CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO ATRAVES DE MÉTODOS GEOTÉCNICOS Y GEFISICOS EN LA URBANIZACIÓN VALLE DEL ESPÍRITU SANTO. (PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER)

MARTIN ELÍAS PÉREZ ARZUAGA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

PAMPLONA

2019

CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO ATRAVES DE MÉTODOS GEOTÉCNICOS Y GEFISICOS EN LA URBANIZACIÓN VALLE DEL ESPÍRITU SANTO. (PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER)

MARTIN ELIAS PÉREZ ARZUAGA

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

INGENIERO CIVIL

Director:

JAIRO ALBERTO TORRES PEÑA

Codirector:

MANUEL ANTONIO CONTRERAS MARTINEZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

PAMPLONA

2019

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

Firma Jurado 1

_____

Firma Jurado 2

_____

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

Dedico esta tesis a mis padres francisco Javier Pérez Arzuaga y Merci Luz Arzuaga Altamar que siempre me apoyaron incondicionalmente en la parte moral y económica para poder llegar hacer un profesional.

A mis hermanos y demás familiares por el apoyo que siempre me brindaron día a día en el transcurso de cada año de mi carrera universitaria.

Agradecimientos

Agradecimientos al Geofísico Jairo Alberto Torres Peña y al Grupo de Investigación (PANGEA), de la Universidad de Pamplona por facilitarnos sus equipos de investigación para adquirir datos de campo en esta investigación.

A la Universidad de Pamplona por la formación impartida.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 2
ABSTRACT 3
INTRODUCCIÓN 4
JUSTIFICACIÓN 7
OBJETIVOS 8
1. MARCO REFERENCIAL 9
2. MARCO CONTEXTUAL 13
2.1. ZONA DE ESTUDIO 15
3. MARCO TEÓRICO 17
3.1. MÉTODO GEOFÍSICO 17
3.1.1. Método sísmico 17
3.1.2. Refracción sísmica 17
3.1.3. Maws (multichannel analysis of surface waves) 18
3.1.4. Ondas P Ondas Primarias (P) 19
3.1.5. Ondas s 20
3.1.6. Ondas Rayleing 20
3.1.7. Geoeléctrica 21
3.1.10. Método geotécnico Prueba De Penetración Estándar (Spt) 22
3.1.11. Ensayos De Laboratorio 22
4. METODOLOGÍA 26
4.1. Fase I: Adquisición de datos geofísicos y geotécnicos. 26
5. RESULTADOS 39
5.1. Análisis de resultados 49
BIBLIOGRAFÍA 55

Lista de tablas

Tabla 1. Coordenadas punto inicial y final de las líneas sísmicas, coordenadas centro de Sondeos Eléctricos Verticales y Ensayo de Penetración Estándar 27

Tabla 2. Límites de Consistencias.....38

Tabla 3. Resultados e interpretación TRS 41

Tabla 4. Resultados e interpretación de MASW 2D 46

Tabla 5. Variación de los parámetros dinámicos de acuerdo a la profundidad 49

Tabla 6. Parámetros dinámicos del subsuelo a partir de los resultados sísmicos de Vp y Vs.....50

Tabla 7. Diferencia de los parámetros dinámicos, calculados por los métodos geofísicos y el método geotécnico. 51

Lista de figuras

Figura 1. Vista superior de la urbanización valle del espíritu santo 5

Figura 2. Fallas estructuralezs; a. Grieta por cortante ángulo de falla de 45°, b. Grieta por flexión, c. Grietas por asentamiento diferencial significativo en la zona, d. Despasivación y corrosión del acero. 6

Figura 3. Localización Geográfica; a. Localización del Municipio de Pamplona; b. Urbanización Valle del Espirito Santo; c. Zona de estudio. 13

Figura 4. Geología de la plancha 110 Pamplona
Fuente: Ministerio de minas y energía (servicio geológico colombiano) 15

Figura 5. Líneas sísmicas y ubicación de puntos donde se ubicaron los sondeos eléctricos y ubicación de ensayo de penetración estándar. 16

Figura 6. Ángulo crítico de refracción Ic. 18

Figura 7. Descripción del armado de la línea sísmica para recompilar los datos MASW 1D 19

Figura 8. Propagación de las ondas en un medio de dos capas. 19

Figura 9. Propagación de las ondas p.....20

Figura 10. Propagación de las ondas p.....20

Figura 11. Comportamientos de las ondas Rayleigh 21

Figura 12. Distribución y posición de los electrodos.....22

Figura 13. Equipos utilizados 27

Figura 14. a. Picados primeros arribos, onda refractada correspondiente a X_s= 38.8m 28

Figura 15. b. Datos observados vs Calculados 29

Figura 16. c. Modelo basado en la inversión de Mínimos Cuadrados 29

Figura 17. d. Modelo a partir de la inversión de la tomografía 30

Figura 18. Procesamiento MASW 1D 31

Figura 19. Procesamiento MASW 1D. b. Curva de dispersión experimental.....31

Figura 20. Procesamiento MASW 1D c. Modelo teórico ajustado 32

Figura 21. Procesamiento MASW 1D. d. Perfil final de velocidades aparentes y reales 32

Figura 22. Procesamiento MASW 2D. a. Frente de Ondas Superficiales en Xs= 25m.....33

Figura 23. Procesamiento MASW 2D. b. Curvas de dispersión activas resultantes del stacking .34

Figura 24. Procesamiento MASW. c. Perfil transversal inicial generado a partir de las curvas ...34

Figura 25. Procesamiento MASW 2D. d. Modelo final generado por la inversión.....35

Figura 26. Procesamiento Sondeos Eléctricos Verticales. a. Resistividades reales 36

Figura 27. Procesamiento Sondeos Eléctricos Verticales. b. Resistividad real representada por el color rojo, el color negro representa la resistividad aparente. 36

Figura 28. Procesamiento Sondeos Eléctricos Verticales. c. Perfil geoélectrico 37

Figura 29. Curva granulométrica. 38

Figura 30. Tomografía de Refracción Sísmica. a.TRS línea N°1 orientación Este-Oeste.....39

Figura 31. Tomografía de Refracción Sísmica. b. TRS línea N°2orientación Este-Oeste
Fuente: Elaboración propia.....40

Figura 32. Tomografía de Refracción Sísmica. c. TRS línea N°3 orientación Norte-Sur
Fuente: Elaboración propia.....40

Figura 33. Tomografía de Refracción Sísmica. d. TRS línea N°4 orientación Norte-Sur
Fuente: Elaboración propia.....41

Figura 34. Modelos finales de los tendidos sísmico MASW 1D. a. Perfil recopilado Línea N°1.42

Figura 35. Modelos finales de los tendidos sísmico MASW 1D. b. Perfil recopilado Línea N°2
Fuente: Elaboración propia.....43

Figura 36. Modelos finales de los tendidos sísmico MASW 1D. c. Perfil recopilado Línea N°3
Fuente: Elaboración propia.....43

Figura 37. Modelos finales de los tendidos sísmico MASW 1D. d. Perfil recopilado Línea N°4.
Fuente: Elaboración propia.....44

Figura 38. Perfiles Transversales finales MASW 2D. a. Perfil transversal Línea N° 1 44

Figura 39. Perfiles Transversales finales MASW 2D. b. Perfil transversal Línea N°2 45

Figura 40. Perfiles Transversales finales MASW 2D c. Perfil transversal Línea N°3 45

Figura 41. Perfiles Transversales finales MASW 2D. d. Perfil transversal Línea N°4
Fuente: Elaboración propi. 46

Figura 42. Perfiles Transversales de los SEV. a. Perfil transversal SEV6, SEV1 y SEV7.....47

Figura 43. Perfiles Transversales de los SEV. b. Perfil transversal SEV5, SEV2, SEV3 y SEV4
Fuente: Elaboración propia.....48

Figura 44. Variación del número de golpes en función de la profundidad 48

RESUMEN

En esta investigación presenta el uso de técnicas geofísicas y geotécnicas para caracterizar el subsuelo en la Urbanización Valle del Espíritu Santo en el municipio de Pamplona, departamento de Norte de Santander (Colombia). Las técnicas implementadas fueron: Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), Sondeos Eléctricos Verticales (SEV); y el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) para el caso geotécnico. El objetivo principal de este trabajo, fue obtener propiedades físicas y geotécnicas de los suelos en la zona de interés, y dar una explicación sobre las posibles causas de las fallas estructurales y patológicas de esta urbanización. Los datos se registraron mediante el levantamiento de cuatro líneas sísmicas, siete Sondeos Eléctricos Verticales y un Ensayo de Penetración Estándar, luego se hizo un procesamiento de datos para el caso sísmico de Tomografía de Refracción Sísmica se utilizó el software de seisimager mientras que en el análisis multicanal de odas superficiales se utilizaron programas como Surface Wave Análisis Wizard y WaveEq (Surface Wave Análisis) y en la parte geolectrica se realizó con el software Ipi2win y para los parámetros geotécnicos se utilizó el programa NOVO SPT. En este contexto el documento presenta los resultados de una integración de datos, donde se detectaron tres capas: La primera capa con una velocidad de compresión (Vp) entre 300-1228 m/s y una velocidad de corte (Vs) de 121-335 m/s, espesor de 3.13 a 6.3 m y resistividad de 30.7-130 Ωm, el cual corresponde a un limo arcilloso. Mientras que la segunda capa presenta valores de Vp que van desde 997 a 1706 m/s, con velocidades de onda S de 264-481 m/s, espesor entre 6.3 a 20.4 m y resistividad de 6.19-258 Ωm, dicha capa se clasifica como arena arcillosa. La capa número tres presenta Vp entre 1281-1829 m/s, Vs de 380 a 601 m/s. La capacidad de carga admisible del terreno es 460.610Kpa a una profundidad de 5.030 m, donde se puede concluir que el suelo se debe estabilizar para realizar cualquier tipo de construcción.

Palabras claves: Geofísica, Geotecnia, Resistividad, Velocidad sísmica.

ABSTRACT

This work shows the use of geophysical and geotechnical to characterize the surface shallow in the Valle del Espiritu Santo urbanization in Pamplona, department of north of Santander, (Colombia). The techniques implemented are; Seismic Refraction Tomography (SRT), Multichannel Analysis of Surface waves, (MASW). Vertical Electric Sounding (VES); and the Standard Penetration Test (SPT) for the geotechnical case. The main objective of this work was to obtain some physical properties of the soils in the area of interest, and give an explanation about the possible causes of the structural and pathological faults. The data were recorded by surveying four seismic lines seven SEV and one SPT; In this context, the document presents the results of a data integration where three layers: the first layer with between Vp 300-1228 m/s, Vs of 121-335 m/s, thickness of 3.13 a 6.3m and resistivity of 30.7-130 Ωm, which corresponds to clay loam. While the second layer has Vp values ranging from 997 to 1706 m/s, white wave speeds S of 264-481 m/s, thickness between 6.3 to 20.4 m and resistivity of 6.19-258 Ωm, said layer is classified as clayey sand. Layer number three presents Vp between 1281-1829 m/s, Vs of 380 to 601 m/s. The admissible load capacity of the ground is 460.61 Kpa, where we can conclude that the soil must be stabilized to carry out any type of construction.

Key words: Geophysics, Geotechnics, Resistivity, Seismic Speed.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal y actual de la geofísica en la ingeniería civil es la determinación el tipo de suelo que se encuentra a profundidades considerables, haciendo uso de la dinámica de las ondas refractada y las ondas Raleigh cuando se propagan en diferentes medios o estratos de la estructura y composición del subsuelo, en este contexto se pueden obtener imágenes de discontinuidades sísmicas, detección de estratos de suelos blandos bajo otros más rígidos, localización del nivel freático, perfil de velocidades y resistividades. Lo mencionado anteriormente se hace necesarios para la caracterización de un perfil de suelo y la evaluación de sus parámetros dinámicos y geotécnicos que lo componen. Si bien la normatividad Sismo Resistente Colombiana NSR-10 (Ministerio de Ambiente, REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10 , 2010) establece los criterios básicos para realizar estudios geotécnicos de edificaciones, los cuales se fundamentan en investigaciones del subsuelo y características estructurales, con el fin de prever situaciones desfavorables debido a posibles sismos y amenazas geotécnicas. La exploración geotécnica determina el tipo de suelo hallado a poca profundidad ya que se realiza el debido análisis a muestras tomadas en diferentes estratos, en este trabajo de investigación se tomaron muestras a una profundidad máxima de 5 metros de profundidad con el ensayo de penetración estándar SPT y ensayos de laboratorio. Se clasificaron las muestras a través del método geotécnico mediante la norma colombiana de INVIAS que se rige y clasifica los suelos basándose en la USCS. De acuerdo a esto se obtuvo un material del suelo limo arcillosos, las velocidades de onda P y onda S se obtuvieron mediante los métodos geofísicos como la refracción sísmica y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 1D, 2D) y estos a su vez determinan la clasificación del perfil de suelo y con este se puede prever el comportamiento de la masa de suelo ante diferentes eventos. La densidad del suelo, el módulo de rigidez, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson se pueden hallar con los diferentes datos que se obtienen en el laboratorio ya con todas estas variables conocidas con estos métodos se pueden integrar y dar una interpretación del tipo de suelo en la zona de estudio

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El 1 de febrero de 2008, la secretaria de planeación expidió la licencia de construcción de un conjunto residencial denominado Valle del Espíritu Santo en el sector El Zulia, sur de Pamplona Ver Figura. 1. De acuerdo con los representantes de la organización la decisión de ejecutar el proyecto la tomó la administración municipal sin tener en cuenta la licencia ambiental, al igual que se instalaron los servicios de acueducto y alcantarillado sin disponer de diseños. Antes de hacer la entrega de las viviendas, algunas empezaron agrietarse por la inestabilidad del terreno Ver Figura. 2. De acuerdo a lo enunciado anteriormente surge el interrogante.

¿Es fundamental determinar los parámetros dinámicos y geotécnicos para caracterizar el subsuelo?

Figura 1. *Vista superior de la urbanización valle del espíritu santo*

Fuente: (TORRES, 2012)

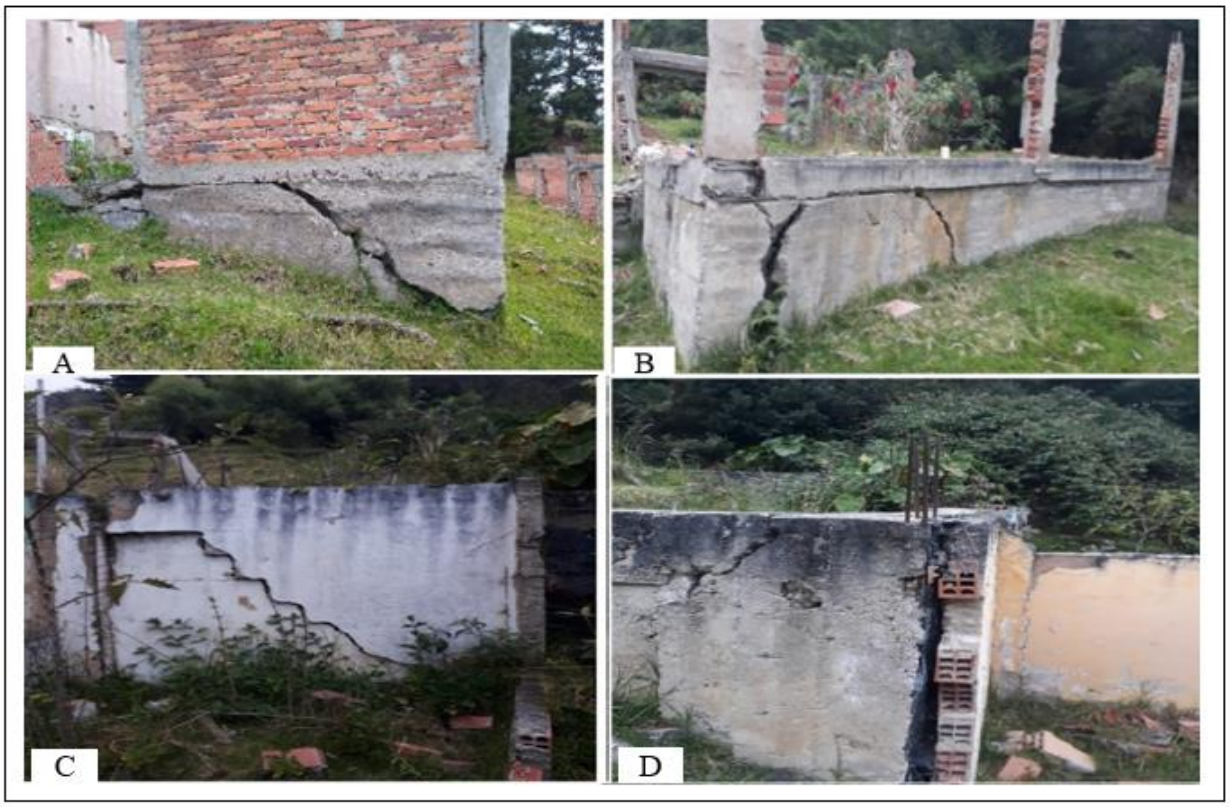


Figura 2. *Fallas estructurales; a. Grieta por cortante ángulo de falla de 45°, b. Grieta por flexión, c. Grietas por asentamiento diferencial significativo en la zona, d. Despasivación y corrosión del acero. Fuente: Elaboración propia*

JUSTIFICACIÓN

En sitios en los que se pretende desarrollar obras civiles de gran importancia, es necesaria la recopilación de información sobre las condiciones del subsuelo, que sirva como herramienta al ingeniero estructural, al ingeniero geotécnico, al geólogo y al hidrogeólogo para la determinación de parámetros tales como: la estratigrafía del sitio, capacidad portante del subsuelo, definición del tipo de cimentación a utilizar y su dimensionamiento, cota de fundación en la que se encuentra el suelo sano y firme, ubicación de yacimientos de rocas sanas y/o alteradas, determinación de fallas, determinación del nivel freático, etc. En ciertas ocasiones, el Estudio de Mecánica de Suelos no provee la información suficiente para definir la mayoría de éstos parámetros, por lo cual, es necesario auxiliarse de métodos alternativos, tal como los métodos sísmicos. De acuerdo a las problemáticas de la urbanización surgió la hipótesis si al utilizar herramientas geofísicas y geotécnicas podría dar una explicación de las posibles causas a las patologías presentadas en esta zona de interés.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Obtener propiedades físicas de los suelos, y dar una explicación sobre las posibles causas de las fallas estructurales y patológicas en la zona de interés.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Se describen algunos ejemplos de verbos comunes que se utilizan en el planteamiento de objetivos, los cuales cambiarán dependiendo de su investigación.

