



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

“Caracterización geotécnica de la formación Mangán, mediante métodos geofísicos”

Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Civil.

Autor:

Pablo Marcelo Cárdenas Arias.
CI:0104510953

Tutor:

Ing. Benigno Alfredo Vázquez López, M.SC.
CI:0101815892

Cuenca, Ecuador

22-octubre-2019



RESUMEN

La variedad de estructuras construidas por el ingeniero civil, están apoyan sobre el terreno, produciendo esfuerzos hacia los geomateriales por debajo de las cimentaciones. Dentro de los criterios de diseño establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 (NEC-15), se debe asegurar que los esfuerzos inducidos no causen deformaciones excesivas o la falla de los suelos o terreno de fundación. Por lo tanto, es imprescindible conocer las propiedades de los materiales que definan su deformabilidad y resistencia, con el fin de plantear el correcto diseño de cualquier tipo de infraestructura.

En los últimos años en el Ecuador se han introducido métodos geofísicos, que han contribuido en la interpretación geológica-geotécnica de perfiles de suelo, en la determinación de las propiedades mediante correlaciones y consecuentemente, en la ejecución de estudios geotécnicos. Sin embargo, ha habido limitada investigación en verificar la validez de las correlaciones entre los resultados de los ensayos geofísicos con los parámetros geotécnicos utilizados en la práctica para diseños geotécnicos.

Planteando el uso de la prospección geofísica con análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), sísmica de refracción y ensayos de laboratorio convencionales, este proyecto logro la caracterización geotécnica de horizontes stratigráficos de baja profundidad de la formación Mangán de la Ciudad de Cuenca, los cuales se localizan dentro de la profundidad de transmisión de esfuerzos en cimentaciones superficiales.

Los resultados obtenidos tras el desarrollo de estos métodos fueron contrastados para analizar la correlación entre los parámetros geotécnicos obtenidos con métodos directos y velocidades de onda.

Palabras claves: Geofísicos. Geotécnica. Correlaciones. Corte directo. Compresión triaxial. Análisis multicanal de ondas superficiales.



ABSTRACT

The variety of structures built by civil engineers are supported by the ground, generating stresses towards the geomaterials below the foundations. Within the design criteria established in the Ecuadorian Construction Policy 2015 (NEC-15), it must be ensured that the induced strain does not cause excessive deformation or failure on the ground or foundations. Therefore, it is essential to know the material properties that define its deformability and resistance, in order to elaborate a correct design for any type of infrastructure.

In recent years, geophysical methods have been introduced in Ecuador, and have contributed to the geological-geotechnical interpretation of soil profiles, the establishment of soil properties through correlations, and consequently in the execution of geotechnical studies. However, limited research to verify the validity of the correlations between the results of the geophysical test, and the geotechnical parameters used in practice for geotechnical designs, has been carried out.

Through the use of geophysical prospecting with multichannel surface wave analysis (MSWA), refraction seismic and conventional laboratory essays, such as direct shear and triaxial compression tests, this project achieved the geotechnical characterization of stratigraphic horizons of low depth in the Mangan formation of the city of Cuenca, which are located within the depth of stresses transmission in shallow foundations.

The results obtained after the application of these methods were contrasted to analyze the correlation between the geotechnical parameters obtained with direct methods, and the ratio between the compression and shear wave velocities.

Keywords: Geophysical. Geotechnical. Correlations. Direct cut. Triaxial compression. Multichannel surface wave analysis.



ÍNDICE DEL TRABAJO

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE TABLAS.....	7
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.2 HIPÓTESIS.....	11
1.3 OBJETIVOS.....	11
1.3.1 Objetivo general.....	11
1.3.2 Objetivos específicos.....	11
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 MÉTODOS DE EXPLORACIÓN.....	12
2.2 MÉTODOS DIRECTOS.....	12
2.2.1 Clasificación de suelos.....	13
2.2.1.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.....	13
2.2.1.2 Límites de Atterberg.....	14
2.2.2 Ensayo corte directo.....	16
2.2.3 Ensayo compresión triaxial.....	17
2.2.4 Limitaciones de los métodos convencionales.....	19
2.3 MÉTODOS INDIRECTOS.....	19
2.3.1 Geofísica.....	19
2.3.2 División de la geofísica.....	19
2.3.3 Prospección geofísica.....	19
2.3.4 Ondas sísmicas.....	20
2.3.4.1 Elementos de una onda sísmica.....	20
2.3.4.2 Tipos de ondas sísmicas.....	21
2.3.4.3 Leyes de propagación de ondas sísmicas.....	22
2.3.4.4 Factores que afectan la propagación de las ondas sísmicas.....	23
2.3.4.5 Parámetros que afectan la velocidad de las ondas sísmicas.....	24
2.3.5 Métodos sísmicos.....	24
2.3.5.1 Métodos sísmicos invasivos.....	24
2.3.5.2 Métodos sísmicos no invasivos.....	26
2.3.6 Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, (MASW).....	29
2.3.7 Método de Refracción de Ruido Ambiental, (ReMi).....	30
2.3.8 Método de Autocorrelación Espacial Extendida, (ESAc).....	31
2.3.9 Combinación de las técnicas.....	32
2.4 INVESTIGACIONES SOBRE CORRELACIONES ENTRE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS Y VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE.....	33
2.4.1 Correlaciones entre peso específico y velocidad de onda de corte.....	33
2.4.2 Correlaciones entre ángulo de fricción y cohesión a partir de la relación entre velocidades de onda V_p/V_s	34
2.4.3 Correlaciones entre módulo de Young y la velocidad de onda de corte.....	35



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	36
3.1 UBICACIÓN.....	36
3.2 EXPLORACIÓN DE CAMPO.....	37
3.3 FORMACIÓN MANGÁN.	37
3.4 EXTRACCIÓN DE LAS MUESTRAS.	38
3.5 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL SUELO.....	39
3.6 ENSAYOS DE LABORATORIO.....	41
3.6.1 Humedad natural.	41
3.6.2 Granulometría de los suelos.	42
3.6.3 Límites de Atterberg.....	42
3.6.3.1 Limite líquido, (LL).....	43
3.6.3.2 Limite plástico, (LP).....	43
3.6.3.3 Índice de plasticidad, (IP).	44
3.6.4 Clasificación del suelo.	44
3.6.5 Ensayo de corte directo.	44
3.6.6 Ensayo de compresión triaxial.	46
3.7 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA.	48
3.7.1 Equipos utilizados.	48
3.7.2 Levantamiento de información geofísica en campo.....	49
3.7.3 Procesamiento de información e interpretación.	51
3.7.4 Cálculo de parámetros geotécnicos.	53
CAPITULO 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	56
4.1 ENSAYOS DE LABORATORIO.....	56
4.2 ENSAYOS GEOFÍSICOS	59
4.3 CORRELACIONES CUANTITATIVAS PROPUESTAS.....	60
4.3.1 Relación entre las velocidades de onda de corte y el peso específico.	60
4.3.2 Relación entre la relación de velocidades de onda y ángulo de fricción.	62
4.3.3 Relación entre la relación de velocidades de onda y la cohesión.....	64
4.3.4 Relación entre la velocidad de onda de corte y el módulo de Young.	66
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXOS.....	73
ANEXO 1. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN.....	73
ANEXO 2. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO.	81
ANEXO 3. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LOS ENSAYOS TRIAXIALES.....	89
ANEXO 4. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LOS ENSAYOS MASW	92



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Carta de plasticidad.	14
Figura 2.2 Diagrama de flujo para nombres de grupo de suelos limosos, inorgánicos y arcillosos.	15
Figura 2.3 Diagrama del arreglo para la prueba de corte directo.	16
Figura 2.4 Recta intrínseca.	17
Figura 2.5 Cámara de compresión triaxial.	17
Figura 2.6 Envolvente de falla criterio de Mohr-Coulomb.	18
Figura 2.7 Aplicación de diferentes métodos geofísicos.	20
Figura 2.8 Elementos de una onda.	21
Figura 2.9 Ondas Primarias, "P"	21
Figura 2.10 Ondas Secundarias, "S"	21
Figura 2.11 Ondas Love, "L"	22
Figura 2.12 Ondas Rayleigh, "R"	22
Figura 2.13 Diagrama de reflexión y refracción, Ley de Snell.	23
Figura 2.14 Esquema de los ensayos Down-Hole y Up-Hole.	25
Figura 2.15 Señales registradas en un ensayo Down-Hole.	25
Figura 2.16 Esquema del ensayo Cross- Hole.	26
Figura 2.17 Señales registradas en un ensayo Cross-Hole.	26
Figura 2.18 Sísmica de reflexión.	27
Figura 2.19 Sísmica de refracción.	28
Figura 2.20 Curva de dispersión de velocidades, obtenida por el método MASW.	30
Figura 2.21 Curva de dispersión de velocidades, obtenida por el método ReMi.	31
Figura 2.22 Curva de dispersión de velocidades, obtenida por el método ESAC.	32
Figura 2.23 Combinación de las curvas de dispersión MASW, ReMi, ESAC.	33
Figura 3.1 Ubicación del cantón Cuenca.	36
Figura 3.2 Ubicación de los diferentes sectores de estudio.	36
Figura 3.3 Proceso de cribado.	42
Figura 3.4 Material pasante por el tamiz #40.	42
Figura 3.5 Procedimiento realizado para obtener el límite líquido.	43
Figura 3.6 Procedimiento realizado para obtener el límite plástico.	44
Figura 3.7 Máquina de corte directo perteneciente a la Universidad de Cuenca.	45
Figura 3.8 Especímenes para los ensayos de corte directo.	45
Figura 3.9 Colocación y corte de los especímenes ensayados por corte directo.	46
Figura 3.10 Cámara de compresión triaxial, Universidad de Cuenca.	47
Figura 3.11 Obtención de las muestras para los ensayos de compresión triaxial.	47
Figura 3.12 Colocación y falla de las muestras ensayadas en la cámara triaxial.	48
Figura 3.13 Equipos utilizados en los ensayos de prospección geofísica.	49
Figura 3.14 Colocación de los geófonos y registro de la línea sísmica LM1.	50
Figura 3.15 Tendido, cableado y registro de datos de la línea MASW.	50
Figura 3.16 Tendido, cableado y registro de datos de la línea REMI.	51
Figura 3.17 Tendido, cableado y registro de datos de la línea ESAC.	51
Figura 3.18 Dromocronas elaboradas dentro del proceso de interpretación geofísica LS1, software WINSISM.	52
Figura 3.19 Tomografía sísmica LS2	52
Figura 3.20 Perfil de velocidades Vs, software MASW.	53



Figura 3.21 Relación no lineal entre la rigidez y la deformación de los suelos. Los.....55

Figura 4.1 Relación entre el ángulo de fricción y el índice de plasticidad58

Figura 4.2 Correlación entre el peso específico (γ_s) y la velocidad de onda de corte (V_s) para Limos-Arenosos de la Formación Mangán.60

Figura 4.3 Correlaciones encontradas por diferentes autores entre el peso específico (γ_s) y la velocidad de onda de corte (V_s).....61

Figura 4.4 Correlación entre relación de velocidades de onda (V_p/V_s) y el ángulo de fricción (ϕ) para Limos-Arenosos de la Formación Mangán.62

Figura 4.5 Correlaciones encontradas por diferentes autores entre la relación de velocidades de onda (V_p/V_s) y el ángulo de fricción (ϕ).63

Figura 4.6 Correlación entre relación de velocidades de onda (V_p/V_s) y cohesión (c) para Limos-Arenosos de la Formación Mangán.64

Figura 4.7 Correlaciones encontradas por diferentes autores entre la relación de velocidades de onda (V_p/V_s) y cohesión (c).65

Figura 4.8 Correlación entre el módulo de Young, (E_{50}) y la velocidad de onda de corte (V_s) para Limos-Arenosos de la Formación Mangán.66

Figura 4.9 Correlaciones encontradas por diferentes autores entre el módulo de Young, (E_{50}) y la velocidad de onda de corte (V_s).67

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Tipo de muestras para ensayos de laboratorio 12

Tabla 2.2 Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos..... 13

Tabla 3.1 Sector, ubicación, coordenadas, geología y litología de los diferentes sectores de estudio.38

Tabla 3.2 Resumen de la cantidad de ensayos convencionales realizados.40

Tabla 3.3 Resumen de la cantidad de ensayos geofísicos realizados.41

Tabla 3.4 Valores del coeficiente de Poisson para diferentes tipos de suelo.....54

Tabla 4.1 Resultados de laboratorio de las diferentes calicatas.56

Tabla 4.2 Parámetros de resistencia al cortante, mediante los ensayos de corte directo para los diferentes suelos.57

Tabla 4.3 Parámetros de resistencia al cortante mediante los ensayos de compresión triaxial para los diferentes suelos.57

Tabla 4.4 Ángulo de fricción interna según el tipo de suelo.....58

Tabla 4.5 Parámetros Físico-Mecánicos.59

Tabla 4.6 Velocidades de onda para los diferentes estratos encontrados a una profundidad de 2.00m.....59

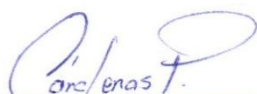


Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Pablo Marcelo Cárdenas Arias en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Caracterización geotécnica de la formación Mangán, mediante métodos geofísicos", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de octubre de 2019



Pablo Marcelo Cárdenas Arias

C.I: 0104510953



Cláusula de Propiedad Intelectual

Pablo Marcelo Cárdenas Arias, autor del trabajo de titulación "Caracterización geotécnica de la formación Mangán, mediante métodos geofísicos", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 21 de octubre de 2019



Pablo Marcelo Cárdenas Arias

C.I: 0104510953



Agradecimientos

La presente tesis se la dedico a Dios, por darme la oportunidad de vivir y bendecirme con una familia maravillosa.

A mis padres y hermanas, ellos son la razón de mi vida, gracias por encaminarme y nunca soltarme de la mano en los momentos difíciles, gracias por sus consejos, paciencia y su apoyo incondicional.

Quiero agradecer de manera especial al Ing. Alfredo Vázquez por su confianza, apoyo, paciencia, dedicación y motivación a lo largo de todo el trabajo de titulación.

De igual manera, quiero agradecer a los ingenieros que hicieron posible la culminación de este trabajo de titulación. Quiero agradecer a los ingenieros Sebastián López y Daniel Vélez quienes supieron de brindarme su experiencia y compartirme sus conocimientos a lo largo de la realización de la presente tesis.

Pablo

Dedicatoria

Quiero dedicar esta tesis con mucho cariño a mis padres, hermanas, familia y amigos.

Pablo



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Definición del problema.

El uso de métodos directos para la caracterización del suelo se lo realiza de forma puntual, interpolando los resultados entre dos o más puntos, en tanto que los métodos indirectos permiten obtener un perfil geofísico del suelo en dos dimensiones, pero con resultados de velocidad de onda V_p y V_s .

El costo de los ensayos directos es alto, en relación al costo de los ensayos indirectos, por lo que la información geotécnica es limitada, la cual, contrastando con ensayos indirectos, permitirían validar los resultados geofísicos, proporcionando una caracterización geotécnica de mayor alcance.

Los resultados de la presente investigación pretenden reducir los costos de exploración geotécnica y ampliar la caracterización geotécnica del área de estudio, utilizando los resultados de la prospección geofísica.

A nivel mundial, dentro del campo geotécnico, se están desarrollando investigaciones en el ámbito geofísico que proporcione información relevante para la caracterización geomecánica del terreno, lo cual permite complementar la investigación directa y optimizar los modelos geotécnicos, y lo conveniente que resulta basar dichos estudios en dos o más métodos de investigación, siendo importante reconocer la amplitud de los aportes de la geofísica prospectiva dentro de la ingeniería civil en el conocimiento de las propiedades físico mecánicas del suelo.

Las propiedades geotécnicas del suelo son de vital importancia ingenieril para el diseño de cimentaciones para estructuras como edificios, puentes, centrales hidroeléctricas, etc. Además de ser trascendentes en estabilización de taludes, diseño y construcción de túneles y carreteras, diseño y construcción de muros de contención para prevención de riesgos geológicos.

1.2 Hipótesis.

Los parámetros geotécnicos del suelo (cohesión y fricción) pueden ser obtenidos mediante una relación empírica, utilizando los valores de onda del suelo.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general.

Establecer las propiedades geotécnicas provenientes de la formación Mangán de la ciudad de Cuenca, basado en una correlación de los métodos geofísicos y convencionales.

1.3.2 Objetivos específicos.

1. Determinar las características geotécnicas del suelo, mediante ensayos de corte directo.
2. Determinar las características geofísicas del terreno mediante ensayos de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW).
3. Sistematizar información existente respecto a correlaciones de parámetros geotécnicos con valores de velocidades de onda V_s y V_p .
4. Analizar y comparar los resultados obtenidos.
5. Generar una correlación basada en la caracterización geotécnica alcanzada.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

2.1 Métodos de exploración.

Para realizar cualquier proyecto de construcción de infraestructura, el proyectista o constructor debe conocer la estratigrafía y propiedades del suelo, este conocimiento se logra a través del estudio geotécnico, el cual incluye la exploración, la obtención de muestras, la ejecución de pruebas de laboratorio y el análisis de la información.

La confiabilidad del estudio geotécnico depende de los trabajos de exploración, por lo tanto, estos deben realizarse en forma cuidadosa, siguiendo métodos y normas establecidas.

Los métodos de exploración del subsuelo se pueden clasificar en dos tipos: los métodos directos e indirectos.

2.2 Métodos directos.

En los métodos de exploración directos se obtienen muestras que sirven para conocer las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del suelo. Las muestras representativas obtenidas pueden ser, alteradas o inalteradas necesarias donde se requiera obtener parámetros mecánicos mediante pruebas de laboratorio (corte directo, compresión triaxial, etc.).

Calicatas.

Las calicatas son uno de los métodos más empleados en el reconocimiento superficial del terreno, y dado su bajo costo y rapidez de realización, constituyen un elemento habitual en cualquier tipo de investigación in situ.

Las calicatas consisten en excavaciones realizadas mediante medios mecánicos convencionales, que permiten la inspección directa del suelo que se desea estudiar, así como tomar muestras de gran tamaño para la realización de ensayos en laboratorio, por lo tanto, es el método de exploración que entrega la información más confiable y completa.

Durante la realización de calicatas, pueden tomarse muestras alteradas e inalteradas.

Toma de muestras en calicatas	Descripción	Ensayos
Alteradas	Son aquellas en la que se altera la estructura interna del suelo. Se obtienen en general de las paredes de los pozos y comprenden estratos determinados o bien la suma de algunos de ellos.	<ul style="list-style-type: none">• Granulometría• Límites de Atterberg
Inalteradas	En este tipo de muestras no se altera significativamente la estructura del suelo. Las muestras son recortadas de las paredes de los pozos y comprenden estratos bien definidos conservando sus características para evitar cambios de humedad.	<ul style="list-style-type: none">• Humedad Natural• Corte directo• Compresión triaxial

Tabla 2.1 Tipo de muestras para ensayos de laboratorio
Fuente: Propia.

2.2.1 Clasificación de suelos.

Según el comportamiento técnico de los suelos estos se clasifican en diferentes grupos. Esto se da para poseer un lenguaje común el momento de expresar las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas.

Existen dos sistemas de clasificación que consideran la distribución por tamaño de grano y plasticidad de los suelos. Estos son el Sistema de Clasificación AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Los ingenieros geotécnicos usualmente usan el Sistema Unificado (Das, 1999).

2.2.1.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

La forma original de este sistema fue propuesta por Casagrande en 1942 implemento este sistema de clasificación debido a la necesidad de usarse en la construcción de aeropuertos durante la Segunda Guerra Mundial. En 1952 el sistema fue revisado y se ha convertido en una de las importantes herramientas al momento de Clasificar los Suelos, (Das, 1999).

El Sistema Unificado de Clasificación se presenta en la Tabla 2.2.

Los suelos de grano fino con 50% o más pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M, que significa limo inorgánico, C para arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos. Otros símbolos son también usados para la clasificación, (Das, 1999):

- ✚ W: bien graduado
- ✚ P: mal graduado
- ✚ L: baja plasticidad (límite líquido menor que 50)
- ✚ H: alta plasticidad (límite líquido mayor que 50)

Símbolo de grupo	Criterios
CL	Inorgánico; $LL < 50$; $PI > 7$; se grafica sobre o arriba de la línea A (véase zona CL en la Fig. 2)
ML	Inorgánico; $LL < 50$; $PI < 4$; o se grafica debajo de la línea A (véase la zona ML en la Fig. 2)
OL	Orgánico; $LL - \text{seco en horno} / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$; $LL < 50$ (véase zona OL en la Fig. 2)
CH	Inorgánico; $LL \geq 50$; PI se grafica sobre o arriba de la línea A (véase la CH en la Fig. 2)
MH	Inorgánico; $LL \geq 50$; PI se grafica debajo de la línea A (véase la zona MH en la Fig. 2)
OH	Orgánico; $LL - \text{seco en horno} / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$; $LL \geq 50$ (véase zona OH en la Fig. 2)
CL-ML	Inorgánico; se grafica en la zona sombreada en la Fig. 2
Pt	Turba, lodos y otros suelos altamente orgánicos

Tabla 2.2 Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos.
Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica, (Das, 1999).

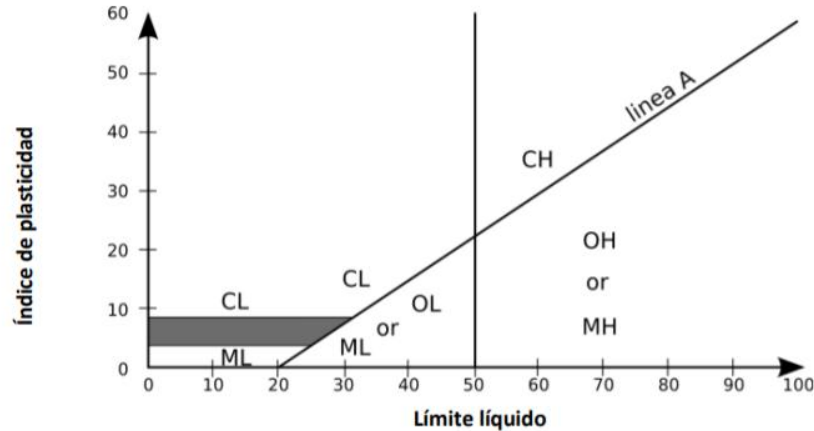


Figura 2.1 Carta de plasticidad.

Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica, (Das, 1999).

2.2.1.2 Límites de Atterberg.

El contenido de agua en el punto de transición de estado semi sólido a plástico es el límite plástico, y de estado plástico a líquido es el límite líquido. Esos límites se conocen también como límites de Atterberg (Das, 1999).

✚ Límite plástico (PL)

El límite plástico se define como el contenido de agua, en porcentaje, con el cual el suelo, al ser enrollado en rollos de 3.2mm de diámetro, se desmorona. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. El índice de plasticidad (PI) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo, (Das, 1999).

✚ Límite líquido (LL)

Es la humedad a partir de la cual un suelo deja de tener un comportamiento plástico y pasa a tener un comportamiento viscoso, es decir, es la humedad límite entre el estado plástico y el estado viscoso; se utiliza un dispositivo mecánico (Copa de Casagrande) en el que, con un determinado número de golpes, se establece la fluencia del suelo, (Das, 1999).

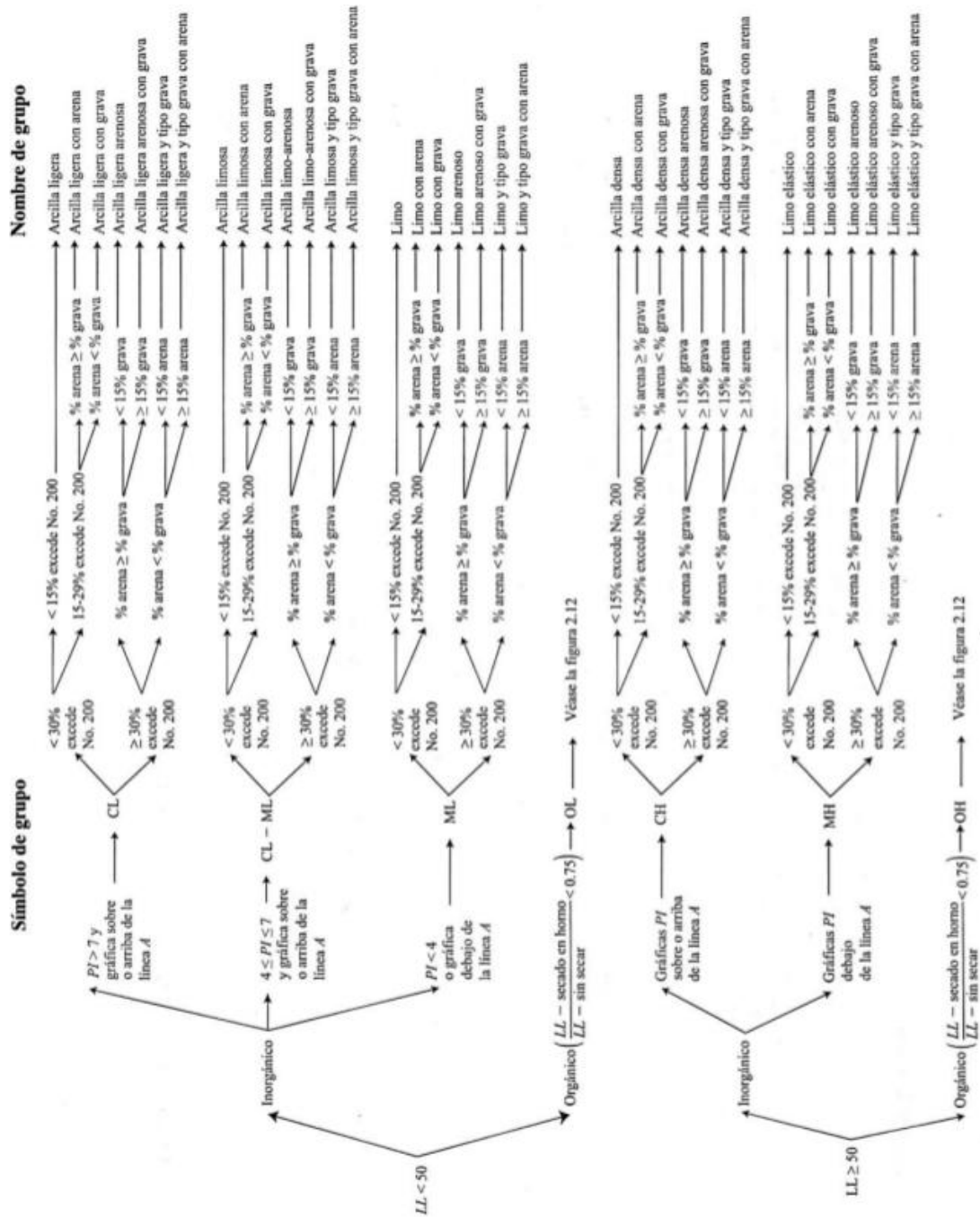


Figura 2.2 Diagrama de flujo para nombres de grupo de suelos limosos, inorgánicos y arcillosos. Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica, (Das, 1999).

