



INTEGRACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS Y GEOTÉCNICOS PARA LA
CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN UNA LADERA ALEDAÑA AL
RELLENO SANITARIO “LA CORTADA”, MUNICIPIO DE PAMPLONA,
DEPARTAMENTO DE NORTE DE SANTANDER (COLOMBIA).

Autor:

German David Aparicio Patiño

Universidad De Pamplona
Facultad De Ingenierías y Arquitectura, Ingeniería Civil
Pamplona, Colombia
2019

INTEGRACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS Y GEOTÉCNICOS PARA LA
CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN UNA LADERA ALEDAÑA AL
RELLENO SANITARIO “LA CORTADA”, MUNICIPIO DE PAMPLONA,
DEPARTAMENTO DE NORTE DE SANTANDER (COLOMBIA).

German David Aparicio Patiño

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Civil

Director

Jairo Alberto Torres

Físico.
Magister en geofísica.

Línea de Investigación:

Línea de Investigación en Geología Básica y Aplicada

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Geofísica y Geología – PANGEA

Grupo de Investigación en Ingeniería Civil -ETENOHA

Universidad De Pamplona
Facultad De Ingenierías y Arquitectura, Ingeniería Civil
Pamplona, Colombia
2019

AGRADECIMIENTOS:

A mi familia, por su paciencia, apoyo y amor, que me impulsaron para cumplir éste nuevo reto, a mis compañeros porque cada día hicieron más interesante y especial ésta travesía.

A Sandra Catalina Gualdron Osorio y Zair Andrés Bueno Diaz, quienes fueron mis compañeros de trabajo en el diplomado de Geotecnia y Geofísica aplicada a la Ingeniería Civil.

Al magister en geofísica Jairo Alberto Torres peña, al geólogo Janer Rafael Cantillo Romero, al director de programa de ingeniería civil Victor vergel y al ingeniero civil Manuel Contreras por guiarme y compartir sus conocimientos conmigo.

Se agradece la Universidad de Pamplona, a la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, al Grupo de Investigación en Geofísica y Geología (PANGEA) y al Grupo de Investigación del Programa de Ingeniería Civil (ETENOHA).

RESUMEN

El presente artículo expone una aplicación de métodos geofísicos y geotécnicos en una ladera adyacente al relleno sanitario “La Cortada” en el municipio de Pamplona (Norte de Santander, Colombia). Los métodos usados fueron Análisis Multicanal De Onda Superficial (MASW), Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) para el caso geotécnico. El objetivo de esta investigación fue realizar una caracterización geofísica y geotécnica a partir de una integración de las propiedades físicas obtenidas con cada uno de los ensayos. Esto se llevó a cabo mediante tres fases, una primera fase de adquisición de datos, en donde se levantaron un total de cuatro (4) líneas sísmicas (TRS y MASW), siete (7) SEV y dos (2) ensayos de SPT, una segunda fase de procesamiento de la información levantada, la cual se analizó principalmente en software especializado y una tercera de análisis de resultados en los que se obtuvieron rangos de velocidad de onda P entre 220 a 1175 m/s, velocidad de onda S entre 175 a 675 m/s y resistividades entre 25 y 600 Ω -m. Se identificó suelo tipo D que corresponde a materiales rígidos y suelo tipo C correspondiente a arenas con presencia de arcilla y arcilla limosa saturada. Finalmente se propone un intercepto con los modelos 2D de las líneas estudiadas.

Palabras claves: Método Geofísico; Tomografía de Refracción Sísmica; Análisis Multicanal de Ondas Superficiales; Sondeo Eléctrico Vertical; Ensayo de Penetración Estándar.

ABSTRACT

The present article exposes an application of geophysical and geotechnical methods on a hillside adjacent to the sanitary landfill "La Cortada" in the municipality of Pamplona (Norte de Santander, Colombia). The methods used were Multichannel Surface Wave Analysis (MASW), Seismic Refraction Tomography (SRT), Vertical Electric Sounding (VES) and the Standard Penetration Test (SPT) for the geotechnical case. The objective of this investigation was to perform a geophysical and geotechnical characterization based on an integration of the physical properties obtained with each of the tests. This was carried out through three phases, a first phase of data acquisition, where a total of four (4) seismic lines (SRT and MASW), seven (7) VES and two (2) SPT, a second phase of information processing, which was mainly analyzed in specialized software and a third analysis of results in which P wave velocity ranges were obtained between 220 to 1175 m / s, S wave velocity between 175 to 675 m / s and resistivities between 25 and 600 Ω -m. Finally, type D soil was identified, corresponding to rigid materials and soil type C corresponding to sands with the presence of clay and saturated silty clay.

Keywords: Geophysical method; Seismic Refraction Tomography; Multichannel Analysis of Surface Waves; Vertical Electrical Probe; Standard Penetration Test.

Contenido

INTRODUCCIÓN	9
ANTECEDENTES	10
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	11
MARCO GEOLÓGICO	12
MARCO TEÓRICO	14
METODOLOGÍA	15
Adquisición de datos	15
PROCESAMIENTO	20
RESULTADOS	26
ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
Correlación de métodos geofísicos con SPT	37
Correlación de resultados	38
INTERCEPTO DE PERFILES	40
CONCLUSIONES	41
RECOMENDACIONES	42
REFERENCIAS	43

Lista de figuras:

Figura 1: Localización de la zona de estudio.

Figura 2: Ubicación líneas sísmicas.

Figura 3: Mapa geológico regional.

Figura 4: Medición longitud para la línea 1.

Figura 5: Equipo utilizado para métodos sísmicos.

Figura 6: Equipo utilizado para método eléctrico.

Figura 7: Ensamble equipo SPT.

Figura 8: Geometría de las líneas.

Figura 9: Procesamiento MASW1D.

Figura 10: Procesamiento MASW2D.

Figura 11: Procesamiento tomografía de refracción sísmica.

Figura 12: Procesamiento sondeos eléctricos.

Figura 13: Procesamiento SPT.

Figura 14: Resultados MASW1D.

Figura 15: Resultados MASW2D

Figura 16: Resultados tomografía de refracción sísmica.

Figura 17: Resultados Sondeos Eléctricos.

Figura 18: Integración métodos.

Figura 19: Profundidades capas integradas.

Figura 20: Intercepto.

Lista de tablas:

Tabla 1: Coordenadas líneas sísmicas.

Tabla 2: Coordenadas sondeos eléctricos.

Tabla 3: Resultados MASW1D.

Tabla 4: Resultados MASW2D.

Tabla 5: Resultados tomografía de refracción sísmica.

Tabla 6: Resultados sondeos eléctricos.

Tabla 7: Constantes elásticas y dinámicas del suelo.

Tabla 8: Correlaciones métodos geofísicos.

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país geológicamente activo, ya que se encuentra en una zona bastante compleja estructuralmente por su alta sismicidad, en particular el Nido de Bucaramanga que es un área comprendida entre los municipios de Cepitá, Umpalá y Los Santos, donde convergen las placas Sudamericana, de Nazca y del Caribe. Dada su alta actividad sísmica es considerado el segundo nido sísmico más activo del mundo. Si bien el origen tectónico del Nido aún no está claro, numerosas publicaciones presentan que se trata de la subducción de una porción de la placa del Caribe bajo la placa Sudamericana, que se inclina dentro del manto bajo la cordillera Oriental [1]. A pesar de lo anterior los informes de estudios geotécnicos de la región no suelen incluir en ellos la aplicación de ensayos de geofísicos.

Estos métodos geofísicos son utilizados como una herramienta para la deducción y/o predicción de las condiciones del subsuelo, obteniendo las características geológicas, geofísicas y geotécnicas del terreno, así mismo conociendo el comportamiento de éste y utilizando toda ésta información indispensable en obras de ingeniería y construcción.

Durante las últimas décadas la incursión de estas técnicas geofísicas a la ingeniería civil sigue en aumento gracias a que son muy efectivos y complementan a los estudios invasivos.

En ésta investigación se aplicó la Refracción Sísmica, el Análisis multicanal de Ondas Superficiales (MASW), el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) con el fin de determinar propiedades físicas, parámetros dinámicos de las resistividades y parámetros geotécnicos adicionalmente generar perfiles en una y dos dimensiones bajo las líneas estudiadas en los que se pueda observar la estratificación y posible distribución del suelo.

ANTECEDENTES

Por medio de revisiones documentales tanto de fuentes impresas como digitales se pudo evidenciar la aplicación de métodos geofísicos.

Por ejemplo de estas aplicaciones de métodos geofísicos se encontró la tesis de Prospección geofísica ambiental aplicada a la detección de plumas contaminantes debidas a la infiltración de lixiviados en un relleno sanitario, bajo la adaptación de sondeos eléctricos verticales de resistividad y polarización inducida, para obtener tomografías geo eléctricas profundas y modelos 3D, realizada en el municipio de Chiquinquirá, Boyacá (Colombia).

En Ecuador un proyecto de grado con objeto de estudio la combinación de métodos geofísicos para estudios de suelo en un sector de Quito, tuvo objetivo fundamental la determinación de un modelo del subsuelo en sector Mirador del Colegio, ubicado en el Distrito Metropolitano de Quito. Los parámetros determinados fueron velocidades de Onda P, Onda S, Vs30, períodos y frecuencias fundamentales del suelo; mediante la integración de diferentes métodos geofísicos como Sísmica de Refracción, Sondeos Eléctricos Verticales, Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, Refracción de Microtremores y mediciones de ruido sísmico ambiental, para el cálculo del cociente espectral. Se determinó, a partir de la integración de los diversos métodos aplicados con resultados a nivel somero (ReMi, MASW y SPT).

En Chile la tesis de Aplicación de métodos geofísicos basados en ondas superficiales para la caracterización sísmica de suelos. Aplicación a la microzonificación sísmica del norte y poniente de Santiago, el objetivo de esta investigación fue estudiar la aplicación del análisis multicanal de ondas superficiales en sus variantes activa y pasiva, para obtener el perfil de velocidades de ondas de corte

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El municipio de Pamplona está situado en las coordenadas $72^{\circ}39'$ de longitud al oeste de Greenwich y a 7° y $23'$ de latitud norte. Se encuentra situado a 2.200 metros sobre el nivel del mar, Pamplona, limita al Norte con Pamplonita y Cucutilla, al sur con los municipios de Cácuta y Mutiscua, al oriente con Labateca y al occidente con Cucutilla. Tiene una extensión total de 456 km. El punto de referencia del estudio es el Relleno Sanitario La Cortada Pamplona, Norte De Santander, Colombia el cual se observa en las Fig. 1 que está ubicado en el kilómetro 3,5 vía Pamplona – Chitaga, a una altura de 2450 metros sobre el nivel del mar, las coordenadas geográficas de la zona de investigación son $7^{\circ}22'12''$ N $72^{\circ}37'39''$ W [9]. También se muestra un mapa en la Fig. 2 con la ubicación de las líneas sísmicas, los puntos de los SEV y los puntos del ensayo de SPT.