- Obtener valores de velocidad sísmica Vp mediante la adquisición de datos sísmico usando la técnica de la Tomografía de Refracción Sísmica (TRS).
- Adquirir valores de velocidad sísmica Vs mediante la adquisición de datos sísmico usando la técnica de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW).
- Obtener valores de resistividades aparentes mediante la adquisición de datos geolectricos usando la técnica de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).
- Obtener valores parámetros del suelo mediante la adquisición de datos geotécnico usando la técnica del ensayo de Penetración Estándar (SPT).
- Integrar las informaciones geofísicas y geotécnicas con el fin de dar una explicación de las posibles causas patológicas de la zona de interés.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1.ESTADO DEL ARTE

UTILIZACIÓN DE LAS TÉCNICAS GEOMÉTRICAS Y SÍSMICAS DE REFRACCIÓN CON FINES INGENIEROS GEOLÓGICOS EN LA ZONA DE DESARROLLO DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO, PROVINCIA CIENFUEGOS, CUBA

En esta investigación se puede apreciar la combinación de la eléctrica y la sísmica de refracción para el apoyo en la clasificación ingeniero geológico de los suelos objeto de la investigación. En un sitio donde se construirá una planta recalificadora de gas natural licuado La tecnología utilizada para la variable de prospección eléctrica es la iris instrumentos de Francia con el equipo syscal junior el que cuenta con un sistema de 48 nodos inteligente programables diseñados siendo el dispositivo apropiado para la adquisición de datos del medio geológico y en el caso de la símica se usó para la adquisición de los registros sísmicos la estación Summit compact de 24 canales los cuales pueden ser reparados hasta una distancia de 5 metros .En este trabajo se valora la distribución de los diferentes tipos de suelos presentes en el lugar, basado en el comportamiento de la resistividad eléctrica aparentes y las velocidades de las ondas sísmicas y en los espesores del suelo y su respectiva clasificación. Para la ejecución de este trabajo se contó con mapas topográficos, geológicos y el uso de internet para el AutoCAD, herramientas usadas para la elaboración de todos los mapas y software como el súper 8, los resultados se muestran en forma de imágenes donde se pueden observar los perfiles resistividades reales a diferentes niveles de profundidad así mismo su representación geológica.

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS ESPESORES DE CANALES DE GRAVAS EN UN ÁREA DEL CAÑÓN DE LA HUASTECA, EN SANTA CATARINA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

El área metropolitana de Monterrey se localiza en una región donde la precipitación pluvial es errática y concentrada, con periodos largos de baja a escasa precipitación y periodos cortos de gran abundancia. El constante crecimiento del área metropolitana, así como las condiciones climáticas

extremosas hacen insuficiente el abasto obtenido por las presas La Boca, Cerro Prieto y el Cuchillo, así como las diferentes galerías localizadas en el frente de la Sierra Madre Oriental. Debido a lo anterior es necesario recurrir a la extracción de agua de los acuíferos del Sistema Buenos Aires en el Cañón de la Huasteca. Una de las primeras tareas para poder establecer un modelo del acuífero del sistema Buenos Aires, fue el levantamiento de cartografías geológicas a detalle realizadas por tesistas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL y de la Universidad Técnica de Aachen. Una tarea importante es la determinación de los espesores de los canales de gravas, en las zonas de interacción entre el acuífero libre (gravas) y el acuífero profundo (calizas). Las metodologías para la exploración del agua subterránea en un área determinada se basan en la geología superficial y en el nivel freático de los pozos existentes. Sin embargo, se recomienda no sólo enfocar la exploración desde el punto de vista geológico, sino complementar siempre con Geofísica aplicada ya que esto permite realizar una vista tipo \"rayos X\" del subsuelo, de manera indirecta, aplicando diversas técnicas geofísicas. En el presente trabajo se realizaron 2 perfiles de refracción sísmica. El diseño del primer perfil es con una línea de 24 geófonos separados 10m entre cada uno, con el primer punto de tiro a 5m de distancia del primer geófono y los siguientes disparos cada 10m hasta completar el tendido completo de detectores. De este perfil se generaron 25 sismogramas, a partir de los cuales se obtuvieron los primeros arribos para posteriormente graficarlos contra la distancia a los receptores y mediante un ajuste de curvas, por el método de mínimos cuadrados, se obtuvieron líneas de mejor ajuste y con el inverso de la pendiente se obtiene la velocidad de la capa seleccionada en la gráfica. El diseño del segundo perfil sísmico es con 24 geófonos separados 10m cada uno, en este perfil se realizaron 3 disparos, uno al principio de la línea, otro en la parte central y el último en la parte final de la línea. A partir de los datos obtenidos con estos perfiles se obtuvieron dos secciones geológicas y un modelo de velocidades de uno de los perfiles. De los perfiles sísmicos se obtuvieron los modelos correspondientes para una capa formada por canales respectivamente. Por debajo de gravas, cuyas velocidades y espesores varían de 1000 m/s a 1300 m/s y de 16m a 53m.

CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO, APLICANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS Y GEOTÉCNICOS EN EL CAMPUS PRINCIPAL UNIVERSIDAD DE PAMPLONA, PAMPLONA-NORTE DE SANTANDER.

El estudio realizado consistió en la caracterización de los suelos aplicando métodos como los son: refracción sísmica, método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y tomografía de resistividad eléctrica (TRE). Esta investigación se desarrolló en el campus principal Universidad de Pamplona, Pamplona-Norte de Santander, tomando como referencia diferentes longitudes para cada método descritas así: Refracción Sísmica con longitud de 90 m, MASW con longitud de 30 m y una Tomografía de Resistividad con longitud de 123 m. Una vez realizada la adquisición de los datos, se lleva acabo el procesamiento de los mismos mediante los programas Pickwin, Plotrefa, Surface Wave Analysis Wizard y Res2dinv vx 64 obteniendo así Perfiles 1D y 2D de la zona. A través de los perfiles obtenidos de la onda P y S se puede estimar el número de capas con sus espesores y tipo de material presente en el subsuelo con sus respectivas velocidades, además de los parámetros como son: capacidad portante ultima y admisible, módulo de Poisson, densidad del terreno y el módulo Young, con la obtención de los parámetros anteriormente mencionados se da una posible interpretación de los diferentes tipos de suelos que podemos encontrar en la zona de estudio y los diferentes materiales. Con los modelos obtenidos en imágenes 2D, en el campus principal de la Universidad de Pamplona, se observa una capa de material vegetal, así como también se presentan suelos rígidos relacionados a partir de la geología del sitio con suelos depósitos coluviales que arrojan velocidades de Onda S (Vs) entre 236-329 m/s y suelos con resistividades aproximadas entre 4.95-3025 ohm- m.

DISEÑO DE OBRAS DE ESTABILIZACIÓNEN LA URBANIZACION VALLES DEL ESPIRITU SANTO.

Por solicitud de la ALCALDIA DE PAMPLONA, se realizó el presente trabajo encaminado a conocer las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas generales del área donde está localizada la Urbanización Valles del Espíritu Santo, de tal forma de obtener un diagnóstico de las fallas presentadas que han afectado las viviendas asentadas en el sector, además de establecer un modelo geotécnico que permita establecer las condiciones de estabilidad y obras de control a las inestabilidades presentadas. El presente informe comprende una descripción general de los suelos en la zona de estudio, e información geotécnica y geológica recopilada de las visitas de reconocimiento realizadas a la zona del proyecto y mediante la recopilación y análisis de información secundaria. El trabajo se desarrolló con base

en el conocimiento geológico y geomorfológico de la región y en antecedentes de estudios anteriores en la zona, además de la información de sondeos realizados en campo y ensayos de laboratorio. Se realizaron los sondeos y se complementó el trabajo con líneas de refracción sísmica y sondeos eléctricos verticales. Además, con los estudios hidrológicos e hidráulicos respectivos.

2. MARCO CONTEXTUAL

La urbanización valle del espíritu santo está ubicada en el municipio de Pamplona, Norte de Santander Colombia ver Figura. 3, el municipio se encuentra a 2287 msnm durante el transcurso del año la temperatura varía de 8° C a 17° C, el departamento se encuentra en una zona de sismicidad alta, geológicamente el municipio se encuentra ubicado en el flanco norte del Macizo de Santander sobre la Cordillera Oriental y dentro del sistema de fallas Bucaramanga, Santa Marta a escala regional, esta es una zona de tectónica compresiva, enmarcada dentro de la evolución de la cordillera oriental, que genero procesos magmáticos y tectónicos que afectaron a las diferentes litologías, por tal motivo su relieve tienen origen en el levantamiento de la cordillera oriental durante el Neógeno y movimientos diferenciados del Macizo Ígneo Metamórfico de Santander, que dio como resultado plegamientos, fallas y procesos denudaciones, que dieron origen a una gran cantidad de sedimentos que fueron depositados discordantemente sobre las litologías presentes.

Estructuralmente el casco urbano de Pamplona se encuentra enmarcado en una zona de tectónica compresiva generada en la evolución de la cordillera Oriental, la que produce estructuras con dirección norte-sur que afecta las diferentes litologías presentes.

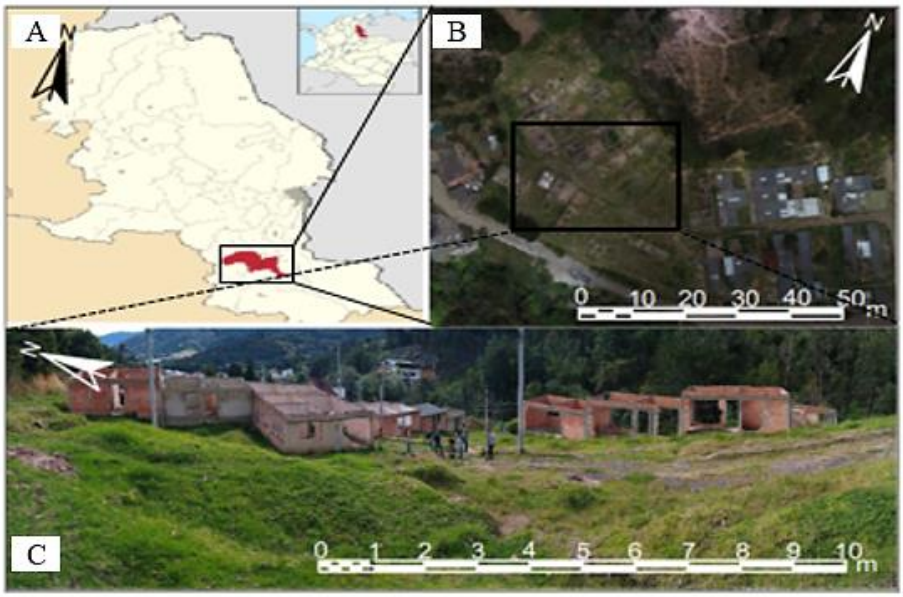


***Figura 3**. Localización Geográfica; a. Localización del Municipio de Pamplona; b. Urbanización Valle del Espirito Santo; c. Zona de estudio.*

***Fuente:** A.Google Maps*, B. Elaboración propia, C. Elaboración propia

2.1. Geología Local

La Figura. 3 representa la geología del municipio de Pamplona y la zona de estudios. La cual se describe a continuación fig. (9).

Qal: Rocas sedimentarias aluvión. Perteneciente al periodo cenozoico, cuaternario holoceno.

Kitm: FORMACION TIBÚ Y MERCEDES (periodo mesozoico cretácico inferior) Mercedes: caliza gris, fosilífera, arenosa, lutita y arenisca de color gris oscuro.

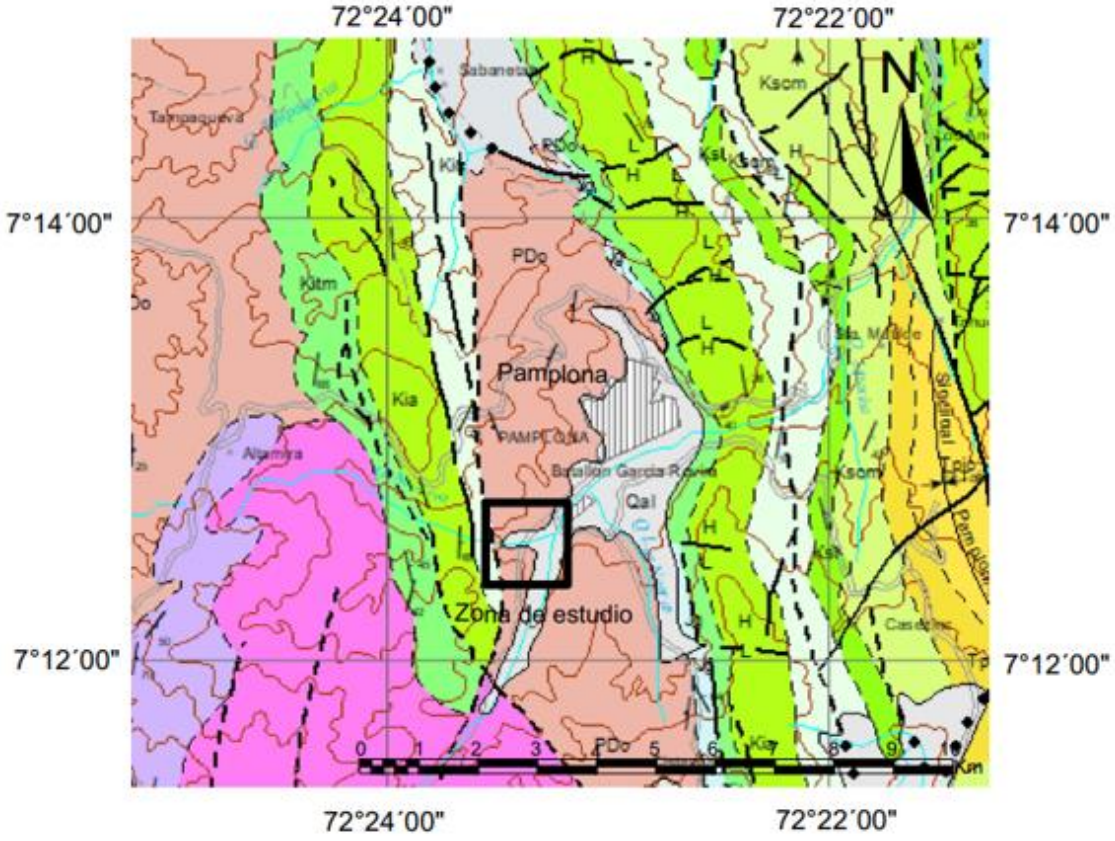
Tibú: Cliza gris, fosilífera, con lutita gris oscura, en la base arenisca clara cuarcitica de grano grueso a conglomeratica.

Kia: Formación Aguardiente (periodo mesozoico cretácico inferior) Arenisca clara, dura de grano fino a grueso con algunas capas de limolita y lutita carbonacea.

Kic: Formación capacho (periodo mesozoico cretácico inferior).

Lutita: gris oscuro a negra con caliza gris, masiva, y fosilífera en las partes inferior y superior.

PDo: Ortoneis (periodo paleozoico pre-devónico) Neis cuarzo monzónico y granodioritico.



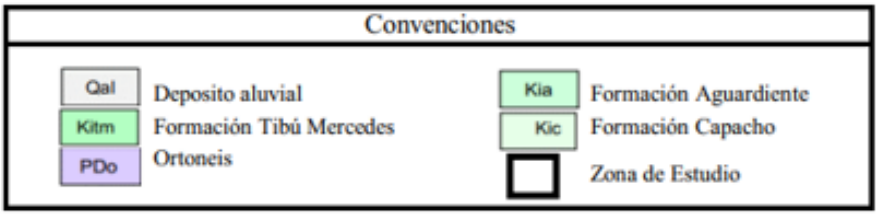


Figura 4. *Geología de la plancha 110 Pamplona*
Fuente: Ministerio de minas y energía (servicio geológico colombiano)

Las principales estructuras tectónicas dentro del casco urbano de Pamplona son: Falla Cristo Rey:

- **Falla de tipo normal**, con rumbo este-oeste. Afecta las rocas de la formación Aguardiente y Tibú Mercedes, generando un paisaje de origen estructural-denudacional, la estructura afecta parte del basamento donde reposan discordantemente depósitos de ladera tipo coluvión, donde se desarrolló el urbanismo de los barrios Juan XXlll. (Santander, 2002)

- **Falla el Escorial:** Sistema de fallas con rumbo este-oeste, cortadas por una falla de contacto. La falla afecta rocas de la formación Aguardiente y de la formación Tibú-Mercedes y parte de algunos afloramientos de la formación Girón que afecta los depósitos presentes en el valle de la quebrada El Escorial. (Santander, 2002)

2.1. ZONA DE ESTUDIO

En la urbanización valle del espíritu santo en Pamplona se establecieron cuatro líneas de estudio, (Ver figura. 5) las (pi) en la figura indican el punto inicial de la línea y (pf) los puntos donde finaliza la línea sísmica, puntos rojos la ubicación de los sondeos eléctricos y el triángulo amarillo ubicación del ensayo de penetración estándar.