2.2.2 Ensayo corte directo.

El ensayo de corte directo tiene como finalidad de determinar la resistencia al corte de un espécimen de suelo, sometido a fatigas y/o deformaciones que supongan las que existen o existirán en el terreno producto de la aplicación de carga.

El equipo consiste en una caja rígida de acero de sección cuadrada dividida horizontalmente en dos mitades. En la misma se coloca el espécimen de suelo junto con piedras porosas en ambos extremos respectivamente, se aplica una carga vertical de confinamiento (P_v) y luego una carga horizontal (P_h) creciente que ocasiona el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte del espécimen, (Das, 1999).

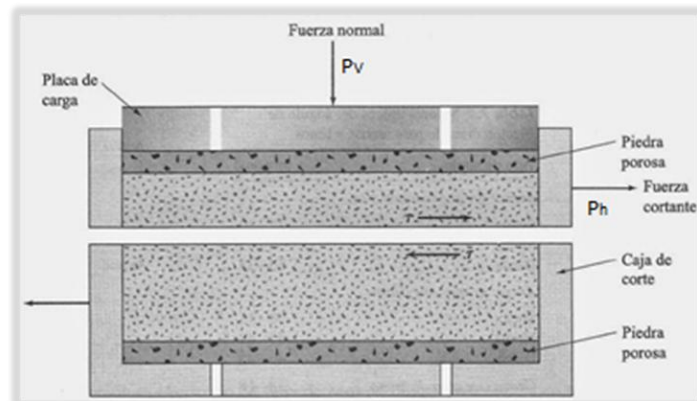


Figura 2.3 Diagrama del arreglo para la prueba de corte directo.
Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica, (Das, 1999).

El ensayo induce la falla a través de un plano determinado. Sobre este plano de falla actúan dos esfuerzos:

- ✚ Un esfuerzo normal (σ_n), aplicando externamente debido a la carga vertical (P_v).
- ✚ Un esfuerzo cortante (τ), debido a la aplicación de la carga horizontal (P_h).

Estos esfuerzos se calculan dividiendo las respectivas fuerzas por el área (A) de la muestra o de la caja de corte y deberían satisfacer la ecuación de Coulomb definida como:

$$\tau = c + \sigma_n \times \tan(\varphi)$$

Según esta ecuación la resistencia al corte depende de la cohesión (C) y la fricción interna del suelo (φ).

Durante la aplicación de la fuerza horizontal, se van midiendo las deformaciones y con estos valores será posible graficar la tensión de corte (τ), en función de la deformación (ε) en el plano de esta tensión de corte.

De la gráfica es posible tomar el punto máximo de tensión de corte como la resistencia al corte del suelo.

Los valores de (τ) se llevan a un gráfico en función del esfuerzo normal (σ_n), obteniendo la recta intrínseca Figura 2.2, donde (τ) va como ordenada y (σ_n) como abscisa. El ángulo que forma esta recta con el eje horizontal es el ángulo (φ) y el intercepto con el eje (τ), la cohesión (C). Este mismo proceso se realiza con otros dos especímenes del suelo, pero sometidas a tensiones normales crecientes (σ_n2) y (σ_n3), (Espinace & Sanhueza, 2004).

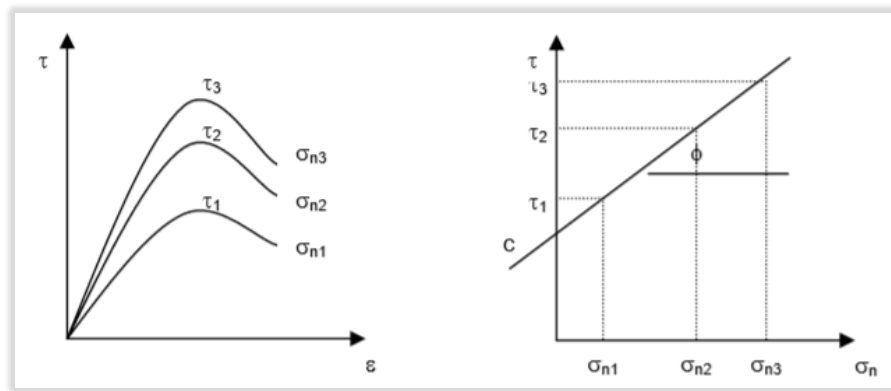


Figura 2.4 Recta intrínseca.

Fuente: Texto guía para la cátedra de mecánica de suelos, (Espinace & Sanhueza, 2004).

❖ Ensayo no consolidado-no drenado (UU)

Es un ensayo rápido, donde el corte se inicia antes de consolidar la muestra bajo la carga normal (Pv). Generalmente la recta intrínseca en el diagrama de τ contra σ es horizontal, donde igual no se permite el drenaje de la muestra en todo el ensayo.

2.2.3 Ensayo compresión triaxial.

El ensayo triaxial, comprende la prueba más común y versátil utilizada para determinar las propiedades esfuerzo deformación del suelo. Esta prueba permite obtener una variada información sobre la resistencia del suelo en estados reales de carga, (Lambe & Whitman, 2004).

El ensayo consiste en adecuar una probeta cilíndrica de suelo, del doble de altura que su diámetro para rodearla de una membrana impermeable que se coloca en una cámara especial que puede adquirir cualquier presión lateral deseada a los especímenes donde se le aplica una presión igual en todo sentido y dirección.

Sujeto a este estado de equilibrio, se incrementa la presión normal, sin cambiar la presión lateral aplicada, hasta llegar a la falla.



Figura 2.5 Cámara de compresión triaxial.

Fuente: Propia.

Ensayando al menos 3 especímenes, con presiones laterales diferentes, en una gráfica se pueden dibujar los círculos de "Mohr" que representarían los esfuerzos de falla de cada muestra

en donde trazando una tangente o envolvente a estos, se determinan los parámetros ángulo de fricción (ϕ) y cohesión (C), del suelo.

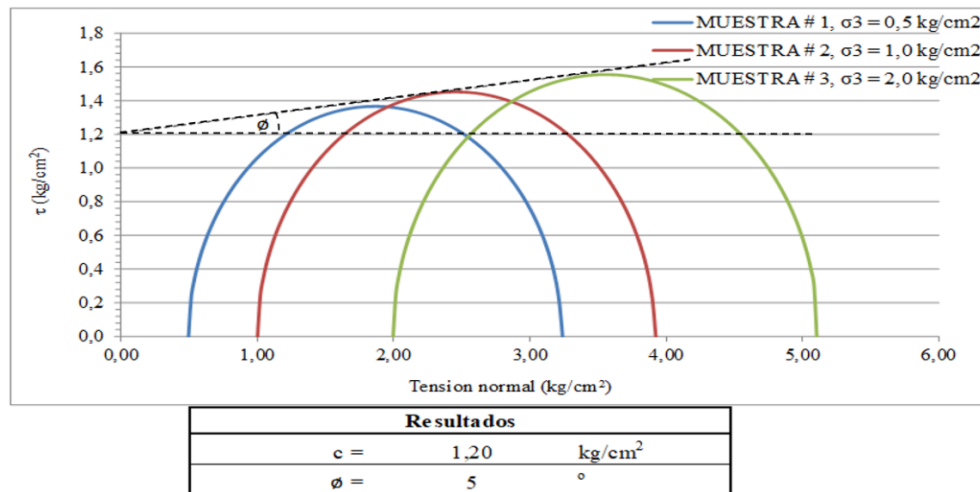


Figura 2.6 Envolvente de falla criterio de Mohr-Coulomb.
Fuente: Propia

Dependiendo del tipo de suelo y las condiciones en las que este va a trabajar, las opciones para realizar este ensayo serán:

- ✚ **Ensayo consolidado drenado (CD)**, también conocido como ensayo lento que permite determinar los parámetros efectivos de resistencia al corte.
- ✚ **Ensayo consolidado no drenado (CU)**, en donde durante su ejecución es posible la medición del exceso de presión de poros pudiendo así determinar los parámetros de resistencia del suelo tanto en términos efectivos como totales.
- ✚ **Ensayo no consolidado no drenado (UU)**, también conocido como ensayo rápido

Para nuestro caso de estudio se analizará la prueba no consolidada no drenada (UU) descrita a continuación.

❖ Ensayo no consolidado no drenado (UU)

Este método permite determinar propiedades de resistencia no drenadas y relaciones esfuerzo deformación (especímenes inalterados como muestras remoldeadas) de suelos cohesivo esto se logra al medir los esfuerzos totales aplicados al espécimen, es decir que los esfuerzos no son corregidos por presiones de poro y los resultados obtenidos dependerán del contenido de humedad y el grado de saturación del espécimen.

La resistencia triaxial no drenada y no consolidada es aplicable a situaciones donde se asume que la aplicación de carga es tan rápida que no hay tiempo suficiente para que la presión de poros inducida se disipe y ocurra consolidación durante el periodo de carga (es decir que no ocurre el drenaje).

Los especímenes fallados a distintas condiciones de saturación brindaran resultados ya que inciden en la envolvente de falla del material. La resistencia a la compresión determinada utilizando este método no aplica en casos donde las condiciones de carga de campo sean significativamente mayores a aquellas utilizadas en el método. (Das, 1999).



2.2.4 Limitaciones de los métodos convencionales.

(Espinace & Sanhueza, 2004) en su libro nos da a conocer las limitaciones de los métodos convencionales para determinar las características del suelo, dentro de las cuales se mencionan:

- ✚ El daño producido al suelo durante el proceso de muestreo, este daño es particularmente importante en las arenas y arcillas, que pueden sufrir una disminución considerable en su resistencia sin drenaje debido al inevitable amasado, la toma de muestras inalteradas y su posterior manejo es difícil y de elevado costo.
- ✚ En muchos casos las muestras no son representativas de una gran masa de terreno.
- ✚ La anulación de las tensiones totales, ocasionada por la toma de muestras y su posterior manejo, puede modificar el comportamiento de materiales esencialmente no elásticos. Hay que tener en cuenta, además, el desconocimiento que casi siempre se tiene sobre las tensiones iniciales y sobre las producidas posteriormente in situ.
- ✚ La dificultad de reproducir en el laboratorio los complejos cambios de tensiones que ocurren in situ.

En todos estos casos puede ser conveniente recurrir a los ensayos in situ, cuyo principal inconveniente puede ser su elevado costo.

2.3 Métodos indirectos.

Los métodos de exploración indirectos son aquellos que recopilan información sobre las propiedades físicas del suelo considerando las variables y configuración más adecuada que presente el medio en estudio sin necesidad de extraer muestras.

2.3.1 Geofísica.

La geofísica (naturaleza de la tierra) es la ciencia que estudia los campos físicos vinculados a nuestro planeta. Es decir, estudia la tierra mediante métodos de la física, de carácter indirecto, a fin de conocer su evolución y características actuales (geofísica pura) y también como herramienta de prospección de recursos (geofísica aplicada).

Pueden medirse directamente los campos físicos naturales (gravedad, magnetismo, radiactividad, etc.) o generarse campos artificiales por emisión de electricidad, energía sísmica, etc., para así obtener mediciones más efectivas a los fines exploratorios (Chelotti, Acosta, & Foster, 2009).

2.3.2 División de la geofísica.

Uno de los principales problemas que presenta la Geofísica es la de establecer un criterio que defina su división. Una de las primeras divisiones se dio en 1929 por Gutenberg, en el libro *Lehrbuch der Geophysik* donde basándose en los distintos campos de la física que se aplican a la tierra queda dividida en capítulos de Mecánica, Gravitación, Electricidad, Magnetismo, Óptica, Calor y Composición de la Materia.

Aunque no exista unanimidad de criterios para la división de la geofísica, la más aceptada es la siguiente:

- | | | |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| ✚ Geodesia y Gravimetría. | ✚ Oceanía Física. | ✚ Planetología. |
| ✚ Sismología. | ✚ Meteorología. | ✚ Prospección Geofísica. |
| ✚ Geomagnetismo y Aeronomía. | ✚ Geodinámica. | |
| | ✚ Geoquímica y Vulcanología. | |

2.3.3 Prospección geofísica.

La prospección geofísica es el conjunto de técnicas que investiga el interior de la Tierra, partiendo de las variaciones encontradas en parámetros físicos significativos y su correlación con las características geológicas. Estas técnicas son no destructivas y de investigación extensiva de gran cobertura, complementarias de los ensayos in-situ y técnicas de reconocimiento directas (González de Vallejo, Ferrer , Ortuño, & Oteo, 2002).

La prospección geofísica ha sido empleada para la exploración geológica y de minas, siendo ahora adaptada a fines que buscan encontrar características geotécnicas como son determinar espesores de rellenos o recubrimientos, excavabilidad, posición del nivel freático, localización de cavidades u otras heterogeneidades del subsuelo, propiedades geomecánicas, localización de conducciones subterráneas y evolución de fenómenos dinámicos.

Según los diferentes métodos geofísicos para el reconocimiento del subsuelo se pueden obtener diferentes parámetros físicos investigados: gravimetría (densidad), magnético (susceptibilidad magnética), eléctricos (resistividad), electromagnéticos (conductividad eléctrica y permeabilidad magnética), sísmico (velocidad de propagación de ondas sísmicas), radioactivos (niveles de radiación natural o inducida) (González de Vallejo, Ferrer , Ortuño, & Oteo, 2002).

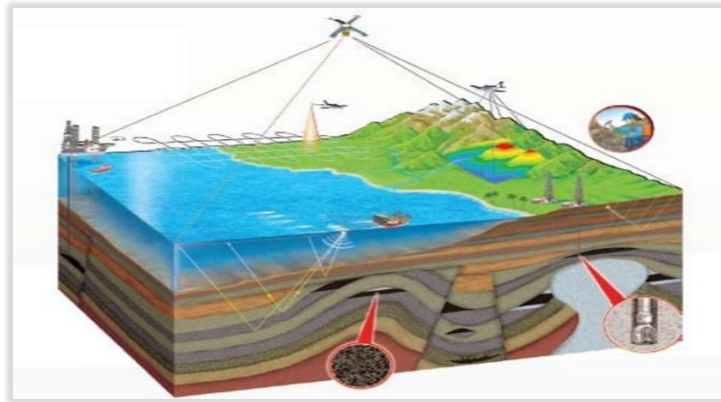


Figura 2.7 Aplicación de diferentes métodos geofísicos.

Fuente: Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos, (Jaimes, 2011).

2.3.4 Ondas sísmicas.

Las ondas sísmicas pueden definirse como una pequeña cantidad de energía elástica de deformación que viaja a través del subsuelo desde su lugar de origen sísmico a velocidades que dependen de las densidades del medio, pero también de su módulo de elasticidad (Lazcano, 2007).

2.3.4.1 Elementos de una onda sísmica

- ✚ **Amplitud (A):** Altura alcanzada por la onda medida sobre el nivel de referencia.
- ✚ **Período (T):** Tiempo entre las repeticiones sucesivas de la onda, su unidad es el segundo.
- ✚ **Frecuencia (f):** Número de onda por unidad de tiempo. Es el inverso del período. Su unidad es el Hz.
- ✚ **Longitud de onda (λ):** Distancia entre sucesivas repeticiones de la onda. Se mide en metros.
- ✚ **Número de Onda K ($1/\lambda$):** Número de onda por unidad de distancia. Su unidad es 1 / metros.
- ✚ **Fase (θ):** Desplazamiento en fracciones de ciclos, de un punto dado sobre la onda.
- ✚ **Velocidad (V):** Número de ondas por unidad de tiempo que pasan por un mismo punto.
 $V = \lambda * f.$

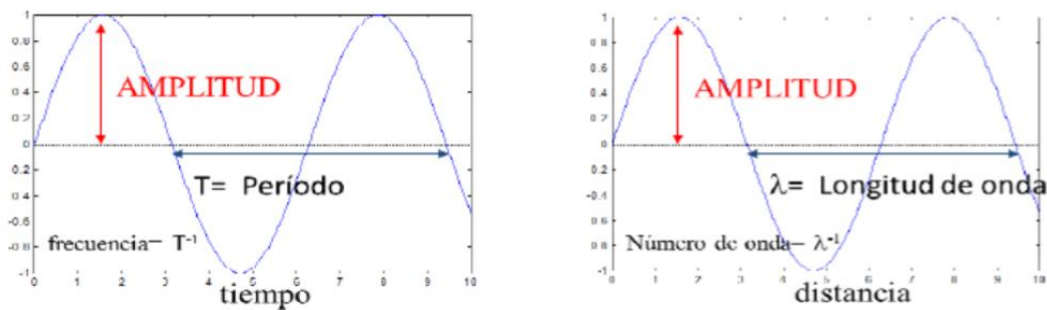


Figura 2.8 Elementos de una onda.

Fuente: Caracterización de suelos del centro histórico de la ciudad de Cuenca, mediante métodos geofísicos, (Avilés & Barzallo, 2016).

2.3.4.2 Tipos de ondas sísmicas.

(Humire, 2013) en su investigación sobre la caracterización sísmica del suelo basados en la aplicación de ondas, clasifica el tipo de ondas sísmicas en ondas de cuerpo y superficiales:

Dentro de las ondas sísmicas, podemos encontrar las ondas de cuerpo que se pueden clasificar en dos tipos:

- ✚ **Ondas Primarias, de compresión u ondas P**, son ondas que crean un movimiento de partículas en dirección de la expansión, comprimiendo y dilatando el medio por el se propagan.

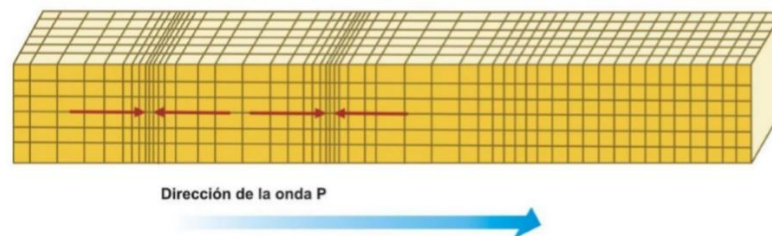


Figura 2.9 Ondas Primarias, "P".

Fuente: Aplicación de Métodos Geofísicos Basados en Ondas Superficiales para la Caracterización Sísmica de Suelos, (Humire, 2013).

- ✚ **Ondas Secundarias, de corte u ondas S**, son ondas que crean un movimiento de partículas perpendiculares a la dirección de expansión, desarrollando esfuerzos de corte en el medio por el que se propagan.

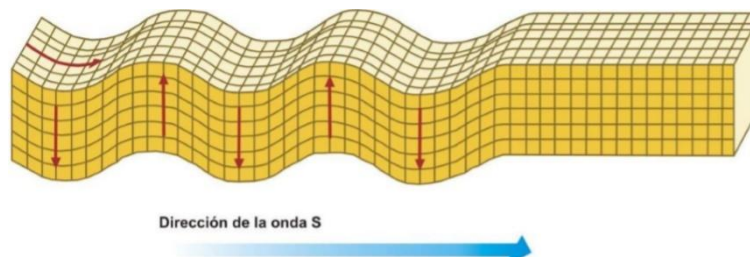


Figura 2.10 Ondas Secundarias, "S".

Fuente: Aplicación de Métodos Geofísicos Basados en Ondas Superficiales para la Caracterización Sísmica de Suelos, (Humire, 2013).

Por otro lado, las ondas superficiales se propagan a lo largo de la superficie de la tierra, su velocidad de propagación es menor que la de las ondas de cuerpo. Estas ondas pueden ser generadas de forma natural (viento, sismos etc.) o artificial (actividades humanas).

Las ondas de superficie se pueden clasificar en dos tipos:

- ✚ **Ondas Love, u ondas L**, son ondas que producen vibración horizontal en sentido perpendicular a la dirección de la propagación, estas ondas se originan cuando la capa superficial es más blanda que la capa inferior.

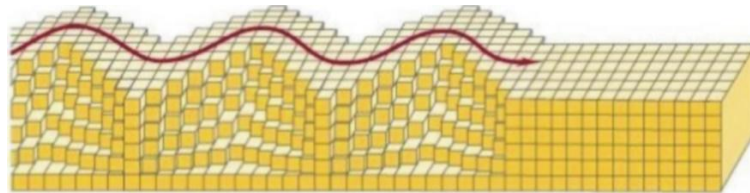
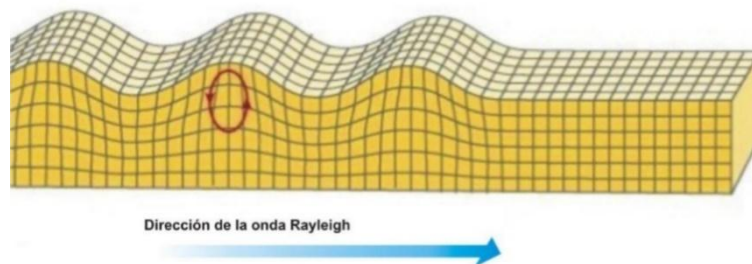


Figura 2.11 Ondas Love, "L".

Fuente: *Aplicación de Métodos Geofísicos Basados en Ondas Superficiales para la Caracterización Sísmica de Suelos*, (Humire, 2013).

- ✚ **Ondas Rayleigh, u ondas R**, son ondas que se ocasionan siempre que se induzca el movimiento sobre la superficie libre en dirección vertical provocando una trayectoria de partículas elípticas con una componente retrógrada de movimiento en el plano de propagación.



Dirección de la onda Rayleigh

Figura 2.12 Ondas Rayleigh, "R".

Fuente: *Aplicación de Métodos Geofísicos Basados en Ondas Superficiales para la Caracterización Sísmica de Suelos*, (Humire, 2013).

2.3.4.3 Leyes de propagación de ondas sísmicas.

La propagación y trayectoria de las ondas están regidas por las siguientes leyes fundamentales:

- ✚ **El Principio de (Christiaan) Huygens (holandés, 1670)**, establece que: "todos los puntos de un frente de onda actúan como puntos de origen para la producción de nuevos frentes de ondas que se extienden en todas las direcciones. El nuevo frente de ondas será la envolvente de todos los pequeños frentes de onda".
- ✚ **El Principio de (Pierre) Fermat (francés, 1670)**, establece que: "un rayo luminoso que va de un punto a otro sigue una trayectoria tal que, comparada con otras trayectorias cercanas, el tiempo que requiere para recorrerla es el mínimo".

Estos dos principios están ligados al concepto de onda y trayectoria, y es en los dos en los que se basa los métodos de exploración sísmica.

- ✚ **Ley de (Willebrord) Snell (holandés, 1621)**, establece que: “los rayos incidente y refractado y la normal a la superficie en el punto de incidencia están en un mismo plano. La relación entre los senos de los ángulos incidente (i) y de refracción (r) medidos entre los rayos y la normal es constante entre dos medios e igual a la relación de velocidades de la onda entre uno y otro medio, constante que conocemos como índice de refracción n ”.

$$n = V_1 / V_2 = \text{sen } \theta_1 / \text{sen } \theta_2$$

Esta ley es muy importante, ya que los métodos sísmicos se basan en que la velocidad de las ondas elásticas es diferente para rocas diferentes.” (Jaimes, 2011).

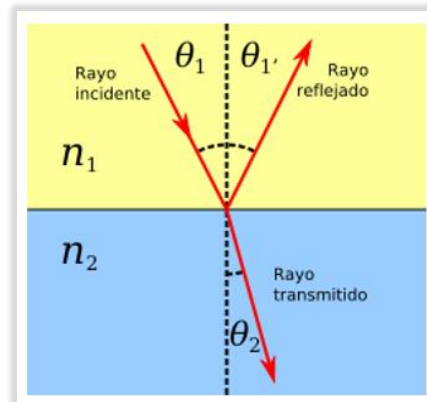


Figura 2.13 Diagrama de reflexión y refracción, Ley de Snell.

Fuente: Caracterización de suelos del centro histórico de la ciudad de Cuenca mediante métodos geofísicos, (Avilés & Barzallo, 2016).

Si una onda llega al límite de separación entre dos medios con características elásticas diferentes, parte de ella es refractada y parte reflejada. Para encontrar la superficie de separación entre las capas del subsuelo, por medio del impacto generado artificialmente se mide el tiempo de viaje de las ondas refractadas o reflejadas, desde su origen hasta diferentes detectores colocados en la superficie del terreno (Espinace & Sanhueza, 2004).

2.3.4.4 Factores que afectan la propagación de las ondas sísmicas.

Según (Chelotti, Acosta, & Foster, 2009), los factores principales que afectan la propagación de las ondas sísmicas son:

- ✚ **Absorción o Atenuación inelástica:** Corresponde a la pérdida de energía de la onda debida a la fricción entre granos de la roca.
- ✚ **Divergencia esférica:** Es la distribución de la energía inicial en una superficie esférica cada vez más grande. Representa la reducción exponencial de la relación energía/área.
- ✚ **Difracciones:** Los fenómenos ópticos, son consecuencia del Principio de Huygens y se producen por heterogeneidades laterales (cambios drásticos de buzamiento, terminaciones rocosas sub horizontales, fallas etc.).
- ✚ **Dispersión:** La variabilidad de la frecuencia produce variaciones en la velocidad de las ondas, ya que existe una dependencia física. Una disminución de frecuencia produce una pequeña reducción de la velocidad.
- ✚ **Desperdigamiento (Scattering):** El golpeo de las ondas con partículas menores produce ondas pequeñas que se distribuyen en todas direcciones.
- ✚ **Conversión de modo de ondas:** Cuando una onda de compresión que viaja a través de un medio llega a una interfaz con un ángulo de incidencia menor que 90° , parte de su energía es reflejada, transmitida y otra parte se convierte en ondas de corte. Los

ángulos con que cada rayo de onda compresión y corte reflejada y transmitida viajará por el medio están dados por la ley de Snell.

2.3.4.5 Parámetros que afectan la velocidad de las ondas sísmicas.

Según (Jaimes, 2011) los principales parámetros que afectan la velocidad en que las ondas sísmicas se propagan son:

- + **Litología:** La velocidad de las ondas es diferente para diferentes clases de rocas.
- + **Porosidad:** Disminuye con la profundidad aumentando de esta manera la densidad y la velocidad.
- + **Edad de la roca:** No varía por sí la velocidad, pero si los procesos que están asociados al paso del tiempo.
- + **Fluidos y saturación de agua:** Al aumentar la densidad del fluido intersticial la velocidad crece.
- + **Cementación:** Crece la velocidad, disminuye la porosidad y crecen los módulos elásticos.
- + **Presión de poros y presión litostática:** Si la presión litostática aumenta y la presión de poros no varía, la matriz se comprime aumentando los módulos elásticos y la densidad varía creciendo la velocidad.
- + **Contenido de arcillas:** Para niveles de arcilla bajos la velocidad crece hasta el punto en el cual baja debido a que la arcilla empieza a hacer parte de la matriz.
- + **Geometría de los poros:** La geometría y relación entre ellos determina una parte de la estructura sólida de la roca y los módulos elásticos.
- + **Anisotropía:** La velocidad se ve perjudicada por el ángulo de incidencia de la onda y el plano normal.
- + **Temperatura:** Experimentalmente se ha visto una disminución de la velocidad con el aumento de temperatura.

