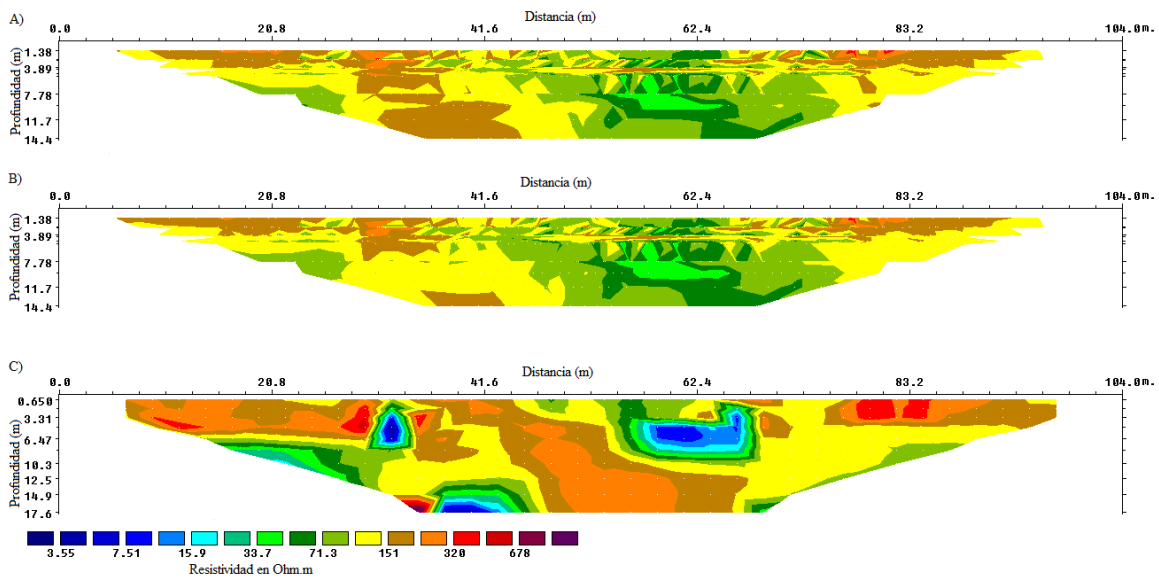


FIGURA 19: Pseudosecciones de resistividades aparentes. A) Pseudoseccion de resistividad aparente medida. B) Pseudoseccion de resistividad aparente calculada. C) Sección de resistividad del modelo del modelo de inversión. Fuente: Autores.

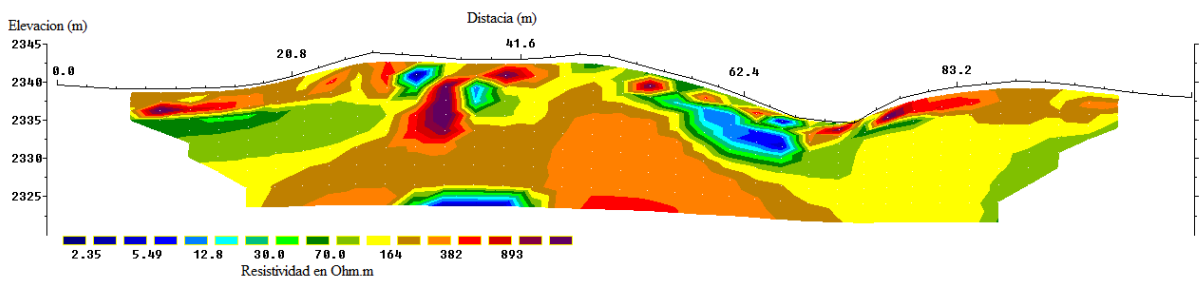


FIGURA 20: Modelo de resistividades reales con topografía. Fuente: Autores.

TABLA 2: Clasificación de las capas según la Vs. Fuente: Decreto 926, 2010.

Capa	Vs (m/s)	Profundidad (m)	Tipo de Perfil	Material
1	163	1.1	E	Material superficial meteorizado
2	184	2.3		
3	223	3.7		
4	248	5.3	D	Deposito coluvión
5	263	7.0		
6	272	7.5		

TABLA 3: Formulas para los parámetros dinámicos del suelo. Fuente: Pegah and Liu, 2016.

Coeficiente Poisson	Modulo De Rigidez (KN/m ²)	E (MPa)	Qf (KPa)	Ø
$\sigma = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 + 2}$	$G = \rho V_s^2$	$E = 2G(1 + \sigma)$	$qf = \frac{V_s^{2.4}}{1590}$	$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{1 - 2\sigma}{1 - \sigma}\right)$

TABLA 4: Parámetros dinámicos del suelo con Vp obtenidos en refracción sísmica. Fuente: Autores.

Capa	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Coeficiente Poisson	Densidad (kg/m ³)	Modulo rigidez (KN/m ²)	E (MPa)	Qf (KPa)	Ø
1	926-1065	163-247	0.48-0.47	1579-1602	41952.45-97736.42	124.5-287.74	128.189-347.54	3.5-6.08
2	1065-2069	247-292	0.47-0.48	1602-1626	97736.42-138895.05	287.74-413.63	347.54-519.42	6.08-2.4

TABLA 5: Periodos y aceleración espectral de una supuesta estructura según el decreto 926 del 2010.