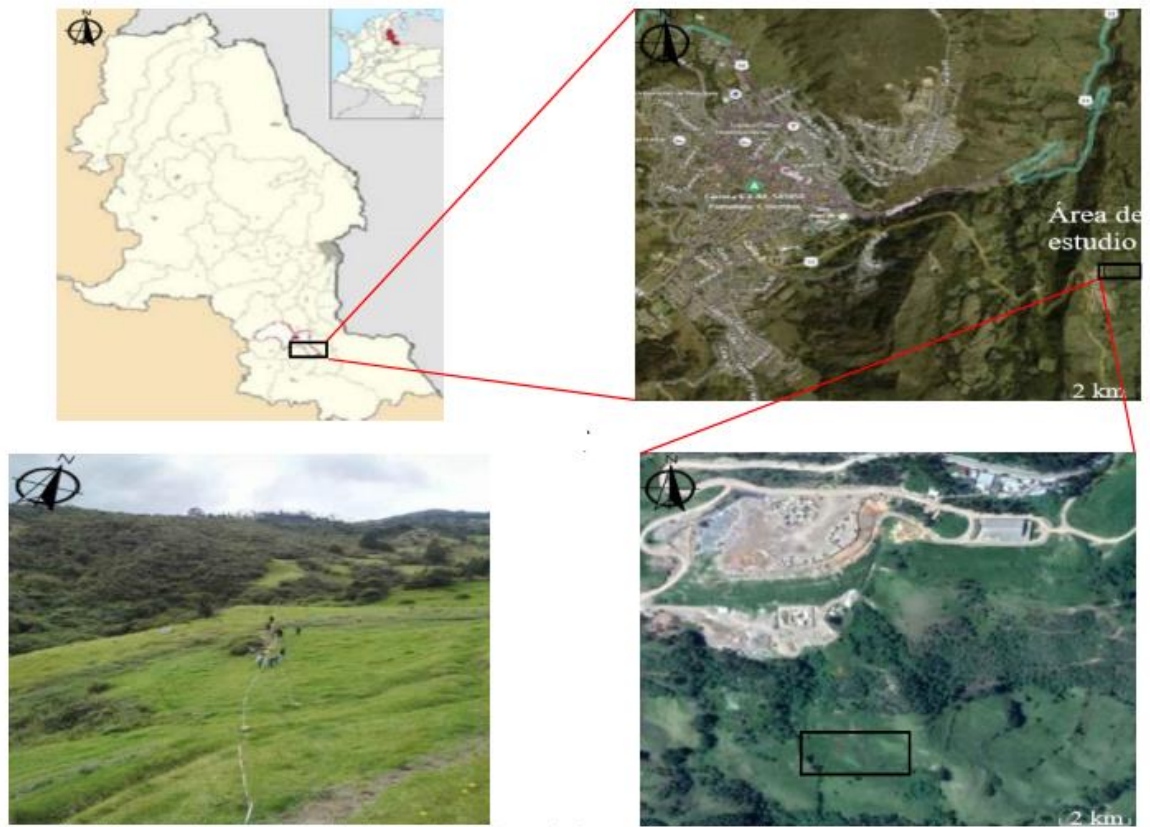


Figura 1: Localización de la zona de estudio.
Fuente: Imagen de google Earth.

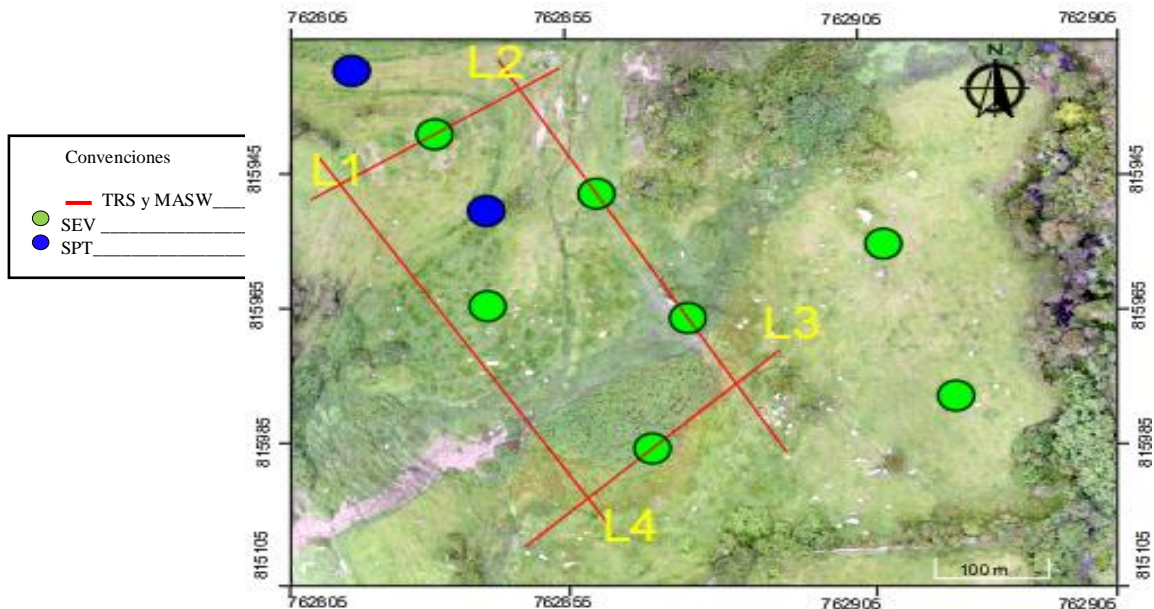


Figura 2. Ubicación de Líneas Sísmicas, Sondeos Eléctricos Verticales y Ensayos de Penetración Estándar.

Fuente: Elaboración propia.

MARCO GEOLÓGICO

Dentro del área de estudio afloran rocas sedimentarias las cuales constituyen el flanco norte del macizo rocoso, desde el punto de vista geológico el municipio de Pamplona se encuentran depósitos aluviales (Qal) en los márgenes de ríos y quebradas grandes con morfología suave de cantos y guijos redondeados, el depósito se caracteriza como suelo granular, se trata de un suelo granular de compacidad compacto.

Los parámetros de resistencia estimados para estos materiales, son de una cohesión efectiva. Este depósito se caracterizó con una litología de gravas con bolos redondeados, arenas arcillosas limosas y gravas en finos arenosos. [13]

En la ladera de la investigación se encuentra la formación de nombre Mito-Juan (kscm), la cual está compuesta de arcillas negra laminadas, areniscas de grano fino, micácea grises, areniscas verdes, en la parte intermedia areniscas de grano fino, algunas conglomeráticas e intercalaciones de arcillas negras laminadas. En la parte inferior arcillas negras laminadas, bancos de arenisca gris de tamaño fino micáceas, calizas y

areniscas. También se presenta un afloramiento de la unidad (Kia) la cual está constituida de areniscas blancas, cuarcíticas compactas de grano fino a grueso excepcionalmente conglomeráticas con pequeños niveles de arcillas negras laminadas [7].

La nomenclatura estratigráfica se determinó por la correlación con los mapas existentes en el Servicio Geológico Colombiano, usando las planchas 110 Pamplona. A continuación, en la Fig. 3 se observa la geología regional del área de estudio.

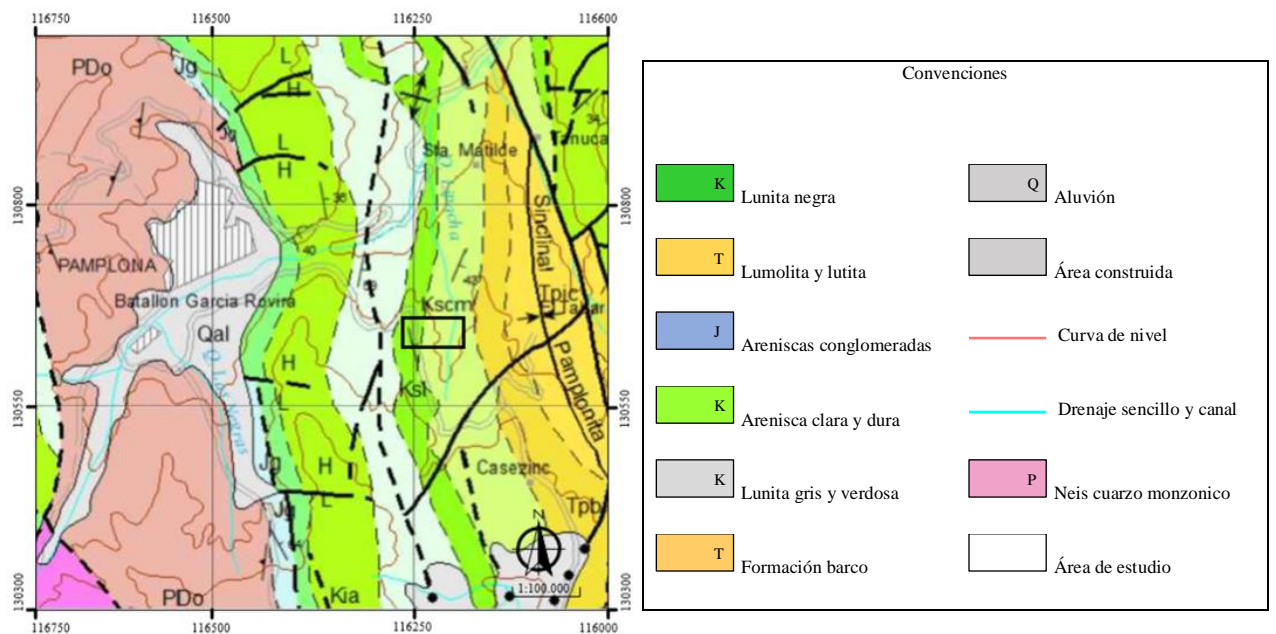


Figura 3. Mapa geológico regional donde se evidencia el área de estudio.

Fuente: [8]

MARCO TEÓRICO

Refracción sísmica:

Consiste en la medición del tiempo de viaje de ondas sísmicas compresionales generadas por una fuente impulsiva, desde un punto de disparo hasta unos sensores anclados a la superficie. Estas fuentes impulsivas son diversas, y pueden ser desde un martillo grande (porra o masetta) hasta la ignición de explosivos. Los tiempos de viaje se registran mediante instrumentos altamente sensibles diseñados para tal propósito. El tiempo de viaje se mide desde el instante del impacto (conocido como “tiempo cero”) hasta el momento en que las ondas son recibidas después de haber viajado por las primeras capas del subsuelo. Dado que los datos registrados corresponden a tiempos de viaje desde la fuente hasta el receptor, estos datos pueden ser convertidos en forma de variaciones de velocidad con la profundidad.

Análisis multicanal de onda:

Es un método no destructivo que analiza las propiedades de dispersión de los tipos de ondas sísmicas superficiales (modos fundamentales de ondas Rayleigh), las cuales se propagan horizontalmente a lo largo de la superficie desde el punto de impacto a los receptores. La técnica MASW proporciona velocidades de ondas de corte con sus respectivos espesores en formatos 1D, 2D y 3D.

Sondeos eléctricos verticales (SEV):

El método consiste en determinar el parámetro de resistividad a profundidad, mediante la inyección de corriente eléctrica en el subsuelo y la medición del potencial resultante a través de un arreglo electródico tetraelectródico. El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) como método geofísico de corriente directa (DC) es muy utilizado por su sencillez y la relativa economía instrumental apropiado para la adquisición en campo.

Los arreglos o métodos utilizados son los de Wenner y Schlumberger, siendo formulaciones matemáticas, para estimar valores de resistividad aparente, que consideran las distancias entre electrodos enterrados en el suelo y las relaciones entre las corrientes y tensiones, debidas a la inyección de corriente a un material.

Ensayo de penetración estándar. (SPT):

Es uno de los más utilizado, para determinar con bastante certeza los parámetros geotécnicos de suelo, analizando la cantidad de golpes con los que se hince un tubo partido, luego se extrae una muestra alterada, y se clasifica, con los números de golpes obtenidos, se hace una serie de correcciones de energía, diámetro de pozo, el método del muestreo, longitud de la barra, y obteniendo números de golpes corregidos y correlacionar con los parámetros geotécnicos.

METODOLOGÍA

Adquisición de datos

Levantamiento topográfico con Drone:

Luego de la visita al terreno y referenciando los puntos límites o frontera de la zona de estudio en la ladera adyacente al relleno sanitario, se hace un sobrevuelo de la zona con el dron y por medio de un software se compila la información para obtener los perfiles del suelo requerido o las curvas de nivel.

Se realizó el reconocimiento del área de estudio. Se decidió la ubicación de cuatro (4) líneas sísmicas Fig. 4 y posteriormente la medición de la longitud para cada una de ellas como se muestra la Tabla 1.

Tabla 1.
Coordenadas UTM de las cuatro líneas geofísicas para MASW y TRS.

Línea	Longitud	Punto Inicial		Punto Final	
a	d				
L1	46 m	815945,0386 N	762803,1659	815327,0891 N	762192,7852
		O		O	
L2	69 m	815265,9478 N	762254,4781	815296,3552 N	762192,9487
		O		O	
L3	46 m	815264,15 N	761916,965	815234,8873 N	762193,2757
		O		O	
L4	57.5 m	815234,8873 N	762193,2757	815326,1022 N	762162,1022
		O		O	

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. Medición de la longitud para la línea 1.
Fuente: Elaboración propia.