2.3.5 Métodos sísmicos.

Los métodos sísmicos estudian la propagación en el terreno de ondas sísmicas generadas artificialmente, estableciendo su correlación con la configuración geológica del subsuelo. La velocidad con la que trascienden depende de la densidad del medio y de las constantes elásticas (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

2.3.5.1 Métodos sísmicos invasivos.

+ Down-Hole y Up-Hole

En el método Down-Hole, la fuente se ubica en la superficie, mientras que los receptores en la pared de la perforación.

El ensayo se lo realiza con un arreglo de receptores distribuidos a lo largo de la perforación que serán los encargados de grabar la señal proveniente de la fuente de manera simultánea, siendo este arreglo la forma más precisa, debido a que las señales registradas por los receptores son producidas por la misma fuente. Pero también este ensayo se lo puede realizar con un solo receptor que va descendiendo hasta conseguir la velocidad de corte a distintas profundidades (Humire, 2013).

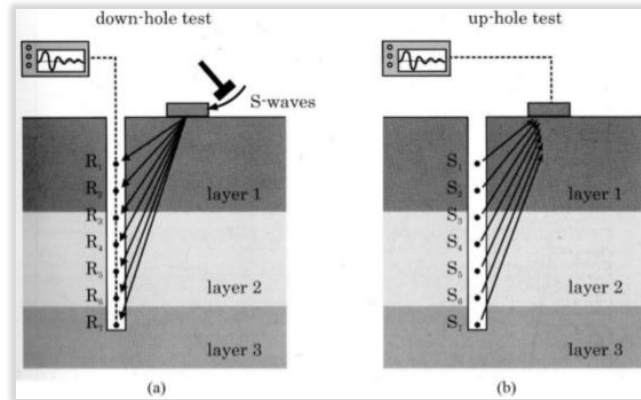


Figura 2.14 Esquema de los ensayos Down-Hole y Up-Hole.
Fuente: *Waves and Vibrations in Soils*, (Semblat & Pecker, 2009).

Para generar las ondas de corte, se debe golpear horizontalmente una placa rígida en la superficie, el golpe debe ser aplicado en sentidos opuestos con la misma energía, de tal forma, que permita reconocer el instante en que llega la onda mediante el desfase o la polarización de las señales registradas.

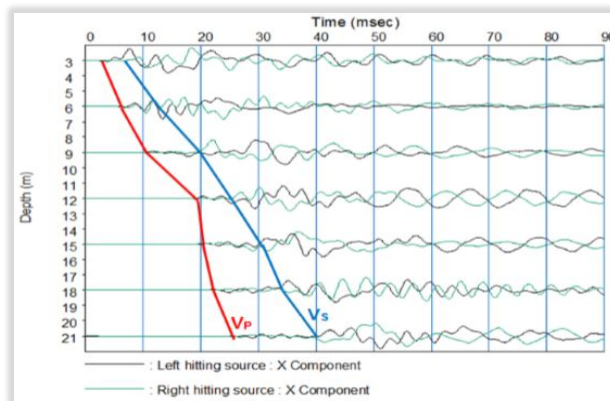


Figura 2.15 Señales registradas en un ensayo Down-Hole.
Fuente: *Aplicación de métodos geofísicos basados en ondas superficiales para la caracterización sísmica de suelos*, (Humire, 2013).

Existe un método alternativo llamado Up-Hole en el cual se ubica un solo receptor en la superficie y se procede a golpear en la perforación a distintas profundidades y se registrando así la señal.

Cross-Hole.

El ensayo Cross-Hole, es el método más preciso, debido a que permite determinar las características mecánicas del suelo directamente en un plano horizontal, y no a lo largo de un pozo (Semblat & Pecker, 2009).

En el método Cross-Hole es necesario realizar dos o más perforaciones debidamente alineadas en donde sobre una de ellas se ubicará la fuente, y en las otras los receptores.

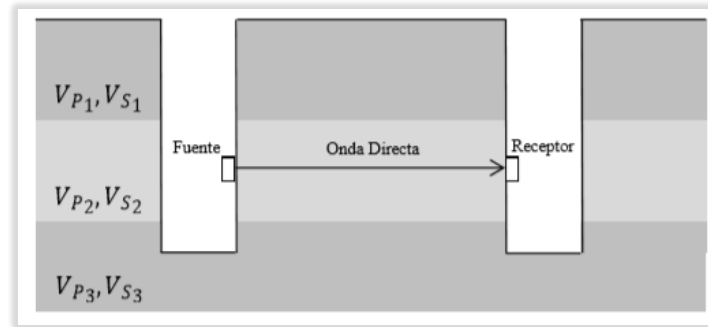


Figura 2.16 Esquema del ensayo Cross- Hole.

Fuente: Aplicación de métodos geofísicos basados en ondas superficiales para la caracterización sísmica de suelos, (Humire, 2013).

Al igual que el ensayo Down-Hole, los golpes se deben ser aplicados en sentidos opuestos, para así diferenciar las ondas de compresión de las ondas de corte. Esto se consigue golpeando en una pieza rígida en la pared de la perforación de abajo hacia arriba, para así poder registrar el desfase o polarización de las señales, precautelando que los golpes se realizan con la misma energía (Humire, 2013).

Para este ensayo se utilizan receptores triaxiales que registran las componentes tanto verticales como horizontales del desplazamiento. Debido a que el golpe es aplicado en forma vertical, la componente horizontal del desplazamiento permitirá registrar las velocidades de ondas de compresión, de la misma manera la componente vertical las velocidades de ondas de corte.

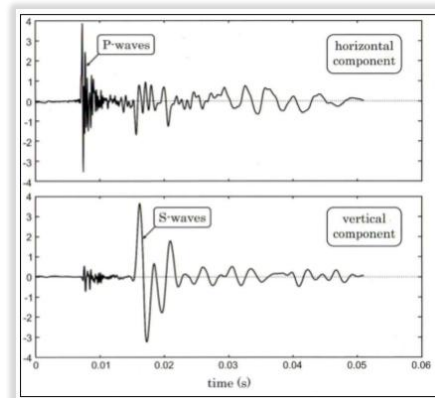


Figura 2.17 Señales registradas en un ensayo Cross-Hole.

Fuente: Waves and Vibrations in Soils, (Semblat & Pecker, 2009).

2.3.5.2 Métodos sísmicos no invasivos.

✚ Empleando ondas de cuerpo (V_s y V_p).

Dentro de los métodos sísmicos de la geofísica se encuentran los de reflexión y refracción sísmica. Métodos que permiten determinar las propiedades elásticas directamente utilizando ondas de cuerpo (V_s y V_p).

✚ Reflexión Sísmica.

El método de reflexión sísmica se ha utilizado muy poco en ingeniería geológica, su importancia se puede destacar en estructuras geológicas profundas como son proyectos de túneles, investigación de deslizamientos profundos, etc.

Este método consiste en medir los tiempos de llegada de las ondas sísmicas, creadas mediante una fuente de energía (martillo, dinamita, caída de peso etc.) a los sensores (geófonos) apropiadamente alineados según el perfil, tras ser reflejadas en las superficies de contacto con las diferentes geologías de las rocas, superficies heterogéneas, fallas etc.

Partiendo de estos tiempos de llegada de las sondas longitudinales a los geófonos y las velocidades de los diferentes horizontes, se podrán rehacer las trayectorias de las ondas primarias (ondas P) y definir la disposición estructural de los diferentes horizontes sísmicos a lo largo del perfil.

El método de la sísmica de reflexión presenta ventaja respecto a otros métodos geofísicos, ya que se pueden representar gráficamente múltiples horizontes con una única descarga de energía, sin perder precisión de manera significativa con la profundidad (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

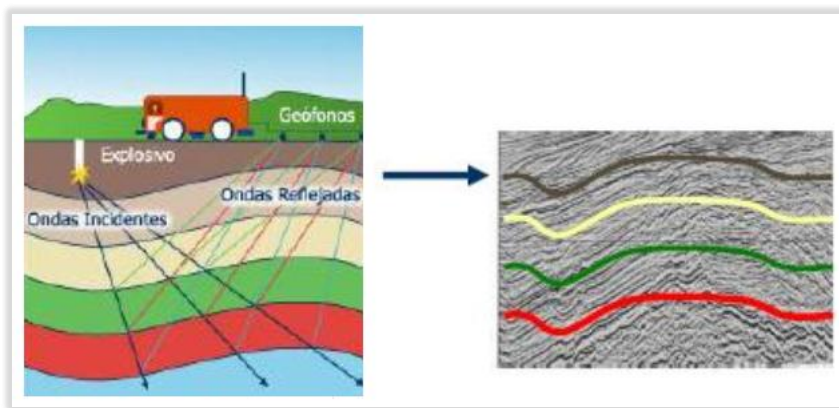


Figura 2.18 Sísmica de reflexión.

Fuente: Comprobación de los parámetros de adquisición sísmica, (Ramírez, 2012).

✚ Refracción Sísmica.

El método de la refracción sísmica es el más empleado, consiste en la elaboración de perfiles longitudinales instrumentados con sensores (geófonos), espaciados entre sí una distancia establecida regular. La energía liberada por la fuente de energía, normalmente mediante el golpeo con un martillo de 16 lbs, llega a los sensores creando una perturbación que se registra en el sismógrafo.

La longitud de los perfiles normalmente se sitúa entre 25 y 100 m, con una separación de los geófonos no mayor a 5 m, esto con el objetivo de asegurar el detalle de la investigación. Los puntos de golpeo como mínimo deberán ser tres, situados al inicio, mitad y final de cada perfil (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

Se mide el tiempo transcurrido entre el momento de golpeo y la llegada de la primera perturbación a los geófonos, la medida de los tiempos de llegada de las ondas a los geófonos proporciona el valor de la velocidad de propagación y espesor de los distintos materiales atravesados.

La velocidad de transmisión de las ondas es un buen indicador de las características geotécnicas de los materiales y es muy común tener tablas de velocidades de los diversos materiales, aunque se debe tener en cuenta la variabilidad de estos valores debido a la composición litológica, saturación de agua y porcentaje de poros.

A medida que los materiales sufren un grado de alteración la velocidad muchas de las veces disminuyen (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

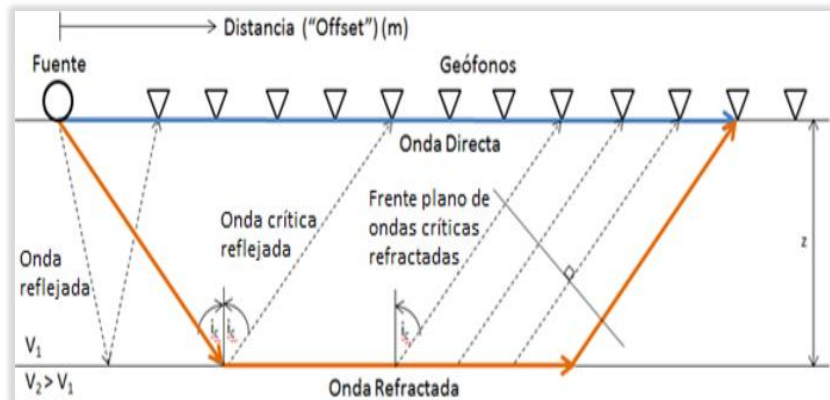


Figura 2.19 Sísmica de refracción.

Fuente: Aplicación de métodos geofísicos basados en ondas superficiales para la caracterización sísmica de suelos, (Humire, 2013).

✚ Métodos Sísmicos Empleando Ondas de Superficie (Rayleigh).

Los Métodos sísmicos que emplean ondas de superficie permiten determinar las propiedades del subsuelo a partir de los desplazamientos horizontales de las partículas. Estos métodos tienen la característica de naturaleza no destructiva, buena resolución a bajas profundidades y costos menores comparados con los métodos de ondas de cuerpo.

Estos métodos han ido creciendo gracias a desarrollo de arreglos multisensoriales, potentes algoritmos de inversión y el uso de medidas activas y pasivas y combinación de ambas (Jaimes, 2011).

Los métodos de ondas superficiales pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de fuente que produce la onda como activos, pasivos y una combinación de ambos.

✚ Métodos Activos.

En los métodos activos las ondas de Rayleigh son generadas a partir de una fuente transitoria con un rango de frecuencias de 4 a 100 Hz y además debe usarse un arreglo de receptores en una dimensión los mismos que son los encargados de monitorear la respuesta del suelo causado por la propagación de las ondas.

Estos métodos están limitados en su práctica al analizar suelos profundos debido a la dificultad de producir energía de baja frecuencia con fuentes razonables.

El método activo más común es el análisis multicanal de onda superficial (MASW).

✚ Métodos Pasivos.

Los métodos pasivos son usados como alternativa para superar la limitación de los métodos activos sus fuentes pasivas como el ruido cultural y los microtemores tienen más energía de baja frecuencia y, por lo tanto, penetran a mayores profundidades.

El rango de frecuencias medido durante las pruebas pasivas está en el orden de 1 a 10 Hz, Estos métodos utilizan como fuente pasiva el ruido urbano ambiental. (Jaimes, 2011).



Los métodos más utilizados son el ESAC (Correlación Espacial Extendida) y el método ReMi (Refracción de ruido ambiental) implementado como un nuevo método que combina las fuentes activas y pasivas.

2.3.6 Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, (MASW).

El método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, "MAWS" (Multichannel Analysis of Surface Waves), utiliza la dispersión de ondas Rayleigh que tienen una longitud de profundidad y onda de penetración diferentes a las ondas de cuerpo propagándose con una velocidad diferente; al evaluar las ondas superficiales se puede conseguir un perfil de velocidad cercano a la superficie. (Park, Miller, & Xia, 1999).

Las ondas de alta frecuencia tienen una longitud de onda corta, por lo que alcanzan poca profundidad mientras que las ondas de baja frecuencia tienen longitud de onda larga alcanzando así más profundidad. Es decir, a mayor profundidad de estudio, las frecuencias deberán ser más bajas.

Para el estudio de velocidades con el método MASW se han establecido que las frecuencias deben estar en un rango entre 5 Hz y 70 Hz frecuencias que permiten una velocidad de fase aparente experimental o curva de dispersión óptima con lo que comúnmente se alcanzan profundidades entre 10 y 30 m, dependiendo de las características internas del medio. (Correia, 2015)

El procedimiento para la toma de datos in-situ es similar a al procedimiento de la sísmica de refracción, es decir, tienen la misma configuración de electrodos, espaciamiento y aplicación de energía (shots). Con la única diferencia que los instrumentos (geófonos) utilizados en este método son para frecuencias más bajas, por lo alcanzarán mayores profundidades que los instrumentos utilizados en el método de la sísmica de refracción.

Por otro lado, el análisis de ondas Rayleigh permite registrar las velocidades de onda de corte (V_s). (Park, Miller, & Xia, 1999).

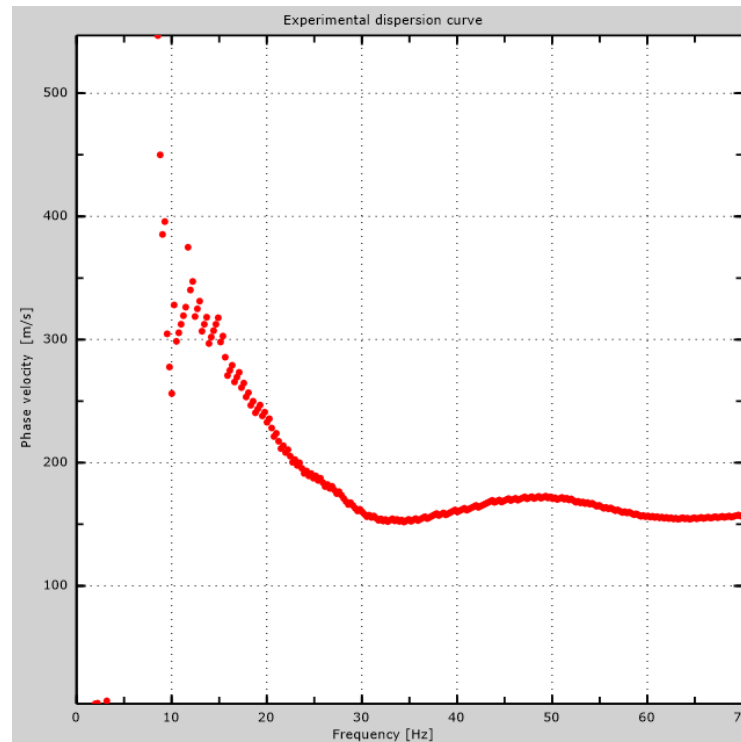


Figura 2.20 Curva de dispersión de velocidades, obtenida por el método MASW.
Fuente: Propia.

2.3.7 Método de Refracción de Ruido Ambiental, (ReMi).

El método de Refracción de ruido ambiental, "ReMi" (Refraction Microtremor), se basa en el análisis de inversión de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh para un sitio determinado, obtenida a partir de registros de ruido ambiental o microtremores. Dichos registros son grabados en fuente utilizando un equipo estándar de refracción sísmica y el producto final del método es un perfil unidimensional de las velocidades de onda corte (V_s) para el área en estudio. (Geostudios S.A., 2014)

La técnica sísmica de microtremores puede clasificarse según las fuentes del ruido: para frecuencias bajas (menor que 0.5 Hz) las fuentes pueden ser océanos, y condiciones meteorológicas a gran escala; para frecuencias alrededor de 1 Hz las fuentes pueden ser viento y condiciones meteorológicas locales, y para frecuencias mayores a 1 Hz las fuentes son esencialmente producto de la actividad humana como tráfico, motores, etc. (Arizaga & Ulloa, 2018).

Para el estudio del método ReMi, se ha establecido que las frecuencias entre 5 Hz y 15 Hz frecuencias que permiten una velocidad de fase aparente experimental o curva de dispersión óptima y generalmente se alcanzan profundidades de hasta 50m, dependiendo de las características del material de sitio (Humire, 2013).

El procedimiento de toma de datos in-situ es la misma que la de la MASW, es decir poseen la misma configuración de electrodos y espaciamiento; debido a que este método es pasivo, no se necesita la aplicación de "shots". Los tiempos de registro recomendados son de 15 a 30 segundos, los cuales son calibrados en el equipo que registra automáticamente.

Mediante los registros de las ondas Rayleigh las cuales se determinan mediante un análisis espectral, se establece la curva de dispersión de las ondas. Esta técnica permite

mejorar la definición en profundidad de la distribución de velocidades de corte (V_s), mediante un resultado visual, el cual se ajusta según la definición de colores. (Arízaga & Ulloa, 2018).

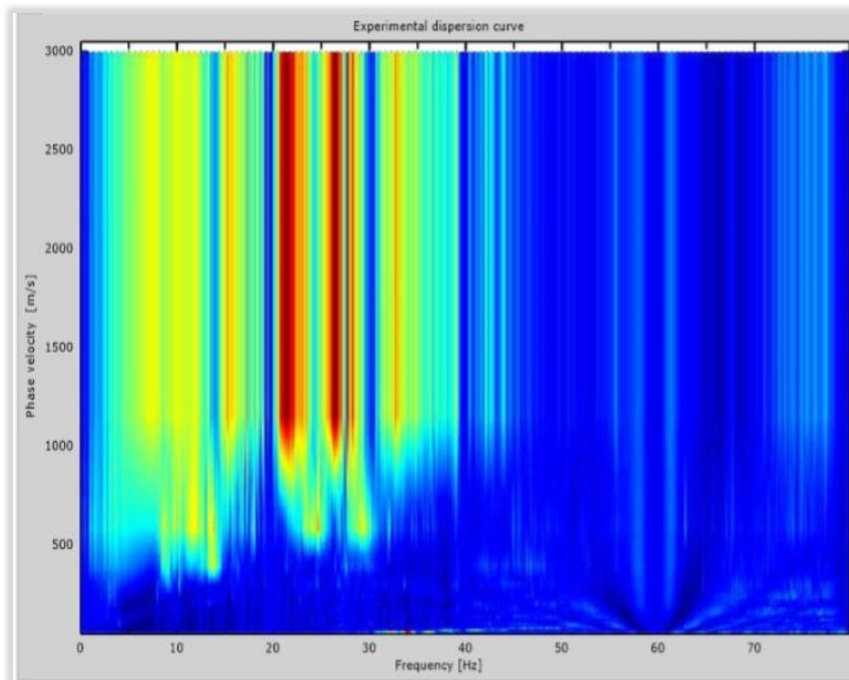


Figura 2.21 Curva de dispersión de velocidades, obtenida por el método ReMi.
Fuente: Propia.

2.3.8 Método de Autocorrelación Espacial Extendida, (ESAc).

El método de autocorrelación espacial extendida, “ESAc” (Spatial Extended Autocorrelation), tiene como principal característica solucionar la incógnita de la geometría circular, que en la práctica provoca problemas de ejecución para la medición de datos en el terreno, debido a la falta de espacio confeccionando matrices de diseño de forma hexagonal, semicircular, circular, en forma de cruz, T, L.

Este método permite investigar las longitudes de onda en un rango de 10 a 20 veces la máxima distancia entre sensores del arreglo, siendo por lo tanto más confiables en frecuencias bajas que otros métodos que utilizan la misma configuración de la matriz. Este dato implica que el espacio entre los sensores debe ser adecuado para alcanzar esa longitud característica de la matriz de sensores. (San Martín, 2015)

El conocimiento del perfil de velocidades y de que el sitio presenta estratos horizontales en profundidad, permite generar un modelo teórico de las velocidades de las ondas Rayleigh en función de la frecuencia, considerando su modo fundamental y modos superiores. Estos modelos teóricos son formulados a partir de las ecuaciones de ondas superficiales en medios estratificados horizontalmente, por lo que es claro que esto impone una limitación que consiste en que los estratos bajo el área del arreglo deben ser horizontales y no presentar heterogeneidades laterales (Errazuriz, 2012)

Adicionalmente a esto, es necesario saber que debe realizarse una configuración del arreglo de sensores, para obtener la medición correcta de las frecuencias. Cabe destacar

también, que, entre más tiempo de la medición, con más certeza se cumple el supuesto de ondas generadas por fuentes distribuidas aleatoriamente.

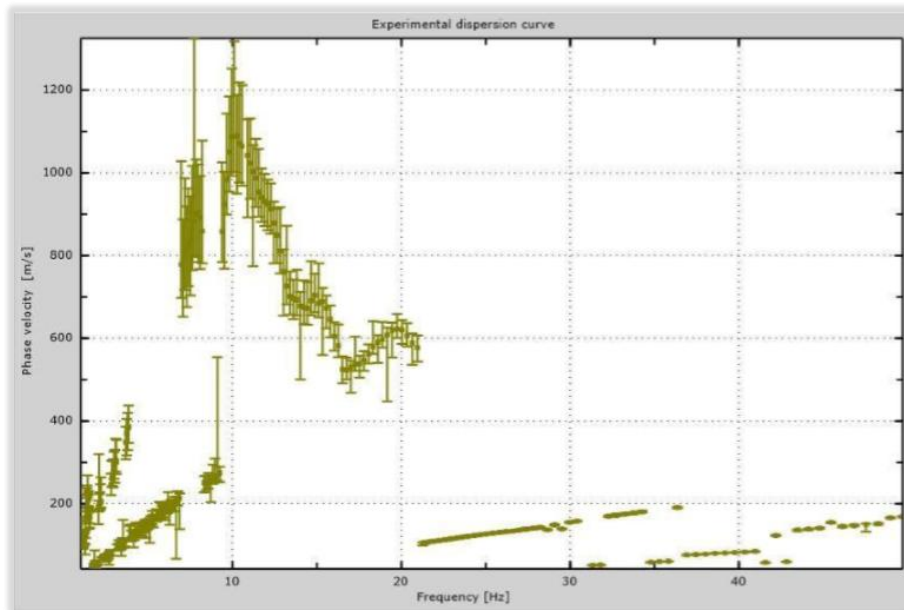


Figura 2.22 Curva de dispersión de velocidades, obtenida por el método ESAC.
Fuente: Propia.

2.3.9 Combinación de las técnicas.

La combinación de las curvas de dispersión obtenidas con los distintos métodos aumenta el ancho de banda de las frecuencias exploradas ampliando la información requerida el estudio de las características geotécnicas del suelo.

Con el software MASW nos permite combinar las curvas de dispersión de los métodos MASW, ReMi y ESAC, obteniendo como resultado una única curva de dispersión está con un mayor rango de frecuencias mucho más definida y confiable.

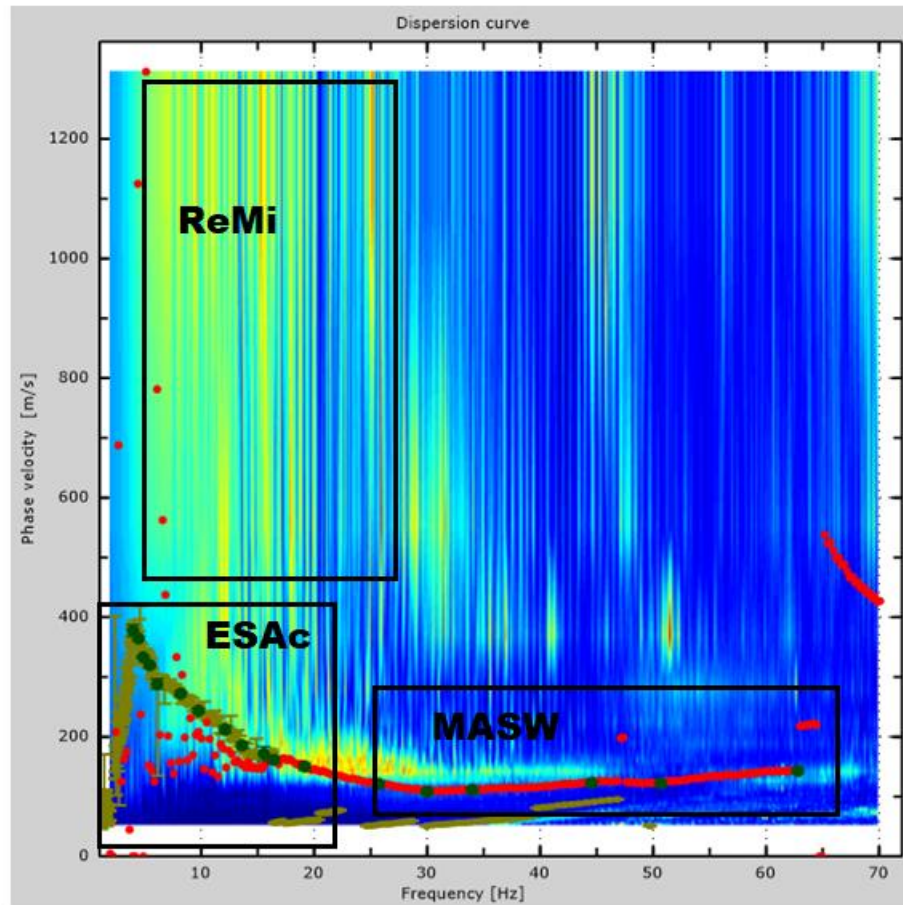


Figura 2.23 Combinación de las curvas de dispersión MASW, ReMi, ESAC.
Fuente: Propia

2.4 Investigaciones sobre correlaciones entre parámetros geotécnicos y velocidades de onda de corte.

Actualmente se cuenta con diversas correlaciones empíricas entre los parámetros geotécnicos (peso específico, ángulo de fricción interna, cohesión y módulo elástico), obtenidos por ensayos de laboratorio y por los obtenidos por ensayos geofísicos (V_p y V_s), cada una de estas correlaciones presentan condiciones dependientes al tipo de suelos estudiados entre otras propiedades.