Grupo de uso	Tipo de perfil	T	To	Tc	Tl	Sa
1	D	0.134	0.132	0.633	4.56	0.9
1	E	0.134	0.208	1	7.2	0.707

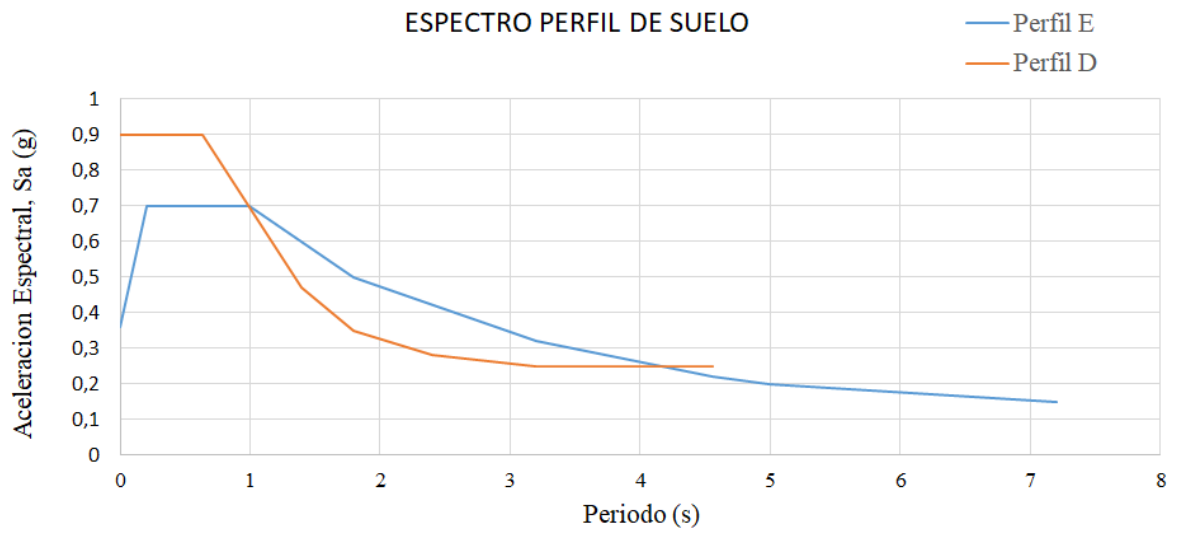


FIGURA 21: Espectro de los dos tipos de suelos obtenidos. Fuente: Autores.

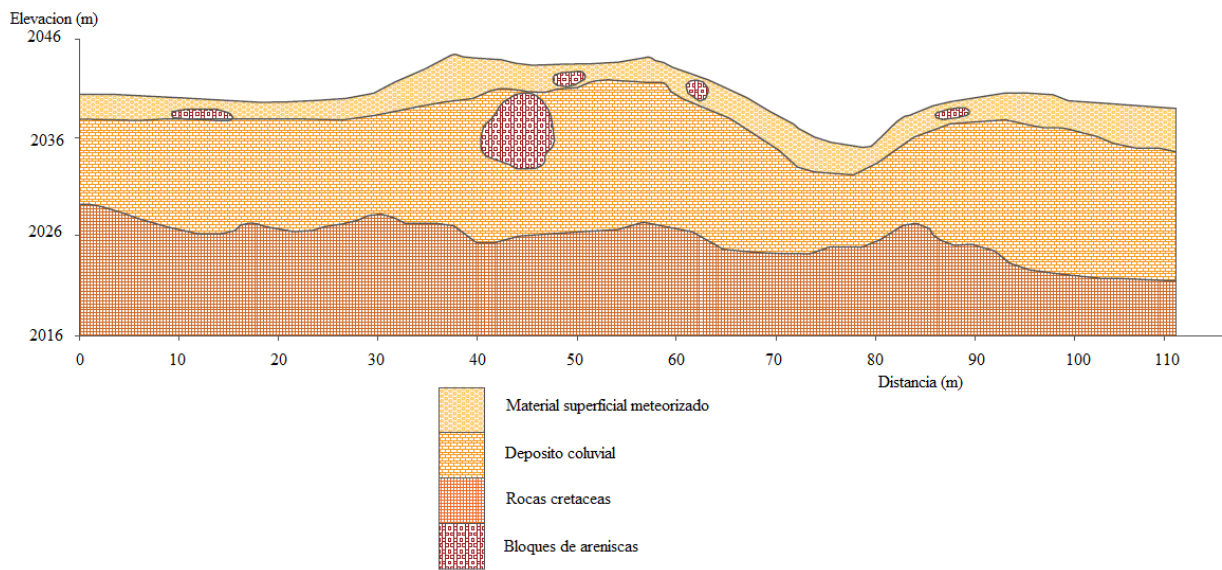


FIGURA 22: Perfil geológico obtenido con la relación de los tres ensayos analizados. Fuente: Autores.