Figura 5. *Líneas sísmicas y ubicación de puntos donde se ubicaron los sondeos eléctricos y ubicación de ensayo de penetración estándar.*

Fuente: Elaboración propia

3. MARCO TEÓRICO

3.1. MÉTODO GEOFÍSICO

Los métodos geofísicos se utilizan para identificar la intrusión de agua de mar en función de los valores de resistividad. Los valores de resistividad son indirectamente proporcionales a la conductividad del agua subterránea. Por lo general, el agua subterránea tendrá altos valores de resistividad. Pero en las regiones costeras, se observan bajos valores de resistividad, lo que indica la presencia de agua de mar. (R.R. Krishnamurthy, 2019)

3.1.1. Método sísmico

Los métodos sísmicos dependen de las velocidades de la energía acústica en los materiales terrestres. En consecuencia, implican la generación de un pulso corto de energía sísmica y el registro permanente de la llegada del pulso sísmico a lugares distantes, con intervalos de tiempo después del instante del pulso determinado con una precisión de milisegundos. Algunos tipos de explosivos o el impacto de una masa suministran la energía que detectan los sismómetros sensibles que funcionan con amplificadores electrónicos y un registrador adecuado. La teoría ondulatoria del tiempo de viaje, la reflexión, la absorción, la difusión y la refracción son aplicables a la interpretación sísmica. y están involucrados principios bastante diferentes que los métodos "potenciales" que incluyen técnicas de gravedad, magnéticas y eléctricas. (S.M. Gandhi, 2016)

3.1.2. Refracción sísmica

La refracción sísmica es un método geofísico no destructivo para la interpretación de las propiedades de los suelos, y la detección de la profundidad de la roca, mediante el análisis de las variaciones en las velocidades sísmicas. Este ensayo permite obtener los perfiles de ondas P de una zona de investigación, el principio del método consiste en medir el tiempo de llegada de las ondas de compresión (P) de una fuente artificial (caída de peso, pistolas de aire, martillo, explosivo). La longitud de la línea (L) se encuentra relacionada en una proporción de 3 a 4 veces con la profundidad de investigación (h), (L ~ 3h a 4h). A medida que la línea de refracción es más larga, la energía necesaria para es mayor, necesitándose en algunos casos explosivos. Los materiales más compactos muestran velocidades altas de ondas P, en comparación con las

velocidades bajas en materiales no consolidados. Las mediciones de refracción sísmica se llevan a cabo a lo largo de los perfiles longitudinales de con múltiples sensores alineados (geófonos), con diferentes impactos posicionados en los extremos y parte central del tendido de la línea. (Franco, 2016) (ver figura 3).

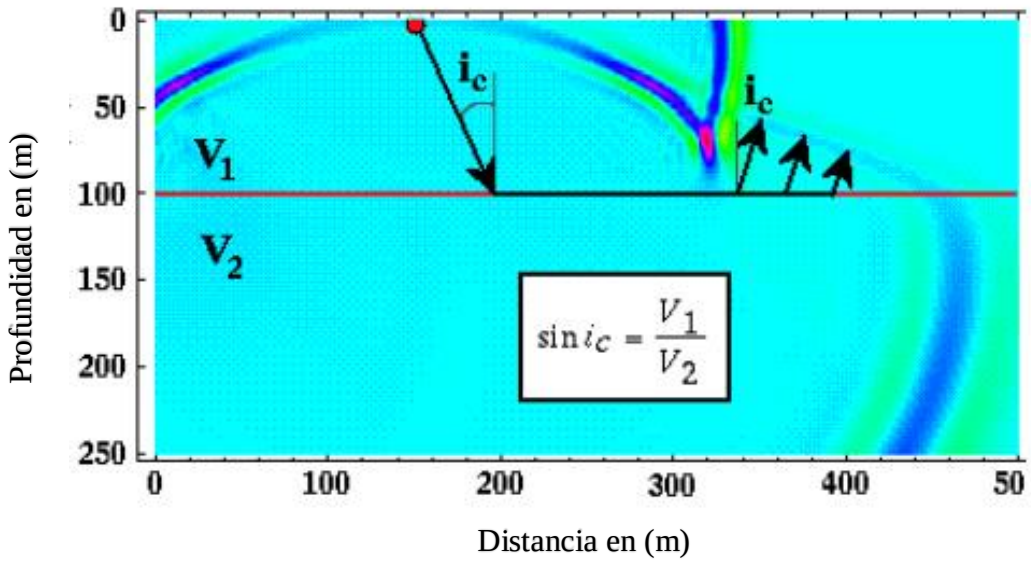


Figura 6. *Ángulo crítico de refracción Ic.*

Fuente: Adoptado de (Boyd,.1999)

3.1.3. Maws (multichannel analysis of surface waves)

El método MASW tiene su base en el principio físico de la dispersión de ondas en el terreno, bajo los supuestos de que todos los medios son, en mayor o menor medida, dispersivos, y por lo tanto las distintas frecuencias que componen un determinado conjunto de ondas se propagan a diferentes velocidades. (Park et al.1996).

La técnica de análisis multicanal de ondas superficiales, utiliza un armado y equipo para registro similar al de la prueba de refracción sísmica, pero se analizan las ondas con una técnica que permite separar las ondas Rayleigh de otras ondas elásticas y finalmente determinar la variación de velocidad de onda de corte (Vs) en profundidad. (Park et al. 1998).

Para la realización de la prueba se instala un tendido lineal con 12 o más geófonos como se observa la Figura. 7; el registro de la vibración se realiza con un sismógrafo digital, y se registra tanto

vibración ambiental (microtremores) como vibración superficial inducida (impactos, vehículos en circulación, etc.) con frecuencias de onda generalmente superiores a 4.5 Hz.

Esquema de recopilación de datos

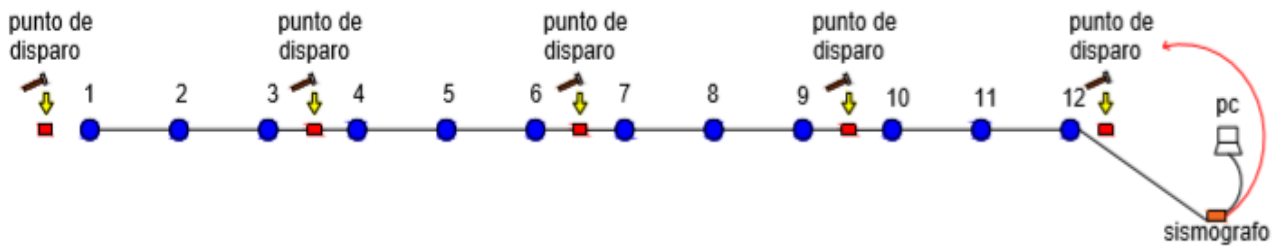


Figura 7. *Descripción del armado de la línea sísmica para recompilar los datos MASW 1D*

Fuente: Elaboración propia

ESQUEMA DE GENERACION DE ONDA

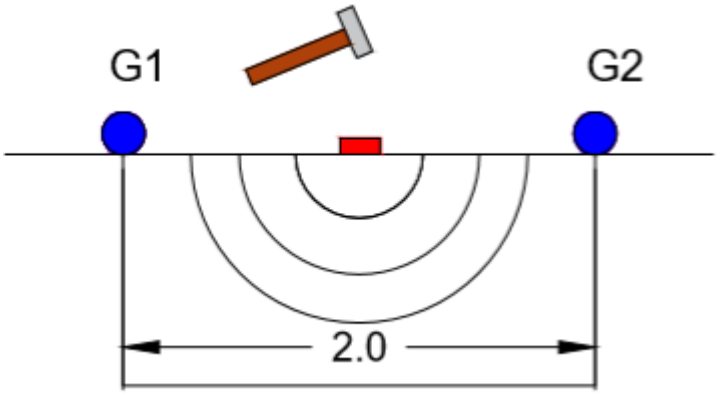


Figura 8*. Propagación de las ondas en un medio de dos capas.*

Fuente: Elaboración propia

3.1.4. Ondas P Ondas Primarias (P)

Son un tipo de ondas que hacen vibrar una partícula en el sentido de propagación de las ondas; su movimiento es similar al de las ondas sonoras, comprimiendo y dilatando alternativamente el

medio sólido a través del cual viajan. A estas ondas también se les denomina ondas longitudinales o de compresión. (López, 2018) **Ver figura. 4.**

Figura 9.*Propagación de las ondas p.*

Fuente: (J. M. Espíndola, 1994)

3.1.5. Ondas s

Son un tipo de ondas que hacen vibrar una partícula en sentido perpendicular a la trayectoria de las ondas, produciendo esfuerzos de corte en el medio sólido en que se propagan; las ondas S son denominadas también como ondas de corte o de cizalladura. La dirección en la cual se propagan las partículas del suelo permite dividir las ondas de corte en dos componentes: SV (movimiento plano vertical) y SH (movimiento plano horizontal). (López, 2018)

Figura 10*. Propagación de las ondas p.*

Fuente: (J. M. Espíndola, 1994)

3.1.6. Ondas Rayleing

Las ondas Rayleigh son ondas superficiales que viajan a lo largo de una superficie “libre”, tal como las interfaces Tierra-aire o tierra-agua (Xia et al, 1999), su movimiento es similar al de las ondas en la superficie del agua, haciendo vibrar una partícula sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimientos elípticos horizontal y vertical simultáneamente. Estas

ondas se caracterizan por tener relativamente, baja velocidad, baja frecuencia y gran amplitud. Las ondas Rayleigh son resultado de la interferencia de ondas P y el movimiento vertical de las ondas de corte (SV). En un medio homogéneo, el movimiento de las partículas del modo fundamental de las ondas Rayleigh que se desplazan de izquierda a derecha, es elíptico a lo largo de la superficie libre, en dirección de las agujas del reloj (retrogrado). El movimiento está limitado a un plano vertical, consistente con la dirección de propagación de la onda. El "ground roll" es un tipo particular de las ondas Rayleigh y viaja a lo largo o cerca de la superficie del suelo. Aunque el "ground roll" se considera ruido en estudios de ondas de cuerpo (perfiles de reflexión y refracción), sus propiedades dispersivas son utilizadas para inferir propiedades elásticas cercanas a la superficie (Park et al, 1999). ver figura. 11

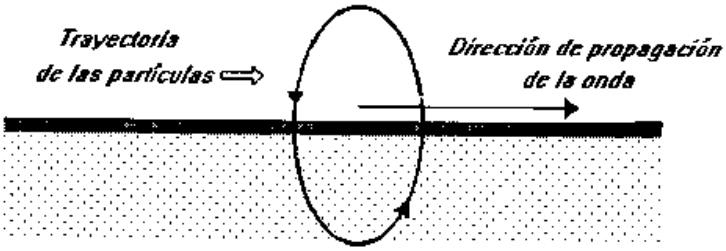


Figura 11. Comportamientos de las ondas Rayleigh

Fuente: (J. M. Espíndola, 1994)

3.1.7. Geoeléctrica

Es la rama de la Geofísica que trata sobre el comportamiento de rocas y sedimentos en relación a la corriente eléctrica. Los métodos geoeléctricos más empleados en Hidrogeología se basan en la inyección artificial de una corriente eléctrica (sondeos eléctricos verticales SEV y calicatas eclécticas CE); de menor utilidad son la polarización inducida (PI) y el potencial espontáneo (PE), este último basado en la medición de campos eléctricos naturales. (Auge D. G., 2008)

3.1.8. Sondeo eléctrico vertical

Consiste en un conjunto de determinaciones de la resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivos lineal y separación creciente entre los electrodos de emisión y de recepción. (Auge D. G., 2008)

3.1.9. Configuración Wenner

También es un dispositivo simétrico pero los elementos se mantienen equiespaciados (figura 12). (Auge D. G., 2008)

La constante geométrica es: 10 K = 2.

$$k=2*\pi*a$$

Configuración Wenner

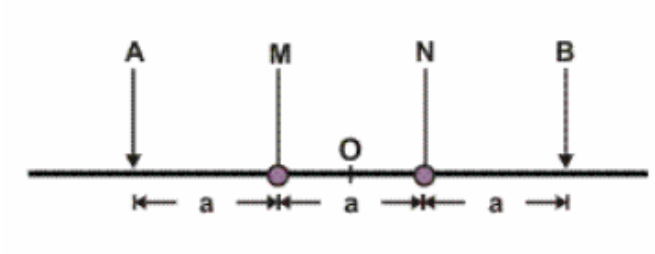


Figura 12. *Distribución y posición de los electrodos.*

Fuente: (Auge M. , 2008)

3.1.10. Método geotécnico Prueba De Penetración Estándar (Spt)

El SPT (Standard Penetration Test) o ensayo de penetración estándar, es un tipo de prueba de penetración dinámica, que es empleado para realizar ensayos en terrenos que se requiere realizar un reconocimiento geotécnico. (Álvarez, 2014)

3.1.11. Ensayos De Laboratorio

3.1.11.1. Contenido De Humedad Del Suelo

El contenido de agua es una de las propiedades índices más significativas de muchos materiales y se emplea para establecer correlaciones con el comportamiento de los suelos. (INVIAS, 2012)

3.1.11.2. Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo, se entenderá todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño

máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. (INVIAS, 2012)

3.1.11.3. Límites De Atterberg

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio normalizados que permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico. Con ellos, es posible clasificar el suelo en la Clasificación Unificada de Suelos (Unified Soil Classification System, USCS). Fueron originalmente ideados por un sueco de nombre Atterberg especialista en agronomía y posteriormente redefinidos por Casagrande para fines de mecánica de suelos de la manera que hoy se conocen. (Casagrande, A. 1948)

3.1.11.4. Gravedad Específica

Es la relación entre la masa de un cierto volumen de solidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas a igual temperatura. La gravedad específica de los sólidos de un suelo se usa en casi toda ecuación que exprese relaciones de fases de aire, agua y sólidos en un volumen dado de material. (INVIAS, 2012)

3.2.MARCO LEGAL

El método de refracción sísmica, el ensayo de penetración estándar y demás ensayos de laboratorio para determinar el contenido de humedad del suelo, el análisis granulométrico, la determinación los límites de Atterberg son regidos por la norma y especificaciones de INVIAS 2012.

A continuación, se especifica la norma que rige cada uno de los ensayos:

- **I.N.V.E-111-13 Ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido.**

  Esta norma describe el procedimiento conocido como Ensayo Normal de Penetración (Standard Penetration Test-SPT), el cual consiste en conducir un muestreador de tubo partido dentro del suelo para obtener las muestras alteradas representativas con fines de identificación, y medir la resistencia del suelo a la penetración del muestreador.

- **I.N.V.E-122-13 Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de**

muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado.

Esta norma se refiere a la determinación en el laboratorio de contenido de agua (humedad), por masa, de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado, la que sea aplicable.

- **I.N.V.E-150-13 Determinación de la humedad de suelos empleando un probador con carburo de calcio.**

  Este método de ensayo se emplea para determinar la humedad de los suelos empleando un probador en el cual el agua disponible de una muestra de suelo de masa especificada reacciona químicamente con un volumen determinado de carburo de calcio, produciendo un gas cuya presión es medida por el manómetro del probador.

- **I.N.V.E-123-13 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.**

  Esta norma se refiere a la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de un suelo. La distribución de las partículas mayores de 75µm (retenidas en el tamiz No.200) se determina por tamizado.

- **I.N.V.E-125-13 Determinación del límite liquido de los suelos.**

  Esta norma se refiere a la determinación del límite líquido de los suelos.

- **I.N.V.E-125-13 Limite plástico e índice de plasticidad de los suelos.**

  Esta norma se refiere a la determinación del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos.

- **I.N.V.E-128-13 Determinación de la gravedad especifica de las partículas sólidas de los suelos y de la llenante mineral, empleando un picnómetro con agua.**

  Esta norma de ensayo se utiliza para determinar la gravedad específica de los suelos y de la llenante mineral de las mezclas asfálticas, empleando un picnómetro.

- **ASTM D 4531– 86 Método de Ensayo Estándar para Densidad a Granel de Turba y Productos de Turba1.**

  Este método, el método de cera de parafina, comprende la determinación de la densidad a

granel de terrones no alterados o piezas irregulares de turba húmeda y productos de turba comprimida.

- **ASTM D5777-00(2011) métodos sísmicos para la caracterización del suelo.**

  En esta norma nos permite guiarnos para la utilización de métodos símicos en la caracterización del suelo.

4. METODOLOGÍA

La investigación de tipo prospectiva, se llevó a cabo en dos fases. La primera que contempla el entorno donde se realizó el estudio, las técnicas, aparatos y tecnología utilizada. A su vez la segunda fase describe secuencialmente el procesamiento de los datos adquiridos.

4.1. Fase I: Adquisición de datos geofísicos y geotécnicos.

La primera etapa de los trabajos de reconocimiento geofísico se realizó con el trazado de cuatro líneas sísmicas, en direcciones longitudinales y transversales al área de estudio (Ver Figura 4), los datos se obtuvieron mediante el sismógrafo Geode de 24 canales (Geometrics), se generaron las ondas utilizando una porra de 16lb y el registro de los archivos se realizó en un computador hp con procesador intel CORE i5. Ver Figura 5a. Los sensores para captar los tiempos de arribo de la onda refractada, detectan frecuencias pico de 14.5 Hz. Los *shots* generados sobre las líneas 1 y 2 distan cada 15m, a diferencia de las líneas 3 y 4 que se ubican cada 12m. Para el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales

Se utilizaron geófonos de 4.5Hz con intervalos de muestreo de 2.5m para las líneas 1 y 2 mientras las líneas 3 y 4 registran *shots* cada 2 m; La Figura 5b ilustra la ubicación y conexión de los geófonos al sismógrafo.