Las correlaciones expuestas a continuación serán utilizadas como referencia y se contrastarán con las correlaciones encontradas para el tipo de suelo estudiado en esta investigación.

2.4.1 Correlaciones entre peso específico y velocidad de onda de corte.

(Kaptan, 2014), menciona que los valores de peso específico pueden estimarse utilizando la siguiente expresión empírica:

$$\gamma_s = 4.3 \cdot V_s^{0.25}$$

Según lo propuesto por Tezcan en el 2006 y Keceli (2009) la expresión encontrada fue a través de varios estudios, que incluyen datos de pozo, pruebas de laboratorio y de prospección geofísica. Esta expresión se recomienda especialmente para suelos granulares, pero no se hace ningún comentario sobre la corrección a seguirse para el análisis de suelos finos.

De igual manera, (Larriva & Muñoz, 2018) en su estudio experimental aplicando el método de sísmica de refracción, con el propósito de encontrar una relación entre las velocidades de onda y las propiedades físicas de un suelo limo-arenoso, efectuaron ensayos de Proctor Modificado donde se obtuvo el siguiente modelo de regresión lineal:

$$\gamma_s = 1.854 \cdot V_s + 1125.4$$

2.4.2 Correlaciones entre ángulo de fricción y cohesión a partir de la relación entre velocidades de onda V_p/V_s .

Las correlaciones buscadas en este estudio serán las que describan el comportamiento mecánico de los diferentes tipos de suelos asociados a la rigidez del material que este compuesto ya que el mismo puede asociarse por medio de la razón V_p/V_s .

(I.G. Mindel, 2002) citado en (Naranjo & Dranichnikov, 2012), propone un modelo de regresión lineal en esfuerzos efectivos entre el ángulo de fricción y cohesión a partir de la relación de velocidades de onda para limos del sur de Ucrania, encontrando las siguientes correlaciones:

$$\begin{aligned}\varphi' &= 34.776 - 3.814 \cdot \left(\frac{V_p}{V_s}\right) \\ c' &= 0.908 - 0.168 \cdot \left(\frac{V_p}{V_s}\right)\end{aligned}$$

Por otro lado (Álvarez, 2003) en su investigación donde se establece la relación entre la V_p/V_s y el ángulo de fricción interna únicamente para suelos del tipo MH del valle de Querétaro donde se propone un modelo de regresión potencial obtenidos a partir de ensayos triaxiales, el cual se describe a continuación:

$$\varphi = 50.866 \cdot \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^{-1.35}$$

La correlación antes descrita fue corroborada por (Aristizábal, 2017), en la obtención de propiedades mecánicas a partir de la relación V_p/V_s para depósitos superficiales de ceniza volcánica en Manizales Colombia. Además, el autor propone, una correlación entre la cohesión obtenida de ensayos de corte directo UU y la relación de velocidades de onda, como se describe a continuación:

$$C = 1.1395 \cdot \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^{-2.383}$$

Por último, la empresa Geo&Geo a lo largo de su trayectoria ha ido recopilando información en una base de datos de estudios de deslizamientos de taludes, los mismos que han sido realizados en distintos sitios de las provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago de una manera empírica a partir de los valores de onda obtenidos en los ensayos de prospección geofísica y ensayos triaxiales UU para suelos limosos y arcillas en función de las velocidades de onda la mismas se describen a continuación.

$$\varphi = 16522 - 3.0234 \cdot \left(\frac{Vp}{Vs}\right)$$
$$C = 0.8847 - 0.1787 \cdot \left(\frac{Vp}{Vs}\right)$$

2.4.3 Correlaciones entre módulo de Young y la velocidad de onda de corte.

(I.G.Mindel, 2002), en su investigación sobre los parámetros geotécnicos a partir de las velocidades de onda propone dos modelos de regresión uno potencial y otro lineal para una valoración rápida del módulo de deformación en suelos arenosos con humedad natural del sur de Ucrania descritos a continuación:

- ❖ Modelo de regresión potencial:

$$E = 2.261 \cdot V_s^2 + 42$$

- ❖ Modelo de regresión lineal:

$$E = 1.5175 \cdot V_s - 189$$

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Ubicación.

Las áreas de interés se encuentran al sur de la República del Ecuador, en la provincia del Azuay, cantón Cuenca. Figura 3.1.

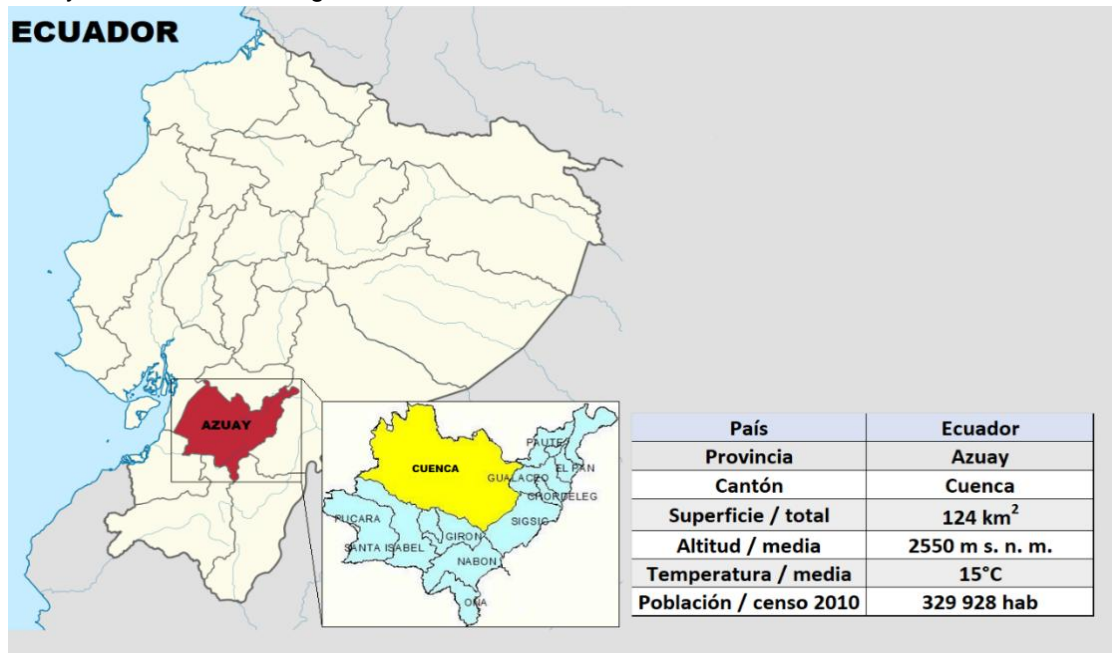


Figura 3.1 Ubicación del cantón Cuenca.

Fuente: Instituto Geográfico Militar 2010 y elaboración propia.

En total se realizaron 4 líneas de estudio Figura 3.2, en los sectores de Gapal, Miraflores, Ricaurte y Turi, sectores con características geológicas similares donde se prevé un crecimiento poblacional importante para la ciudad de Cuenca.

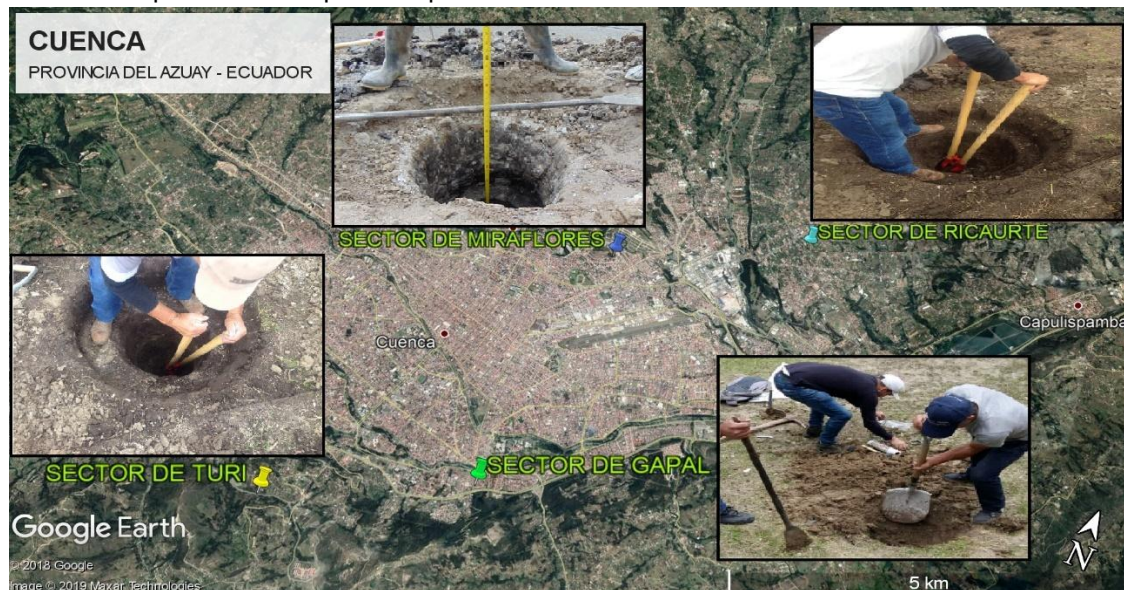


Figura 3.2 Ubicación de los diferentes sectores de estudio.

Fuente: Google Earth 2018.



El trabajo se realiza con el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM WGS84.

3.2 Exploración de campo.

De acuerdo con la exploración de campo, se identifica material correspondiente a la formación Mangán. Según lo establecido en el Mapa Geológico Cuenca-Azogues, hoja 73, se determina que la zona de estudio se encuentra sobre la Formación Mangán.

3.3 Formación Mangán.

La Formación Mangán es una de las más importantes secuencias y la primera de la serie más joven de la cuenca sedimentaria de Cuenca; dataciones recientes por fisión indican que se formó al inicio del Mioceno-Tardío, encontrándose depósitos continentales deltaicos en un sistema fluvial meandriforme con planicies de inundación.

La Formación Mangán se encuentra en discordancia con los depósitos antiguos de la cuenca sedimentaria, tal es el caso del contacto con la Formación Azogues, la misma que sufrió grandes deformaciones compresivas hace más de 9-8 millones de años, afectando así a la formación Mangán; la cual presenta ahora una ligera deformación y fallamiento.

Existen afloramientos de la formación sectores como Deleg, Gapal, Turi, Ricaurte, Miraflores alrededor de la ciudad de Cuenca.

Esta formación se encuentra conformado mayormente por lutitas, limolitas y areniscas finas granulares, en la parte inferior son de color claro, en la parte superior se ve un afloramiento de areniscas tobáceas gruesas de color café y hacia arriba estas se hacen conglomeráticas y en la parte media hay la presencia de lutitas asociadas a vetas de carbón.

La formación Mangán tiene una alternancia de estratos entre fino-granular y duro-blando que favorece el desarrollo de superficies de debilidad; especialmente si los materiales finos se encuentran saturados, pues esto disminuye la resistencia al corte hasta la rotura.

Los materiales competentes se encuentran medianamente fracturados con juntas cerradas a abiertas con bordes oxidados, blandos y rugosos; los materiales incompetentes se fragmentan con juntas abiertas, las mismas que tienen bordes blandos y están rellenas con arcilla, (Vélez, 2012).

Es de gran importancia la caracterización y estudio de la Formación Mangán ya que la susceptibilidad a terrenos inestables es alta pues los estratos incompetentes presentes en la formación con altas presiones de poros, sobrecargas y en caso de taludes tener un corte inadecuado, pueden verse involucrados en problemas inestabilidad hasta grandes deslizamientos.

En la Tabla 3.1, se detallan las características (sector, ubicación, coordenadas, geología y litología) de las diferentes áreas de interés donde se extendieron las 4 líneas de estudio.

Código	Sector	Ubicación	Coordenadas		Geología	Litología
			Este	Norte		
Línea 1	Gapal	Ave. Gapal y Alfredo Espinosa Tamayo	723084	9677378	Formación Mangán	Presencia de limos, lutitas, arenas y arcillas de color gris oscuro
Línea 2	Miraflores	Calle Rosalino Quintero	723313	9681512	Formación Mangán	Presencia de limos, lutitas, arenas y arcillas de color de color marrón claro
Línea 3	Ricaurte	Calle del Subcentro de Salud	726580	9683791	Formación Mangán	Presencia de limos, lutitas, arenas y arcillas de color gris claro
Línea 4	Turi	Camino Nuevo a Turi	720537	9676070	Formación Mangán	Presencia de limos, lutitas, arenas y arcillas de color melocoton

Tabla 3.1 Sector, ubicación, coordenadas, geología y litología de los diferentes sectores de estudio.
Fuente: Propia.

3.4 Extracción de las muestras.

Corte Directo.

La extracción de las muestras para los ensayos de corte directo se las realizó mediante los anillos de corte.

Los anillos de corte consisten en moldes cuadrados normalizados de 6cm de ancho por 6cm de largo y 2cm de profundidad.

Con la ayuda de otro molde se introdujo con cuidado el anillo de corte en el suelo, se cortó el excedente y se procedió a sellar herméticamente las muestras de suelo en los anillos con plástico, por lo tanto, se considera mínima la perturbación ocasionada por la extracción de las muestras.

A continuación, se procedió a trasladar de inmediato las muestras en un “cooler” adecuado para el traslado hasta el laboratorio de la Universidad de Cuenca donde fueron ensayadas por lo tanto se consideró que no hubo perturbación producida por la extracción y traslado de las muestras.

Compresión Triaxial.

La extracción de las muestras para los ensayos de compresión triaxial se las realizó mediante el muestreador de cuchara partida estándar.

El muestreador de cuchara partida estándar consiste en un tubo de acero de pared gruesa, cortado longitudinalmente en dos mitades, que para el muestreo van unidas por piezas de los mismos diámetros, roscadas en sus extremos que hacen que el montaje/desmontaje sea mucho más fácil y rápido.



El tubo cortado forma el tramo de mayor longitud del muestreador, por lo que se denomina cuerpo, mientras que la pieza que va roscada en su extremo inferior es conocida como boquilla cortante, esta boquilla cortante consiste en un corto tramo de tubo con la pared chaflanada en su extremo para facilitar la penetración de la cuchara partida en el terreno.

Por otro lado, la pieza roscada del extremo superior forma un acople entre la cuchara partida y las barras de extensión, por lo que lleva una rosca hembra del mismo diámetro que la unión de las barras.

Para obtener las muestras mediante la cuchara partida se rosca la toma muestras en la parte inferior del cuerpo, luego se procede a colocar el muestreador en los pozos de exploración previamente preparados para cada lugar. A continuación, se avanza dentro del suelo en toda su longitud con la ayuda de un martillo para luego extraer del cuerpo la muestra en su interior.

El hecho de ser el cuerpo un tubo partido permite separar sus mitades y extraer la muestra una vez que se hayan desenroscado de sus extremos la boquilla cortante y el acople.

Una vez obtenida las muestras en el cuerpo se procedió a emplastificar y sellar herméticamente las muestras trasladándolas de inmediato en un “cooler” debidamente adecuado hasta el laboratorio de la Universidad de Cuenca donde fueron ensayadas por lo tanto se consideró que la perturbación fue mínima en la extracción y traslado de las muestras.

Si bien el muestreador de cuchara partida es bastante práctico para la obtención de muestras, tiene cierto grado de alteración en la estructura geotécnica del suelo, esto debido al espesor de la pared, por lo tanto, se podría esperar que los parámetros obtenidos en los ensayos de compresión triaxial varíen con respecto a los valores reales del terreno.

Estas variaciones pueden influir en la obtención de los resultados de esta investigación.

Debido a limitaciones en la instrumentación y equipos para ensayos in-situ, no fue posible ejecutar pruebas que permitan conocer las propiedades fundamentales de los suelos en los sitios de extracción de las muestras. Sin embargo, se realizaron ensayos para verificar la consistencia en las propiedades índice y en la gradación granulométrica de los materiales.

3.5 Determinación de las Propiedades físicas y mecánicas del suelo.

Con el propósito de disponer de un conocimiento más amplio de las características y comportamiento geotécnico de los suelos que constituyen las áreas de estudio, se tomaron muestras alteradas e inalteradas y se realizaron ensayos de laboratorio que permiten caracterizar a los depósitos de suelos y determinar los parámetros geotécnicos, las cuales se resumen en la Tabla 3.2.



Código	Sector	Ensayos Convencionales			
		Nº de muestras		Nº de ensayos	
		Corte Directo	Compresión Triaxial	Corte Directo	Compresión Triaxial
Línea 1	Gapal	9	3	2	1
Línea 2	Miraflores	9	3	2	1
Línea 3	Ricaurte	9	3	2	1
Línea 4	Turi	9	3	2	1
Total de Ensayos Realizados		36	12	8	4

*Tabla 3.2 Resumen de la cantidad de ensayos convencionales realizados.
Fuente: Propia.*

De igual manera, para la determinación de ensayos geofísicos (prospección geofísica), se procedió al levantamiento de información in-situ de cuatro líneas (una por cada lugar de estudio), donde se realizaron diferentes ensayos complementarios (ReMi, ESAC) para una mejor interpretación de los resultados, en la Tabla 3.3, se muestra el número de ensayos realizados.

Para los ensayos MASW y de sísmica de refracción se utilizó la misma configuración por medio de la excitación del suelo por medio de impactos de martillo (shots).

Para investigar a mayor profundidad, se complementó el estudio con el registro de sísmica pasiva mediante la técnica ReMi (Refraction Microtremor), obtenidos mediante el registro del ruido ambiental.

De forma complementaria y con el objeto de lograr mayor profundidad en la investigación, se levantaron perfiles complementarios en configuración "L", para ser utilizada con la técnica ESAC (autocorrelación espacial extendida).

Código	Sector	Ensayos Geofísicos			
		Ensayos Realizados			
		MASW	ReMi	ESAc	Sísmica de Refracción
Línea 1	Gapal	1	1	1	1
Línea 2	Miraflores	1	1	1	1
Línea 3	Ricaurte	1	1	1	1
Línea 4	Turi	1	1	1	1
Total de Ensayos Realizados		4	4	4	4

Tabla 3.3 Resumen de la cantidad de ensayos geofísicos realizados.
Fuente: Propia.

3.6 Ensayos de laboratorio.

Con el propósito de correlacionar la información obtenida mediante investigación geofísica a fin de disponer de las características geotécnicas del material de la zona de estudio, se realizaron 4 calicatas (C1, C2, C3 y C4) (pozos). En estos pozos se tomaron muestras alteradas e inalteradas luego de alcanzar la profundidad de 2m, ayudados de los diferentes instrumentos normalizados correspondientes a cada ensayo empleando especial cuidado al momento de introducir, extraer y trasladar las muestras al laboratorio de la Universidad de Cuenca.

3.6.1 Humedad natural.

El procedimiento seguido para la determinación de la humedad natural es el detallado en la Norma (ASTM D-2216, 1999), a continuación, se detallará de manera breve el procedimiento seguido:

1. Se tomo una muestra de suelo en campo con un recipiente antes pesado, una vez que se obtuvo la muestra se procedió a pesar nuevamente el recipiente esta vez ya con la muestra de suelo para obtener su peso húmedo (peso del recipiente más la muestra de suelo).
2. A continuación, se procedió a secar la muestra en un horno a una temperatura entre 100 y 110°C, por 24 horas y se volvió a pesar, obteniendo de esta manera el peso seco de la muestra sumada al peso del recipiente.
3. Una vez que se conocen estos dos resultados, se aplicó la siguiente expresión:

$$\omega = \left(\frac{W_w}{W_s} \right) * 100(\%)$$

Donde:

$$\begin{aligned}\omega &= \text{humedad, expresada en \%} \\ W_w &= \text{peso del agua en la masa de suelo} \\ W_s &= \text{peso de las partículas sólidas}\end{aligned}$$

3.6.2 Granulometría de los suelos.

El procedimiento seguido para el análisis granulométrico es el detallado en la Norma (ASTM D-422, 1999). A continuación, se detallará de manera breve el procedimiento seguido:

1. Una vez que la muestra ha sido disgregada y determinada su humedad, se tomaron 1000 gr para el lavado sobre el tamiz N° 200 (0,074mm).
2. Después se colocaron las mallas en orden descendente de diámetro en forma vertical donde posteriormente la muestra fue vaciada por la parte superior, para luego iniciar con el proceso de cribado, Figura 3.3.
3. Una vez concluido el proceso se verificó cuánto material quedó retenido en cada una de las mallas y se pesaron.
4. Con la obtención de cada uno de los pesos, se calcularon los porcentajes retenidos y el porcentaje que pasante de cada malla.



Figura 3.3 Proceso de cribado.
Fuente: Propia.

3.6.3 Límites de Atterberg.

El procedimiento seguido para el análisis de los límites de Atterberg, es el detallado en la Norma (ASTM D-4318, 1999), para realizar estos ensayos se utiliza el material pasante del tamiz N° 40, Figura 3.4. A continuación, se detallará de manera breve el procedimiento seguido:



Figura 3.4 Material pasante por el tamiz #40.
Fuente: Propia.

3.6.3.1 Limite líquido, (LL).

1. Se utilizó 100gr de material seco y se mezcló con agua destilada hasta que el mismo presento una consistencia uniforme.
2. Se colocó una porción de la mezcla obtenida en la cuchara de Casagrande, Figura 3.5. Con el acanalador se procedió a ranurar por la mitad de la pasta obteniendo dos mitades.
3. Una vez ranurado se procedió a girar la manivela de la cuchara de Casagrande dando golpes a razón de 2 golpes por segundo, y contar el número de estos hasta que la parte inferior de la ranura formada en la muestra se juntó en 1.27cm.
4. Cuando se ha obtenido el número consistente de golpes comprendidos entre 15 y 35, se tomó de la zona en donde se juntó el suelo. Se recolectó aproximadamente 5gr de suelo que se lo puso a secar para determinar el contenido de humedad.
5. Los pasos 2 al 5 se repitieron con diferentes contenidos de agua en la muestra, obteniendo así los 4 valores de número de golpes con su respectiva humedad.



Figura 3.5 Procedimiento realizado para obtener el límite líquido.
Fuente: Propia

6. Con los datos obtenidos en este ensayo se procedió a dibujar la curva de fluidez que es el contenido de humedad versus el número de golpes donde finalmente se tomó el valor correspondiente al contenido de humedad presente a los 25 golpes.

3.6.3.2 Limite plástico, (LP).

1. Se mezcló aproximadamente 15gr de suelo húmedo; con la ayuda de una placa de vidrio se rodó la masa de suelo hasta alcanzar un cilindro con diámetro aproximado a 3mm.
2. Se repitió una y otra vez este paso hasta que el suelo presentó grietas, pues esto indicaba que el suelo llegó al límite señalado.
3. Luego de esto se llevaron los cilindros al horno por 24 horas y se determinaron sus humedades respectivas para cada muestra.
4. Se repitieron los pasos 1 y 2 hasta obtener 3 valores para cada área de estudio, Figura 3.6.



Figura 3.6 Procedimiento realizado para obtener el límite plástico.
Fuente: Propia.

3.6.3.3 Índice de plasticidad, (IP).

El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico obteniéndose así los valores para cada área en estudio.

$$IP = LL - LP$$

Donde:

$$\begin{aligned} IP &= \text{Índice de plasticidad} \\ LL &= \text{Límite líquido expresado en \%} \\ LP &= \text{Límite plástico expresado en \%} \end{aligned}$$

3.6.4 Clasificación del suelo.

Una vez recopilados los resultados obtenidos a través de los ensayos descritos anteriormente, se realizó la clasificación del suelo siguiendo los criterios dados por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

La determinación de la clasificación se presenta en el Anexo 4.1.

3.6.5 Ensayo de corte directo.

Los ensayos de corte directo con muestras no consolidadas no drenada (UU), fueron realizados en base a la Norma (ASTM-D-3086, 1999) y se utilizó para ello la máquina de corte provista en el Laboratorio de suelos de la Universidad de Cuenca, la cual se presenta en la Figura 3.7.



Figura 3.7 Máquina de corte directo perteneciente a la Universidad de Cuenca.
Fuente: Propia.

✚ Preparación de las muestras.

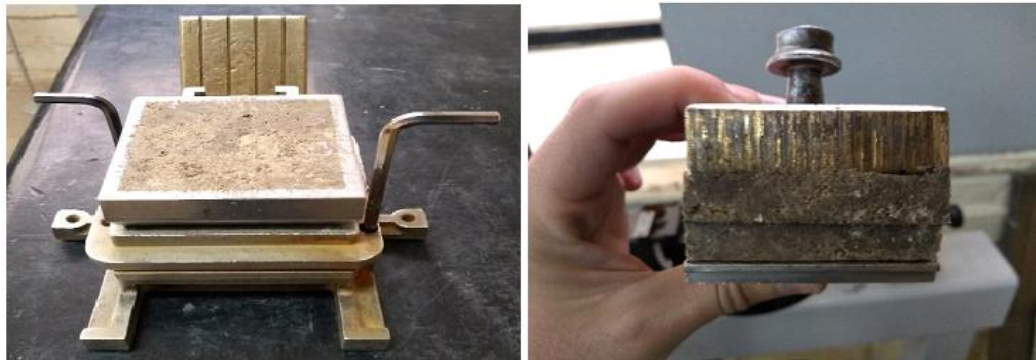
1. Este ensayo requirió de 6 muestras inalteradas, para cada lugar de estudio, las mismas que se obtuvieron en campo, por medio de los anillos de corte (moldes cuadrados 6x6x2cm).
2. Con la ayuda de otro molde se introdujo con cuidado el anillo de corte en el suelo, se cortó el excedente, protegiendo la muestra para evitar pérdidas de humedad. Posteriormente se las procedió a trasladar al laboratorio.
3. En el laboratorio se enrazaron las caras del molde, obteniéndose especímenes (6 especímenes por cada lugar) perfectamente cuadrados.
4. Antes de ensayar cada muestra se procedió a pesar, medir las dimensiones y obtener el peso específico de cada muestra, Figura 3.8.



Figura 3.8 Especímenes para los ensayos de corte directo.
Fuente: Propia.

Procedimiento del ensayo.

1. Primero se procedió a introducir la muestra en la caja de corte, y sobre ésta se colocó una placa de carga normal encargada de transmitir la carga a todo el espécimen.
2. Se procedió a ensayar cada uno de las muestras con diferentes combinaciones de esfuerzo normal sobre plano de falla ($0.28 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$; $0.56 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$; $1.11 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ y $2.22 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$) ,al mismo tiempo que se aplicaba una fuerza tangencial a una velocidad de deformación constante en el equipo de corte directo de 0.75 mm/min .
3. Una vez iniciado el ensayo se procedió a tomar las lecturas de carga y deformación cada 0.1mm hasta que la muestra falló u ocurrieron cuatro lecturas seguidas de igual magnitud en el dial de carga.
4. Con los datos obtenidos se procedió a dibujar las rectas de envolventes de falla de donde se obtuvieron los parámetros de cohesión y ángulo de fricción correspondiente a cada lugar de estudio, Figura 3.9.