Análisis multicanal de onda:

En MASW 1D y 2D se hizo el tendido sísmico, luego se procedió a instalar cada geófono de 4.5 Hz verticalmente y verificando que la separación fuera la misma entre cada uno de ellos, se conectó cada cable al equipo. La fuente de energía para el sismógrafo fue una batería de 12 Voltios, para los golpes se utilizó un martillo de 14

libras sobre una placa metálica rectangular y el trigger ubicado a una distancia óptima para registrar cada dato en la computadora mediante el programa Geometrics Seismodule Controller [10]. En la Fig. 5 se muestra el equipo e instrumentos utilizados.



Figura 5. Sismógrafo GEODE de la empresa geometrics, geófonos rojos y azules, martillo de 14 libras, placa metálica, cable de conexión y computadora portatil.

Fuente: [11]

Tomografía de refracción sísmica:

Para la adquisición de los datos, se realizó la elección de la ubicación de las cuatro (4) líneas sísmicas mostradas en la Tabla 1, posteriormente y después de haber medido cada una de ellas Fig. 4, se procedió a la instalación de 24 geófonos, 24 de frecuencia 14.5 Hz, verticalmente en línea recta separados a una misma distancia entre ellos, debidamente conectados al cable encargado de transmitir la información recibida hasta el equipo de obtención (Sismógrafo GEODE Geometrics)[10] Fig. 5, la fuente es la misma utilizada en MASW. En la Fig. 6 se muestra el tendido sísmico con la distribución de los geofonos y puntos de disparo.

Sondeos eléctricos verticales:

Se ubicaron siete (7) puntos estratégicos que abarcaran la mayor cantidad de mediciones de resistividades posibles, las coordenadas de cada SEV se muestran en la

Tabla 2, el equipo utilizado fue el GEOAMP 303 Fig. 7 (Es un equipo geofísico versátil, desarrollado por SUBSUELO3D) [11], cuatro electrodos, cuatro tramos de cable AWG 00 de 100 m cada uno, computadora y cables conectores de adquisición.

Para la ubicación de los electrodos se usó el arreglo Wenner, el cual consiste en colocar los electrodos inyectores de corriente A y B a una distancia (a) y los electrodos medidores de potencial M y N simétricos sobre esta distancia con una separación de $a/3$.

Tabla 2.
Coordenadas UTM de los siete SEV.

Sondeo	Coordenada Norte	Coordenada Oeste
SEV 1	815334,9477	762167,8895
SEV 2	815322,5166	762199,8668
SEV 3	815301,6665	762209,1828
SEV 4	815287,7513	762193,3013
SEV 5	815275,667	762176,7962
SEV 6	815296,618	762242,3482
SEV 7	815388,1986	762240,6335

Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. Equipo GeoAmp 303 SUBSUELO 3D.

Fuente: [11]

Ensayo de penetración estándar:

En el ensayo de SPT se ubicaron dos puntos estrategicos entre el cruce de dos líneas geofísicas y el centro de la zona de estudio, se ensambló el equipo como se muestra en la Fig. 8, una vez que en la perforación del sondeo se ha alcanzado la profundidad a la que se ha de realizar la prueba, sin avanzar la entubación y limpio el fondo del sondeo, se desciende el toma muestras SPT unido al varillaje hasta apoyar suavemente en el fondo. Se realizada esta operación, se eleva repetidamente la masa con una frecuencia constante, dejándola caer libremente sobre una sufridera que se coloca en la zona superior del varillaje. Se contabiliza y se anota el número de golpes necesarios para hincar la cuchara y se va sacando las muestras cada 18 pulgadas.



Figura 8. Ensamblaje equipo SPT.

Fuente: Elaboración propia.

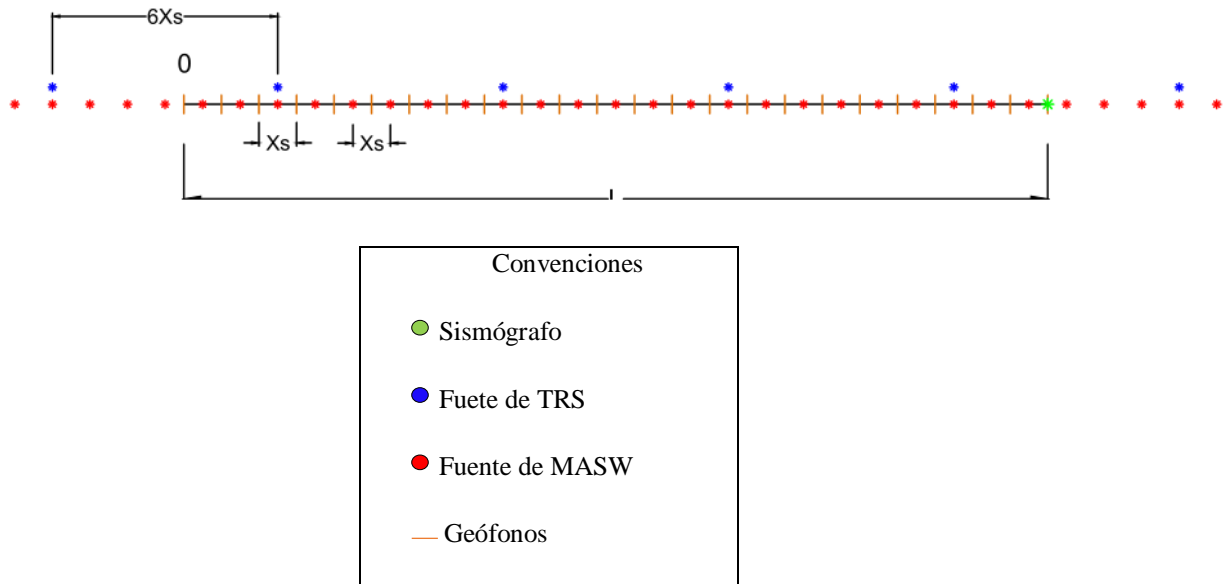


Figura 6: Geometría y visualización del tendido sísmico.

Fuente: Elaboración propia.

Procesamiento

Análisis multicanal de onda 1D:

El procesamiento de los datos adquiridos se llevó a cabo usando el software Surface Wave Analysis Wizard [12], en el cual se cargan los datos sísmicos para los primeros tiempos de arribo de la onda S para cada línea como se muestra en la Fig. 9 a), luego realiza el picado generando la curva de dispersión ver Fig. 9 b), posteriormente se genera el modelo inicial usando el software WaveEq Surface Wave Analysis [12] como se muestra en la Fig. 9 c) por último se genera el modelo final utilizando una inversión, en la Fig. 9 d) se observa la velocidad de la onda (V_s 30m) y profundidad estimada el centro de la longitud de la línea.

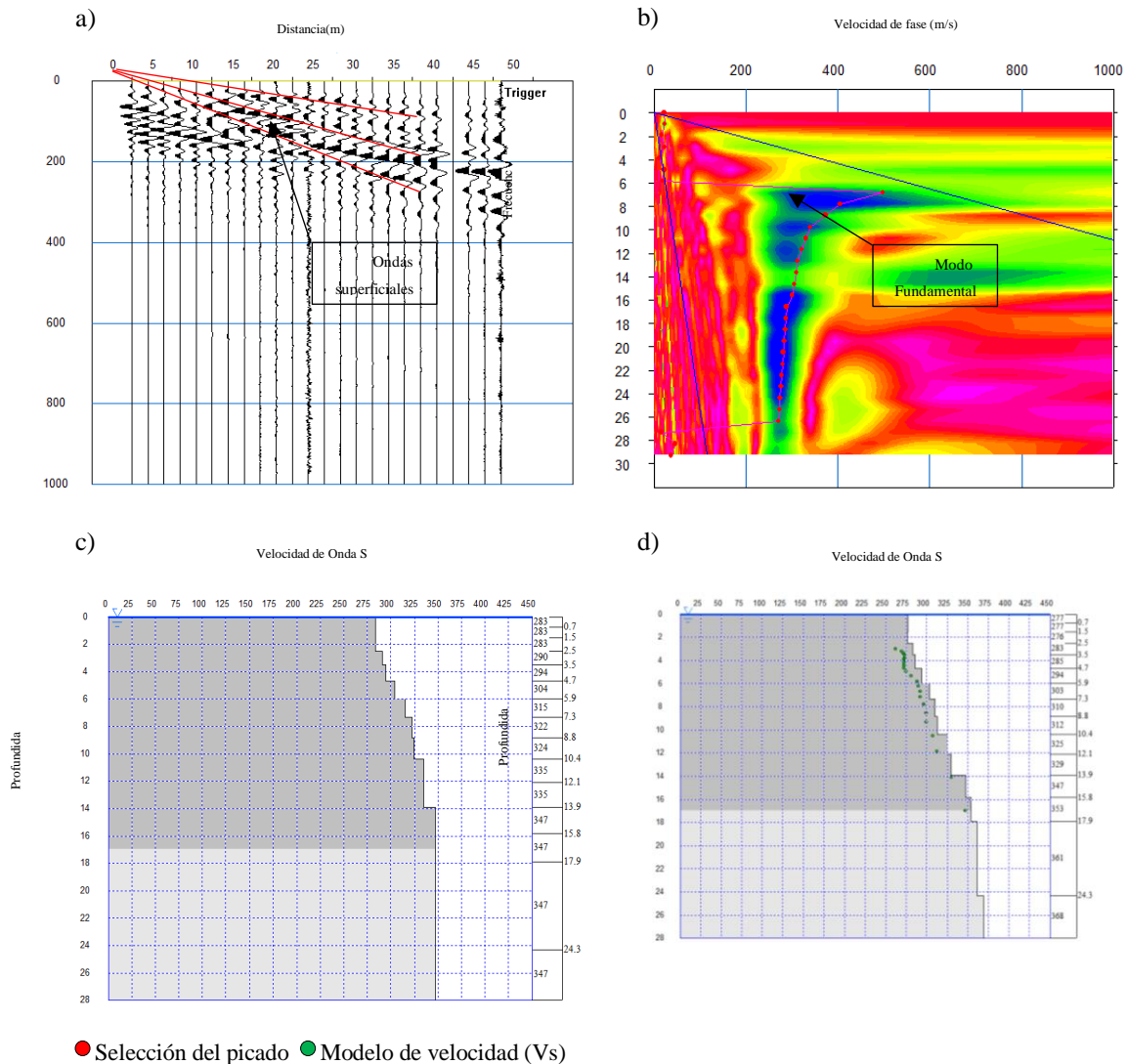


Figura 9. a) Registro en tiempo de las ondas superficiales, b) Picado del modo fundamental, d) Modelo inicial, b) Perfil del modelo final de V_s 30m .

Fuente: Elaboración propia.

Análisis multicanal de onda 2D:

Para la generación del modelo del suelo se usó el software Surface Wave Analysis Wizard [12] en su apartado específico para el procesamiento de datos 2D, permitiendo la creación de una lista y procesando todos los datos a la vez, gracias a que el software los organiza por CMP (common middle point) o punto medio común Fig. 10 a).

Mediante la transformada de Fourier los datos pasaron al dominio de la frecuencia mostrando las curvas de dispersión inicial, luego se corrige la curva eliminando datos de alta frecuencia (igual que en MASW1D) Fig. 10 b), generando el modelo inicial donde se indica la profundidad estimada según la longitud de la línea mostrando velocidades aparentes y espesores de cada capa de todos los CMP Fig. 10 c) y posteriormente generando un modelo 2D con los rangos de velocidades presentes a lo largo de la línea Fig. 10 d).