Las mediciones en el caso de los Sondeos Eléctricos Verticales para la toma de datos in situ se efectuaron con el resistivimetro GeoAmp (Subsuelo 3D) de fabricación colombiana. Ver Figura 5c, el cual cuenta con un sistema de recepción de datos de 4 electrodos, el arreglo que se desplegó fue el Wenner con espaciado entre electrodos inyectores de corriente de 3m y 1m de separación entre los electrodos que miden la diferencia de potencial. Por último, los datos geotécnicos se obtuvieron a través de un Ensayo de Penetración Estándar, donde se extrajeron muestras del subsuelo cada 45.72cm, hasta alcanzar una profundidad de 5.03m, en la cual se registró un rechazo. Ver Figura 5d. En la tabla 1 se observan las coordenadas del punto inicial y final, la separación de los geófonos y longitud de las líneas sísmicas; Al igual que las coordenadas y alcance longitudinal de cada SEV, del mismo modo la ubicación del Ensayo de Penetración Estándar. Todo esto con la finalidad de cumplir el objetivo de la investigación.

Tabla 1.*Coordenadas punto inicial y final de las líneas sísmicas, coordenadas centro de Sondeos Eléctricos Verticales y Ensayo de Penetración Estándar*

Líneas TRS Y MASW	Coordenada Inicial		Coordenada Final		L (m)	Δg (m)
	N	E	N	E		
L1	7°21´51.638¨	72°39´45.551¨	7°21´51.67¨	72°39´43.123¨	75	2.5
L2	7°21´52.394¨	72°39´45.694¨	7°21´52.556¨	72°39´43.299¨	75	2.5
L3	7°21´52.919¨	72°39´44.713¨	7°21´50.799¨	72°39´44.358¨	60	2
L4	7°21´52.762¨	72°39´42.608¨	7°21´50.899¨	72°39´44.928¨	60	2
Sondeos Eléctricos Verticales	Coordenadas					
	N		E		L (m)	
SEV 1	7°21´51.748¨		72°39´45.361¨		33	
SEV 2	7°21´52.142¨		72°39´44.583¨		24	
SEV 3	7°21´51.659¨		72°39´43.792¨		45	
SEV 4	7°21´52.541¨		72°39´45.607¨		36	
SEV 5	7°21´52.564¨		72°39´44.99¨		28.5	
SEV 6	7°21´52.666¨		72°39´46.278¨		30	
SEV 7	7°21´50.935¨		72°39´44.765¨		34.5	
Ensayo de Penetración Estándar	7°21´49.074¨		72°39´45.635¨			

Fuente: Elaboración propia

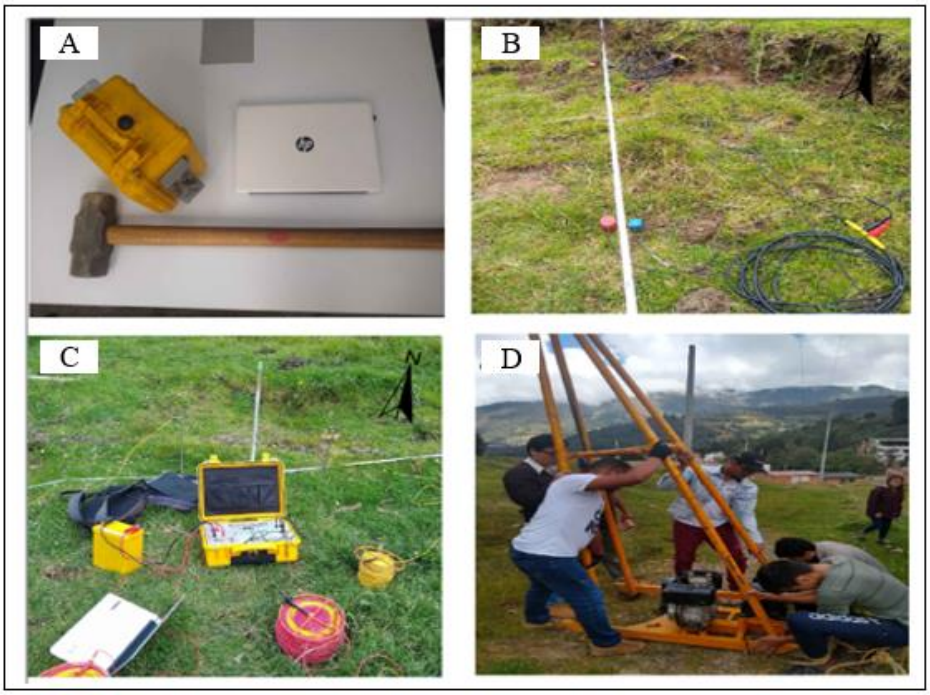


Figura 13. *Equipos utilizados*

a. Sismografo Geode de 24 canales (Geometrics), Computador hp Intel CORE i5, Porras 16 lb. b. Ubicación de geofonos, rojos para TRS y azules para MASW. c. Resistivimetro GeoAmp (Subsuelo 3D). d. Montaje del equipo del Ensayo de Penetración Estándar.

Fuente: Elaboracion propia

4.2. Fase II: Procesamiento geofísico y geotécnico.

En esta fase se realizó una valoración de los datos, con el fin de escoger las mejores trazas para el procesamiento sísmico, donde se utilizó el software Pickwin de Seisimager para obtener perfiles de frentes de onda para cada línea.

Para la refracción sísmica en la Figura 14 se observan los picados de las ondas refractadas además de las ondas superficiales de las mediciones obtenidas en los trabajos de campo, este registro corresponde a la posición XS = 38.8m de la línea N°2. De igual forma se realiza el proceso para todos los shots de las cuatro líneas sísmicas. En la figura 15 se muestra la curva de tiempo en función de la distancia para todos lo picados de los datos con las capas asignadas, donde la curva de color azul representa los picados observados del tendido y la de color verde describe el picado calculado generado mediante la inversión de mínimos cuadrados utilizada por el software Plotrefa, con un error de 1.19 ms después de diez iteraciones. En la figura 16 se visualiza el modelo inicial con las respectivas velocidades para cada capa. Por último, la figura 17 refleja la tomografía que se obtuvo después de la inversión, con diez iteraciones que tiene un error de 0.948 ms.

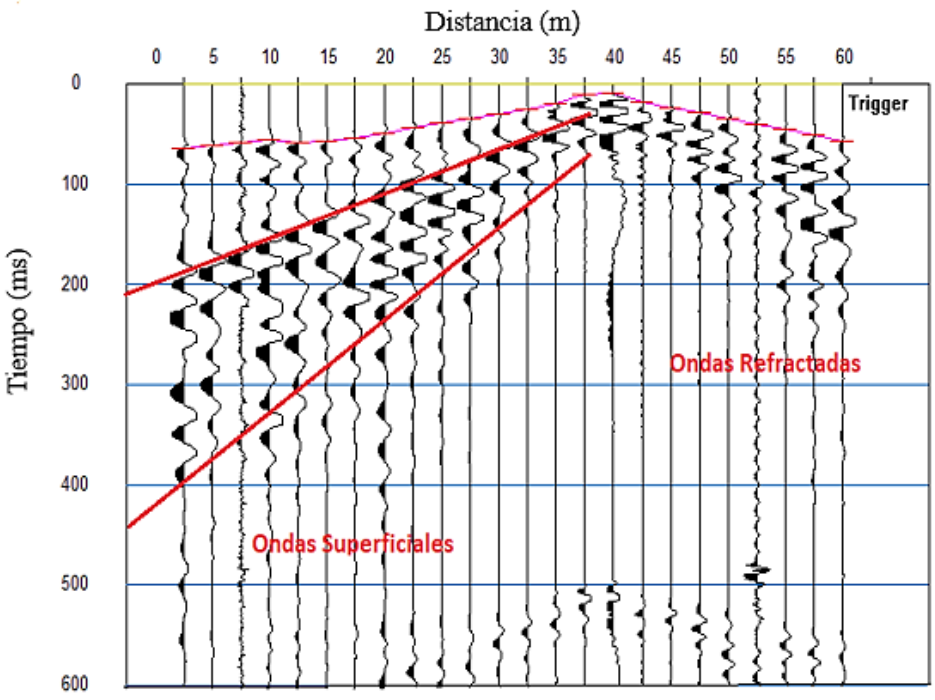


***Figura 14**. Picados primeros arribos, onda refractada correspondiente a X_s= 38.8m*

Fuente: Elaboración propia.

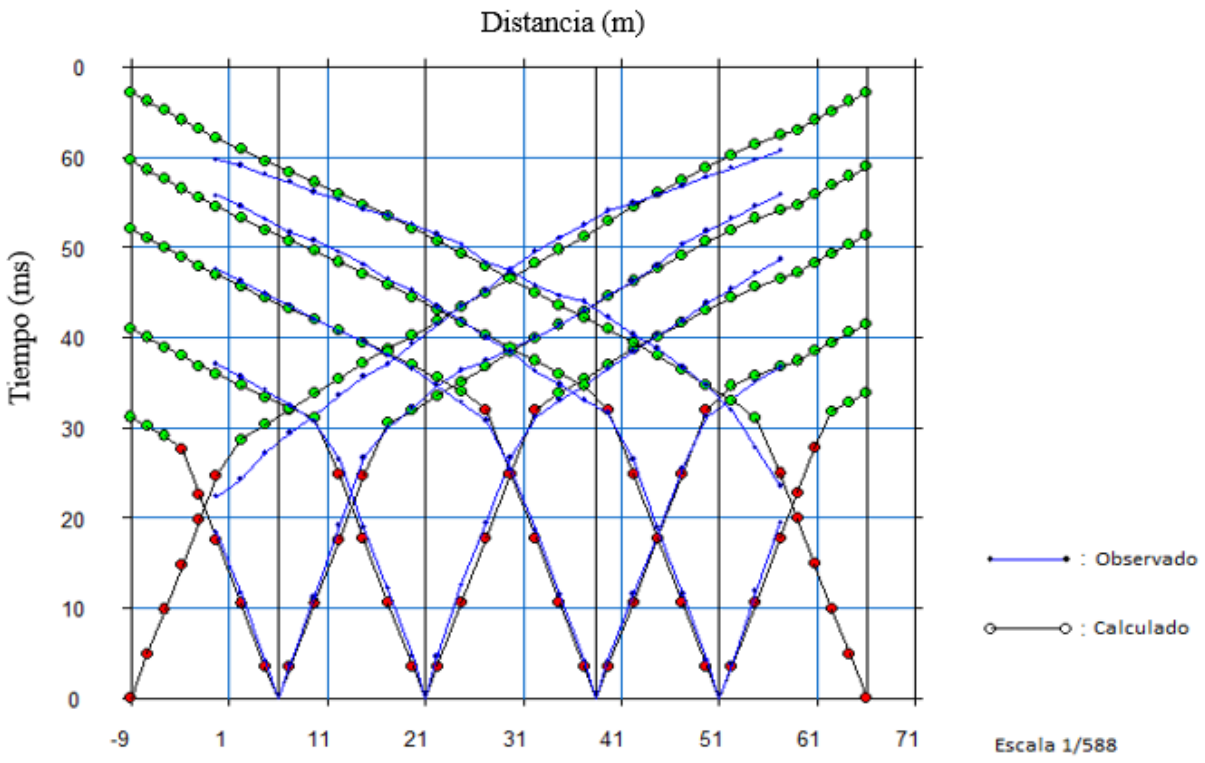


Figura 15. *Datos observados vs Calculados*

Fuente: Elaboración propia.

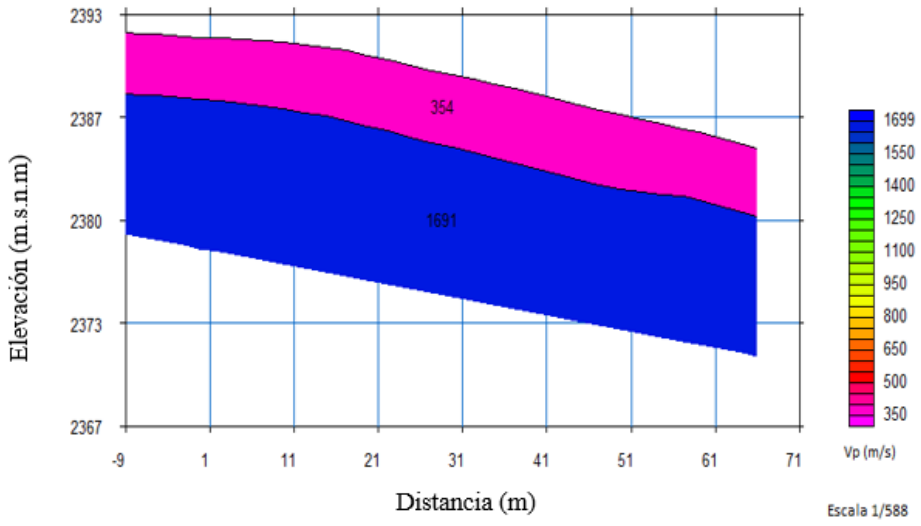


Figura 16. *Modelo basado en la inversión de Mínimos Cuadrados*

Fuente: Elaboración propia.

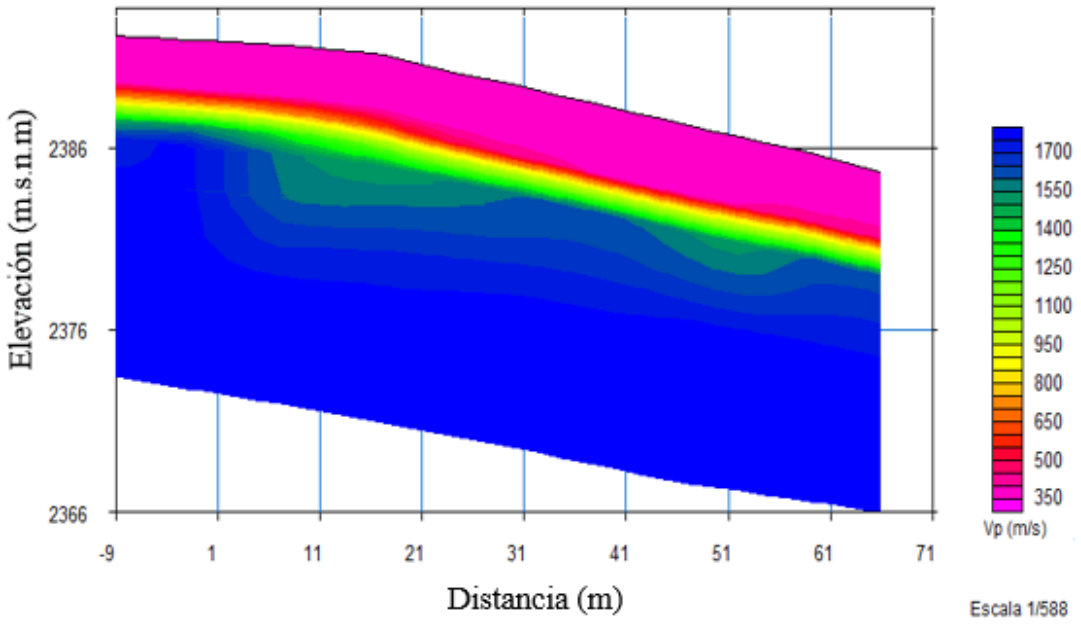


Figura 17. *Modelo a partir de la inversión de la tomografía*
Fuente: Elaboración propia.

El procesamiento de MASW 1D en la Figura 18. ilustra los frentes de ondas superficiales de la señal registrada en un punto de tiro a 61.3 m correspondiente a la línea N° 2, procesada en el software Surface Wave Analysis Wizard. En la figura 19 se observa la curva de dispersión experimental obtenida por medio del método de la transformada de Fourier, mientras que en la figura 20 se visualiza el modelo teórico que ajusta la curva de dispersión donde se ven velocidades preliminares del subsuelo generado con el programa WaveEq (Surface Wave Analysis). Por último, la figura 21 describe el perfil final de velocidades de ondas de corte. Para su inversión se utilizó el método de mínimos cuadrados con diez iteraciones el cual presenta un porcentaje de error de 2.53%.