*Figura 3.9 Colocación y corte de los especímenes ensayados por corte directo.
Fuente: Propia.*

3.6.6 Ensayo de compresión triaxial.

Los ensayos de compresión triaxial con muestras no consolidadas no drenada (UU), fueron realizados en base a la Norma (ASTM D-2850, 1999) y se utilizó la cámara triaxial provista en el Laboratorio de la Universidad de Cuenca, la cual se presenta en la Figura 3.10.



Figura 3.10 Cámara de compresión triaxial, Universidad de Cuenca.
Fuente: Propia.

✚ Preparación de la muestra.

1. Este ensayo requirió de 4 muestras inalteradas para cada lugar de estudio, las mismas que se obtuvieron en campo por medio de la cuchara partida estándar.
2. Una vez extraídas las muestras cuidadosamente en campo se procedió a protegerlas para evitar pérdidas de humedad y se las trasladaron al laboratorio.
3. En el laboratorio cuidadosamente se sacaron las muestras del cuerpo y se procedió a entallar las mismas sin dar demasiada manipulación y pérdida de humedad, Figura 3.11.
4. Las muestras fueron pesadas antes y después del ensayo las mismas eran cilíndricas con un promedio de la razón altura-diámetro entre 2 y 3.
5. Las muestras fueron revestidas con una membrana de látex que se sujetaron con dos bandas de caucho (la membrana evita que el agua en la cámara entre en contacto con las muestras).



Figura 3.11 Obtención de las muestras para los ensayos de compresión triaxial.
Fuente: Propia.

✚ Procedimiento del ensayo.

1. Las muestras se colocaron dentro de la cámara triaxial y esta a su vez en el dispositivo de carga donde se procedió a llenar la cámara con agua.
2. Luego de configurar la presión de carga correspondientes a $0.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$; $1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ y $2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ para cada conjunto de muestras respectivamente se dio inicio al ensayo.
3. Una vez iniciado el ensayo se procedió a tomar las lecturas de carga y deformación cada 0.2mm hasta que la muestra fallo o la deformación vertical era igual al 20% de la altura de cada muestra, Figura 3.12.
4. Con los datos obtenidos se procedió a dibujar las gráficas de envolventes de falla de donde se obtuvieron los parámetros de cohesión y ángulo de fricción correspondiente a cada lugar de estudio.



Figura 3.12 Colocación y falla de las muestras ensayadas en la cámara triaxial.
Fuente: Propia.

3.7 Prospección geofísica.

Con el propósito de conocer las características del subsuelo y proporcionar los parámetros geotécnicos para el diseño de la cimentación, se procede a levantar información geofísica mediante Sísmica de Refracción y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales MASW.

Los ensayos de prospección geofísica se los realizaron con el apoyo logístico de la empresa GEO & GEO, conjuntamente con quienes se realizó la toma de datos in-situ en cada uno de los lugares correspondientes a esta investigación.

3.7.1 Equipos utilizados.

Para el desarrollo de las actividades de prospección geofísica y su procesamiento, utilizamos los siguientes equipos Figura 3.13:

- ✚ Sismógrafo PASI modelo 16SG24-N (Equipo combinado – sismógrafo y tomógrafo eléctrico).
- ✚ Accesorios para sísmica:

- ❖ 2 cables sísmicos de 130 m, 12 canales.
- ❖ 23 geófonos verticales de 10 Hz.

✚ Equipo complementario:

- ❖ Vehículo Mahindra 4x4.
- ❖ GPS Garmin GPSmap 62 CSx.
- ❖ Herramientas varias.



Figura 3.13 Equipos utilizados en los ensayos de prospección geofísica.
Fuente: Propia.

3.7.2 Levantamiento de información geofísica en campo.

El levantamiento de información geofísica en campo se realizó los días 18 y 19 de junio de 2019.

✚ **Sísmica de refracción.**

El levantamiento mediante Sísmica de refracción se hizo mediante el tendido de una línea LS1, LS2, LS3, LS4 (una para área de estudio) con una longitud de 21m, se colocaron 23 geófonos ubicados a un metro (1.00m) cada uno, Figura 3.14 y se realizaron 7 Shots (impactos) con martillo. Previo al retiro de los equipos, se procedió a la revisión de consistencia de los datos, con el propósito que estos proporcionen la información necesaria y correcta para el siguiente proceso de interpretación.



Figura 3.14 Colocación de los geófonos y registro de la línea sísmica LM1.
Fuente: Propia.

✚ Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW).

Para el registro de datos mediante la línea MASW, se procedió al levantamiento de información de cuatro líneas MASW (LM1, LM2, LM3 y LM4), con una longitud de 21m cada una, se instalaron 23 geófonos colocados de forma lineal ubicados a 1.00 y 1.50 metros dependiendo del espacio encontrado en cada área de estudio, posterior a ello se realizaron 7 “shots” (impacto del combo de 16 lbs sobre la placa de acero), distribuidos estratégicamente a lo largo de la línea con la siguiente configuración; a los 12 y 0.5m en los extremos de la línea, entre los geófonos 6 y 7, 12 y 13 y 18 y 19, Figura 3.15.

La configuración considerada como óptima para la obtención de señales superficiales a detalle para uno de los ensayos tanto de sísmica de refracción y análisis multicanal de ondas superficiales, fue consultada, sugerida y configurada bajo la experiencia y supervisión de la empresa Geo&Geo.

La empresa Geo&Geo a lo largo de su trayectoria ha encontrado que las señales de onda se ven distorsionadas si se toman rangos de separación de los geófonos mayores a 1.5 metros debido al ruido presente en cada uno de los lugares donde se realizan los ensayos.



Figura 3.15 Tendido, cableado y registro de datos de la línea MASW.
Fuente: Propia

Debido a la sensibilidad del equipo ante el ruido generado por fuentes ambientales y dispersiones de frecuencia de onda generadas que afectan la señal, se repitió este proceso un total de 7 veces en los extremos y 5 entre geófonos, Figura 3.16.

Para investigar a mayor profundidad, se complementó el estudio con el registro de sísmica pasiva mediante la técnica ReMi (Refraction Microtremor), obtenidos mediante el registro del ruido ambiental.



Figura 3.16 Tendido, cableado y registro de datos de la línea REMI.
Fuente: Propia

De forma complementaria y con el objeto de lograr mayor profundidad en la investigación, se levantaron perfiles complementarios en configuración “L”, para ser utilizada con la técnica ESAC (autocorrelación espacial extendida), Figura 3.17.



Figura 3.17 Tendido, cableado y registro de datos de la línea ESAC.
Fuente: Propia

Previo al retiro de los equipos, se procedió a la revisión de consistencia de los datos, con el propósito de que éstos proporcionen la información necesaria y correcta para el procesamiento, interpretación y análisis.

3.7.3 Procesamiento de información e interpretación.

Sísmica de refracción.

En base a la información levantada en el campo, se procedió en primer lugar al ingreso de los datos en el software WINSISM, desarrollado por la empresa Suiza Geosoft. Este

software cuenta con módulos para conversión de datos de los registros de los sismogramas generados por la lectura de los equipos a formato propio del programa para su procesamiento y análisis. Del registro de los sismogramas se obtienen las curvas tiempo – distancia (dromocronas) correspondientes a cada uno de los disparos (shots) generados, Figura 3.18.

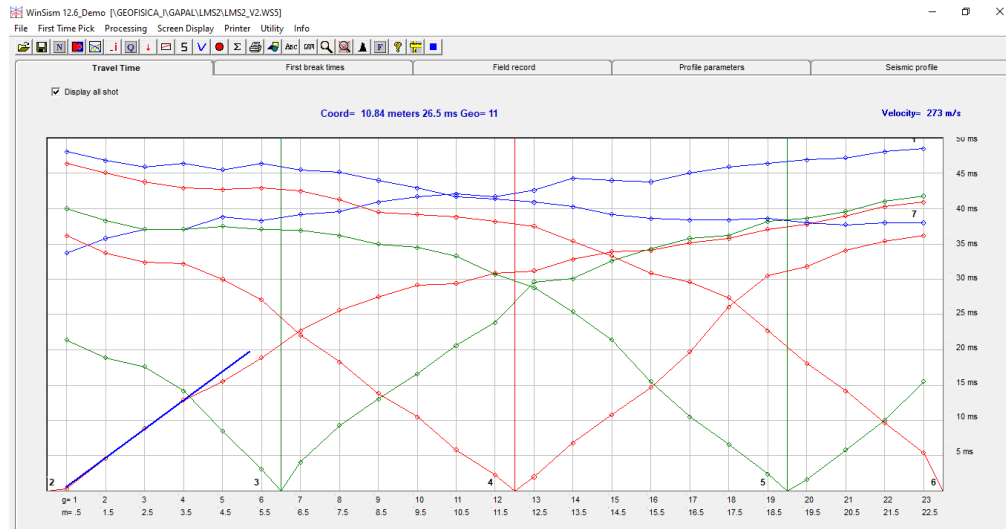


Figura 3.18 Dromocronas elaboradas dentro del proceso de interpretación geofísica LS1, software WINSISM
Fuente: Propia

Con esta información y con los datos topográficos se realizan los modelos para determinar los cambios de pendiente a fin de obtener las velocidades presentes en el terreno. Para la determinación de la profundidad de los estratos identificados se utilizó el Método de tomografía sísmica, Figura 3.19.

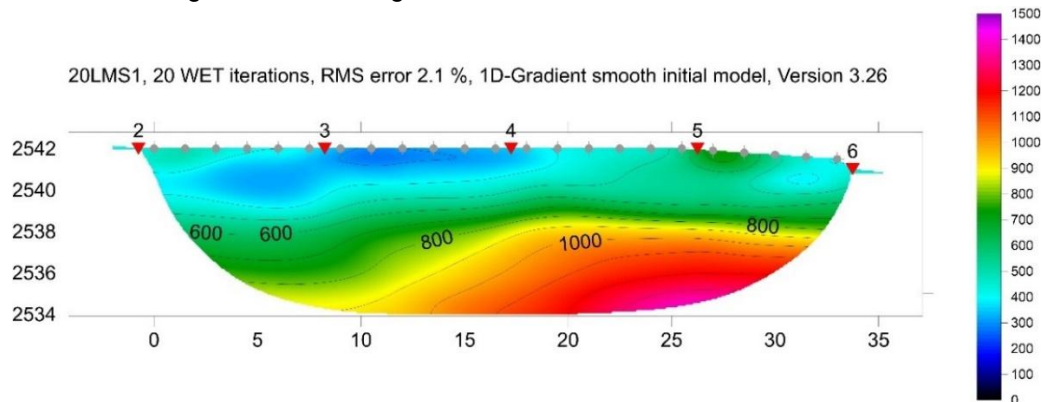


Figura 3.19 Tomografía sísmica LS2
Fuente: Propia.

Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW).

Con los resultados obtenidos en campo (sismogramas), se procede con la fase de interpretación, obteniendo información referente a los estratos que conforman el subsuelo, clasificados por velocidad Vs, Figura 3.20.

Para su determinación se utiliza un software especializado, desarrollado por la Sociedad Roma & Associati Srl.

El valor correspondiente a V_s se obtiene a partir del método MASW (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales), el mismo que utiliza los registros de sismogramas para la determinación de las ondas de corte a partir de las ondas Rayleigh.

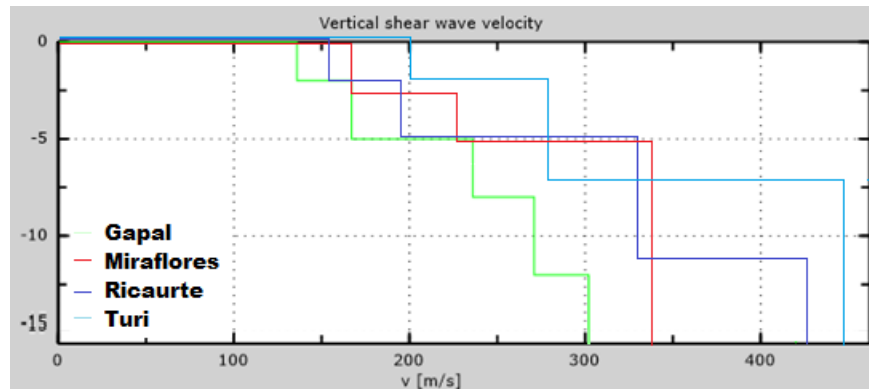


Figura 3.20 Perfil de velocidades V_s , software MASW.
Fuente: Propia.

3.7.4 Cálculo de parámetros geotécnicos.

Con el objeto de complementar la información obtenida tras la determinación de los parámetros geotécnicos de las zonas estudiadas mediante prospección geofísica (variación de la velocidad de onda de corte (V_s) y la densidad de los depósitos de suelo), se puede calcular fácilmente el módulo de corte y el módulo de Young ante pequeñas deformaciones de acuerdo con las siguientes expresiones:

✚ Módulo de corte:

$$G_{din} = \gamma \cdot V_s^2$$

Donde:

G_{din} = Módulo de corte dinámico.

γ = Densidad del terreno.

V_s = Velocidad de onda de corte.

✚ Módulo de Young:

$$E_{din} = 2 \cdot G_{din} \cdot (1 + \nu)$$

Donde:

E_{din} = Módulo de Young dinámico.

G_{din} = Módulo de corte dinámico.

ν = Módulo de Poisson.



(Lazcano, 2007), en su publicación sobre la “Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de superficie”, menciona que: “la relación de Poisson (ν) para la mayoría de los suelos arenosos varía de 0.25 a 0.49, y es razonable tomar un valor de 0.35”.

Este valor fue corroborado según los valores propuestos por (Das, 1999), para suelos limosos, Tabla 3.2.

Tipo de suelo	Coefficiente de Poisson , ν
Arcilla saturada	0,4-0,5
Arcilla no saturada	0,1-0,3
Arcilla arenosa	0,2-0,3
Limo	0,3-0,35
Arena, arena gravosa	0,1-1,0 ^a
Roca	0,1-0,4 ^b
Loess	0,1-0,3
Hielo	0.36
Concreto	0.15

^a Valor comúnmente usado 0,3-0,4

^b Es dependiente del tipo de roca

Tabla 3.4 Valores del coeficiente de Poisson para diferentes tipos de suelo.
Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica, (Das, 1999).

Tanto G_{din} como E_{din} son valores máximos, para deformaciones angulares (γ) del orden de 10^{-4} %, Figura 3.21. Sin embargo, se ha encontrado que la deformación angular promedio es de alrededor de 10^{-1} % (Mayne, 2006). Por lo tanto, para aplicaciones de ingeniería, como asentamientos en cimentaciones, terraplenes o deformaciones en excavaciones, partiendo de parámetros elásticos máximos (G_{din} y E_{din}), hay que reducirlos.

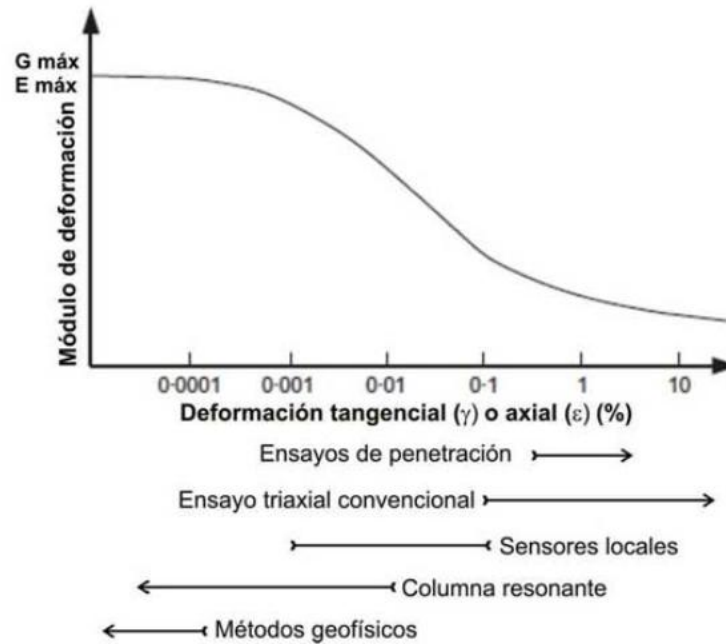


Figura 3.21 Relación no lineal entre la rigidez y la deformación de los suelos. Los valores de rigidez del terreno dependen del nivel de deformación alcanzado durante el ensayo.
Fuente: *In-Situ Test Calibrations for Evaluating Soil Parameters*, (Mayne, 2006).



CAPITULO 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Ensayos de laboratorio.

Una vez realizado el procesamiento, de la información alcanzada mediante los ensayos de laboratorio (humedad natural, análisis granulométrico y límites de Atterberg) de las muestras tomadas en campo correspondientes a cada área de estudio, se procedió a realizar su clasificación, siguiendo los criterios dados por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) detallados anteriormente.

A continuación, en la Tabla 4.1, se presenta un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos antes mencionados mientras que en el Anexo 4.1 se pueden observar con más detalle las características de cada uno de los suelos estudiados.

SECTOR	CALICATA	PROFUNDIDAD	HUMEDAD NATURAL	GRAVA	ARENA	FINOS	SUCS	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	INDICE DE PLASTICIDAD
		Z	w					LL	LP	IP
		(m)	%					%	%	
GAPAL	C1	2,00	31,69	0,89	44,45	54,66	MH	52,60	50,00	2,60
MIRAFLORES	C2	2,00	22,38	-	38,75	61,25	ML	48,58	30,95	17,63
RICAUARTE	C3	2,00	21,70	3,18	43,38	53,44	ML	40,68	38,75	1,93
TURI	C4	2,00	26,65	-	47,06	52,94	ML	39,56	34,52	5,04

Tabla 4.1 Resultados de laboratorio de las diferentes calicatas.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos anteriormente detallados Tabla 4.1, el suelo de la calicata C1 procedente del sector de Gapal se clasifica como suelo tipo MH, correspondiente a un limo inorgánico elástico con arena. Por otro lado, los suelos de las calicatas C2, C3 y C4, correspondientes a los sectores de Miraflores, Ricaurte y Turi respectivamente, se clasifican como suelos tipo ML, correspondientes a limos inorgánicos con arenas.

En los ensayos de corte directo y compresión triaxial se tomó en consideración el criterio sugerido por (Lazcano, 2007), para la determinación del módulo de Poisson, tomando como válido el valor de 0.35 para el análisis complementario de los módulos de corte y de Young.



Como consiguiente en la Tabla 4.2, se presentan los resultados obtenidos mediante los ensayos de corte directo para cada set de muestras ensayadas para cada sector de estudio haciendo una síntesis de los resultados, para una mejor interpretación los resultados específicos obtenidos para cada configuración utilizada en este ensayo se presentan en el Anexo 4.2.

SECTOR	CALICATA	PROFUNDIDAD	PESO ESPECÍFICO	MÓDULO DE POISSON	MÓDULO DE ELASTICIDAD	MÓDULO DE CORTE	COHESIÓN	FRICCIÓN
		Z	γ	ν	E ₅₀	G ₅₀	C	ϕ
		(m)	Kg/m ³	m/m	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Grados
GAPAL	C1	2,00	1832	0,35	63	23	0,63	30,48
MIRAFLORES	C2	2,00	1931	0,35	109	40	0,64	31,78
RICAURTE	C3	2,00	1860	0,35	84	31	0,60	36,59
TURI	C4	2,00	2015	0,35	151	56	0,69	41,02

Tabla 4.2 Parámetros de resistencia al cortante, mediante los ensayos de corte directo para los diferentes suelos.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.3, se presentan los resultados obtenidos mediante los ensayos de compresión triaxial correspondiente para cada set de muestras ensayadas para cada sector de estudio, de igual manera se procedió hacer una síntesis de los resultados de manera general, para una mejor interpretación los resultados específicos obtenidos para cada configuración utilizada en este ensayo se los puede observar en el Anexo 4.3.

SECTOR	CALICATA	PROFUNDIDAD	PESO ESPECÍFICO	MÓDULO DE POISSON	MÓDULO DE ELASTICIDAD	MÓDULO DE CORTE	COHESIÓN	FRICCIÓN
		Z	γ	ν	E ₅₀	G ₅₀	C	ϕ
		(m)	Kg/m ³	m/m	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Grados
GAPAL	C1	2,00	1868	0,35	49	18	1,18	3,00
MIRAFLORES	C2	2,00	2003	0,35	104	39	1,20	5,00
RICAURTE	C3	2,00	1950	0,35	70	26	1,10	12,85
TURI	C4	2,00	2062	0,35	161	60	1,35	21,04

Tabla 4.3 Parámetros de resistencia al cortante mediante los ensayos de compresión triaxial para los diferentes suelos.
Fuente: Elaboración propia.

Los ángulos de fricción obtenidos son altos debido al elevado contenido de arena (mayor al 40%) que están presentes en cada uno de los sectores. Además, los valores del índice de plasticidad son bajos, lo cual también indican que los materiales podrían desarrollar ángulos de fricción relativamente altos, de acuerdo a (Terzaghi, 1996), Figura 4.1.

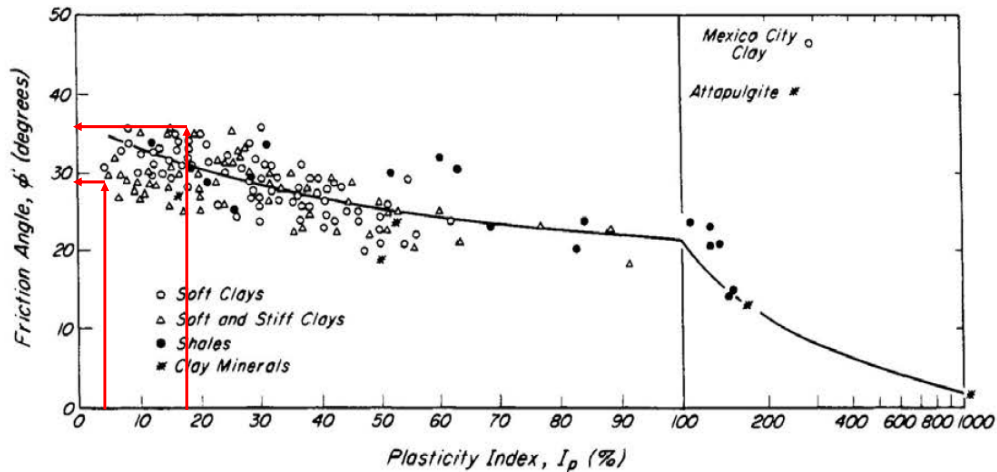


Figura 4.1 Relación entre el ángulo de fricción y el índice de plasticidad
Fuente: Soil Mechanics in Engineering Practice, (Terzaghi, 1996)

Como se observa en las Tablas 4.2 y 4.3, los resultados de c y ϕ (ensayos no consolidados-no drenados), los parámetros de resistencia al cortante obtenidos por cada método, son diferentes. Esto puede deberse al grado de alteración de las muestras producido por la perturbación en la extracción, o en el momento del tallado. Así mismo debido al mecanismo de falla correspondiente a cada ensayo esto porque la superficie de falla supuesta en el ensayo de corte directo es una superficie de rotura inducida y puede darse la opción de que no represente el plano más débil mientras que, en el ensayo triaxial la muestra no es forzada a inducir la falla sobre una superficie determinada.

A continuación, se muestra la Tabla 4.4 que fue propuesta por (Das, 1999), para una primera aproximación entre el ángulo de fricción interna (ϕ) y varios tipos de suelos.

ANGULO DE FRICCIÓN INTERNA "θ"

Tipo de suelo	θ ° (grados)
<i>Arena: granos redondeados</i>	
Suelta	27 - 30
Media	30 - 35
Densa	35 - 38
<i>Arena: granos angulares</i>	
Suelta	30 - 35
Media	35 - 40
Densa	40 - 45
Grava con algo de arena	34 - 48
Arcillas consolidadas	20 - 30
Limos	26 - 35

Tabla 4.4 Ángulo de fricción interna según el tipo de suelo.
Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica, (Das, 1999)

Los ángulos de fricción interna obtenidos con el ensayo de corte directo presentan una mayor similitud a los valores propuestos por (Das, 1999), para el tipo suelo encontrado en cada sector de estudio. Esto debido a que el ensayo triaxial UU es más próximo al mecanismo de falla no drenado, al haber un confinamiento de la muestra en todas sus direcciones. En tanto que, en el ensayo de corte directo, se genera una falla parcialmente drenada, la cual se refleja en ángulos de fricción mayores, similares a los mostrados en la Tabla 4.4.

Del mismo modo con el fin de buscar bibliografía similar en la búsqueda de los parámetros geotécnicos de la Formación Mangán, el proyecto piloto denominado PRECUPA (Prevención - Ecuador - Cuenca - Paute) orientado a la prevención de desastres en 1998. Como parte de su trabajo de investigación presentó la Tabla 4.5, donde se pueden apreciar los parámetros físicos mecánicos obtenidos para depósitos coluviales y para la Formación Mangán, valores que se asemejan a los encontrados en los ensayos de compresión triaxial.

CLASIFIC. SUCS	PARAMETROS FISICO-MECANICOS				
	γ (Kg/m ³)	C' (Kg/cm ²)	ϕ' (°)	C _u (kg/cm ²)	ϕ_u (°)
ML - CL	*1835 - 2141	*0.1 - 0.31	* 18- 26	0.31	7 - 15
SC	* 2141 - 2243	* 0 - 1.52	* 30 - 35	-	-

* valores compilados y ensayados, el resto estimados a partir de las características físicas

Tabla 4.5 Parámetros Físico-Mecánicos.

Fuente: Prevención de Desastres Naturales en la Cuenca del Paute, (PRECUPA, 1998)

4.2 Ensayos geofísicos

El reporte de los resultados obtenidos en el proceso de interpretación de los métodos de sísmica de refracción y análisis multicanal de ondas, para cada área de en estudio se adjuntan en el Anexo 4.

A continuación, en la Tabla 4.6, se resumen de los resultados obtenidos mediante la interpretación geofísica, recopilando información de interés en los estratos donde se tomaron las muestras para cada uno de los ensayos de laboratorio.

SECTOR	PROFUNDIDAD DEL ESTRATO	VELOCIDAD DE ONDA DE COMPRESIÓN	VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE
	Z	V _p	V _s
	(m)	(m/s)	(m/s)
GAPAL	2,00	477	167
MIRAFLORES	2,00	611	227
RICAURTE	2,00	425	193
TURI	2,00	509	272

Tabla 4.6 Velocidades de onda para los diferentes estratos encontrados a una profundidad de 2.00m.

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Correlaciones cuantitativas propuestas.

Al realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos mediante los ensayos convencionales (corte directo y compresión triaxial) y geofísicos (prospección geofísica) a continuación, se presentan correlaciones estadísticas por regresión lineal y potencial dependiente del mejor ajuste (coeficiente de correlación mayor) entre las velocidades de onda (V_p y V_s) y las siguientes variables geotécnicas: peso específico, ángulo de fricción, cohesión y módulo de Young.

4.3.1 Relación entre las velocidades de onda de corte y el peso específico.

El peso específico de un suelo es la relación existente entre su masa y volumen multiplicado por la gravedad, sus valores dan referencia del grado de compacidad del suelo, donde a mayor compacidad mayor son los valores de la velocidad de onda.