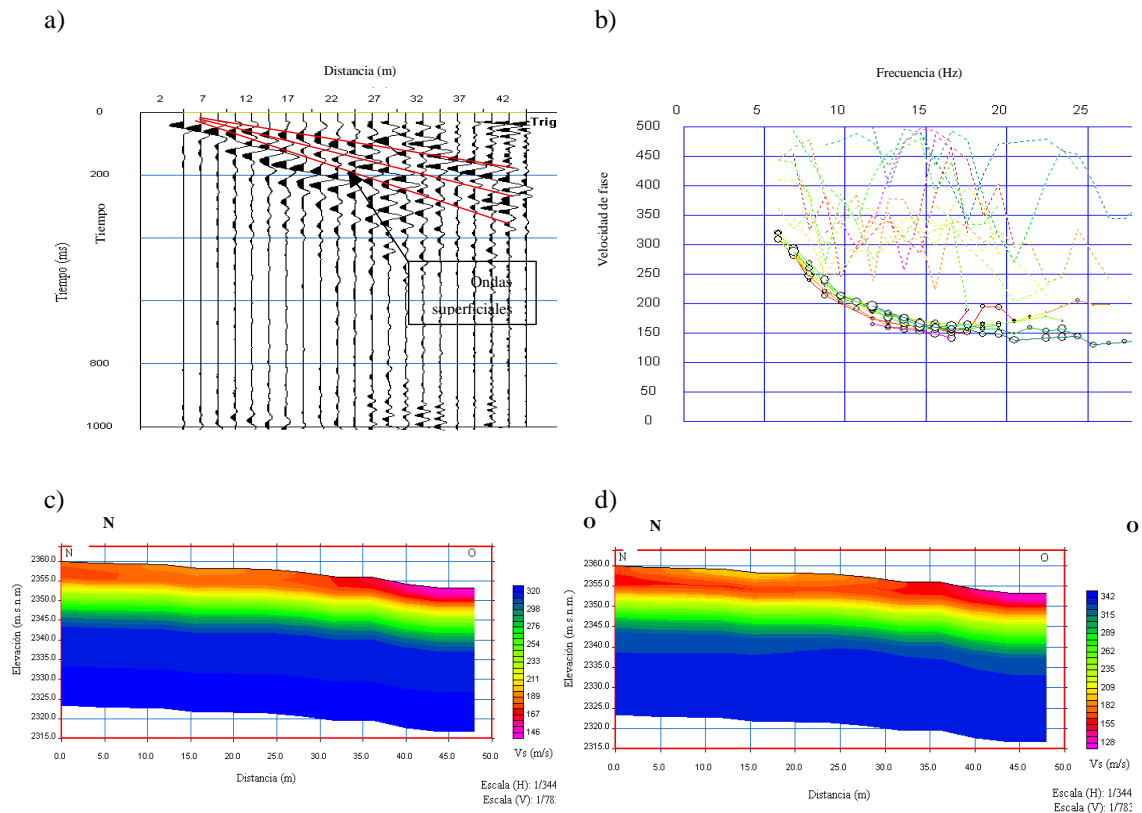


Figura 10. Procesamiento MASW 2D a) Registro en el tiempo de los CMP, b) Dispersión CMP corregidas, c) Modelo inicial, profundidad en función de las velocidades y d) Modelo final.

Fuente: Elaboración propia.

Tomografía de refracción sísmica:

El procesamiento de los datos obtenidos se realizó con la ayuda del software Pickwin (Pick Firts Break or Dispersión Curves) [13], se carga la información recolectada y se realiza el picado de los primeros arribos de las ondas P propagadas Fig. 11 a), posteriormente en el software Plotrefa (Refraction Analysis) [14] se realiza la selección de capas Fig. 11 b), en el mismo software se genera un modelo inicial ya con la altimetría de la línea incluida Fig. 11 c), luego de una inversión se llega al modelo final o tomografía de refracción sísmica Fig. 11 d), donde se observan las profundidades y velocidades de onda P.

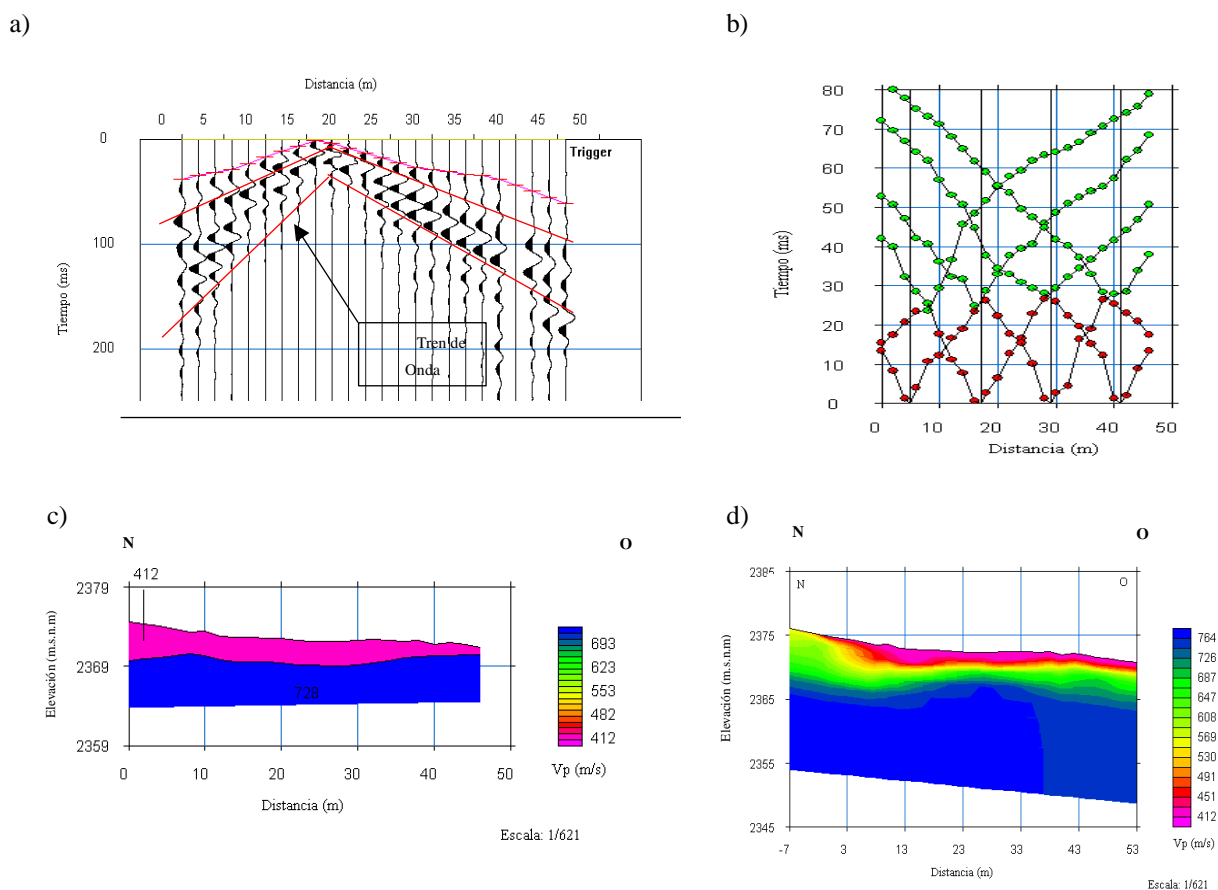


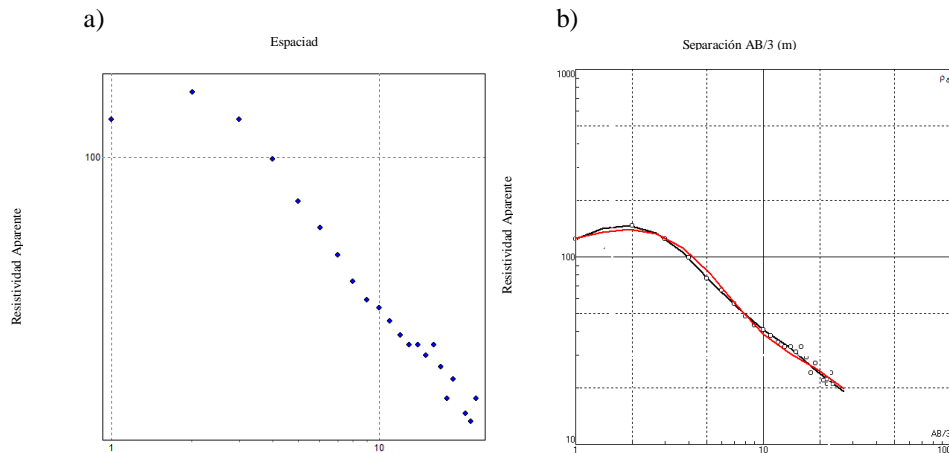
Figura 11. Procesamiento de tomografía de refracción sísmica.

Fuente: Elaboración propia.

Sondeo eléctrico vertical:

Se realizó en el software IPI2win [15] que es un programa para la interpretación 1D automática y manual de curvas SEV con este se obtuvo una gráfica que relaciona los valores de resistividad aparente en función del espaciado como se muestra en la Fig. 12 a) en un gráfico logarítmico de acuerdo al arreglo Wenner (alpha). Los valores de campo de la resistividad aparente son marcados por círculos y la curva que se presenta por una línea negra es el resultado de atenuar los valores de campo por el método spline, la curva es plotada en escala logarítmica para los dos ejes como se muestra en la Fig. 12 b). El rango de los valores en los ejes es determinado automáticamente de manera tal que la escala de la curva puede variar para diferentes puntos de sondeo Fig. 12 c), se acomoda la línea azul que representa los parámetros del modelo analizado de tal forma que el porcentaje de error sea mínimo Fig. 12 d). [16]

d). [16]



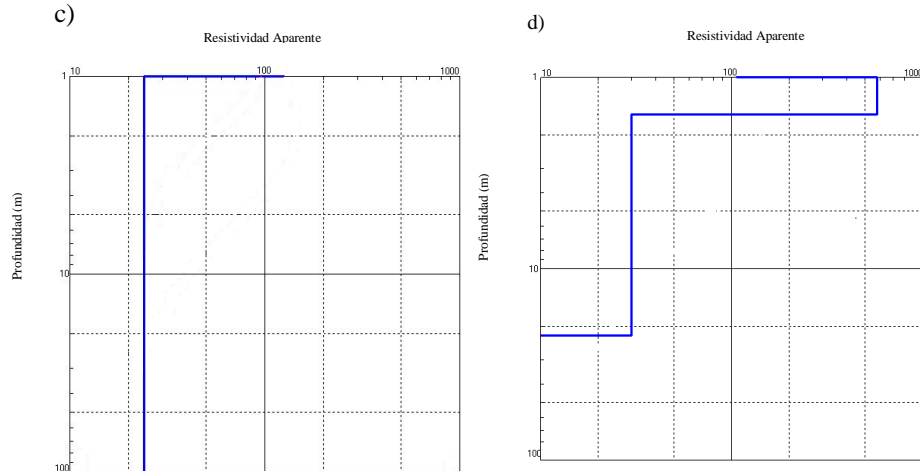


Figura 12. Visualización del procesamiento de los SEV en el software IPI2win, a) Dispersión de las resistividades aparentes en función del espaciado, b) Curva de atenuación de los datos de resistividad de campo, c) Perfil resistividad aparente con profundidad de una capa y d) La profundidad de capas en función de la resistividad real.

Fuente: Elaboración propia.

Ensayo de penetración estándar:

El software NovoSPT [17] fue el utilizado para el procesamiento de los datos obtenidos con el Ensayo de Penetración Estándar, en el cual con los N de campo y la profundidad de los estratos encontrados es posible estimar los parámetros estructurales del suelo. Los datos obtenidos pueden variar de acuerdo a los métodos escogidos, se usaron tres para cada uno de los parámetros buscados, haciendo un promedio de los tres y de esa manera obteniendo el resultado para Angulo de fricción interno Fig. 13 a), modulo corte Fig. 13 b), peso específico Fig. 13 c), modulo Young Fig. 13 d).