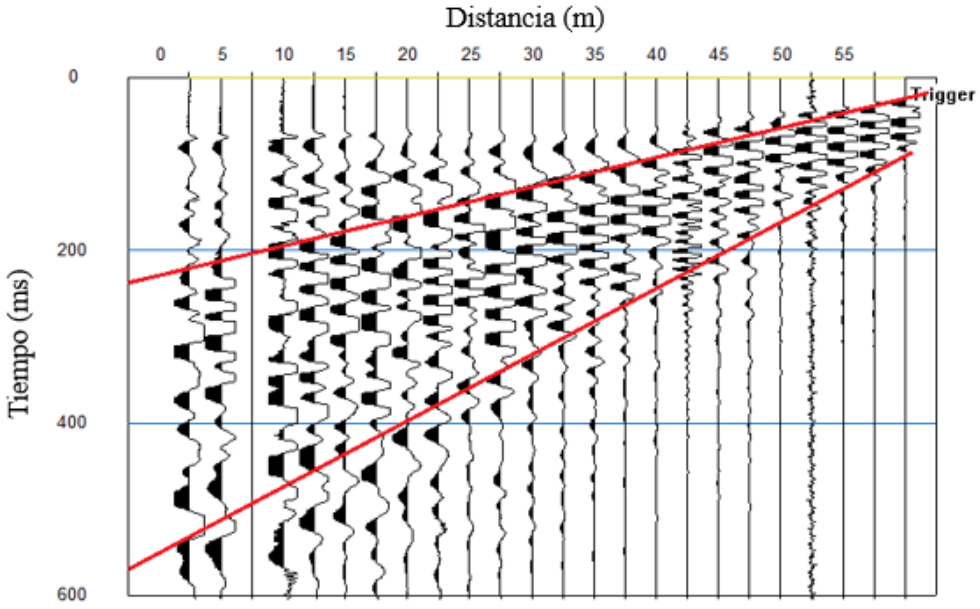


Figura 18. *Procesamiento MASW 1D. Tren de Ondas Superficiales a X_s= 61.3*

Fuente: elaboración propia

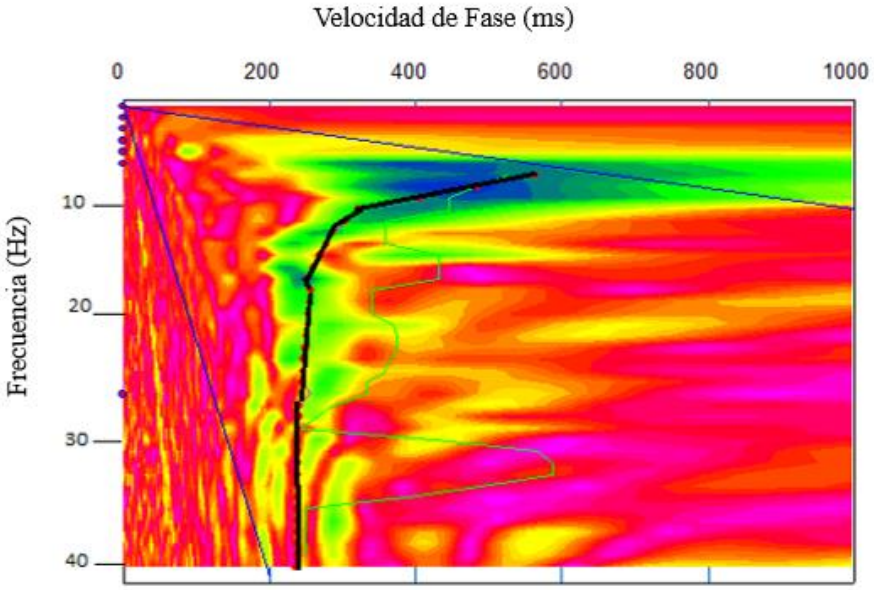


Figura 19. *Procesamiento MASW 1D. Curva de dispersión experimental*

Fuente: Elaboración propia

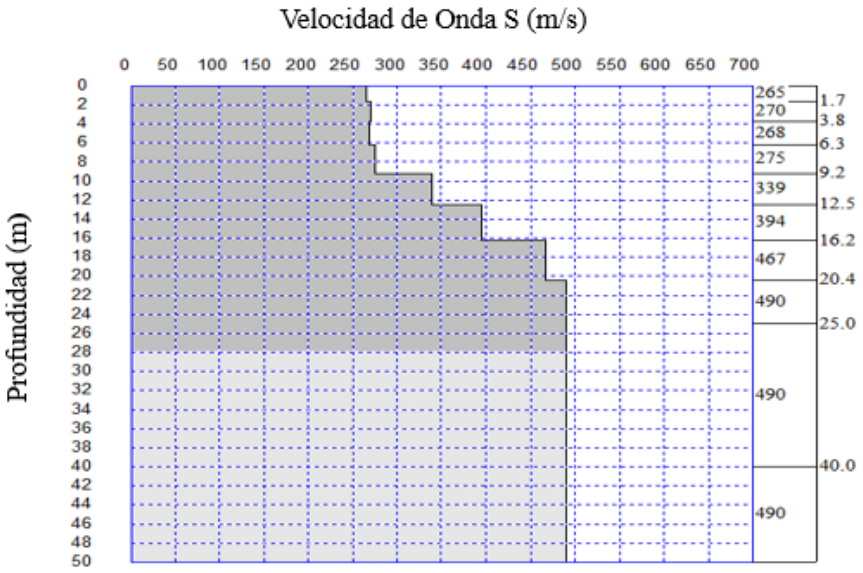


Figura 20. Procesamiento MASW 1D. Modelo teórico ajustado

Fuente: Elaboración propia

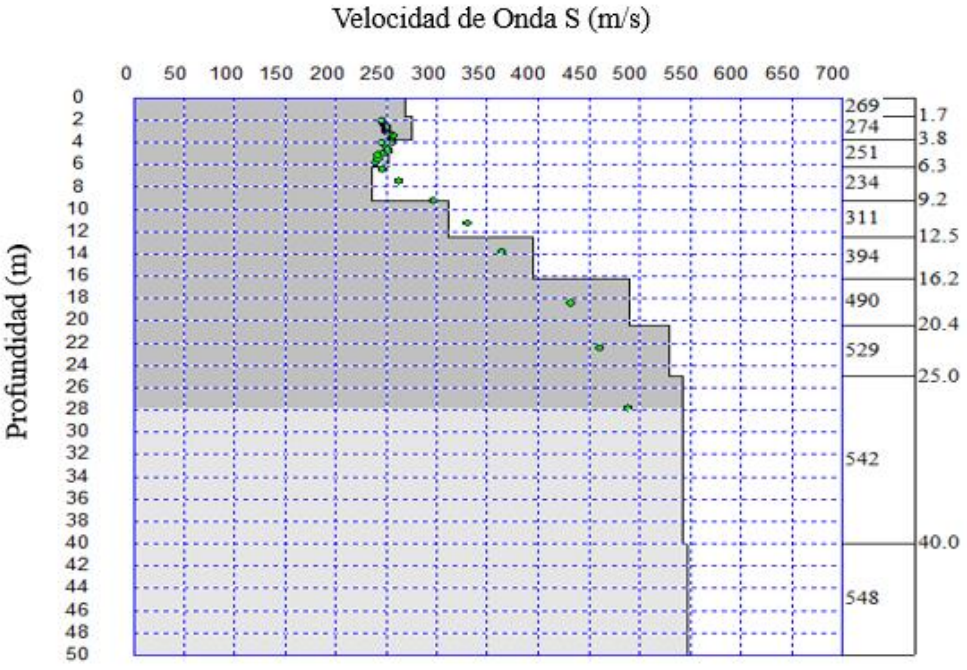


***Figura 21**. Procesamiento MASW 1D. Perfil final de velocidades aparentes y reales*

Fuente: Elaboración propia

En las 4 Figuras se observa el procesamiento para MASW 2D de los datos adquiridos en la línea N°2 agrupados en el dominio CMP, donde la Figura 22 muestra las ondas superficiales en un punto en común a 25 m; en la Figura 23 se observan las curvas de dispersión activas resultantes del *stacking* en frecuencias para los distintos golpes efectuados, se visualiza un rango de frecuencias entre 5 y 50 Hz; mientras que en la Figura 24 se ilustra el perfil transversal inicial generado a partir de las curvas y la topografía en el software GeoPlot (Visualize Data); por ultimo en la Figura 25 se aprecia el perfil final de acuerdo al modelo inicial y mediante la inversión de mínimos cuadrados realizada por el programa WaveEq (Surface Wave Analysis), obteniendo un error de 13.8354% a partir de 15 iteraciones.

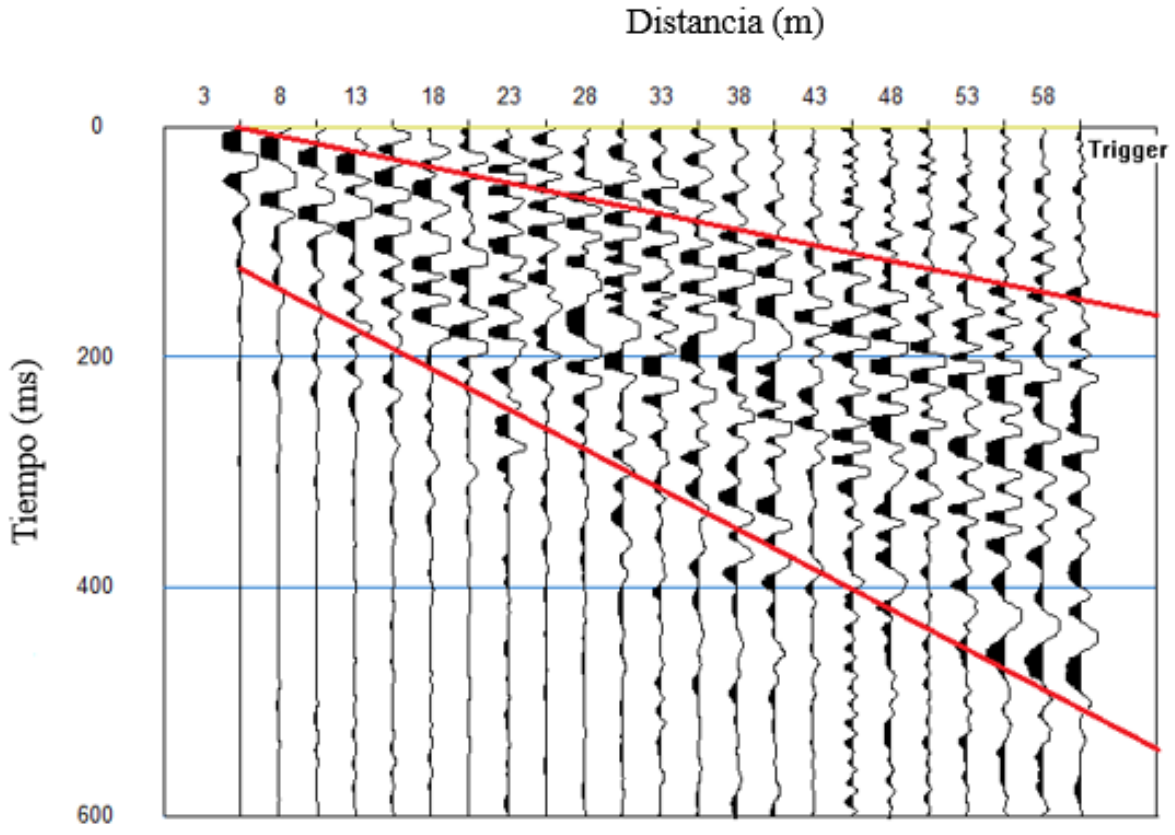


Figura 22. *Procesamiento MASW 2D. Frente de Ondas Superficiales en Xs= 25m*

Fuente: Elaboración propia

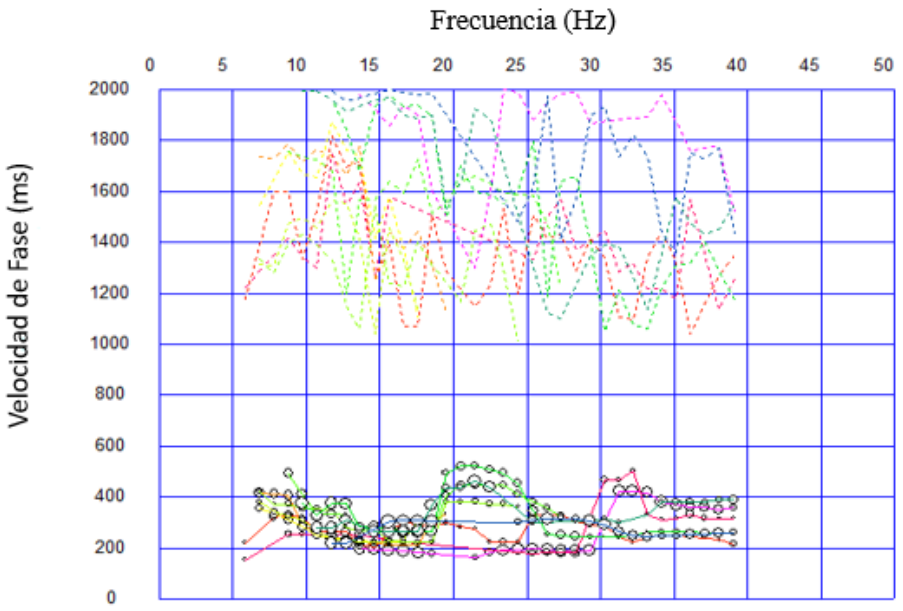


Figura 23. *Procesamiento MASW 2D. Curvas de dispersión activas resultantes del* stacking

Fuente: Elaboración propia

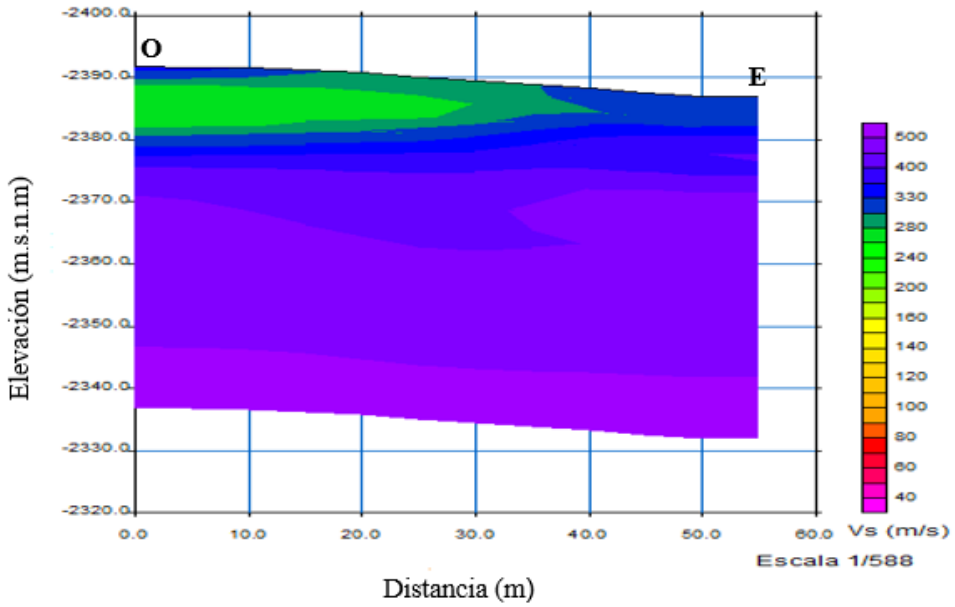


Figura 24. *Procesamiento MASW. Perfil transversal inicial generado a partir de las curvas*

Fuente: Elaboración propia

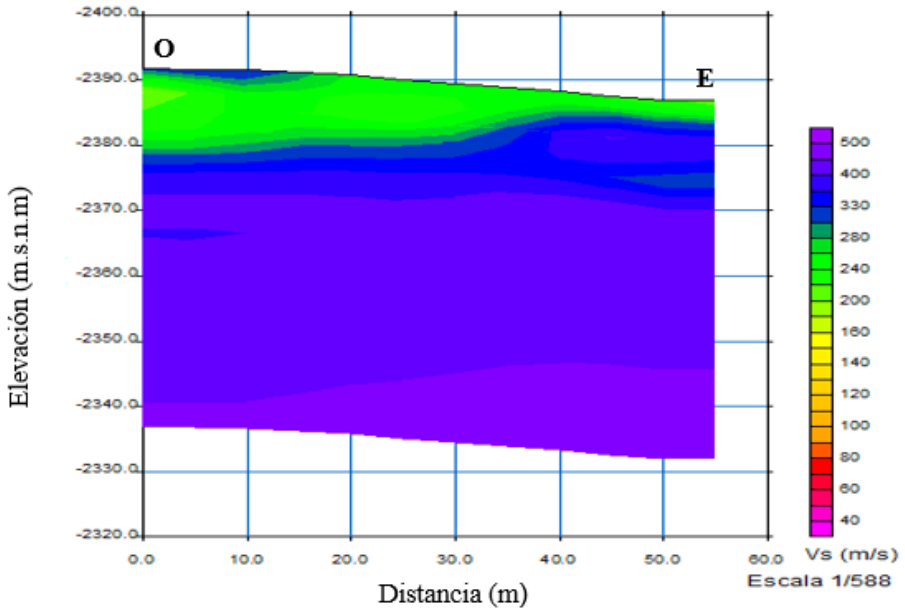


Figura 25. *Procesamiento MASW 2D. Modelo final generado por la inversión.*

Fuente: *Elaboración propia.*

La otra parte del procesamiento geofísico corresponde a las mediciones de los siete sondeos eléctricos verticales realizados en la zona de estudio. Para tal caso se utilizó el software Ipi2win. En la Figura 26 se observan los datos importados de las resistividades reales distribuidas espacialmente utilizando el arreglo Wenner. En la Figura 27 se visualizan dos curvas, una que representa las resistividades reales, y otra obtenida en el procesamiento mediante el método escogido con un error de 4.27%. Por ultimo en la Figura 28 se observa el perfil de resistividades del subsuelo respecto a la profundidad. La secuencia descrita corresponde al SEV 4.