Mediante esta correlación se obtuvo la Figura 4.2, con su respectivo coeficiente de determinación R^2 que proporciona la calidad del modelo, esto con la totalidad de los datos obtenidos en los ensayos de corte directo (36 valores) y en el ensayo de compresión triaxial (12 valores).

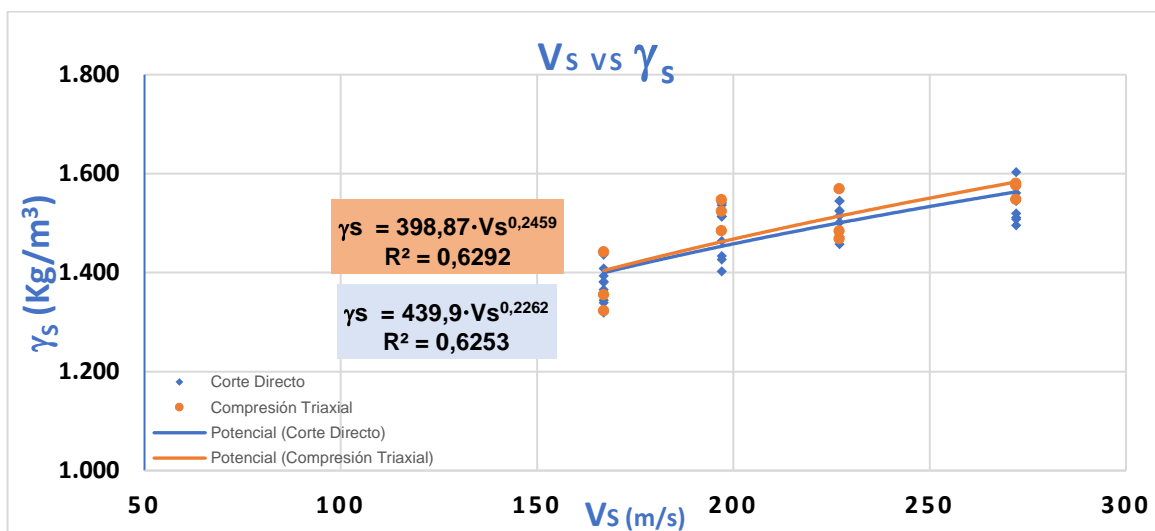


Figura 4.2 Correlación entre el peso específico (γ_s) y la velocidad de onda de corte (V_s) para Limos-Arenosos de la Formación Mangán.

Fuente: Elaboración propia.

La correlación entre el peso específico, (γ_s) y la velocidad de onda de corte, (V_s) propuestas en este estudio presentan un coeficiente de determinación R^2 de 0.62 para los datos obtenidos por los ensayos de corte directo y compresión triaxial, lo cual indica que el 62% de los valores de peso específico están explicados por los valores de velocidad de onda de corte.

La regresión potencial encontrada indica que cuando se incremente la velocidad de onda de corte (V_s), el peso específico (γ_s) será cada vez mayor, este incremento ira disminuyendo a medida que las velocidades de onda de corte sean mayores.

✚ Correlaciones Similares:

Con el fin de realizar una comparación entre modelos de regresión encontrados en este estudio con los encontrados por otros autores se procedió a hacer una comparativa entre los resultados obtenidos por cada autor.

En la Figura 4.3, se puede apreciar el modelo de regresión potencial propuesta por (Tezcan, 2006), (Keceli, 2009) para una primera aproximación del peso específico de cualquier tipo de suelo por medio de la velocidad de onda de corte y el modelo de regresión lineal propuesta por (Larriva & Muñoz, 2018) para un suelo limo-arenoso.

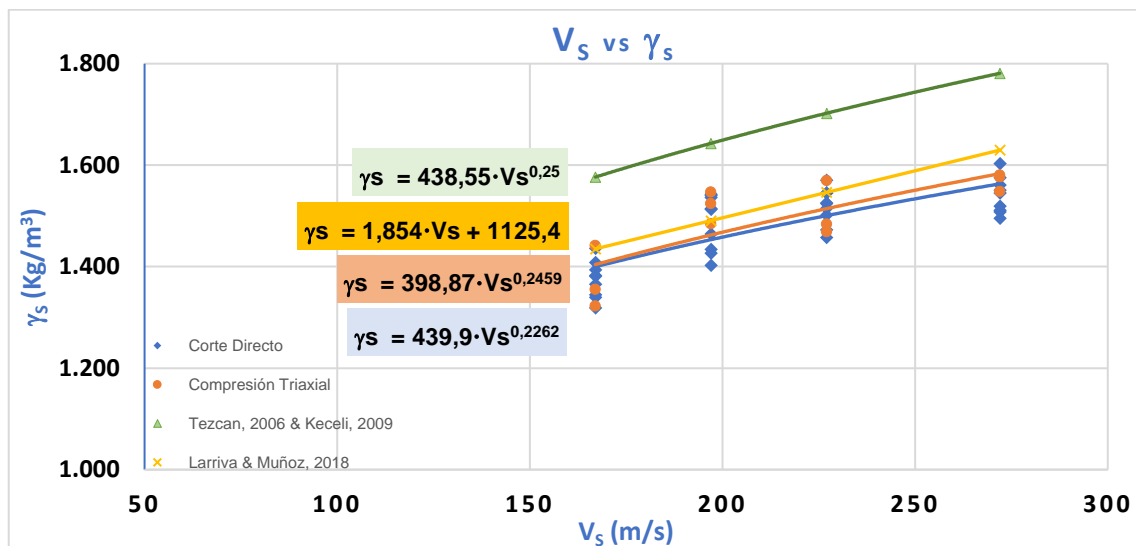


Figura 4.3 Correlaciones encontradas por diferentes autores entre el peso específico (γ_s) y la velocidad de onda de corte (V_s).
Fuente: Elaboración propia.

(Kaptan, 2014), en su estudio de 550 sitios de construcción mediante pruebas de laboratorio y prospección geofísica menciona que esta expresión está especialmente recomendada para suelos granulares, pero no se hace ningún comentario sobre la corrección adecuada a seguirse para el análisis de suelos limo arenosos.

Con este estudio se puede corroborar lo mencionado por (Kaptan, 2014), ya que el modelo de regresión potencial propuesto por (Tezcan, 2006) y (Keceli, 2009) varía significativamente al encontrado en este estudio.

Por otro lado, (Larriva & Muñoz, 2018) en su estudio experimental aplicando el método de sísmica de refracción, con el propósito de encontrar relación entre las velocidades de onda y las propiedades físicas de un suelo limo-arenoso, propone un modelo de regresión lineal el cual está más ajustado al modelo de regresión potencial encontrado en este estudio.

Los modelos de regresión potencial propuestos en este estudio son muy similares entre sí, estos modelos son sugeridos para una primera aproximación al peso específico de suelos

limo-arenosos pertenecientes a la Formación Mangán de ciudad de Cuenca, en un rango de velocidad de onda de corte de 150m/s a 350m/s.

4.3.2 Relación entre la relación de velocidades de onda y ángulo de fricción.

Se analizó la correlación entre el ángulo de fricción (ϕ), y la relación de velocidades de onda (V_p/V_s), el ángulo de fricción es el máximo ángulo de pendiente para un conjunto de material, el cual depende de la cohesión y densidad, donde a mayor ángulo de fricción mayor será la velocidad de onda.

Mediante esta correlación se obtuvo la Figura 4.4, con su respectivo coeficiente de determinación R^2 que proporciona la calidad del modelo, esto con los resultados obtenidos en los ensayos de corte directo (8 valores) y en el ensayo de compresión triaxial (4 valores).

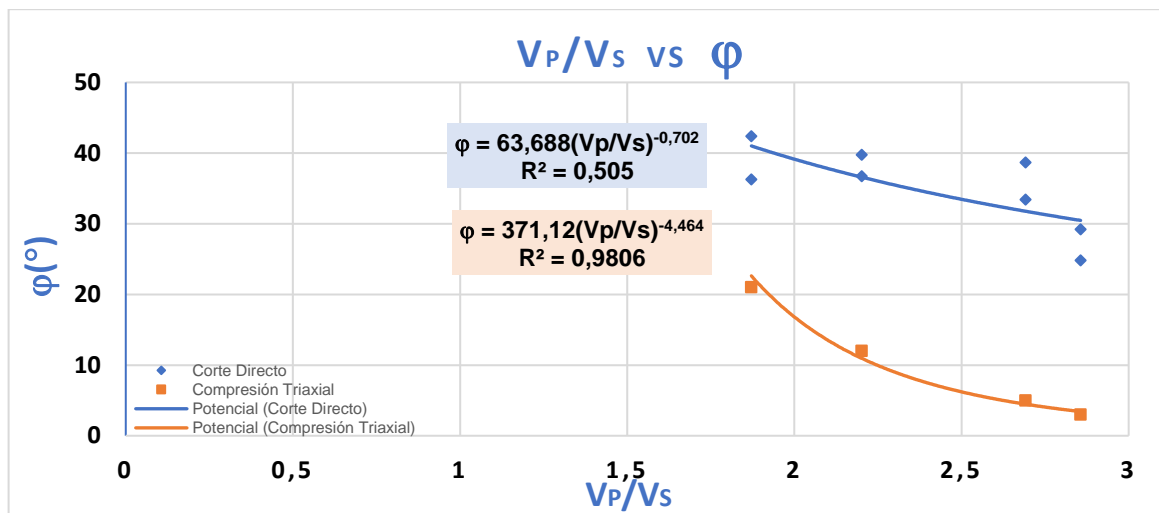


Figura 4.4 Correlación entre relación de velocidades de onda (V_p/V_s) y el ángulo de fricción (ϕ) para Limos-Arenosos de la Formación Mangán.
Fuente: Elaboración propia.

La correlación entre el ángulo de fricción, (ϕ) y la relación de velocidades de onda, (V_p/V_s) presentan un coeficiente de determinación R^2 de 0.50 para los valores obtenidos por el ensayo de corte directo y 0.98 en el ensayo triaxial lo cual indica que el 50% y 98% de los valores de ángulo de fricción están explicados por los valores de la relación de velocidades de onda.

Las correlaciones indican que cuando la magnitud de la velocidad de onda de corte “ V_s ” está más próxima a la velocidad de onda de compresión “ V_p ” el material es más rígido; por tanto, el ángulo de fricción interna será mayor.

✚ Correlaciones similares.

Con el fin de realizar una comparación entre modelos de regresión encontrados en este estudio con los encontrados por otros autores se procedió a hacer una comparativa entre los resultados obtenidos por cada autor.

En la Figura 4.5, se puede apreciar el modelo de regresión lineal propuesta por (I.G. Mindel, 2002), para limos del sur de Ucrania, el modelo de regresión potencial propuesta por (Álvarez, 2003) para suelos tipo “MH” del Valle de Querétaro y el modelo de regresión lineal encontrado por la empresa Geo&Geo, para suelos limosos y arcillas

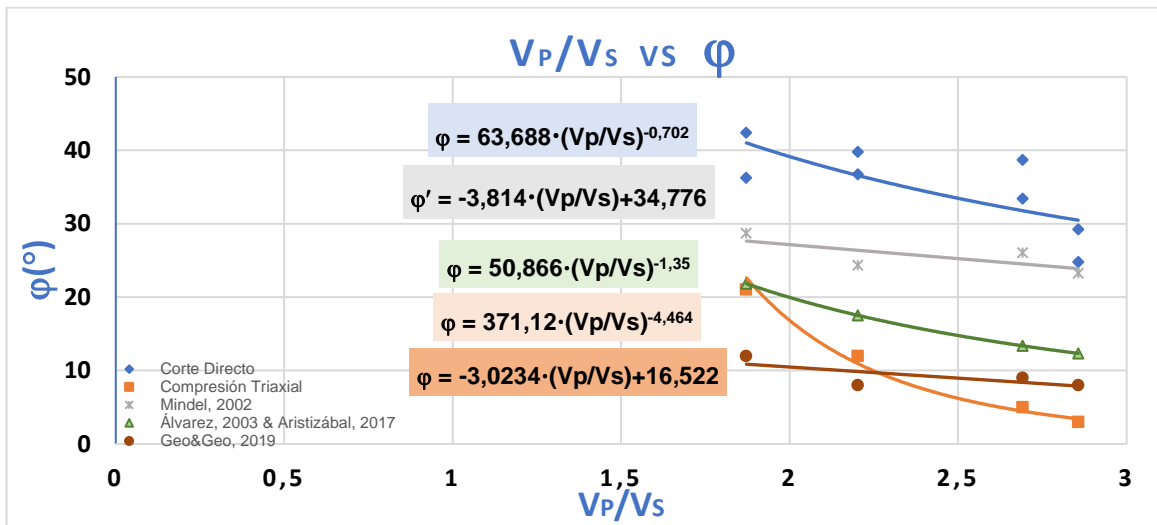


Figura 4.5 Correlaciones encontradas por diferentes autores entre la relación de velocidades de onda (V_p/V_s) y el ángulo de fricción (ϕ).
Fuente: Elaboración propia.

(I.G. Mindel, 2002) citado en (Naranjo & Dranichnikov, 2012), propone un modelo de regresión lineal en esfuerzos efectivos para limos del sur de Ucrania, este modelo de regresión presenta cierta similitud al modelo de regresión encontrado en este estudio con los resultados obtenidos mediante los ensayos de corte directo.

(Álvarez, 2003) en su investigación sobre la evaluación indirecta del ángulo de fricción interna y la relación V_p/V_s , en suelos tipo “MH” del Valle de Querétaro, propone un modelo de regresión potencial en esfuerzos totales. Este modelo de regresión presenta cierta similitud al encontrado en este estudio con los resultados obtenidos por los ensayos de compresión triaxial.

La empresa Geo&Geo posee una base de datos con información recopilada en estudios de deslizamientos de taludes los mismos que han sido realizados en distintos sitios de las provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago en los cuales se han obtenido datos de ángulo de fricción para suelos limosos y arcillas en función de las velocidades de onda, el modelo de regresión lineal encontrado por la empresa presenta similitud al modelo de regresión encontrado en este estudio con los resultados obtenidos por los ensayos de compresión triaxial.

Los modelos de regresión potencial propuestos en este estudio varían de manera significativa entre sí, esto debido a las limitaciones en cada ensayo.

Estos modelos de regresión son sugeridos para suelos limo-arenosos pertenecientes a la Formación Mangán de ciudad de Cuenca, queda a criterio del investigador el poder escoger entre los modelos de regresión presentados en este estudio.

4.3.3 Relación entre la relación de velocidades de onda y la cohesión.

De igual manera que el caso anterior se analizó la correlación entre la cohesión (c) y la relación de velocidades de onda (V_p/V_s), la cohesión de un suelo es una cualidad de las partículas que permite tener una referencia de la fuerza interna, lo que también puede interpretarse en un aumento en la resistencia del material que por ende da entender que a mayores cohesiones son también mayores los valores de velocidad de onda.

La cohesión podría ser interpretada por el factor de profundidad ya que al aumentar esta, la compactación de los suelos es mayor y en consecuencia las velocidades de onda también lo serán.

Mediante esta correlación se obtuvo la Figura 4.6, con su respectivo coeficiente de determinación R^2 que proporciona la calidad del modelo, esto con los resultados obtenidos en los ensayos de corte directo (8 valores) y en el ensayo de compresión triaxial (4 valores) en esfuerzos totales.

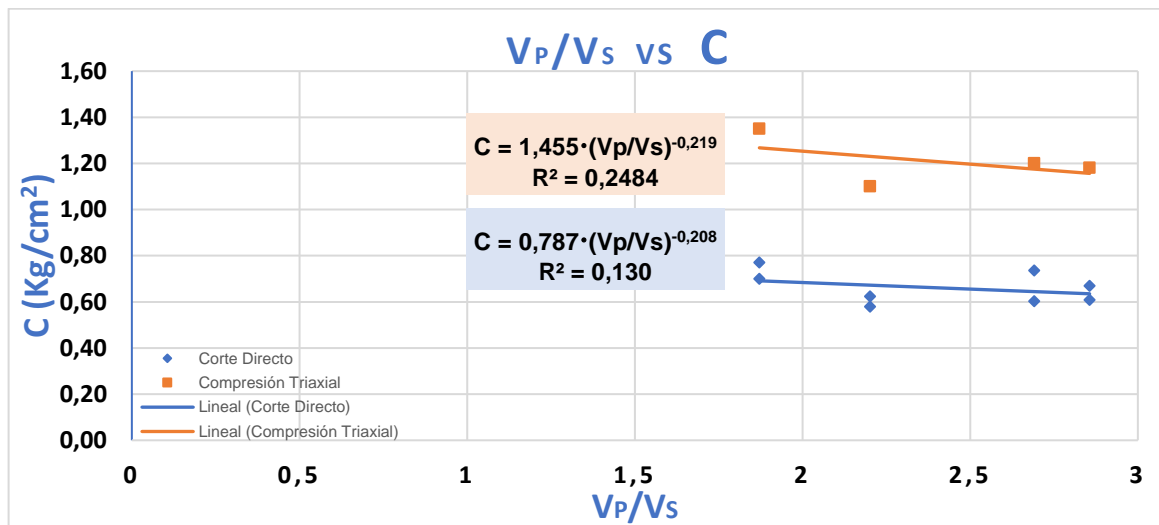


Figura 4.6 Correlación entre relación de velocidades de onda (V_p/V_s) y cohesión (c) para Limos-Arenosos de la Formación Mangán.
Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de los casos anteriores, la correlación entre la cohesión, (c) y la relación de velocidades de onda, (V_p/V_s) presentan un coeficiente de determinación R^2 de 0.13 para los valores obtenidos por el ensayo de corte directo y 0.24 en el ensayo triaxial lo cual indica que el 13% y 24% de los valores de ángulo de fricción están explicados por los valores de la relación de velocidades de onda.

Las correlaciones indican que cuando la magnitud de la velocidad de onda de corte “Vs” está más próxima a la velocidad de onda de compresión “Vp” el material es más rígido; por tanto, la cohesión del terreno será mayor.

✚ Correlaciones similares.

Con el fin de realizar una comparación entre modelos de regresión encontrados en este estudio con los encontrados por otros autores se procedió a hacer una comparativa entre los resultados obtenidos por cada autor.

En la Figura 4.7, se puede apreciar el modelo de regresión lineal propuesta por (I.G. Mindel, 2002), para cualquier suelo limoso con humedad natural, el modelo de regresión potencial propuesta por (Aristizábal, 2017) para depósitos superficiales de ceniza volcánica en Manizales-Colombia y el modelo de regresión lineal encontrado por la empresa Geo&Geo, para suelos limosos y arcillas.

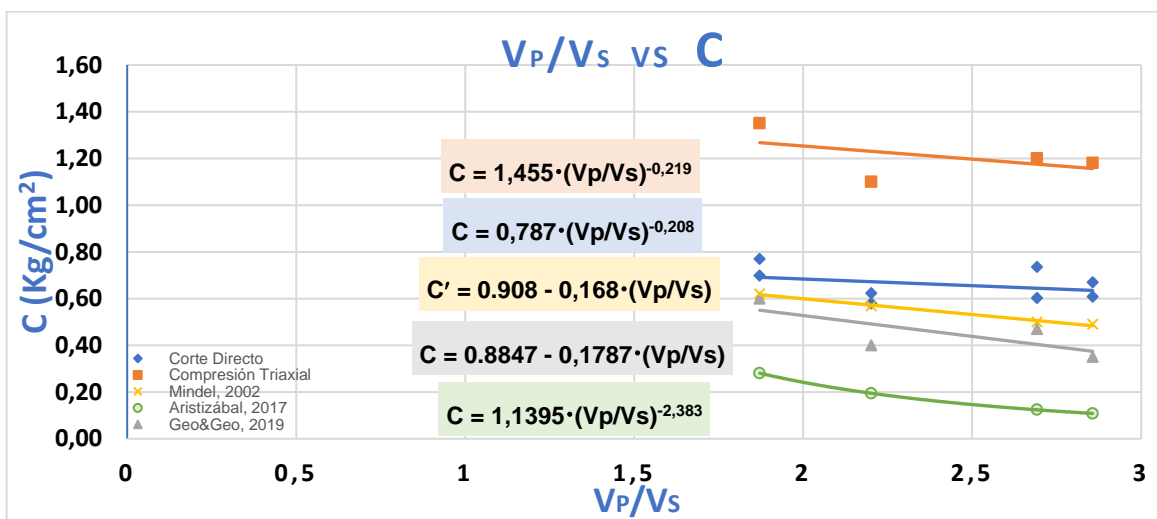


Figura 4.7 Correlaciones encontradas por diferentes autores entre la relación de velocidades de onda (V_p/V_s) y cohesión (c).

Fuente: Elaboración propia.

(Mindel, 2002) citado en (Naranjo & Dranichnikov, 2012), propone un modelo de regresión lineal en esfuerzos efectivos para cualquier suelo limoso con humedad natural, este modelo de regresión presenta cierta similitud al modelo de regresión encontrado en este estudio con los resultados obtenidos por los ensayos de corte directo.

(Aristizábal, 2017) en su investigación sobre la obtención de las propiedades mecánicas a partir de la relación V_p/V_s para depósitos superficiales de ceniza volcánica en Manizales-Colombia, propone un modelo de regresión potencial en esfuerzos totales. Este modelo de regresión presenta valores inferiores a los encontrados en este estudio.

La empresa Geo&Geo posee una base de datos con información recopilada en estudios de deslizamientos de taludes los mismos que han sido realizados en distintos sitios de las

provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago, en los cuales se han obtenido datos de cohesión para suelos limosos y arcillas en función de las velocidades de onda, el modelo de regresión lineal encontrado por la empresa presenta la misma tendencia al modelo de regresión encontrado en este estudio con los resultados obtenidos por los ensayos de corte directo.

Los modelos de regresión para este caso en particular presentan coeficientes de determinación bajos esto debido a que la cohesión es mucho más sensible a las condiciones de humedad del terreno estos modelos de regresión son sugeridos para suelos limo-arenosos pertenecientes a la Formación Mangán de ciudad de Cuenca, queda a criterio del investigador su uso.

4.3.4 Relación entre la velocidad de onda de corte y el módulo de Young.

Por último, se procedió a realizar un análisis estadístico con toda la información recolectada en los ensayos de corte directo y compresión triaxial para encontrar la correlación entre el módulo de Young (E_{50}) y velocidad de onda de corte (V_s), el módulo de Young es una medida de firmeza del suelo, comúnmente utilizada en diseños y aplicaciones de ingeniería, donde a mayor valor de firmeza del suelo mayor son los valores de la velocidad de onda.

Mediante esta correlación se obtuvo la Figura 4.8, con su respectivo coeficiente de determinación R^2 que proporciona la calidad del modelo, esto con la totalidad de los datos obtenidos en los ensayos de corte directo (36 valores) y en el ensayo de compresión triaxial (12 valores).

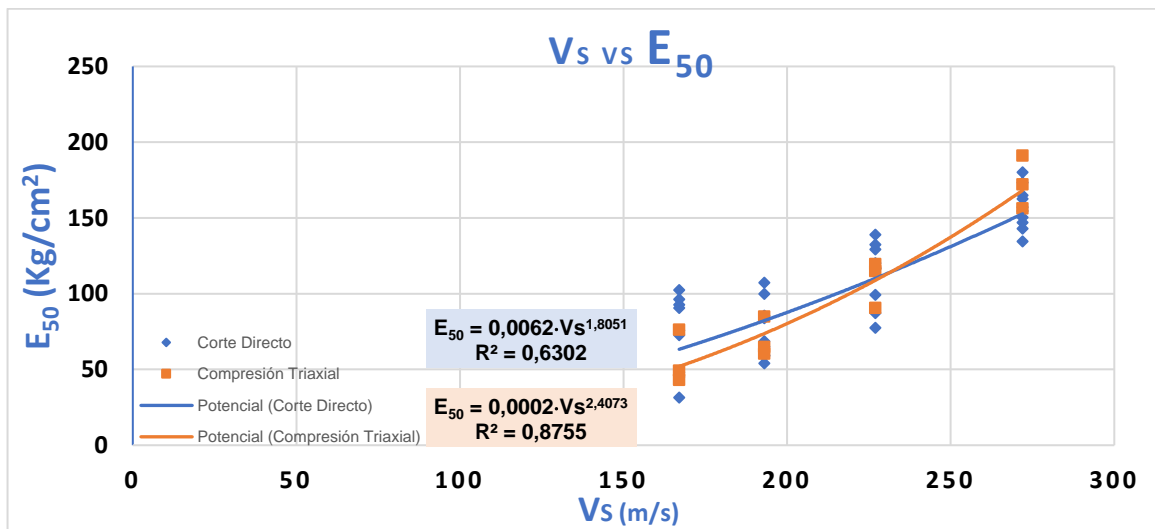


Figura 4.8 Correlación entre el módulo de Young, (E_{50}) y la velocidad de onda de corte (V_s) para Limos-Arenosos de la Formación Mangán.
Fuente: Elaboración propia.

La correlación entre el módulo de Young (E_{50}) y velocidad de onda de corte (V_s), alcanzadas en este estudio presentan un coeficiente de determinación R^2 de 0.63 para los valores obtenidos por el ensayo de corte directo y 0.87 en el ensayo triaxial lo cual indica

que el 63% y 87% de los valores de módulo de Young están explicados por los valores de velocidad de onda de corte.

La regresión potencial encontrada indica que cuando se incremente la velocidad de onda de corte (V_s), el módulo de Young (E_{50}) será cada vez mayor, este incremento ira aumentando a medida que las velocidades de onda de corte sean mayores.

Correlaciones Similares:

Con el fin de realizar una comparación entre modelos de regresión encontrados en este estudio con los encontrados por otros autores se procedió a hacer una comparativa entre los resultados obtenidos por cada autor.

En la Figura 4.9, se puede apreciar los dos modelos de regresión potencial propuesta por (I.G. Mindel, 2002), para una valoración rápida del módulo de Young en suelos arenosos con humedad natural.

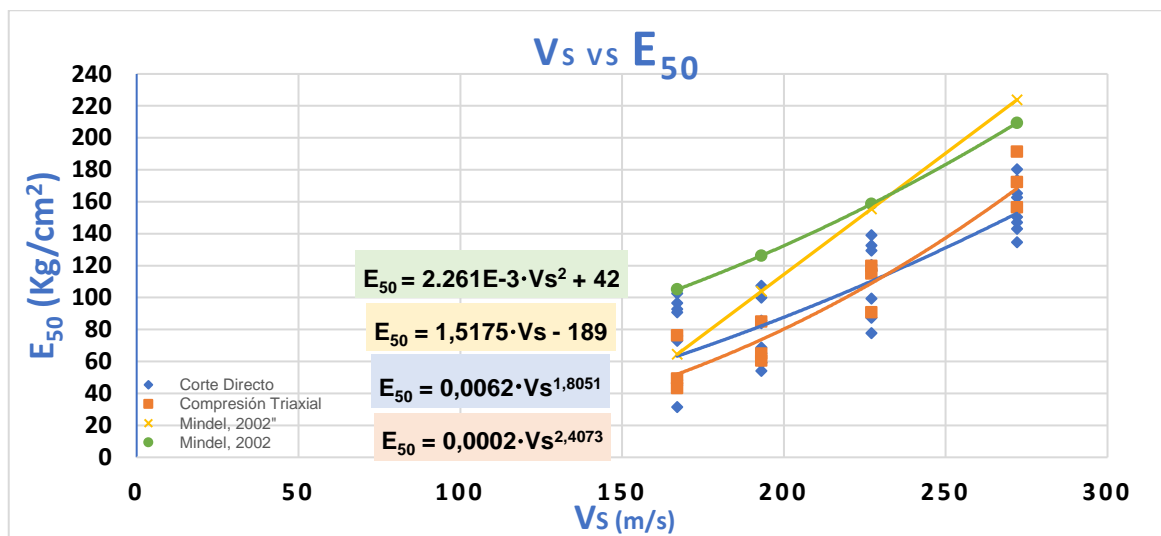


Figura 4.9 Correlaciones encontradas por diferentes autores entre el módulo de Young, (E_{50}) y la velocidad de onda de corte (V_s).