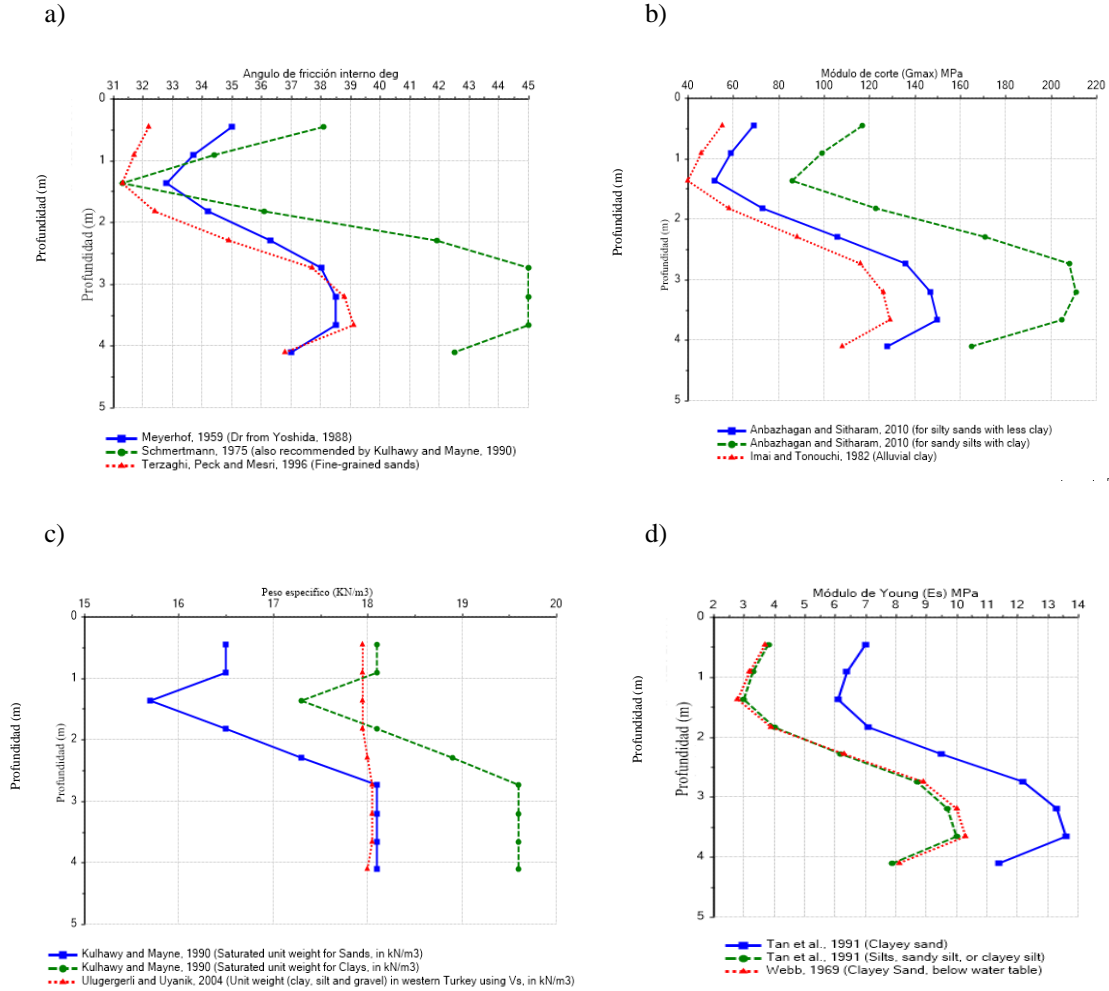


Figura 13. Parámetros estructurales del suelo en función de la profundidad, a) Angulo de Fricción Interno, b) Modulo de Corte, c) Peso Específico, d) Modulo de Young. Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Análisis multicanal de onda 1D:

Los modelos finales del procesamiento de MASW 1D se observan en la Fig. 14 a), muestra velocidades aparentes entre 220 m/s a 389 m/s de la línea 1 y profundidad máxima de 24.3 m. En la Fig. 14 b) se muestra velocidades entre 325 m/s a 675 m/s de la línea 2 y profundidad máxima de 36.4 m. En la Fig. 14 c) se muestra velocidades entre 230 m/s y 500 m/s, profundidades máximas de 24 m. En la Fig. 14 d) se observa velocidades entre 195 m/s a 523 m/s. En la Tabla 3 se muestran los rangos de cada línea sísmica.

Tabla 3.
Resultados MASW 1D.

Línea	Profundidad promedio (m)	Vs (m/s)
L1	18,7	310-675
L2	23,2	315-640
L3	17,8	175-380
L4	23,5	225-520

Fuente: Elaboración propia.

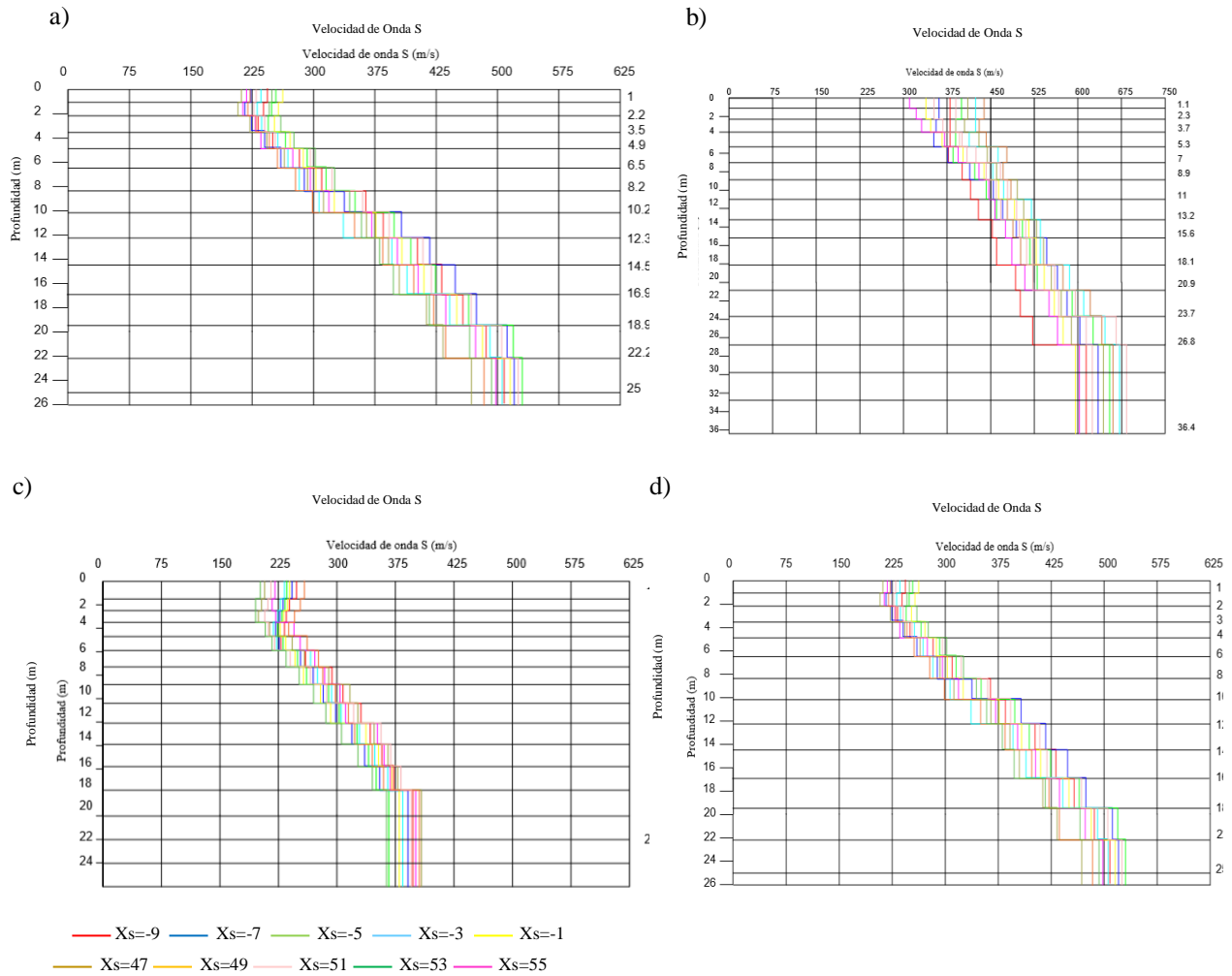


Figura 14. a) Perfil del modelo final MAS W 1D Línea 1, b) Perfil del modelo final MAS W 1D Línea 2, c) Perfil del modelo final MAS W 1D Línea 3 y d) Perfil del modelo final MAS W 1D Línea 4.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis multicanal de onda 2D:

Del procesamiento de la información de MASW 2D se obtiene un modelo de capas con colores, donde se muestra la distancia en metros en función con la elevación en metros sobre el nivel mar para cada una de las líneas respectivamente, la línea 1 Fig. 15 a), en la que identifican dos estratos, el primero con una profundidad promedio de 9 m y con velocidades de onda S entre 107 m/s y 283 m/s y el segundo con un espesor indefinido y velocidades entre 285 m/s y 389 m/s. en la línea 2 Fig. 15 b) se visualiza una distribución similar a la de la línea 1 y los valores de espesores y velocidades se muestran en la Tabla 4. En las líneas 3 Fig. 15 c) y 4 Fig. 15 d) se identifican tres estratos cuyos valores de espesores y velocidades también se visualizan en la Tabla 4.

Tabla 4.
Resultados MASW 2D.

Línea	Capas	Espesores promedio (m)	Vs (m/s)
L1	1	9	107-283
	2	Indefinido	283-389
L2	1	10	158-278
	2	Indefinido	278-350
L3	1	7	128-209
	2	5,5	239-346
	3	Indefinido	346-417
L4	1	5	130-239
	2	8	239-346
	3	Indefinido	346-417

Fuente: Elaboración propia.

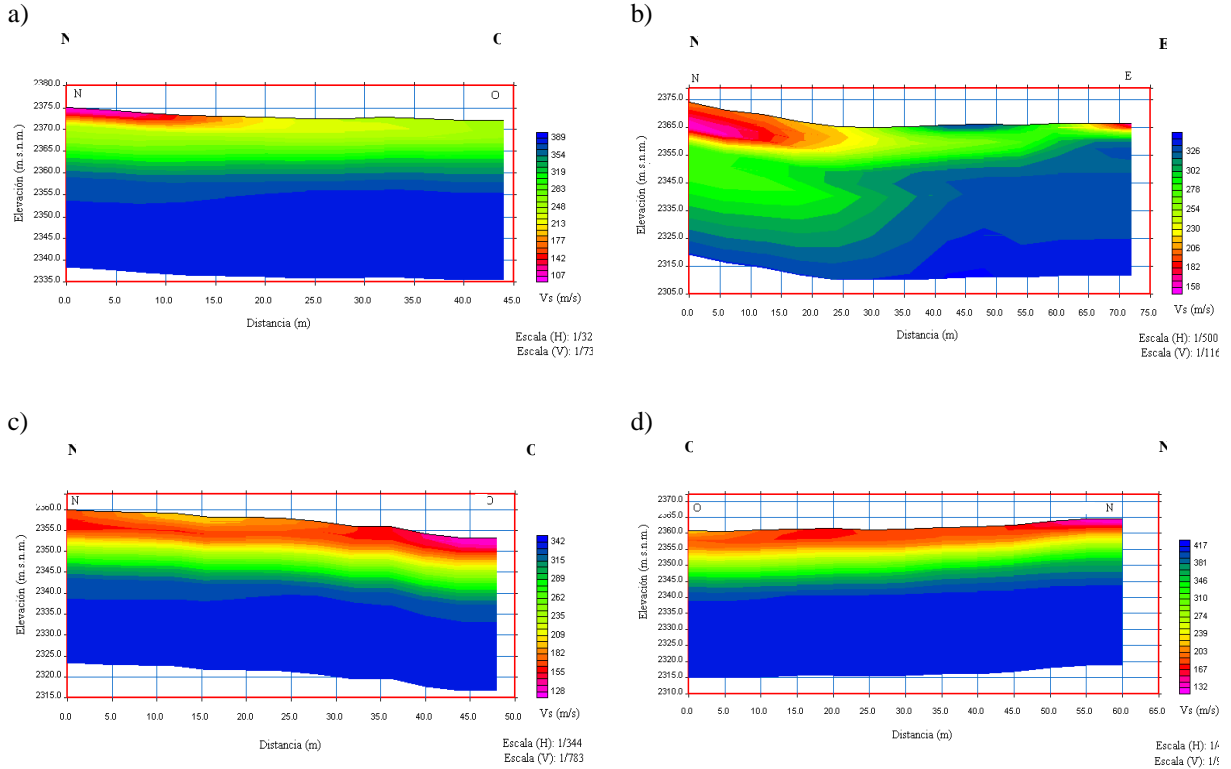


Figura 15. a) Perfil del modelo final MAS W 2D Línea 1 b) Perfil del modelo final MAS W 2D Línea 2 c) Perfil del modelo final MAS W 2D Línea 3 d) Perfil del modelo final MAS W 2D Línea 4.