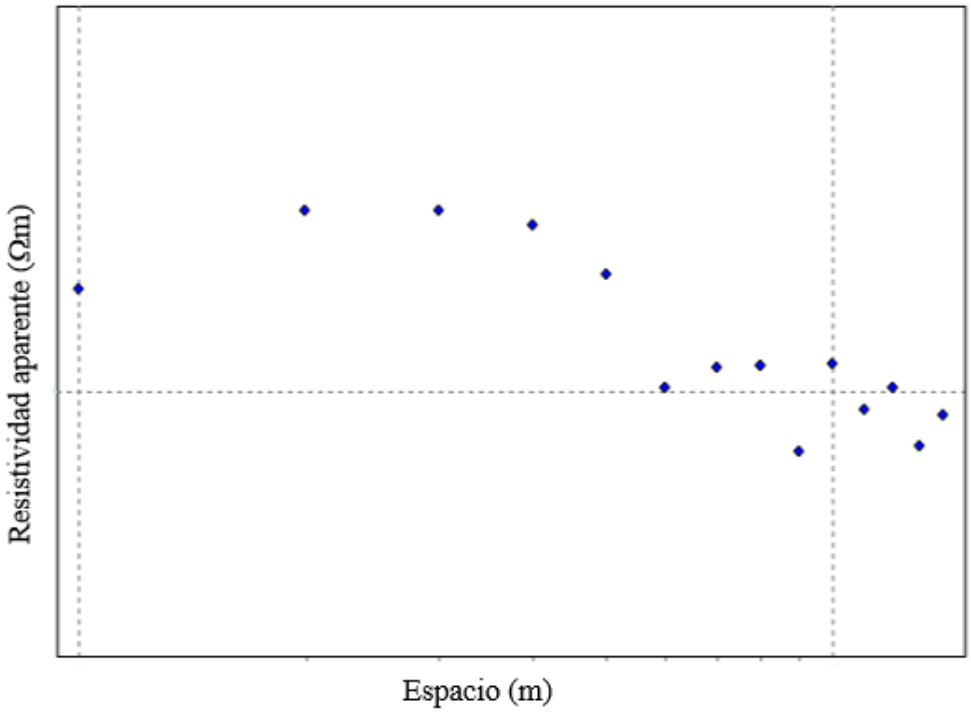


Figura 26. *Procesamiento Sondeos Eléctricos Verticales. Resistividades reales*

Fuente: Elaboración propia

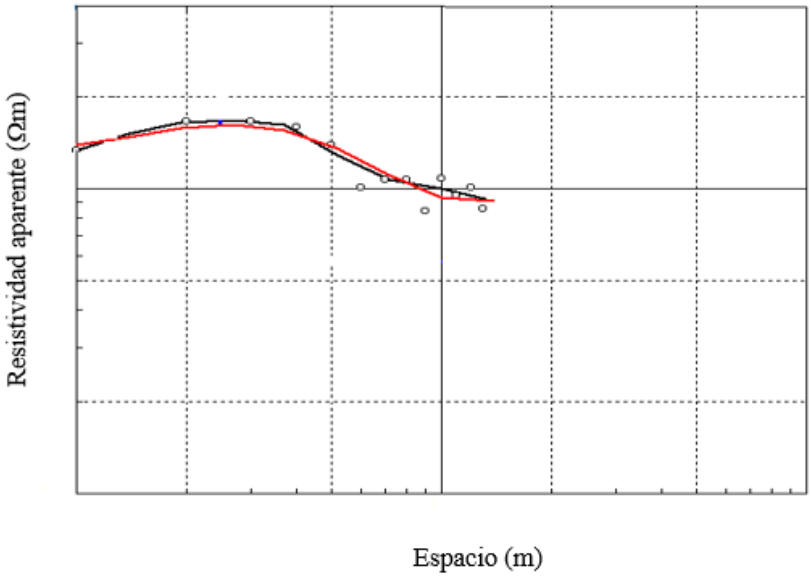


Figura 27. *Procesamiento Sondeos Eléctricos Verticales. Resistividad real representada por el color rojo, el color negro representa la resistividad aparente.*

Fuente: *Elaboración propia.*

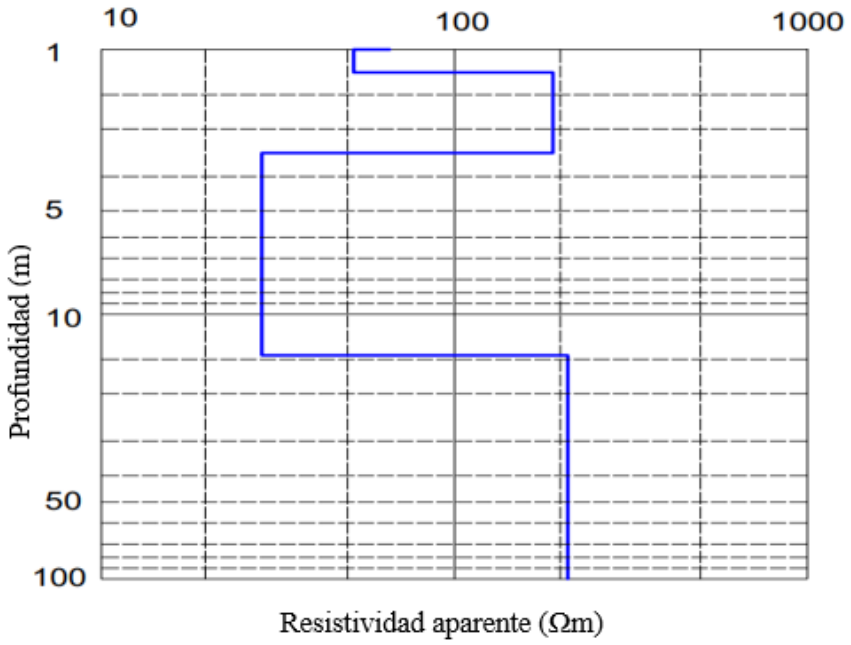


Figura 28. *Procesamiento Sondeos Eléctricos Verticales. Perfil geoélectrico*
Fuente: *Elaboración propia.*

El procesamiento geotécnico contempla en primer lugar, la realización del ensayo granulométrico utilizando una serie de tamices continua del N°8 al N°200 y, los límites de consistencia para obtener el tipo de suelo. La Figura 29 representa la curva granulométrica en escala logarítmica donde el eje x representa el porcentaje de material que pasa por cada tamiz, y el eje Y la abertura del tamiz en mm. La Tabla 2 representa los valores en porcentaje de los limes de consistencia. Para obtener los parámetros geotécnicos se utilizó el software NOVO SPT, donde la variable principal es el tipo de suelo, para este caso un limo-arcilloso (ML-CL). Las variables dinámicas como: capacidad portante, modulo elástico, módulo de corte, velocidad de onda S y peso específico, fueron obtenidas por medio de la selección de diferentes autores, como la AASHTO [16], Bowles [17], Hasancebi [18], Imai [19] y Ohsaki [20] que han establecido expresiones matemáticas para el cálculo de dichas variables dependiendo de las características del subsuelo.

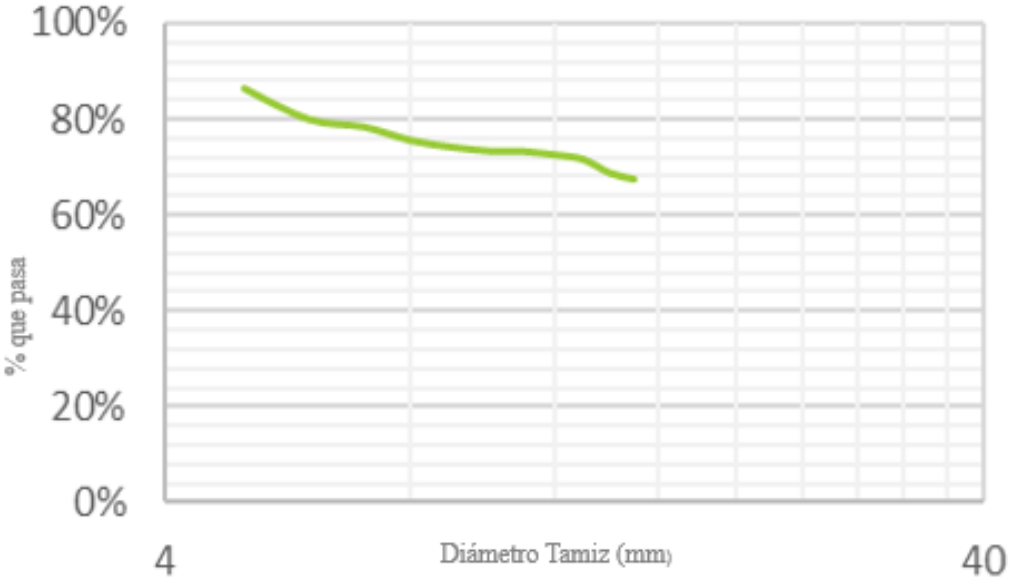


Figura 29. *Curva granulométrica.*

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. *Límites de Consistencias*

LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE DE PLASTICIDAD
35.10%	31.70%	3.4

Fuente: Elaboración propia

5. RESULTADOS

Del procesamiento sísmico para cada tendido se muestran los diferentes perfiles de Tomografía de Refracción Sísmica, asociados a las diferentes capas geológicas detectadas, observándose además un incremento paulatino de las velocidades de la onda P con respecto a la profundidad. Ver Figuras 30. Con una orientación de Este-Oeste, en la figura 31. Se muestra orientada de Este-Oeste, la Figura 32.se ilustra con una orientación de Norte-Sur, Figura 33. Se enseña orientada de Norte-Sur.

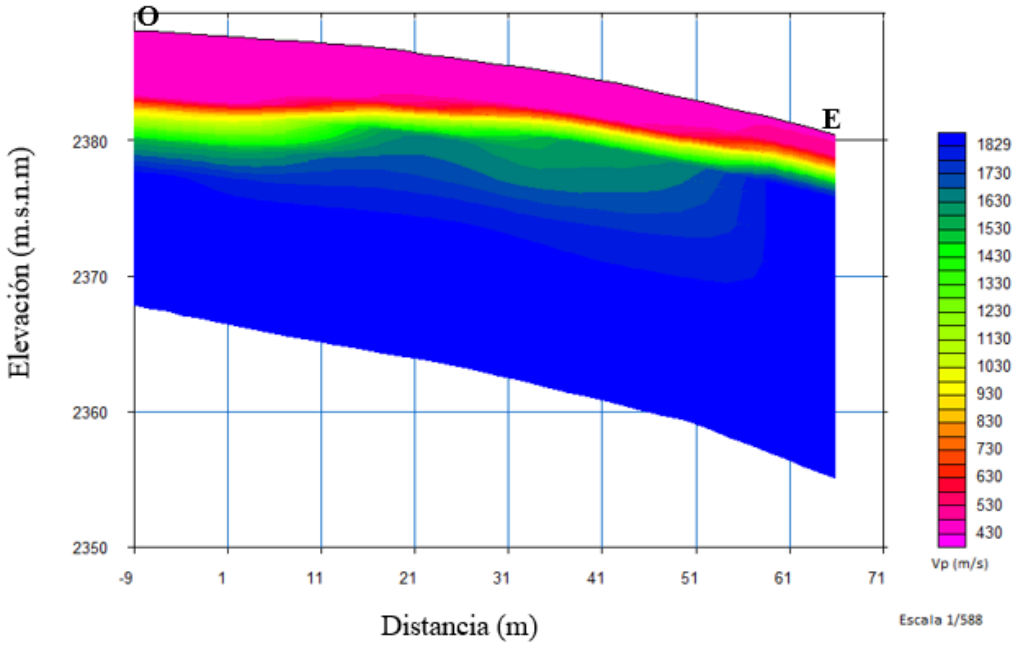


***Figura 30**. Tomografía de Refracción Sísmica. a.TRS línea N°1 orientación Este-Oeste.*

Fuente: Elaboración propia

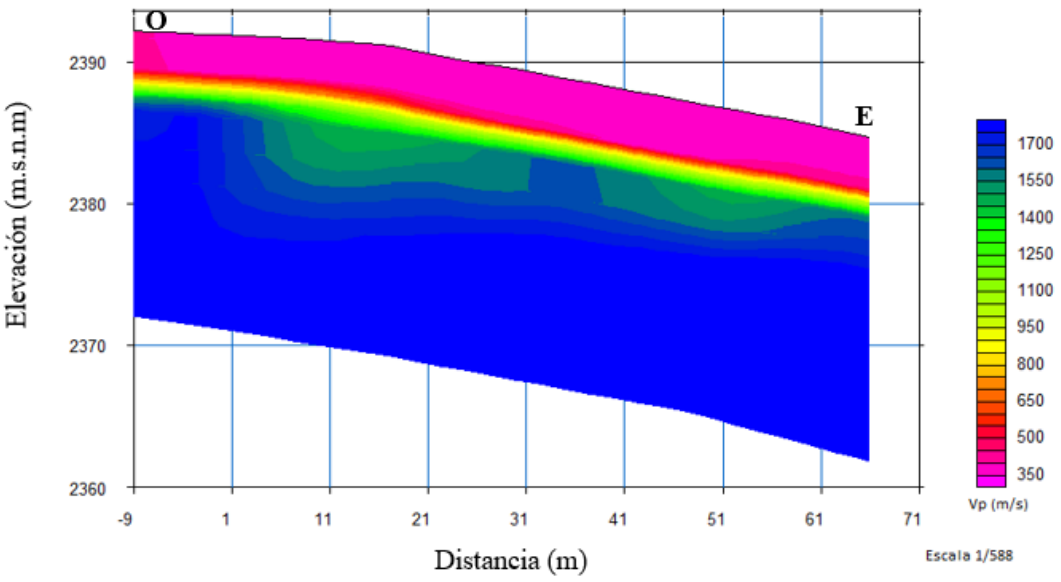


Figura 31. *Tomografía de Refracción Sísmica. b. TRS línea N°2 orientación Este-Oeste*
Fuente: Elaboración propia

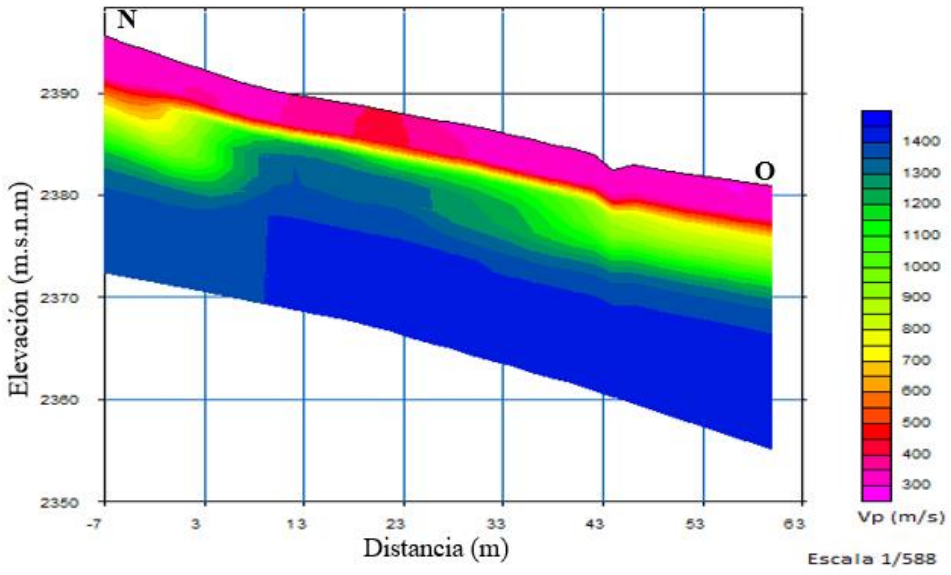


Figura 32. *Tomografía de Refracción Sísmica. c. TRS línea N°3 orientación Norte-Sur*
Fuente: Elaboración propia

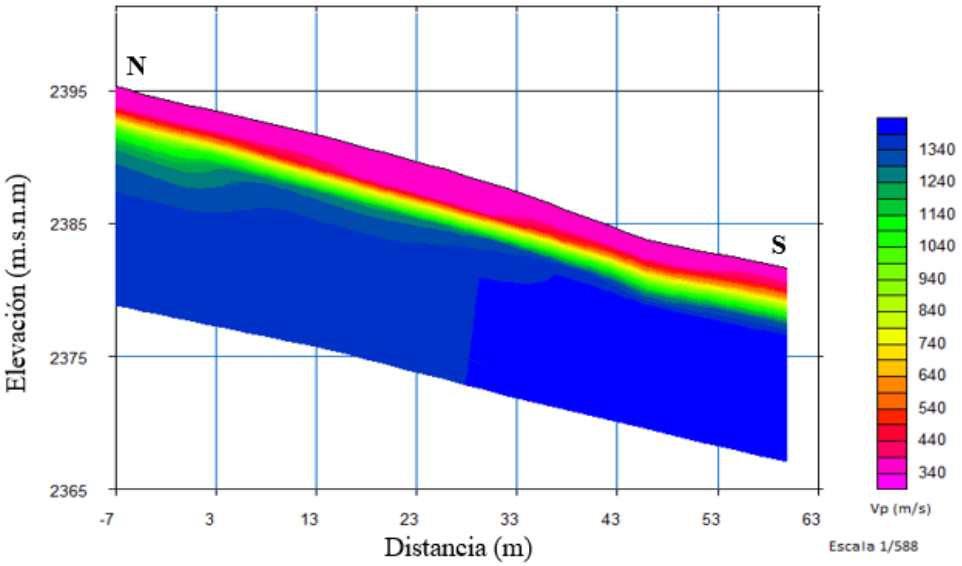


Figura 33. *Tomografía de Refracción Sísmica. d. TRS línea N°4 orientación Norte-Sur*
Fuente: Elaboración propia

De las tomografías anteriormente descritas en la Figura 11, sobreyacen dos capas, donde los valores de la onda P, espesor e interpretación de cada capa se muestran en la Tabla 3

Tabla 3. *Resultados e interpretación TRS*

Líneas	N° capa	Vp (m/s)	Profundidad (m)	Interpretación
L1	N°1	430-1228	0-5	Material aluvial compacto: arcilla saturada
	N°2	1228-1706	5-9.3	Aluvial muy compacto: intercalación de limo y arcilla
L2	N°1	350-1147	0-5	Material aluvial compacto: arcilla saturada
	N°2	1147-1623	5-9.74	Material aluvial compacto: intercalación de arena y arcilla saturada
L3	N°1	300-997	0-5	Material aluvial compacto: intercalación de limo y arcilla
	N°2	997-1285	4-9.33	Material aluvial compacto: intercalación de arena fina y limo arcilloso
L4	N°1	340-989	0-3.8	Material aluvial compacto: intercalación de limo y arcilla
	N°2	989-141	3.8-5	Material aluvial compacto: intercalación de arena fina y limo arcilloso

Fuente: Elaboracion propia.