Fuente: Elaboración propia.

(I.G. Mindel, 2002) citado en (Naranjo & Dranichnikov, 2012), propone dos modelos de regresión uno potencial y otro lineal para una valoración del módulo de deformación o de Young en suelos arenosos con humedad natural.

Estos modelos de regresión presentan igual tendencia que los modelos de regresión encontrados con los datos de corte directo y compresión triaxial, aunque los valores encontrados por estos dos modelos son inferiores a los encontrados por este autor.

Los modelos de regresión potencial propuestos en este estudio son muy similares entre sí, estos modelos son sugeridos para una aproximación al módulo de Young de suelos limo-



arenosos pertenecientes a la Formación Mangán de ciudad de Cuenca, en un rango de velocidad de onda de corte de 150m/s a 350m/s.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

❖ Conclusiones

- ✚ La información obtenida en laboratorio respecto a las propiedades geotécnicas de los suelos limo-arenosos pertenecientes a la Formación Mangán, de la ciudad de Cuenca, muestran un rango de variación considerable entre los resultados obtenidos entre ensayos. Esto se debió a que cada una de las zonas investigadas presentan variación por diferentes grados de meteorización o alteración del material.
- ✚ La variación presentada en los resultados de los ensayos de corte directo y triaxiales se deben a que por su parte los ensayos triaxiales UU son más próximos al mecanismo de falla no drenado, al haber un confinamiento de la muestra en todas sus direcciones. Mientras que, en los ensayos de corte directo, se genera una falla parcialmente drenada, la cual se refleja en ángulos de fricción mayores, similares a los encontrados por (Das, 1999); es por eso que durante las evaluaciones estadísticas los datos encontrados entre ensayos muestran una dispersión considerable.
- ✚ Los ángulos de fricción obtenidos en este estudio son altos debido al elevado contenido de arenas (mayor al 40%). Además, los valores de índice de plasticidad son bajos, lo cual también indican los materiales podrían desarrollar ángulos de fricción relativamente altos.
- ✚ Los valores de onda de corte, V_s para suelos Limo-Arenosos pertenecientes a la Formación Mangán, de la ciudad de Cuenca, en los sitios estudiados varían en un rango de 167m/s y 272m/s.
- ✚ Casi todas las correlaciones cualitativas establecidas en esta investigación presentan coeficientes de determinación $R^2 > 50$, lo que indica que más del 50% de los valores de las variables geotécnicas están explicados por los valores de velocidad de onda. Sin embargo, las correlaciones cualitativas alcanzadas entre la cohesión y la relación de velocidades de onda no mostraron una correlación clara, debido a que la cohesión es mucho más sensible a las condiciones de humedad del terreno.

❖ Recomendaciones:

- ✚ Un factor concluyente y que debe tenerse en cuenta al momento de emplear alguna de las correlaciones propuestas en este estudio es que fueron determinadas en suelos Limo-Arenosos de la Formación Mangán de la ciudad de Cuenca-Ecuador y se recomienda como referencia para este tipo de suelos.
- ✚ Hay que tener en cuenta que los ensayos de laboratorio plantean el inconveniente de que la muestra debe ser representativa del total del estrato de suelo y suponer que el mismo se encuentre en un mismo estado.
- ✚ Para estudios futuros se recomienda, obtener muestras a mayores profundidades para verificar la influencia de la presión de confinamiento.
- ✚ En la revisión de los datos de campo tomados de las pruebas geofísicas (sísmica de



refracción y análisis multicanal de ondas superficiales) se considera que la rigurosidad técnica, y experiencia en la realización de este tipo de ensayos puede conllevar a un enfoque de datos representativos de los estratos, de manera que la implementación de normas y medidas encaminadas al control de calidad en estos ensayos contribuirá a la confiabilidad de las correlaciones propuestas en esta investigación y en investigaciones futuras.

- ✚ La presente investigación no pretende reemplazar la prospección geotécnica ni mucho menos los ensayos de laboratorio convencionales. Sino más bien propone una herramienta de soporte, para lugares donde es necesario realizar gran cantidad de ensayos para una correcta interpretación, es aquí donde se propone que los ensayos geofísicos y estas correlaciones servirán para cubrir mayores extensiones y complementar la información obtenida por los ensayos convencionales homogeneizando de esta manera el área de estudio.

❖ **Limitaciones.**

- ✚ Las principales limitaciones encontradas en este estudio se presentaron en la falta de equipos ideales para la extracción de las muestras para los ensayos de compresión triaxial (muestras con grado de alteración significativo) debido al muestreador de cuchara partida presenta un grado de alteración en la estructura geotécnica del suelo, esto debido al espesor de la pared del cuerpo, por lo tanto, se podría esperar que los parámetros obtenidos en los ensayos de compresión triaxial varíen con respecto a los valores reales del terreno siendo causante de una inadecuada interpretación de los resultados.
- ✚ Debido a que las máquinas de corte directo y compresión triaxial no son exclusivas para el uso de los estudiantes de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, no hubo una completa disponibilidad de las máquinas para la ejecución de ensayos en condiciones drenadas. Por lo tanto, se debió realizar ensayos no consolidados no drenados (UU), configuración que no es la más adecuada para la determinación de los parámetros del suelo que se buscaba en esta investigación.



BIBLIOGRAFÍA.

- Álvarez, M. (2003). Evaluación indirecta de los módulos elásticos de rigidez in situ y la relación entre V_p/V_s y el ángulo de fricción interna. Sanfandila, Qro: Instituto Mexicano de Transporte.
- Aponte, J. (2011). Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Aristizábal, J. (2017). Obtención de propiedades mecánicas a partir de la relación V_p/V_s para depósitos superficiales de ceniza volcánica en Manizales Colombia. Espacios, 22-44.
- Arízaga, J., & Ulloa, M. (2018). Análisis de infiltraciones en la Presa de Mazar, mediante los métodos de prospección geofísica: geoelectrónicos y sísmicos. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- ASTM D-2216. (1999). Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.
- ASTM D-2850. (1999). Standard Test Method for Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.
- ASTM D-422. (1999). Particle-Size Analysis of Soils.
- ASTM D-4318. (1999). Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- ASTM-D-3086. (1999). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soil Unconsolidated Undrained Condition.
- Avilés, J., & Barzallo, B. (2016). Caracterización de suelos del centro histórico de la ciudad de Cuenca mediante métodos geofísicos. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Chelotti, L., Acosta, N., & Foster, M. (2009). La biblia de la geofísica. Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina.
- Correia, N. (2015). Obtención del Perfil de Velocidad de Onda de Corte Mediante Método MASW y Comparación con Ensayo Tipo Downhole en Estaciones Sismológicas de Zona Central. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Das, B. M. (1999). Fundamentos de ingeniería geotécnica. Sacramento, California: Thomson Learning.
- Errazuriz, J. (2012). Microzonificaciones Sísmicas en Ciudades del Mundo y Discusión sobre la Aplicabilidad en la ciudad de Santiago. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica De Chile.
- Espinace, R., & Sanhueza, C. (2004, Septiembre). Texto guía para la cátedra de mecánica de suelos. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Geoestudios S.A. (2014). Evaluaciones de correlación mediante ecuaciones para cuaciones de correlación para estimar las velocidades de las ondas cortantes en los suelos de la ciudad de Guayaquil. In G. S.A, Elaboración del documento Microzonificación Sísmica y Geotécnica de la ciudad de Guayaquil según la norma Ecuatoriana de la Construcción 2011. (pp. 690-715). Guayaquil: Secretaría de Gestión de Riesgos.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería geológica. Madrid: Pearson Educación.
- Humire, F. (2013). 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. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Jaimes, J. (2011). Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

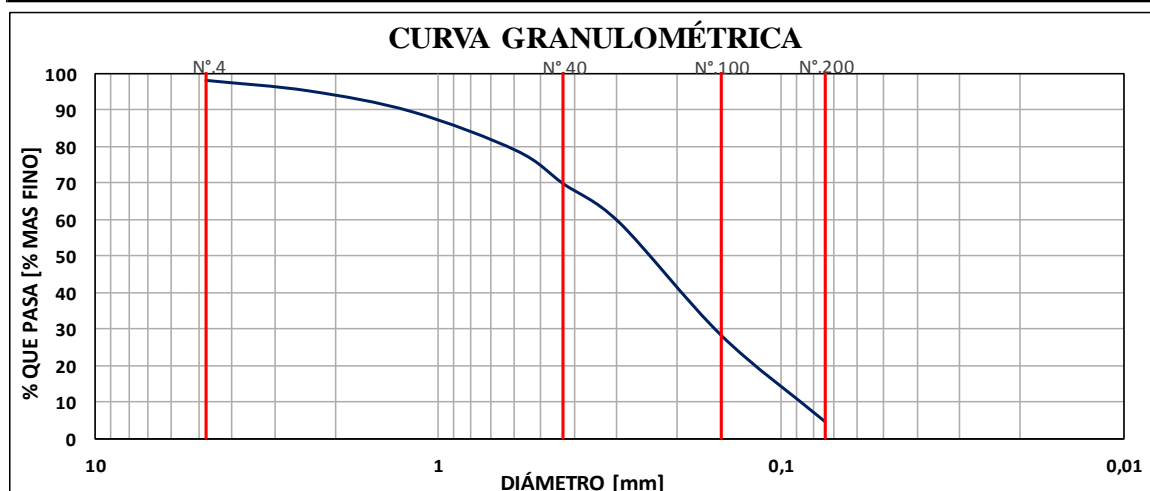


- Kaptan, K. (2014). A refined formula for the allowable soil pressure using shear wave velocities. *Global Journal of Civil and Structural Engineering*, 18-26.
- Lambe, W., & Whitman, R. (2004). *Mecánica de Suelos*. Mexico, D.F.: Limusa, S.A.
- Larriva, D., & Muñoz, D. (2018). Estudio de las velocidades sísmicas de un suelo areno limoso, con diferentes grados de compactación y humedad mediante equipo sísmico. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Lazcano, S. (2007). Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie, . Ciudad de México: Academia de Ingeniería de México.
- Lopez, G., & Israel, L. (2013). *Métodos de Investigación del Subsuelo*. Salvador: Universidad del Salvador.
- Mayne, P. (2006). In-Situ Test Calibrations for Evaluating Soil Parameters . Geosystems Engineering Group, Georgia Institute of Technology, 20-27.
- Naranjo, H., & Dranichnikov, T. (2012). Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional. Quito: Abya-Yala.
- NEC-2015, N. E. (2014). Peligro Sísmico , Diseño sismo resistente. MIDUVI: Dirección de Comunicación Social.
- Park, C., Miller, R., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves (MASW). *Kansas: Geophysics*. 64. 10.1190/1.1444590.
- Plaxis. (2019). *Material Models Manual 2019*. Plaxis, 93-95.
- PRECUPA. (1998). *Prevención de Desastres Naturales en la Cuenca del Paute*. Cuenca.
- Ramírez, L. (2012). *Comprobación de los Parámetros de Adquisición Sísmica*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
- San Martín, C. (2015). Estudio de la Eficiencia de Diferentes Configuraciones de Geófonos para la Utilización del Método ESAC. Concepción: Universidad del Bio-Bio.
- Sauter, F. (1989). *Introducción a la Sismología*. Castago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Semblat, J., & Pecker, A. (2009). *Waves and Vibrations in Soils*. Pavía: Istituto Universitario di Studi Superiori.
- Terzaghi, K. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: John Wiley and Sons.
- Tezcan, S., & Ozdemir, Z. (2011). A Refined Formula for the Allowable Soil Pressure Using Shear Wave Velocities. *The Open Civil Engineering Journal*, 1-8.
- Vélez, P. (2012). *Comprobación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índices en suelos del sector Challuabamba, Cuenca*. Proyecto de graduación previo a la obtención del grado de Magíster en Geología Aplicada y Geotecnia. Cuenca: Universidad de Cuenca.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados obtenidos mediante ensayos de clasificación.

TESIS: CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.						
UBICACIÓN: AVE. GAPAL Y ALFREDO ESPINOSA, SECTOR GAPAL						
DESCRIPCION DEL SUELO: SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR GRIS OSCURO						
FECHA: 30/07/2019 PROFUNDIDAD DE LA CALICATA: 1,5 - 2m						
ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN						
ABERTURA mm	TAMIZ ASTM	PESO RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
4,75	N. 4	8,90	8,90	1,96	1,96	98
2,38	N. 8	13,10	22,00	2,89	4,85	95,15
1,19	N. 16	25,80	47,80	5,69	10,54	89,46
0,59	N. 30	48,30	96,10	10,65	21,20	78,80
0,43	N. 40	41,20	137,30	9,09	30,28	69,72
0,297	N. 50	47,10	184,40	10,39	40,67	59,33
0,149	N. 100	140,90	325,30	31,08	71,75	28,25
0,074	N. 200	107,40	432,70	23,69	95,43	4,57
	PASA 200	20,70	453,40	4,57	100	
	TOTAL	453,40		100		
ENSAYO DE GRANULOMETRIA						ASTM D-422
ANTES DEL LAVADO				1000	gr	
DESPUES DEL LAVADO				453,40	gr	
% GRAVA				0,89	%	
% ARENA				44,45	%	
% FINOS				54,66	%	

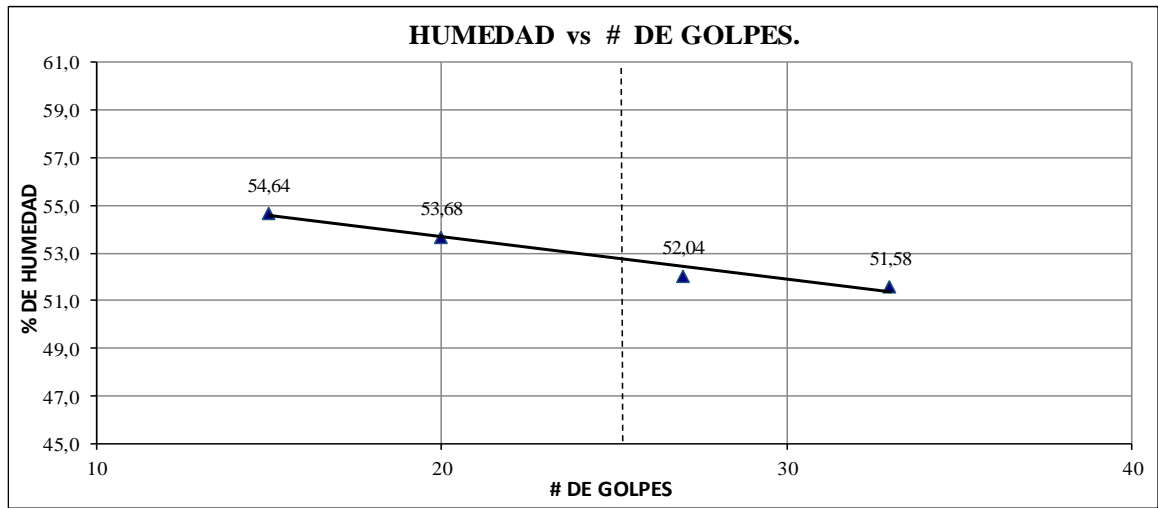




HUMEDAD NATURAL						ASTM D-2216
N° TARRO	N° GOLPES	PESO HUMEDO	PESO SECO	PESO TARRO	% DE HUMEDAD	% PROMEDIO
A	----	69,60	63,70	44,70	31,05	
B	----	62,30	58,00	44,70	32,33	
						31,69

LIMITE LIQUIDO						ASTM D-4318
A	15	103,50	98,20	88,50	54,64	
B	20	54,90	49,80	40,30	53,68	
C	27	61,00	55,90	46,10	52,04	
D	33	59,80	54,90	45,40	51,58	
						52,60

LIMITE PLASTICO						ASTM D-4318
A	----	39,80	39,50	38,90	50,00	
B	----	51,50	51,10	50,30	50,00	
						50,00



HUMEDAD NATURAL:	31,69
LIMITE LIQUIDO:	52,60
INDICE PLASTICO:	2,60
SIMBOLO DEL GRUPO	MH
NOMBRE DEL GRUPO	LIMO ELÁSTICO ARENOSO



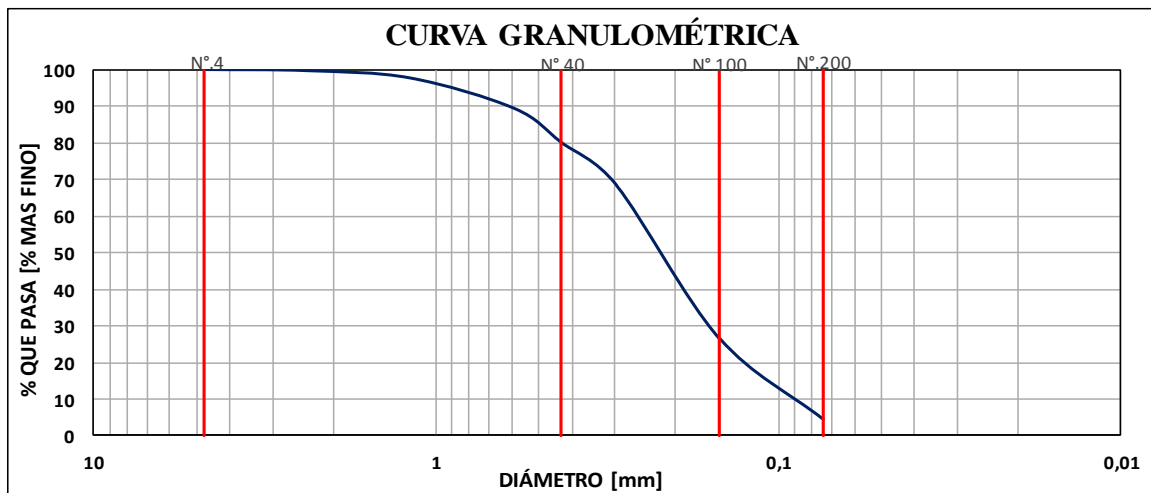
TESIS: **CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.**
UBICACIÓN: CALLE ROSALINO QUINTERO, SECTOR MIRAFLORES
DESCRIPCIÓN DEL SUELO: SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR MARRÓN CLARO
FECHA: 30/07/2019 **PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:** 1,5 - 2m

ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN

ABERTURA mm	TAMIZ ASTM	PESO RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
4,75	N. 4	0	0,00	0,00	0,00	100
2,38	N. 8	1,2	1,20	0,31	0,31	99,69
1,19	N. 16	7,7	8,90	1,99	2,30	97,70
0,59	N. 30	32,3	41,20	8,34	10,63	89,37
0,43	N. 40	36,1	77,30	9,32	19,95	80,05
0,297	N. 50	45,1	122,40	11,64	31,59	68,41
0,149	N. 100	161,7	284,10	41,73	73,32	26,68
0,074	N. 200	86,3	370,40	22,27	95,59	4,41
	PASA 200	17,1	387,50	4,41	100	
	TOTAL	387,50		100		

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA ASTM D-422

ANTES DEL LAVADO	1000	gr
DESPUES DEL LAVADO	387,50	gr
% GRAVA	0	%
% ARENA	38,75	%
% FINOS	61,25	%

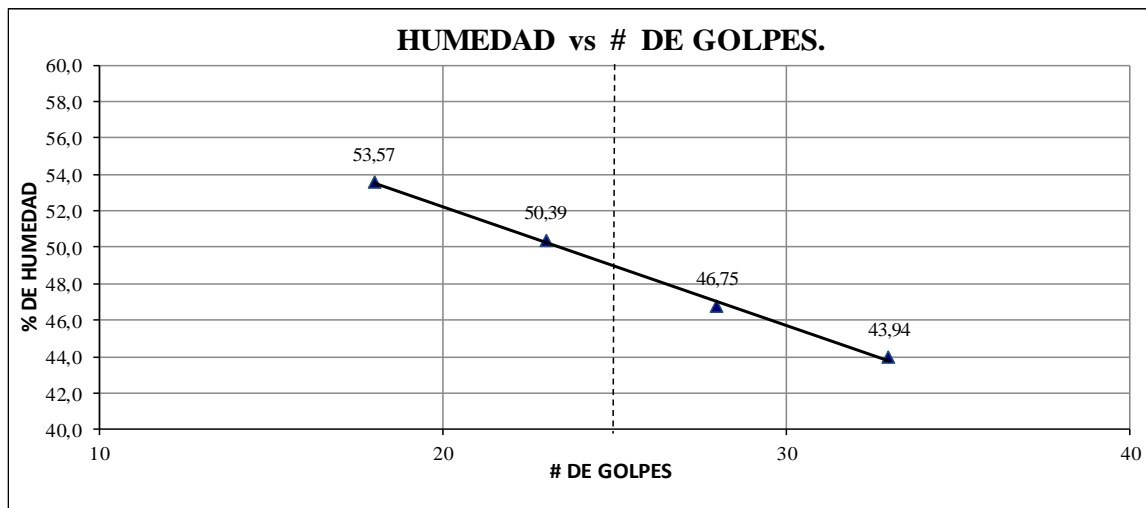




HUMEDAD NATURAL						ASTM D-2216
N° TARRO	N° GOLPES	PESO HUMEDO	PESO SECO	PESO TARRO	% DE HUMEDAD	% PROMEDIO
A	----	75,10	69,00	41,80	22,43	
B	----	114,80	110,00	88,50	22,33	
						22,38

LIMITE LIQUIDO						ASTM D-4318
A	18	59,00	53,00	41,80	53,57	
B	23	71,00	64,60	51,90	50,39	
C	28	55,20	51,60	43,90	46,75	
D	33	64,90	59,10	45,90	43,94	
						48,58

LIMITE PLASTICO						ASTM D-4318
A	----	45,50	45,30	44,60	28,57	
B	----	43,00	42,40	40,60	33,33	
						30,95



HUMEDAD NATURAL:	22,38
LIMITE LIQUIDO:	48,58
INDICE PLASTICO:	17,63
SIMBOLO DEL GRUPO	ML
NOMBRE DEL GRUPO	LIMO ARENOSO



TESIS: CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.
UBICACIÓN: CALLE DEL SUBCENTRO DE SALUD, SECTOR RICAURTE
DESCRIPCION DEL SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR GRIS CLARO
FECHA: 30/07/2019 PROFUNDIDAD DE LA CALICATA: 1,5 - 2m

ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN

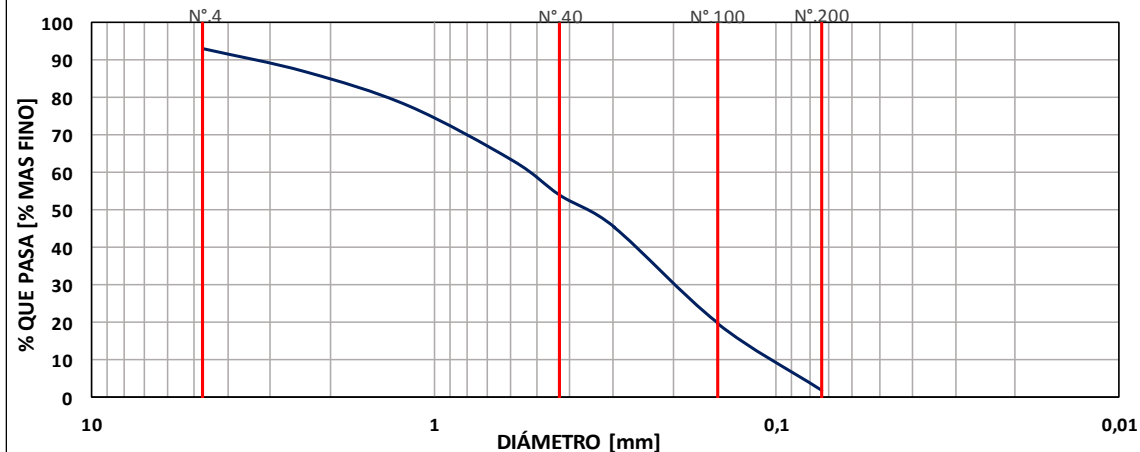
ABERTURA mm	TAMIZ ASTM	PESO RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
4,75	N. 4	31,8	31,80	6,83	6,83	93
2,38	N. 8	28,8	60,60	6,19	13,02	86,98
1,19	N. 16	42,3	102,90	9,09	22,10	77,90
0,59	N. 30	68,1	171,00	14,63	36,73	63,27
0,43	N. 40	43	214,00	9,24	45,96	54,04
0,297	N. 50	40,1	254,10	8,61	54,57	45,43
0,149	N. 100	119,2	373,30	25,60	80,18	19,82
0,074	N. 200	83	456,30	17,83	98,00	2,00
	PASA 200	9,3	465,60	2,00	100	
	TOTAL	465,60		100		

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

ASTM D-422

ANTES DEL LAVADO	1000	gr
DESPUES DEL LAVADO	465,60	gr
% GRAVA	3,18	%
% ARENA	43,38	%
% FINOS	53,44	%

CURVA GRANULOMÉTRICA

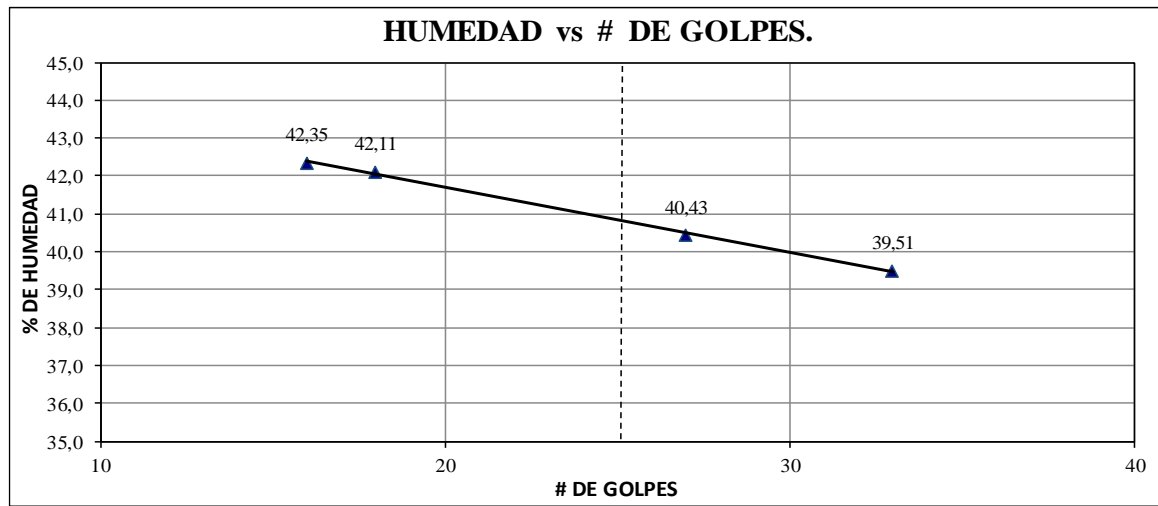




HUMEDAD NATURAL						ASTM D-2216
N° TARRO	N° GOLPES	PESO HUMEDO	PESO SECO	PESO TARRO	% DE HUMEDAD	% PROMEDIO
A	----	79,80	74,70	50,30	20,90	
B	----	71,10	65,50	40,60	22,49	
						21,70