Fuente: Elaboración propia.

Tomografía de refracción sísmica:

El procesamiento de TRS nos muestra modelos finales en colores que representan la elevación en función de la distancia para cada tomografía respectivamente. En el caso de la línea 1 se identifican tres estratos con una profundidad máxima de 3.4m y mínima de 0.9m con velocidades entre 400 a 500 m/s, el segundo estrato de 3.8 m máximo y 1.3 m mínimo de profundidad y velocidades entre 500 y 650 m/s y una tercera capa a partir de este segundo estrato y velocidades mayor a 650 m/s como se muestra en la Fig. 16 a). Para la línea 2, 3 y 4 se encuentra una distribución similar a la Línea 1 Fig. 16 b), 16 c) y 16 d) respectivamente, el valor de los espesores promedio y los rangos de la velocidad de onda P se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5.
Resultados de TRS

Línea	Capas	Espesor (m)	Vp (m/s)
L1	1	3,4	412-510
	2	5	510-687
	3	Indefinido	687-784
L2	1	4,9	623-873
	2	5,5	873-1498
	3	Indefinido	1498-1747
L3	1	5,2	220-235
	2	4,7	235-260
	3	Indefinido	260-275
L4	1	4	220-250
	2	4,9	250-330
	3	Indefinido	330-380

Fuente: Elaboración propia.

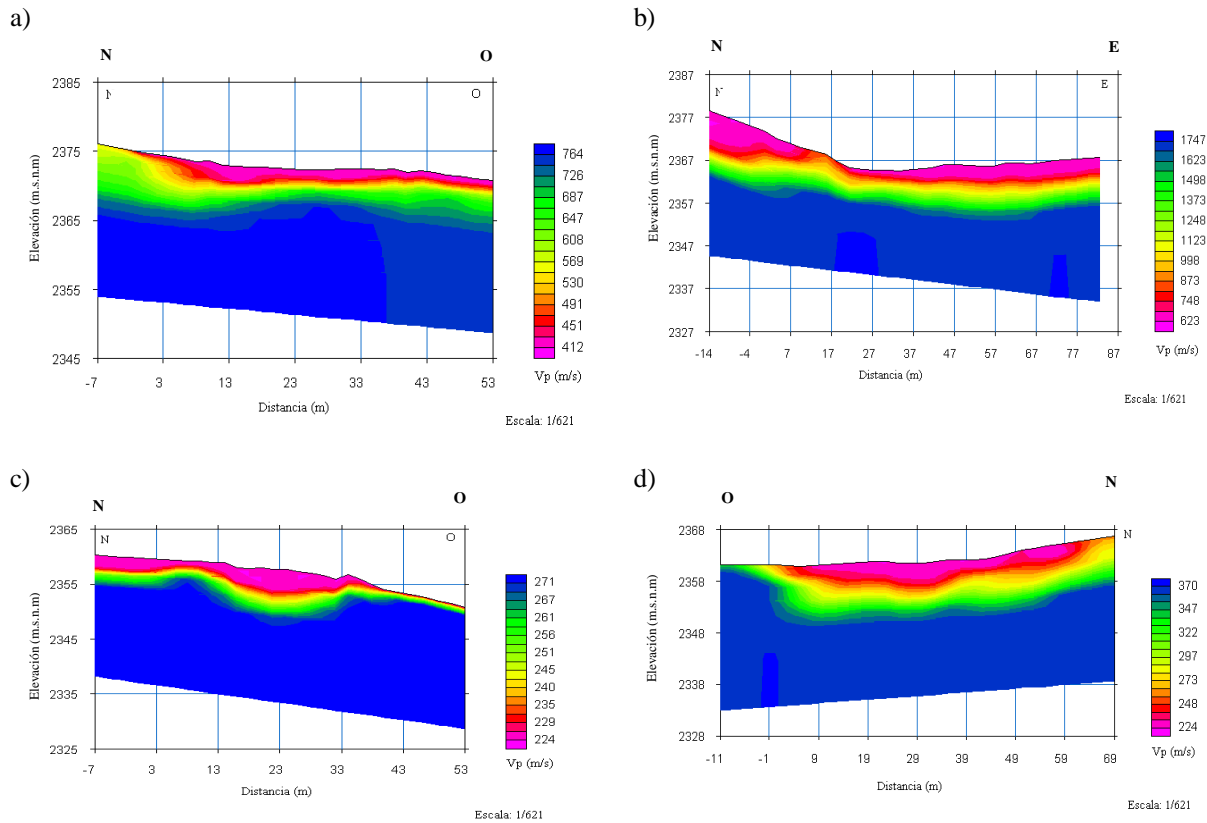


Figura 16. Resultados TRS a) modelo final línea 1, b) modelo final línea 2, c) modelo final línea 3 y d) modelo final línea 4.

Fuente: Elaboración propia.

Sondeo eléctrico vertical:

El resultado del procesamiento de los datos eléctricos en el software nos muestra un perfil de resistividades reales en función de la profundidad alcanzada para cada una de las capas identificadas, también se obtiene información de resistividad, espesor y profundidad de cada una de ellas, esta información es mostrada en la Tabla 6. En la Fig. 17 se observan los perfiles de seis (6) sondeos, donde se evidencia las variaciones de la resistividad, también se observa el espesor de cada capa y la profundidad alcanzada con cada ensayo.

Tabla 6.

Resultados de los modelos para los sondeos eléctricos verticales, (N) Número de capas, (ρ) Resistividades, (E) Espesores y (Z) profundidades.

Sondeo	N	ρ (Ω -m)	E (m)	Z (m)
SEV 1	1	136	1	1
	2	321	1,13	2,13
	3	47,3	2,68	4,81
	4	71,7	10,5	15,3
	5	8,31		
SEV 2	1	57,3	1,01	1,01
	2	3134	0,116	1,13
	3	34	14,9	16
	4	26,8		
SEV 3	1	31,1	0,994	0,994
	2	166	2,4	3,39
	3	17,9	16,2	19,6
	4	26,6		
SEV 4	1	96,4	0,973	0,973
	2	119	6,6	7,57
	3	12,7	16,1	23,7
	4	538		
SEV 5	1	107	1	1
	2	579	0,561	1,56
	3	29,9	20,7	22,3
	4	4,78		
SEV 6	1	171	1	1
	2	66,6	7,06	8,06
	3	10,5	10,1	18,2
	4	29,9		
SEV 7	1	83,7	1	1
	2	126	1,38	2,38
	3	0,202	6,67	9,05
	4	2,72		

Fuente: Elaboración propia.

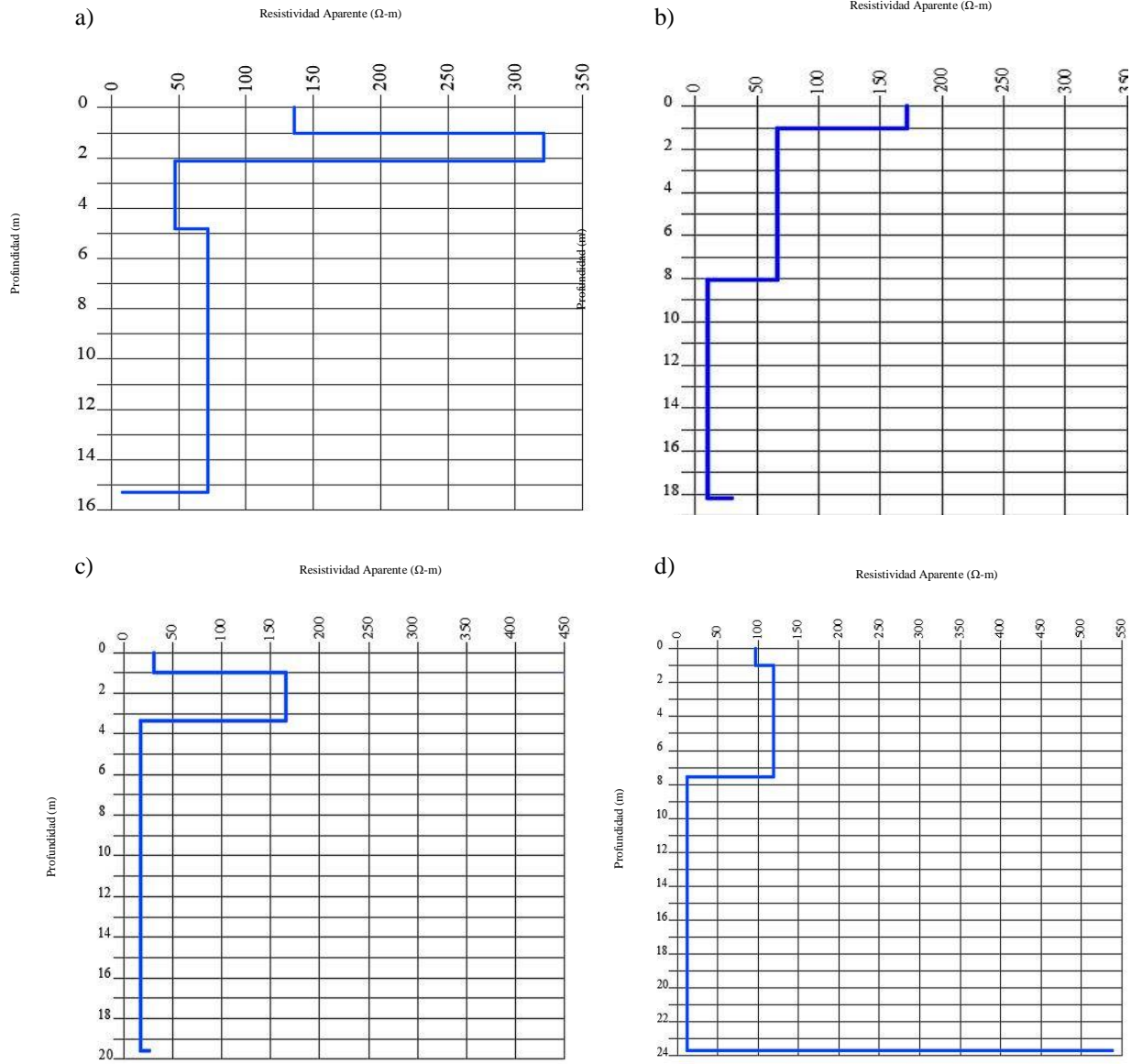


Figura 17. Perfil de la resistividad real en función de la profundidad para los SEV.

Fuente: Elaboración propia.

Ensayo de penetración estándar:

Del procesamiento de los datos adquiridos en campo con el SPT, obtenemos parámetros estructurales fundamentales del suelo, mostrados en la Tabla 7 al igual que la profundidad máxima alcanzada. En la Fig. 13 se observa la relación de profundidad en función a estos parámetros según diferentes autores. Los parámetros encontrados: Angulo de fricción interno Fig. 13 a), modulo corte Fig. 13 b), peso específico Fig. 13 c), modulo Young Fig. 13 d).

Tabla 7.
Constantes elásticas y dinámicas del suelo.

SPT	Estrat o	Profundida d (m)	Peso Específic o (KN/m3)	Módul o de corte (MPa)	Módul o de Young (MPa)	Angul o de fricción interno (°)	Qa (Mpa)
1	Perforación 1	0 - 1.83	17.38	73.25	5.69	32.69	0.1247
	2	1.83 - 3.66	17.25	59.67	5.35	30.94	0.1198
2	Perforación 1	0 - 2.29	17.52	82.8	5.09	34.42	0.4633
	2	2.29 - 4.11	18.58	152.42	10.34	40.16	1.7550

Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Análisis multicanal de onda 1D:

De acuerdo con los resultados obtenidos con MASW 1D se pueden identificar los siguientes tipos de suelo para cada línea sísmica.