Para MASW 1D se muestran los perfiles recopilados de los *shots* que se encuentran en los extremos de cada linea, de manera que, las velocidades reales Vs_{30} Calculadas en el modelo final para la linea N°1 son de 380-407 m/s, la profundidad confiable alcanzada comprende valores entre 25 a 40 m. Ver Figura 34. Igualmente, la linea N°2 tiene profundidades de 16 a 31 m, con Vs_{30} de 341-407 m/s. Ver Figura 35. La LineaN°3 presenta profundidades confiables de 20 a 28 m, mientras que el rango para Vs_{30} es de 371.6 a 466.3 m/s. Ver Figura 36. Por ultimo la linea N°4 arroja valores de profundidades de 14 a 26 m con Vs_{30} de 320.2-368.9 m/s. Ver Figura 37.

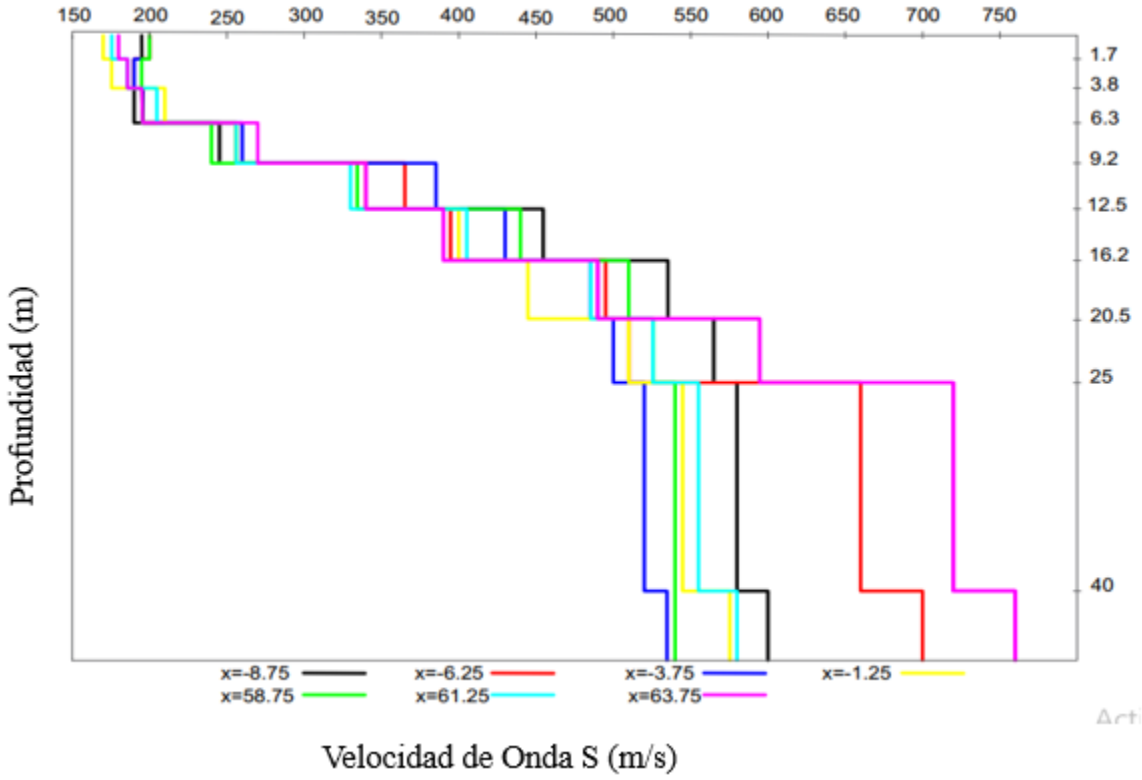


Figura 34. *Modelos finales de los tendidos sísmico MASW 1D. a. Perfil recopilado Línea N°1*

Fuente: Elaboración propia

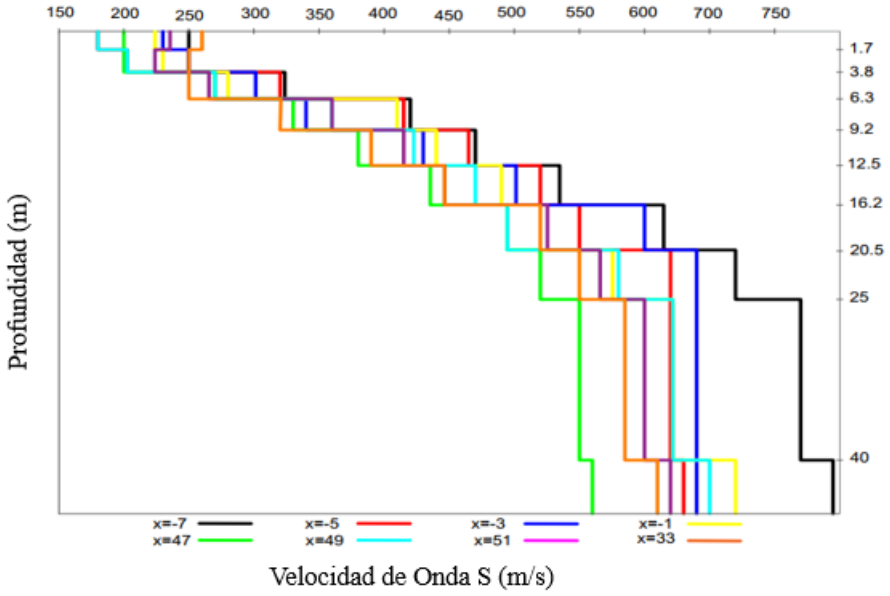


Figura 35. *Modelos finales de los tendidos sísmico MASW 1D. b. Perfil recopilado Línea N°2*
Fuente: Elaboración propia

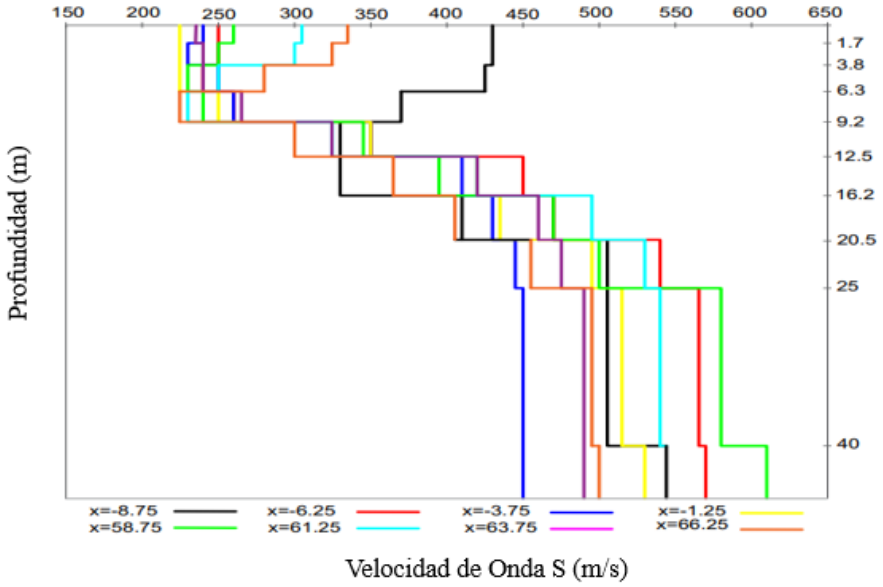


Figura 36*. Modelos finales de los tendidos sísmico MASW 1D. c. Perfil recopilado Línea N°3*
Fuente: Elaboración propia

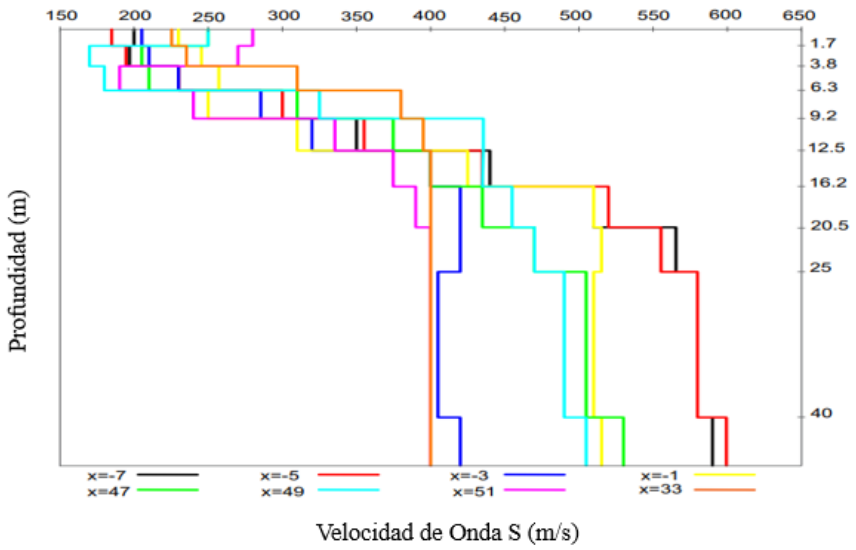


Figura 37. *Modelos finales de los tendidos sísmico MASW 1D. d. Perfil recopilado Línea N°4.*
Fuente: Elaboración propia

El procesamiento de MASW 2D genera resultados a partir de los datos organizados en el dominio CMP. A continuación, se presentan los perfiles transversales finales para cada una de las líneas sísmicas, también se indica la variación de la velocidad de onda S de acuerdo a las capas. Ver Figuras 38. se muestra el perfil transversal con una orientación este-oeste. la figura 39. se ilustra el perfil transversal con una orientación este-oeste. la figura 40. se enseña el perfil a una orientación Norte-Sur transversal a su vez se muestra perfil transverso a una orientación Norte-Sur transversal de la figura 41.

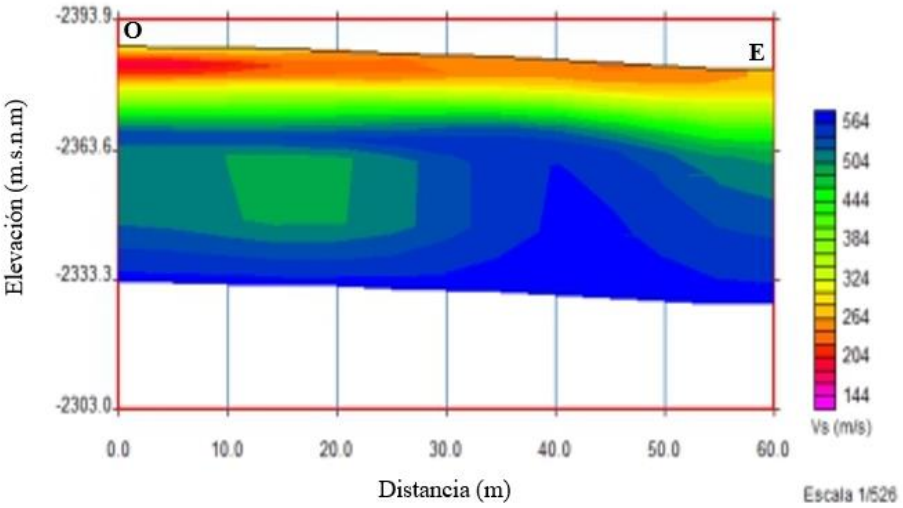


Figura 38*. Perfiles Transversales finales MASW 2D. a. Perfil transversal Línea N° 1*

Fuente: Elaboración propia

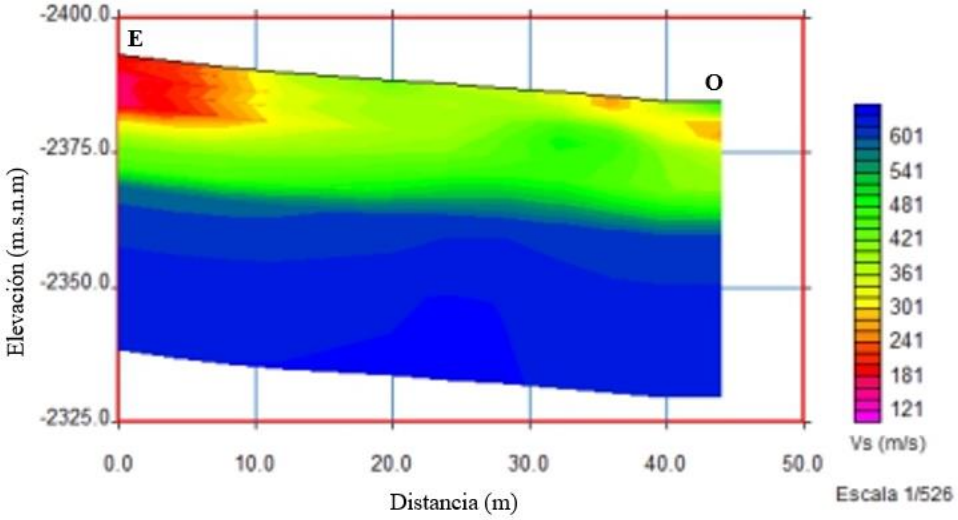


Figura 39. *Perfiles Transversales finales MASW 2D. b. Perfil transversal Línea N°2*

Fuente: Elaboración propia.

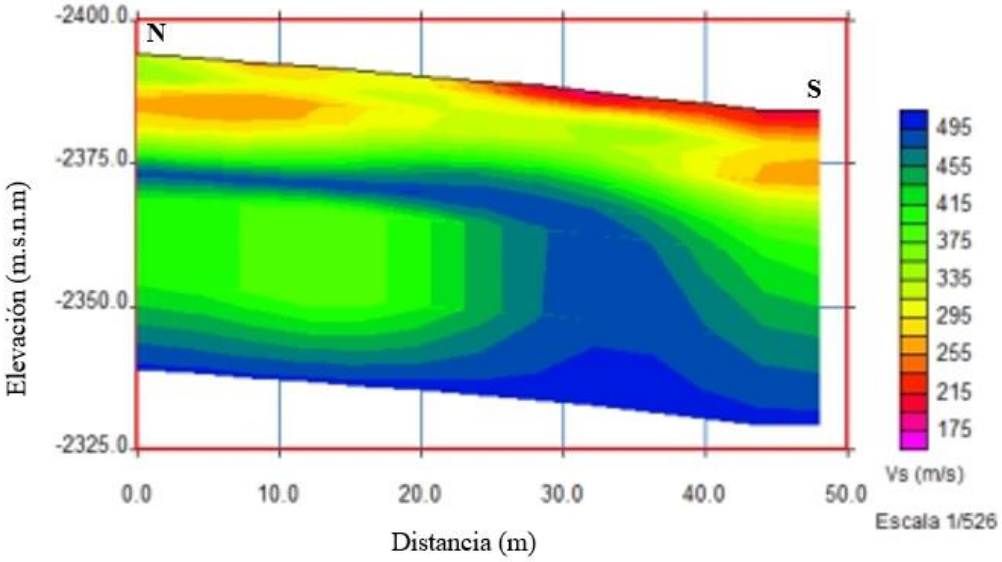


Figura 40. *Perfiles Transversales finales MASW 2D c. Perfil transversal Línea N°3*

Fuente: Elaboración propia.

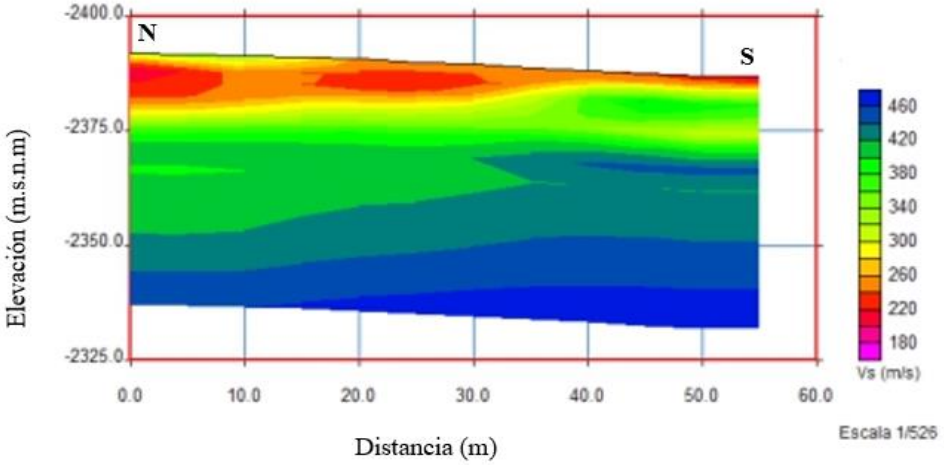


Figura 41. *Perfiles Transversales finales MASW 2D. d. Perfil transversal Línea N°4*
Fuente: Elaboración propia.

Los datos numéricos que se muestran en la Tabla 4, corresponden a los valores de las velocidades de las ondas superficiales a diferentes profundidades en cada capa detectada, indicando también la interpretación geológica obtenida mediante el CISMID.

Tabla 4. *Resultados e interpretación de MASW 2D*

Líneas	N° capa	Vp (m/s)	Profundidad (m)	Interpretación
L1	N°1	430-1228	0-5	Material aluvial compacto: arcilla saturada
	N°2	1228-1706	5-9.3	Aluvial muy compacto: intercalación de limo y arcilla
L2	N°1	350-1147	0-5	Material aluvial compacto: arcilla saturada
	N°2	1147-1623	5-9.74	Material aluvial compacto: intercalación de arena y arcilla saturada
L3	N°1	300-997	0-5	Material aluvial compacto: intercalación de limo y arcilla
	N°2	997-1285	4-9.33	Material aluvial compacto: intercalación de arena fina y limo arcilloso
L4	N°1	340-989	0-3.8	Material aluvial compacto: intercalación de limo y arcilla
	N°2	989-1341	3.8-5	Material aluvial compacto: intercalación de arena fina y limo arcilloso

Fuente: Elaboracion propia

Los resultados de los Sondeos Electricos Verticales se presentan en forma de secciones transversales, donde el comportamiento de los valores de la resistividad aparante del subsuelo, se manifiesta con un rago de valores amplios, los valores minimos se encuentran en el orden de 6.19 a 33. 6 Ωm, y el maximo de 378 Ωm; aunqueexiste un predominio mayoritario de valores bajos en la distribucion de este parametro en toda el area. En la Figura 42 se observan dos secciones tranversales de los sondeos realizados en el lugar.

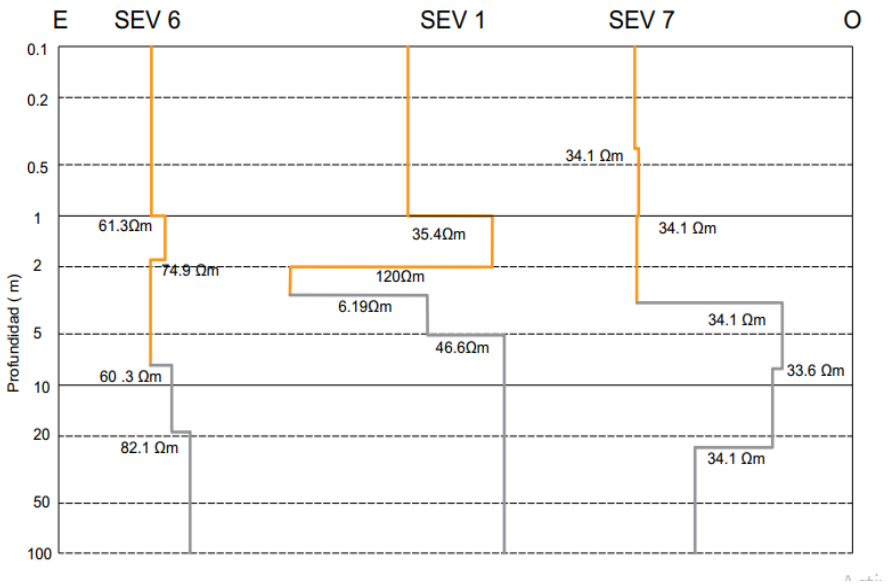


Figura 42. *Perfiles Transversales de los SEV. a. Perfil transversal SEV6, SEV1 y SEV7. Fuente: Elaboración propia.*

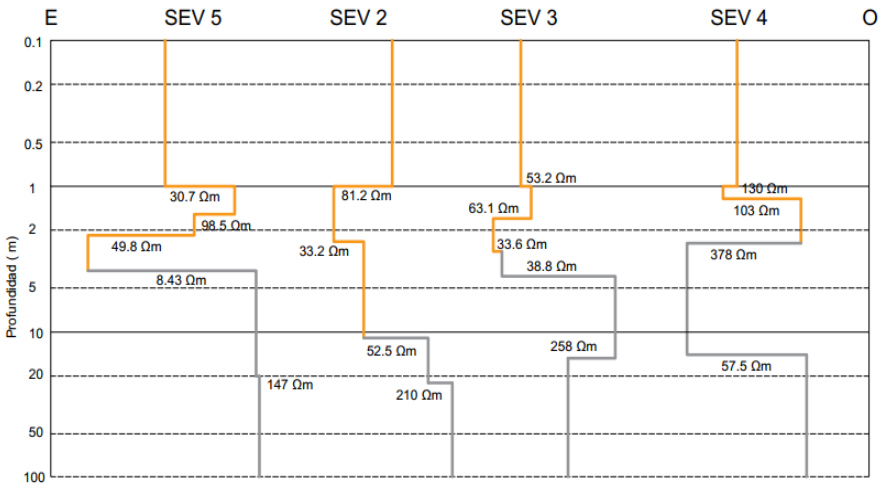


***Figura 43**. Perfiles Transversales de los SEV. b. Perfil transversal SEV5, SEV2, SEV3 y SEV4*
Fuente: Elaboración propia.

Respecto al resultado del SPT En la Figura 43 se observa la variación del número de golpes en función de la profundidad a la cual se presentó el rechazo del vástago. Donde el número de golpes corregido a 5.03m es igual a 24. La Tabla 5 describe los valores del peso específico, módulo de corte, módulo de Young, capacidad portante del suelo y velocidad de onda S, los cuales varían según la profundidad alcanzada en el Ensayo de Penetración Estándar, además del promedio de cada uno de los parámetros a los 5.03 m, ya que solo se identificó una unidad geológica.

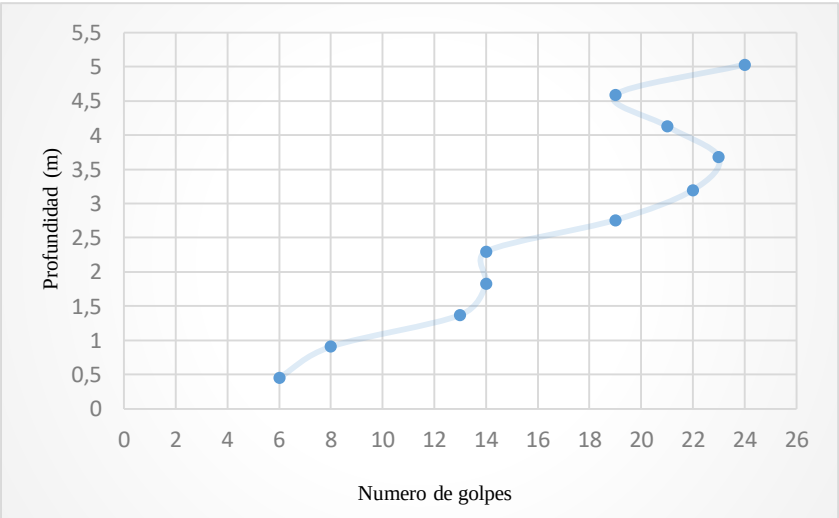


***Figura 44**. Variación del número de golpes en función de la profundidad*

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. *Variación de los parámetros dinámicos de acuerdo a la profundidad*

Parámetros geotécnicos						
Z (m)	Vs(m/s)	G(Mpa)	Es (Mpa)	γ (KN/m^3)	μ (Mpa)	qa(Kpa)
0.460	146.500	41.500	63.575	18.025	0.491	160.720
0.910	159.000	50.000	92.408	18.025	0.489	221.770
1.370	182.000	69.000	173.707	18.450	0.486	255.890
1.830	185.000	72.500	191.275	18.450	0.485	290.010
2.300	181.000	72.500	191.275	18.450	0.486	341.190
2.800	193.500	89.000	284.492	18.450	0.484	409.430
3.200	199.000	97.500	344.223	18.800	0.483	426.490
3.700	199.500	101.500	364.701	18.800	0.483	422.220
4.130	196.000	99.000	324.023	18.800	0.484	422.220
4.600	192.500	95.500	284.492	18.800	0.484	428.620
5.030	206.500	113.500	385.448	18.800	0.482	460.610

Fuente: Elaboracion propia

5.1. Análisis de resultados

Los valores sísmicos de Vp y Vs, se interpretan como un material aluvial (producto de escorrentías superficiales y/o aguas no encauzadas). Frecuentemente se trata de superficies inestables, donde se desarrollan suelos blandos como limos y arcillas. De acuerdo al $Vs_{30\ promedio}$ = 376.814 m/s la NSR 10- Titulo A [1] lo describe como un perfil tipo D (medianamente compacto).

Se pudieron diferenciar dos unidades geoeléctricas, representadas en los perfiles de resistividades con colores naranja (arcillas, limo saturado), y gris (arena arcillosa) . A partir de esta diferenciación de materiales geoeléctricos se puede observar que la primera capa es más conductora debido a las escorrentías superficiales del área.

De acuerdo al N_{SPT} corregido= 24 a una profundidad de 5.03m, la ASTM D 1586 [9] relaciona los resultados como un suelo cohesivo de consistencia muy compacta. A continuación, se describen las ecuaciones Para el cálculo de las constantes elásticas dinámicas por medio de los resultados sísmicos.

Ecuación (1)

$$Capacidad\ de\ carga\ admisible: q_{\mathrm{a}} = \frac{G}{VP}\,[KN/m^2],$$

Ecuación (2)

$$Módulo\ de\ Young: \boldsymbol{E} = 1.8X10^{-3}\ \boldsymbol{V}s^{2\cdot 17}[Mpa],$$

Ecuación (3)

$$Módulo\ de\ corte: \boldsymbol{G} = 5.4X10^{-4}\ \boldsymbol{V}s^{2\cdot 19}[Mpa],$$

Ecuación (4)

$$Módulo\ de\ Poisson: \boldsymbol{\mu} = \frac{((Vp\ /Vs)^2-_2)}{((Vp\ /Vs)^2-_1)}\,[Mpa].$$

En la Tabla 6 se muestran los valores de las constantes dinámicas calculadas utilizando los resultados sísmicos de las ondas Vp y Vs.

Tabla 6*. Parámetros dinámicos del subsuelo a partir de los resultados sísmicos de Vp y Vs*

Cálculo por geofisica						
Z (m)	Vp (m/s)	Vs(m/s)	G(Mpa)	Es (Mpa)	μ(Mpa)	qa (kpa)
0.5	1097	279.3	129.60	365.66	0.47	118
0.9	1097	279.3	129.60	365.66	0.47	118
1.4	1097	279.3	129.60	365.66	0.47	118
1.8	1097	279.3	129.60	365.66	0.47	118
2.3	1097	279.3	129.60	365.66	0.47	118
2.8	1097	279.3	129.60	365.66	0.47	118
3.2	1097	279.3	129.60	365.66	0.47	118
3.7	1097	279.3	129.60	365.66	0.47	118
4.1	1097	279.3	129.60	365.66	0.47	118
4.6	1097	279.3	129.60	365.66	0.47	118
5.0	1097	279.3	129.60	365.66	0.47	118
10.0	1489	375.9	248.45	696.83	0.47	167
15.0	1785	371.6	242.34	679.85	0.48	136
20.0	1785	376.8	249.78	700.54	0.48	140
25.0	1785	372.9	244.15	684.90	0.48	137
30.0	1785	385.6	262.73	736.53	0.48	147

Fuente: Elaboracion propia.

Las diferencias nuemericas entre los parametros del subsuelo calculdos por geofisica y geotenica ha la profundidad alcanzada en el SPT se observan en la Tabla 7.

Tabla 7. *Diferencia de los parámetros dinámicos, calculados por los métodos geofísicos y el método geotécnico.*

Parámetros geotécnicos						
Z (m)	Vs(m/s)	G(Mpa)	Es (Mpa)	γ (KN/m^3)	μ (Mpa)	qa(Kpa)
0.460	146.500	41.500	63.575	18.025	0.491	160.720
0.910	159.000	50.000	92.408	18.025	0.489	221.770
1.370	182.000	69.000	173.707	18.450	0.486	255.890
1.830	185.000	72.500	191.275	18.450	0.485	290.010
2.300	181.000	72.500	191.275	18.450	0.486	341.190
2.800	193.500	89.000	284.492	18.450	0.484	409.430
3.200	199.000	97.500	344.223	18.800	0.483	426.490
3.700	199.500	101.500	364.701	18.800	0.483	422.220
4.130	196.000	99.000	324.023	18.800	0.484	422.220
4.600	192.500	95.500	284.492	18.800	0.484	428.620
5.030	206.500	113.500	385.448	18.800	0.482	460.610

Fuente: Elaboracion propia.

Los valores numéricos descritos en la Tabla 7, muestran una relación aceptable con los métodos utilizados para la caracterización del subsuelo en el área de estudio. Se observa que a una profundidad de 5.03m no existe una variación excesiva de los parámetros calculados, donde los resultados geotécnicos son los más cercanos a la realidad, ya que este es un ensayo invasivo.

La interpretación de los datos basados en las técnicas de TRS, MASW, SEV y SPT, se puede concluir que los suelos del área investigada de acuerdo a las propiedades físicas que en ellos se analiza, se define la existencia de dos capas ingeniero geológicas.

6.CONCLUSIONES

La capa N°1 se caracteriza por valores de Vp en el orden de 989-1228 m/s, por su parte la velocidad de la onda sísmica Vs, presenta valores de 237-433 m/s; Con una resistividad que varía entre 30.7-130 Ωm, capacidad de carga admisible de 160.72 a 460.610 Kpa, peso específico que comprende valores entre 18.025 y 18.80 KN/m^3 .La velocidad de onda S calculada para esta capa mediante el software NOVO SPT varía entre 146.5-206.50 m/s Esta capa es un perfil tipo D de acuerdo con la NSR-10 (Ministerio de Ambiente, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, 2010), asociados a depósitos aluviales con intercalación de limo y arcilla medianamente compacto, con un espesor máximo promedio de 3.8 a 5m, caracterizado por un incremento gradual de las propiedades mecánicas, la USC lo clasifica como un suelo ML-CL.

La capa N°2 presenta valores para la onda de presión Vp entre 1285-1706 m/s, con Vs de 264-586 m/s. Esta unidad geológica tiene una resistividad que varía entre 6.19-258 Ωm de acuerdo a Braja Das la distribución corresponde a una arena arcillosa, y un perfil tipo D NSR-10.

Como característica especial, todos los suelos arcillo-limosos tienen la propiedad de contraerse cuando pierden humedad y de expandirse cuando la ganan de nuevo según las condiciones ambientales. Los daños que presentan las edificaciones cimentadas superficialmente en estos suelos se manifiestan progresivamente mediante fisuramientos, agrietamientos y giros en conjunto de los muros y elementos estructurales, como se logró evidenciar en la inspección de campo.

De acuerdo a los datos analizados, el nivel freático de la zona se encuentra aproximadamente a 4.13 m de profundidad

Observando la situación actual de las viviendas y el tipo de material que compone el área, se puede decir que el esfuerzo admisible del suelo q_a = 460.61 Kpa a 5.03m es de consistencia firme de acuerdo con Braja Das (Das, 2014). Lo cual lleva a concluir, que la posible causa de las fallas estructurales se debió, que al momento de diseñar las cimentaciones no se tuvo en cuenta las presiones ascendentes causadas por la expansión del suelo, falta de estabilización del terreno y/o encause de las escorrentías superficiales.

7.RECOMENDACIONES

Las propiedades básicas mínimas que se deben determinar para cualquier tipo de construcción son: peso unitario, humedad, clasificación completa para cada uno de los estratos y sus distintos niveles de meteorización.

La profundidad de cimentación debe realizarse de tal forma que disminuya toda posibilidad de erosión o meteorización acelerada del suelo causada por flujos de aguas superficiales o subterráneas de cualquier origen.

En los suelos arcillo-limosos el nivel de desplante de las cimentaciones debe llevarse hasta un nivel tal que no haya influencia de los cambios de humedad inducidos por agentes externos.

La caracterización básica del perfil litológico se debe establecer en términos de los valores de velocidad de la onda de corte (Vs) con la profundidad y su variación mediante ensayos geofísicos en el terreno.

La Capacidad de carga admisible debe ser claramente establecida en los informes geotécnicos, para evitar diseños deficientes del tipo de cimentación.

Cuando existan suelos expansivos bajo la cimentación, el suelo debe retirarse o estabilizarse, debajo y en los alrededores de la edificación.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, J. E. (2014). *ESTUDIO DE RESULTADOS ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)vv PARA EL FACTOR DE CORRECCIÓN (CN) Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN (Ø) DEL SUELO USANDO DIFERENTES TIPOS DE CORRELACIONES.* BOGOTÁ D.C.

Auge, D. G. (2008). *Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea.* Buenos Aires.

Auge, M. (2008). *Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea.* Buenas aires.

Das, B. M. (2014). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.*

Franco, J. E. (2016). *Refracción Sísmica* .

INVIAS. (2012). *Normas de ensayos de materiales para carreteras.*

J. M. Espíndola, C. (1994). *Terremotos y ondas sísmicas.* México: UNAM.

López, J. F. (2018). *APLICACIÓN DEL METODO MASW PARA LA CARACTERIZACIÓN SISMICA DEL SUELÓ EN ZÓNA URBANA.* Cartagena.

Ministerio de Ambiente, V. y. (2010). *REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10* . Bogotá D.C.

Ministerio de Ambiente, V. y. (2010). *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10.* Bogota D.C.

ondas sismicas. (s.f.). Obtenido de https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/P.gif

R.R. Krishnamurthy, M. J. (2019). *Chapter 17 - Management of Coastal Groundwater Resources,.*

S.M. Gandhi, B. S. (2016). *Essentials of Mineral Exploration and Evaluation.*

Santander, A. M. (2002). *Plan de Ordenamiento Territorial Pamplona Norte de Santander 2002.* Pamplona - Colombia.

TORRES, J. O. (2012). *ESTUDIO Y DISEÑOS URBANIZACIÓN VALLES DEL ESPIRITU SANTO*. Cúcuta.