Línea 1: Según los resultados obtenidos para la primera línea, se observó una primera capa la cual presenta un material superficial meteorizado, en la segunda capa se observó un material con presencia de arenas limosas y una tercera capa la cual puede asociarse a un suelo rígido tipo D [8] con presencia de arena arcillosa.

Línea 2: Según los resultados obtenidos para la segunda línea, se observó una primera capa la cual presenta un material superficial meteorizado, en la segunda capa se observó un material con presencia de arenas saturadas y una tercera capa la cual puede asociar aun un suelo rígido tipo D [8] con presencia de arcilla saturada.

Línea 3: Según los resultados obtenidos para la tercera línea, se observó una primera capa la cual presenta un material superficial meteorizado, en la segunda capa se observó un material con presencia de arenas limosas y una tercera capa la cual puede asociarse a un suelo rígido tipo D [8] con presencia de arena arcillosa.

Línea 4: Según los resultados para la cuarta línea, se observó una primera capa la cual presenta un material superficial meteorizado, en la segunda capa se observó un material con presencia de arenas saturadas y una tercera capa la cual puede asociarse a un suelo rígido tipo D [8] con presencia de arcillosa saturada. Resultados de los métodos geofísico, geo eléctrico y geotécnicos utilizados en la investigación.

Análisis multicanal de onda 2D:

Con base en los resultados de Vs obtenidos con MASW 2D, podemos clasificar los perfiles de suelo teniendo en cuenta las velocidades de ondas S [18] presentes en la zona de estudio de la siguiente manera: para la línea 1 y 2 en la primera capa un suelo tipo D y para la segunda capa de suelo tipo C. Para las líneas 2 y 3 inicialmente se observaban dos capas, pero debido a que el rango de velocidades es bajo y de acuerdo a la clasificación a partir de la velocidad de onda S son estimables dos capas, una primera capa de suelo tipo D y la segunda capa de suelo tipo C.

Tomografía de refracción sísmica:

De acuerdo con la información obtenida en el procesamiento de los datos de Tomografía Refracción Sísmica y con la ayuda la tabla de rango de velocidades de las ondas P [19], podemos clasificar los estratos presentes en el subsuelo para cada una de las cuatro (4) línea.

Línea 1: en el primer estrato presenta una Arcilla Arenosa Semi-Consolidada (Suelo arcilloso), el segundo estrato una Arena Seca y el tercer estrato una Arcilla Esquistosa (Shale).

Línea 2: tendríamos que el primer estrato es una arena húmeda o saturada, el segundo estrato Arcilla Esquistosa (Shale) y el tercero Arenas Compactas.

Línea 3: debido a que el rango de velocidades es muy reducido podría considerarse que son solo un material: Suelo blando, la velocidad varía levemente debido a una posible saturación del terreno y podría considerarse en el rango de una Marga Humedecida.

Línea 4: al igual que en la 3, considerando las mismas condiciones que la línea 3, se llega a la conclusión que también es una Marga Humedecida.

Sondeo Eléctrico vertical:

Según los resultados de los SEV y usando la tabla de valores típicos de resistividad [20] para algunos materiales de la capa somera del suelo podemos decir que:

SEV 1: Según los resultados para el primer sondeo, observamos un material con resistividades por encima 300 Ω -m que puede ser interpretado como Basamento, roca fracturada con agua corriente. También se logra identificar un material con resistividades entre 7 a 140 Ω -m, el cual puede interpretarse como Arenas Saturadas, el espesor de estas arenas en promedio es de 8 a 10 m.

SEV 2: Según los resultados para este sondeo, observamos un material con resistividades por encima 3100 Ω -m que puede ser interpretado como Basamento, roca fracturada. También se logra identificar un material con resistividades entre 25 a 58 Ω -m, el cual puede interpretarse como Basamento, roca fracturada con agua corriente, el espesor de esta capa en promedio es de 15 a 20 m.

SEV 3: Según los resultados para este sondeo, observamos un material con resistividades por encima 160 Ω -m que puede ser interpretado como Arena Saturada. También se logra identificar un material con resistividades entre 17 a 32 Ω -m, el cual puede interpretarse como Arcilla Saturada, el espesor de esta capa en promedio es de 8 a 10 m.

SEV 4: Según los resultados para este sondeo, observamos un material con resistividades por encima 530 Ω -m que puede ser interpretado como Arena no Saturada. También se logra

identificar un material con resistividades entre 5 a 120 Ω -m, el cual puede interpretarse como Arenas Saturada, el espesor de esta capa en promedio es de 15 a 20 m.

SEV 5: Según los resultados para este sondeo, observamos un material con resistividades por encima 575 Ω -m que puede ser interpretado como Arena no Saturada. También se logra identificar un material con resistividades entre 4 a 110 Ω -m, el cual puede interpretarse como Arenas Saturada, el espesor de esta capa en promedio es de 15 a 20m.

SEV 6: Según los resultados para este sondeo, observamos un material con resistividades por encima 170 Ω -m que puede ser interpretado como Arena Saturada. También se logra identificar un material con resistividades entre 10 a 67 Ω -m, el cual puede interpretarse como Basamento, roca fracturada con agua corriente, el espesor de esta capa en promedio es de 8 a 10 m.

SEV 7: Según los resultados para este sondeo, observamos un material con resistividades por encima 120 Ω -m que puede ser interpretado como Arena Saturada. También se logra identificar un material con resistividades entre 2 a 80 Ω -m, el cual puede interpretarse como Arenas Saturadas, el espesor de esta capa en promedio es de 5 a 7 m.

Ensayo de penetración estándar:

En los sondeos de SPT se obtuvo la siguiente información para cada una de las perforaciones, en ambos casos la clasificación se realizó después de los ensayos de Humedad, límites de Atterberg (líquido y plástico) y granulometría. Clasificados según la American Association of State Highway Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Perforación 1: Profundidad máxima alcanzada de 3.66 m debido a rechazo por a la presencia de rocas, identificable gracias al taponamiento que éstas generaron en la punta del muestreador de tubo partido. Se obtuvo una Arena Arcillosa.

Perforación 2: 4.11 m de profundidad máxima alcanzada, debido a rechazo por presencia de material más compactado, haciendo que la cantidad de golpes necesarias para tomar las muestras sea muy alta. Se obtuvo una Arcilla Limosa.

CORRELACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS CON SPT

De la integración de los resultados de velocidad de onda S y velocidad de onda P de los ensayos de TRS y MASW con los resultados de las constantes elásticas dinámicas del suelo adquiridos con el SPT obtenemos la correlación mostrada en la Tabla 8.

Tabla 8.

Correlaciones TRS, MASW y SPT.

Línea	Profundidad promedio (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (KN/m ³)	Módulo de corte (MPa)	Coefficiente de poisson (MPa)	Módulo de young (MPa)	qa (MPa)
L1	3.4	450	160	15.29	39.95	0.4276	11.41	0.0587
	5	575	290	17.74	152.28	0.3294	40.49	0.1235
	4.9	675	190	15.96	58.81	0.4570	17.14	0.0728
L2		117						
	5.5	5	280	17.59	140.72	0.4699	41.37	0.1182
L3	5.2	220	150	15.05	34.55	0.0656	7.36	0.0542
	4.7	250	230	16.75	90.39	-2.2552	-22.69	0.0924
L4	4	220	170	15.53	45.79	-0.2410	6.95	0.0633
	4.9	250	240	16.92	99.48	-5.3776	-87.09	0.0975

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta las ecuaciones de Peso específico eq. (1), Módulo de corte eq. (2), Coeficiente de Poisson eq. (3), Módulo de Young eq. (4) y Módulo de elasticidad eq. (5), que relacionan valores de Vs y Vp para el cálculo de estas constantes elásticas y dinámicas del suelo.

$$1) \gamma = 4.5V_s^2 \left(\frac{KN}{m^3} \right)$$

$$2) G = \frac{\gamma}{g} V_s^2 \left(\frac{KN}{m^2} \right)$$

$$3) \mu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2}{2 \left(\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right)}$$

$$4) E_{din} = 2(1 + \mu)G$$

$$5) E_{est} = (0.09346 * E_{din}) + 4$$

CORRELACIÓN DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos en los métodos de MASW, TRS y SEV. Se realizó la integración de las profundidades en el centro de la longitud de las cuatro líneas estudio como lo muestra la Fig. 18. Se realizó la correlación de las profundidades de cada método, finalmente se observó un modelo de 3 capas para las cuatro líneas de estudio. En la primera capa se observó un material Meteorizado, en la segunda capa se observó una Arcilla Limosa y para la tercera capa se observó un material tipo Arena Arcillosa. Los modelos de esta integración se observan en la Fig. 19 para cada línea respectivamente, Fig. 19 a) línea 1 muestra una profundidad máxima de 6.5 m, Fig. 19 a) línea 2 muestra una profundidad máxima de 11 m, Fig. 19 a) línea 3 una profundidad máxima de 11.1 m y Fig. 19 a) línea 4. Una profundidad máxima de 10.5 m.

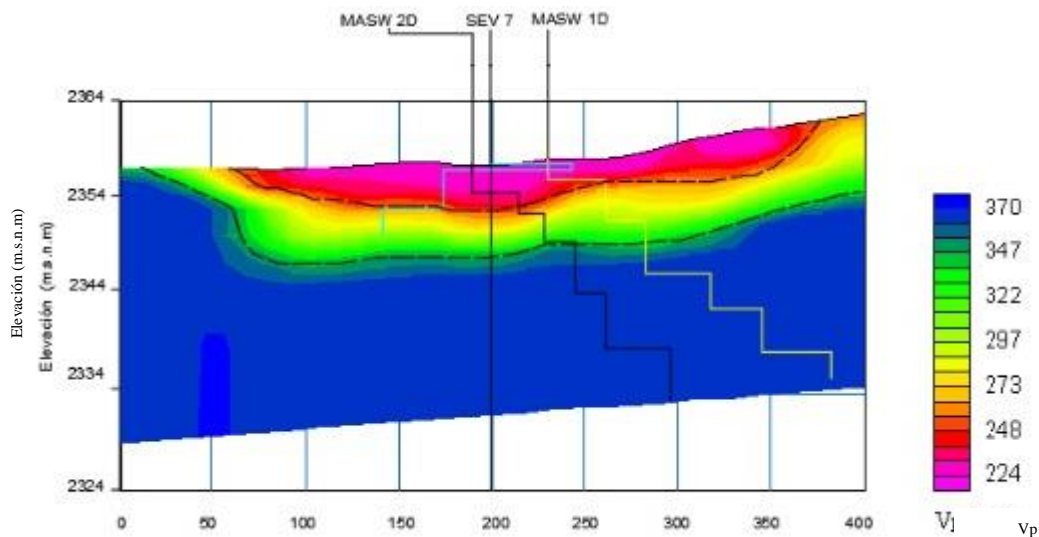


Figura 18. Integración de datos de MASW 1D, SEV y MASW 2D.

Fuente: Elaboración propia.

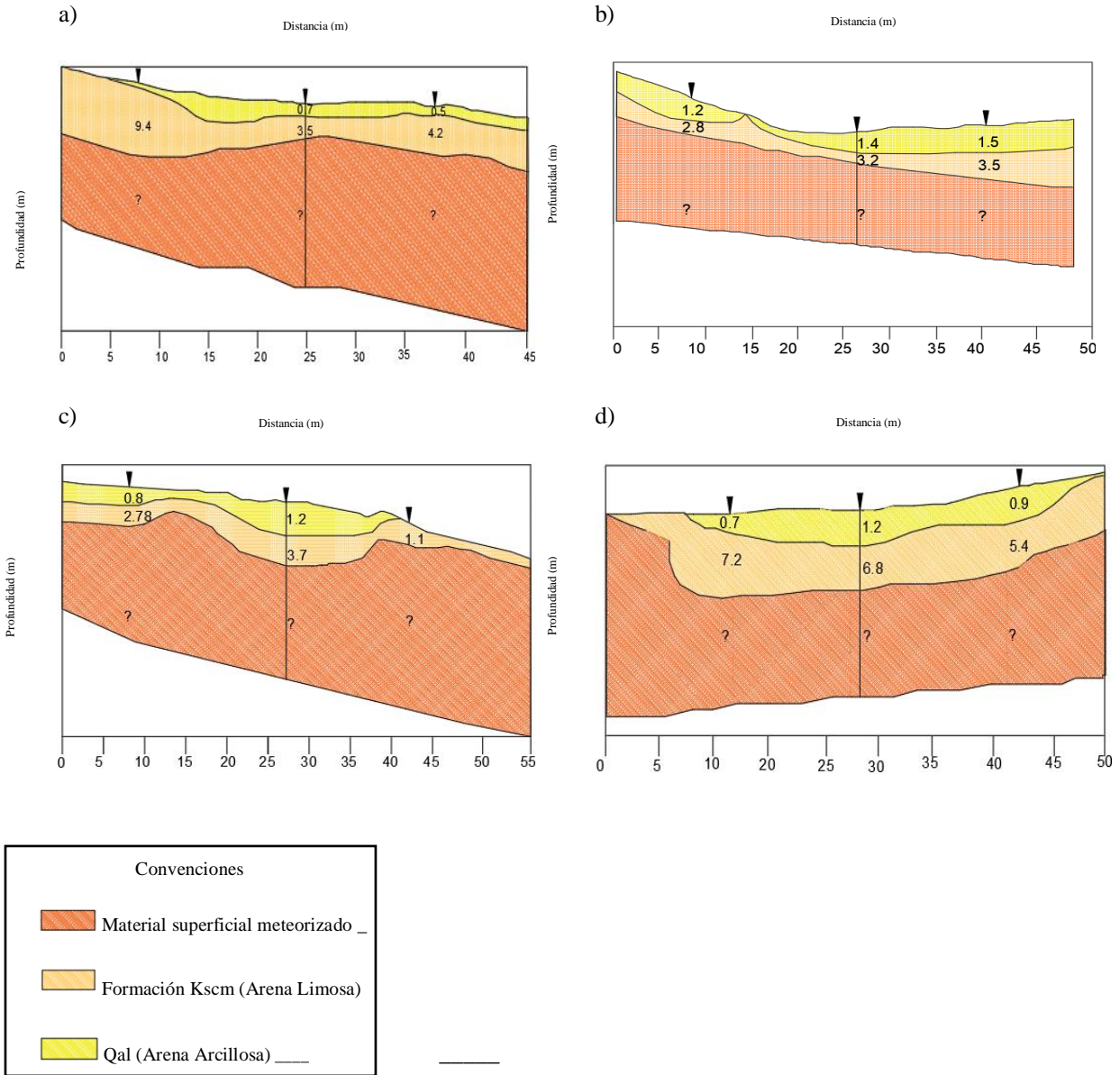


Figura 19. Profundidad por cada capa, según la correlación de las profundidades a) Línea 1, b) Línea 2, c) Línea 3 y d) Línea 4.

Fuente: Elaboración propia.

INTERCEPTO DE PERFILES

Interceptando las tomografías de refracción sísmica obtenidos en el procesamiento en el software AutoCAD 2016 se halla un modelo 3D, donde es posible comparar las capas entre las líneas sísmicas estudiadas, distribución de las capas además de la geometría y puntos de intercepción entre los perfiles.

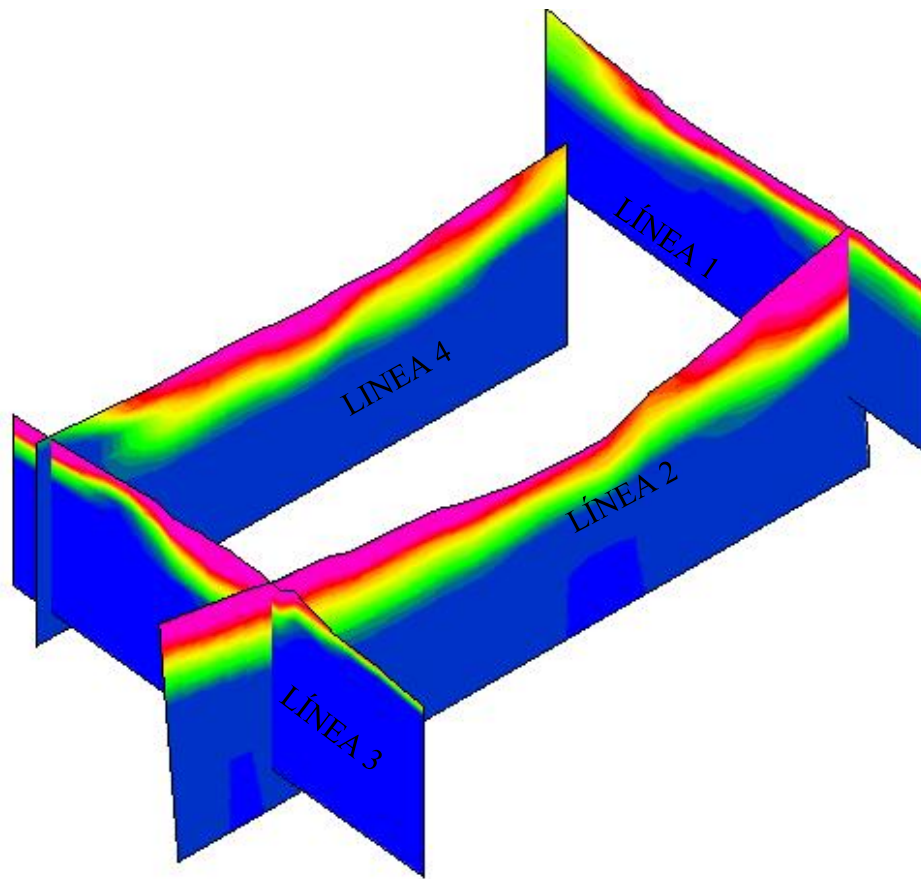


Figura 20: Intercepto usando las tomografías de refracción sísmica.

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

- De los resultados obtenidos de MASW 1D, Según la norma NSR 10, los valores promedio obtenidos de la velocidad superficial (V_s a 30m) están entre 314 m/s a 340.9 m/s, la profundidad promedio en el centro de cada línea fue de 9.8 m, pudo interpretarse como un material rígido (Suelo tipo D).
- De los resultados de MASW 2D y de acuerdo con lo que se evidencio en el área de estudio y asociado a los rangos de velocidad de onda S de 175 a 675 m/s, se concluye la posible presencia de dos estratos de tipo D y C respectivamente.
- De TRS se observaron rangos de velocidades de onda P de 220 a 1748 m/s, de estos valores se puede decir que los tipos de suelo encontrados en el área de estudio pueden asociarse a composiciones entre Arenas y Arcillas.
- De los SEV encontramos que en la zona de estudio el tipo de suelo predominante según la resistividad que esta entre 25 a 600 Ω -m son Arenas Saturadas y No Saturadas y la profundidad de investigación alcanzada fue de 15 a 25 metros aproximadamente.
- De los ensayos de SPT y después de realizar los ensayos de laboratorio necesarios para la clasificación de suelos, se concluye que el tipo de suelo para el área de estudio son suelos Finos (Arena, Arcilla y Limos).
- En el área se evidencio nivel freático, también se observó escorrentía superficial, por estas razones se obtuvieron lecturas bajas en los valores de velocidad de onda P de 220 m/s y velocidad de onda S de 175 m/s, además de los valores bajos de resistividad de 2 a 5 Ω -m. A partir de lo anterior y del SPT se establece un nivel freático a 2.6 m aproximadamente.

RECOMENDACIONES

- Se deben tener en cuenta las características geológicas e hidráulicas, analizar los efectos del proceso de inestabilidad de los terrenos aledaños que pueden tener inferencia en área de estudio.
- Se recomienda realizar más estudios en la zona, como la implementación Tomografía de Refracción Eléctrica. Así mismo una mayor extensión de líneas sísmicas y un mayor número de perforaciones de SPT para tener menor incertidumbre.
- Para los análisis de estabilidad se requiere contar con un modelo geológico-geotécnico que contenga al menos una sección transversal, representando la topografía de la superficie de la ladera, distribución de los materiales en profundidad y condiciones de aguas subterráneas.

REFERENCIAS

- [1] Wikipedia. Geología de Colombia, [en línea] Disponible en:
https://es.wikipedia.org/wiki/Geolog%C3%ADa_de_Colombia
- [2] Marín-Herrera, E. y Avendaño-Hernández, F. Tesis Prospección geofísica ambiental aplicada a la detección de plumas contaminantes debidas a la infiltración de lixiviados en un relleno sanitario, bajo la adaptación de sondeos eléctricos verticales de resistividad y polarización inducida, para obtener tomografías geoelectricas profundas y modelos 3D, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D. C. Colombia. pp 7, 2017.
- [3] Castrechini-Rodríguez, A. Tesis Combinación De Métodos Geofísicos Para Estudios De Suelo En Un Sector De Quito, Ecuador, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela. pp 6. 2019.
- [4] Humire-Guarachi, F. Tesis Aplicación De Métodos Geofísicos Basados En Ondas Superficiales Para La Caracterización Sísmica De Suelos. Aplicación A La Microzonificación Sísmica Del Norte Y Poniente De Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. pp. 18. 2013.
- [5] Mancilla, H. Tesis, Caracterización geofísica de las zonas clausuradas y en operación, en las instalaciones del relleno sanitario regional “la Cortada” Municipio de Pamplona, Norte de Santander, a partir de la aplicación de Refracción Sísmica y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW). Universidad de Pamplona, Colombia. 2017.
- [6] Hinojosa-Carvajal, Y. Tesis, Aplicación de métodos geofísicos en zonas clausuradas y activas del relleno sanitario regional “La Cortada” Municipio de Pamplona, Norte de Santander, Universidad de Pamplona, Colombia. 2017.
- [7] Geologia y Morfologia. Pamplona, [en línea] Disponible en:
<https://www.scribd.com/document/347602237/Pamplona-Norte-de-Santander-Geologia-y-Morfologia>
- [8] Servicio Geológico Colombiano. Geoportal Mapas [en línea] Disponible en:
<https://www.sgc.gov.co/sgc/mapas/Paginas/geoportal.aspx>

- [9] Alcaldía de Pamplona. Información del municipio, [en línea] Disponible en: <http://pamplonanortedesantander.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>.
- [10] Geometrics. Productos, [en línea] Disponible en: <http://www.geometrics.com/geometrics-products/seismographs/geode/>
- [11] SubSuelo3D. Equipos, [en línea] Disponible en: <http://www.subsuelo3d.com/es/ipaginas/ver/16/equipos/>
- [12] Geometrics. Aplicaciones, [en línea] Disponible en: <http://www.geometrics.com/applications/geophysical-methods/surface-wave-analysis/>
- [13] Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), Informe de Geología, Geotecnia y Suelos Norte de Santander, [en línea] Disponible en: <https://www.ani.gov.co/informes-y-reportes>
- [14] Geometrics. Aplicaciones, [en línea] Disponible en: <http://www.geometrics.com/geometrics-products/seismographs/download-seismograph-software/>
- [15] IPI2win - Interpretación 1D del perfil VES, [en línea] Disponible en: <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>
- [16] Universidad Estatal de Moscú, IPI2win guía de usuario [en línea] Moscú. pp. 23, 2000. Disponible en: http://geophys.geol.msu.ru/demo_exe/WIPI_OM2.PDF
- [17] NovoTech. Software de correlaciones SPT (NovoSPT) [en línea] Disponible en: <http://www.novotechsoftware.com/geotechnical-software/spt-correlations-software/>
- [18] Norma Colombiana Sismo Resistente. Título H, [en línea] Disponible en: www.NSR10/tituloH.com
- [19] López, J., Mejía, J., y Vega, N., Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P. Tesis Universidad del Salvador, Salvador., 2008.
- [20] Hoyos-Patiño, F. y Velez-Otálvaro, M., Investigación de las aguas subterráneas de los valles de San Nicolás, Universidad Nacional, Medellín. pp. 6, 2000.