LIMITE LIQUIDO						ASTM D-4318
A	16	57,00	53,40	44,90	42,35	
B	18	56,00	51,20	39,80	42,11	
C	27	59,90	56,10	46,70	40,43	
D	33	54,60	51,40	43,30	39,51	
						40,68

LIMITE PLASTICO						ASTM D-4318
A	----	47,50	46,90	45,30	37,50	
B	----	45,50	45,30	44,80	40,00	
						38,75



HUMEDAD NATURAL:	21,70
LIMITE LIQUIDO:	40,68
INDICE PLASTICO:	1,93
SIMBOLO DEL GRUPO	ML
NOMBRE DEL GRUPO	LIMO ARENOSO



TESIS: **CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.**
UBICACIÓN: CAMINO NUEVO A TURI, SECTOR TURI
DESCRIPCION DEL SUELO: SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR MELOCOTON
FECHA: 30/07/2019 **PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:** 1,5 - 2m

ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN

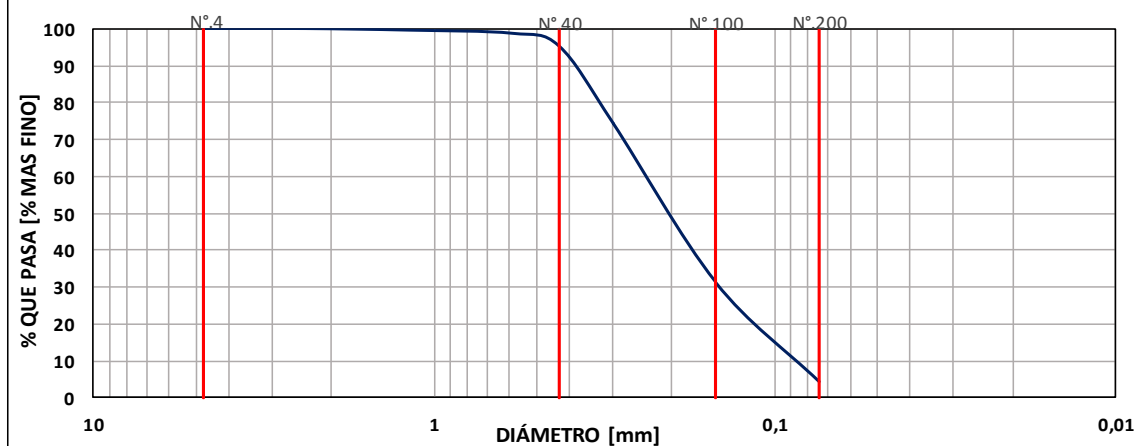
ABERTURA mm	TAMIZ ASTM	PESO RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
4,75	N. 4	0,00	0,00	0,00	0,00	100
2,38	N. 8	0,10	0,10	0,02	0,02	99,98
1,19	N. 16	2,00	2,10	0,42	0,45	99,55
0,59	N. 30	4,00	6,10	0,85	1,30	98,70
0,43	N. 40	16,00	22,10	3,40	4,70	95,30
0,297	N. 50	99,20	121,30	21,08	25,78	74,22
0,149	N. 100	201,70	323,00	42,86	68,64	31,36
0,074	N. 200	126,20	449,20	26,82	95,45	4,55
	PASA 200	21,40	470,60	4,55	100	
	TOTAL	470,60		100		

ENSAYO DE GRANULOMETRIA

ASTM D-422

ANTES DEL LAVADO	1000	gr
DESPUES DEL LAVADO	470,60	gr
% GRAVA	0	%
% ARENA	47,06	%
% FINOS	52,94	%

CURVA GRANULOMÉTRICA

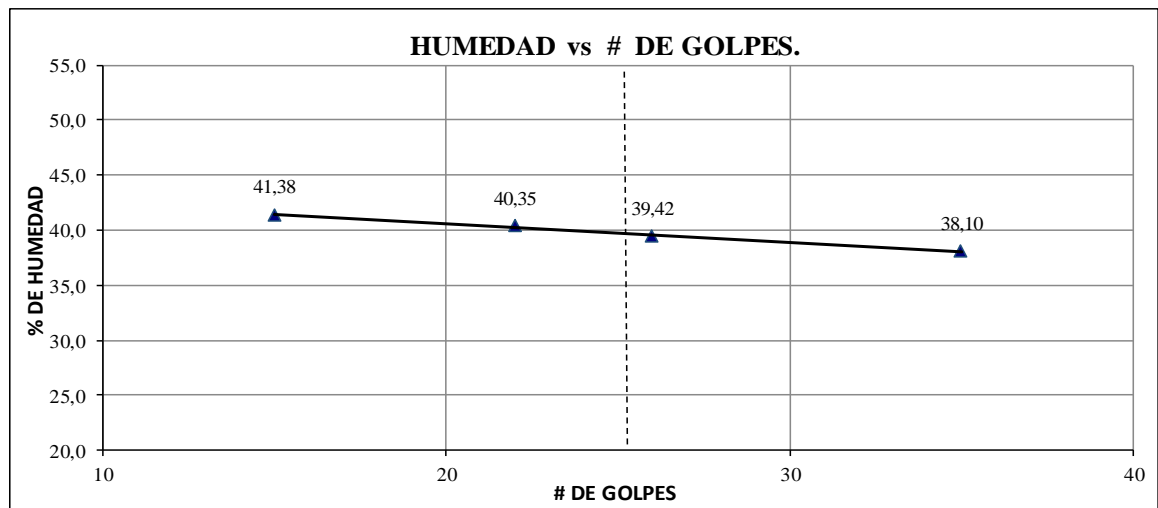




HUMEDAD NATURAL						ASTM D-2216
N° TARRO	N° GOLPES	PESO HUMEDO	PESO SECO	PESO TARRO	% DE HUMEDAD	% PROMEDIO
A	----	61,30	56,90	40,00	26,04	
B	----	53,80	51,10	41,20	27,27	
						26,65

LIMITE LIQUIDO						ASTM D-4318
A	15	57,80	54,20	45,50	41,38	
B	22	61,60	57,00	45,60	40,35	
C	26	58,60	54,50	44,10	39,42	
D	35	53,60	51,20	44,90	38,10	
						39,56

LIMITE PLASTICO						ASTM D-4318
A	----	43,70	43,20	41,80	35,71	
B	----	48,50	47,90	46,10	33,33	
						34,52



HUMEDAD NATURAL:	26,65
LIMITE LIQUIDO:	39,56
INDICE PLASTICO:	5,04
SIMBOLO DEL GRUPO	ML
NOMBRE DEL GRUPO	LIMO ARENOSO



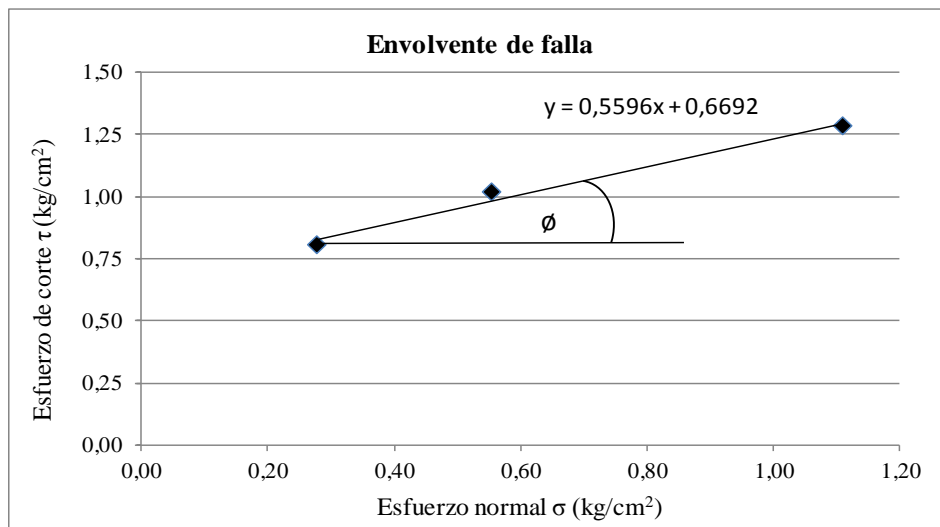
Anexo 2. Resultados obtenidos mediante los ensayos de corte directo.

TESIS:	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.		
UBICACIÓN:	AVE. GAPAL Y ALFREDO ESPINOSA, SECTOR GAPAL		
DESCRIPCION DEL SUELO:	SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR GRIS OSCURO		
FECHA:	30/07/2019	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:	1,5 - 2m
ENSAYO DE CORTE DIRECTO UU			ASTM D-3086

Resumen de datos:

Especimen	Esfuerzo normal σ	Esfuerzo de corte τ	Criterio Mohr - Coulomb $\tau = c + \sigma \tan \phi$	
			c (kg/cm ²)	ϕ (°)
#	kg/cm ²	kg/cm ²		
Muestra # 1	0,28	0,80	0,67	29,23
Muestra # 2	0,56	1,01		
Muestra # 3	1,11	1,28		

Grafico de la Envolvente de falla criterio de Mohr - Coulomb:



Resultados		
c =	0,67	kg/cm ²
$\phi =$	29,23	°

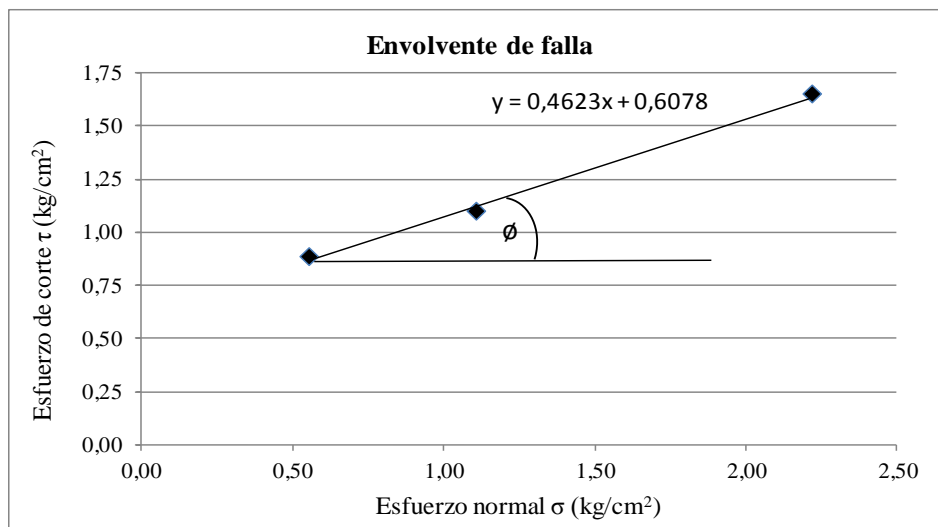


TESIS:	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.		
UBICACIÓN:	AVE. GAPAL Y ALFREDO ESPINOSA, SECTOR GAPAL		
DESCRIPCION DEL SUELO:	SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR GRIS OSCURO		
FECHA:	30/07/2019	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:	1,5 - 2m
ENSAYO DE CORTE DIRECTO UU			ASTM D-3086

Resumen de datos:

Especimen #	Esfuerzo normal σ (kg/cm ²)	Esfuerzo de corte τ (kg/cm ²)	Criterio Mohr - Coulomb $\tau = c + \sigma \tan \phi$	
			c (kg/cm ²)	ϕ (°)
Muestra # 1	0,56	0,88	0,61	24,81
Muestra # 2	1,11	1,09		
Muestra # 3	2,22	1,64		

Grafico de la Envolvente de falla criterio de Mohr - Coulomb:



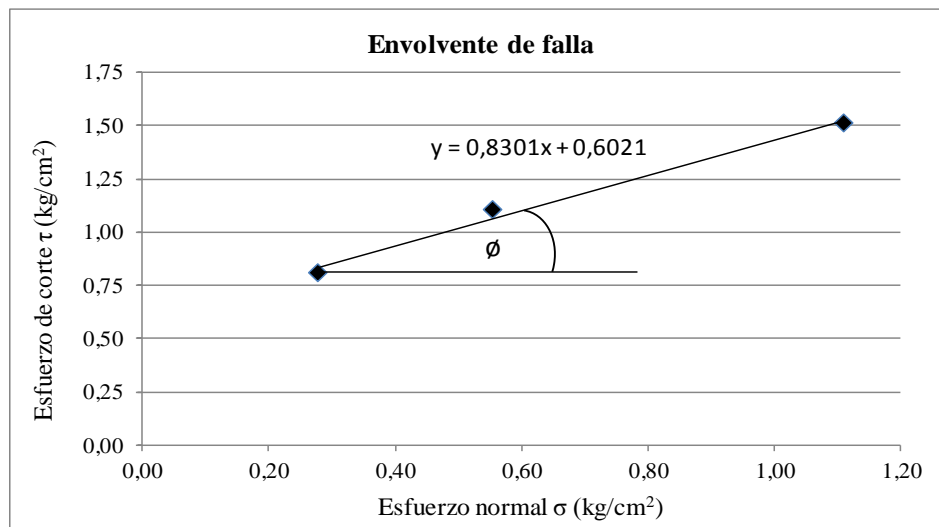
Resultados		
c =	0,61	kg/cm ²
$\phi =$	24,81	°

TESIS:	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.		
UBICACIÓN:	CALLE ROSALINO QUINTERO, SECTOR MIRAFLORES		
DESCRIPCION DEL SUELO:	SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR MARRÓN CLARO		
FECHA:	30/07/2019	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:	1,5 - 2m
ENSAYO DE CORTE DIRECTO UU			ASTM D-3086

Resumen de datos:

Especimen #	Esfuerzo normal σ kg/cm ²	Esfuerzo de corte τ kg/cm ²	Criterio Mohr - Coulomb $\tau = c + \sigma \tan \phi$	
			c (kg/cm ²)	ϕ (°)
Muestra # 1	0,28	0,81	0,60	39,70
Muestra # 2	0,56	1,10		
Muestra # 3	1,11	1,51		

Grafico de la Envolvente de falla criterio de Mohr - Coulomb:



Resultados	
c =	0,60 kg/cm ²
ϕ =	39,70 °

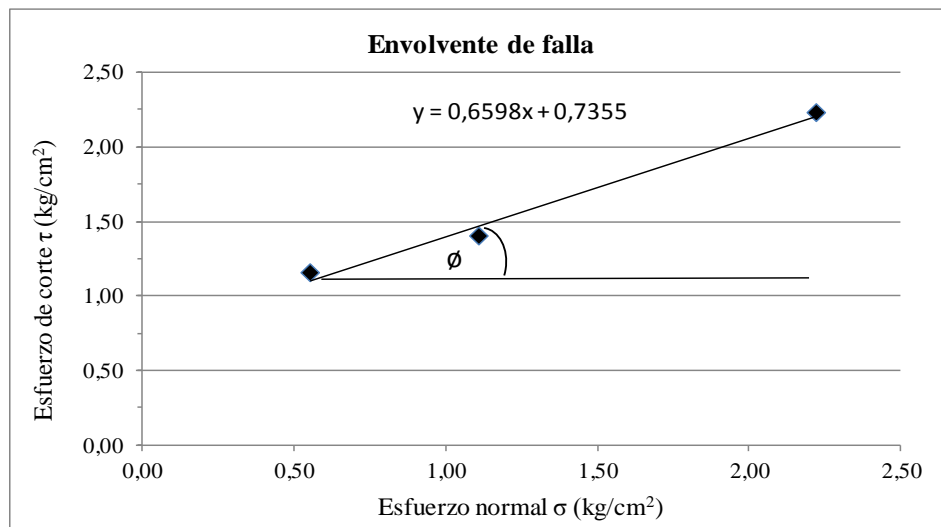


TESIS:	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.		
UBICACIÓN:	CALLE ROSALINO QUINTERO, SECTOR MIRAFLORES		
DESCRIPCION DEL SUELO:	SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR MARRÓN CLARO		
FECHA:	30/07/2019	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:	1,5 - 2m
ENSAYO DE CORTE DIRECTO UU			ASTM D-3086

Resumen de datos:

Especimen #	Esfuerzo normal σ (kg/cm ²)	Esfuerzo de corte τ (kg/cm ²)	Criterio Mohr - Coulomb $\tau = c + \sigma \tan \phi$	
			c (kg/cm ²)	ϕ (°)
Muestra # 1	0,56	1,15	0,74	33,42
Muestra # 2	1,11	1,40		
Muestra # 3	2,22	2,22		

Grafico de la Envolvente de falla criterio de Mohr - Coulomb:



Resultados		
c =	0,74	kg/cm ²
ϕ =	33,42	°

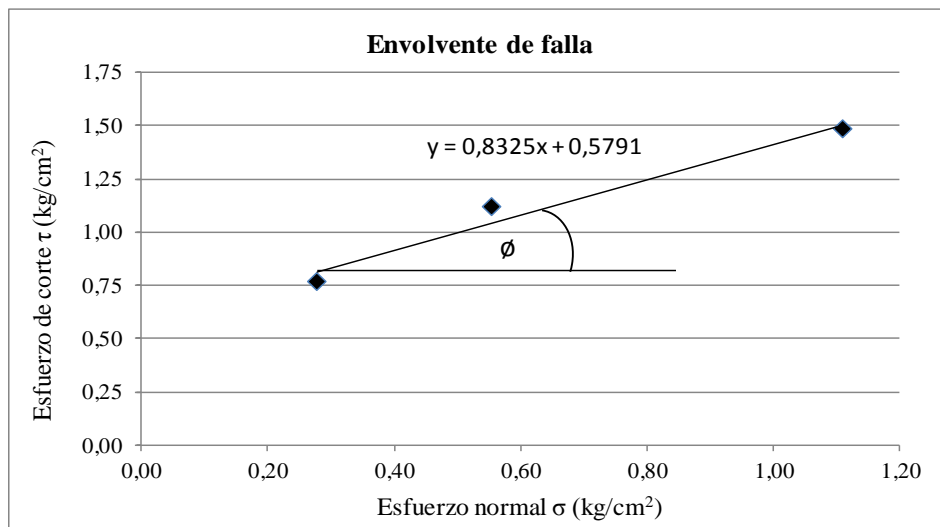


TESIS:	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.		
UBICACIÓN:	CALLE DEL SUBCENTRO DE SALUD, SECTOR RICAURTE		
DESCRIPCION DEL SUELO:	SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR GRIS CLARO		
FECHA:	30/07/2019	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:	1,5 - 2m
ENSAYO DE CORTE DIRECTO UU			ASTM D-3086

Resumen de datos:

Especimen #	Esfuerzo normal σ kg/cm ²	Esfuerzo de corte τ kg/cm ²	Criterio Mohr - Coulomb $\tau = c + \sigma \tan \phi$	
			c (kg/cm ²)	ϕ (°)
Muestra # 1	0,28	0,76	0,58	39,78
Muestra # 2	0,56	1,11		
Muestra # 3	1,11	1,48		

Grafico de la Envolvente de falla criterio de Mohr - Coulomb:



Resultados		
c =	0,58	kg/cm ²
ϕ =	39,78	°

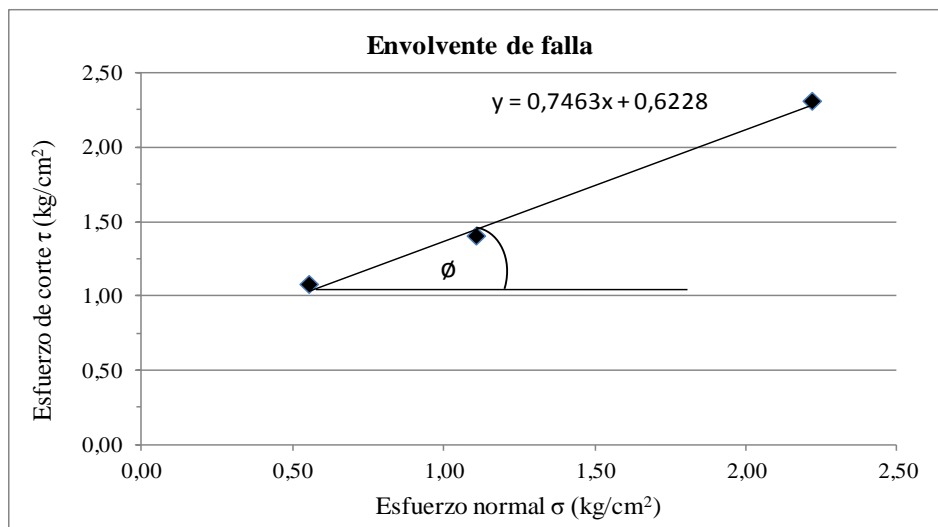


TESIS:	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.		
UBICACIÓN:	CALLE DEL SUBCENTRO DE SALUD, SECTOR RICAURTE		
DESCRIPCION DEL SUELO:	SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR GRIS CLARO		
FECHA:	30/07/2019	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:	1,5 - 2m
ENSAYO DE CORTE DIRECTO UU			ASTM D-3086

Resumen de datos:

Especimen #	Esfuerzo normal σ (kg/cm ²)	Esfuerzo de corte τ (kg/cm ²)	Criterio Mohr - Coulomb $\tau = c + \sigma \tan \phi$	
			c (kg/cm ²)	ϕ (°)
Muestra # 1	0,56	1,08	0,62	36,73
Muestra # 2	1,11	1,40		
Muestra # 3	2,22	2,30		

Grafico de la Envolvente de falla criterio de Mohr - Coulomb:



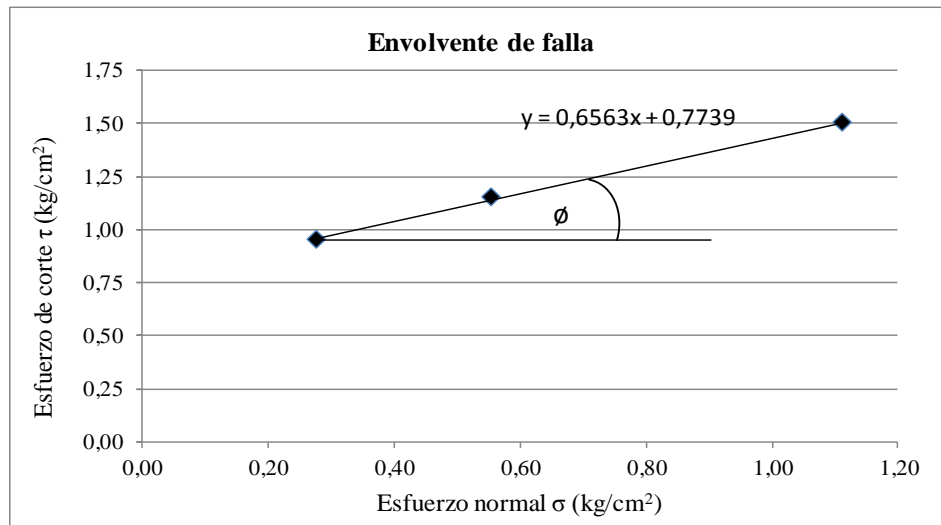
Resultados		
c =	0,62	kg/cm ²
$\phi =$	36,73	°

TESIS:	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.		
UBICACIÓN:	CAMINO NUEVO A TURI, SECTOR TURI		
DESCRIPCIÓN DEL SUELO:	SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR MELOCOTON		
FECHA:	30/07/2019	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:	1,5 - 2m
ENSAYO DE CORTE DIRECTO UU			ASTM D-3086

Resumen de datos:

Especimen #	Esfuerzo normal σ (kg/cm ²)	Esfuerzo de corte τ (kg/cm ²)	Criterio Mohr - Coulomb $\tau = c + \sigma \tan \phi$	
			c (kg/cm ²)	ϕ (°)
Muestra # 1	0,28	0,95	0,77	36,28
Muestra # 2	0,56	1,15		
Muestra # 3	1,11	1,50		

Grafico de la Envolvente de falla criterio de Mohr - Coulomb:



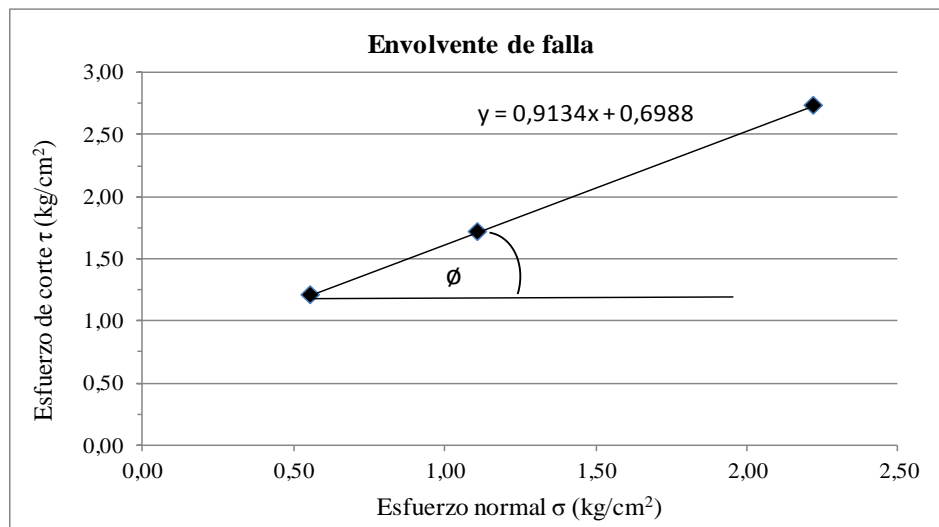
Resultados		
c =	0,77	kg/cm ²
ϕ =	36,28	°

TESIS:	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.		
UBICACIÓN:	CAMINO NUEVO A TURI, SECTOR TURI		
DESCRIPCION DEL SUELO:	SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR MELOCOTON		
FECHA:	30/07/2019	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:	1,5 - 2m
ENSAYO DE CORTE DIRECTO UU			ASTM D-3086

Resumen de datos:

Especimen #	Esfuerzo normal σ kg/cm ²	Esfuerzo de corte τ kg/cm ²	Criterio Mohr - Coulomb $\tau = c + \sigma \tan \phi$	
			c (kg/cm ²)	ϕ (°)
Muestra # 1	0,56	1,21	0,70	42,41
Muestra # 2	1,11	1,71		
Muestra # 3	2,22	2,73		

Grafico de la Envolvente de falla criterio de Mohr - Coulomb:



Resultados	
c =	0,70 kg/cm ²
ϕ =	42,41 °

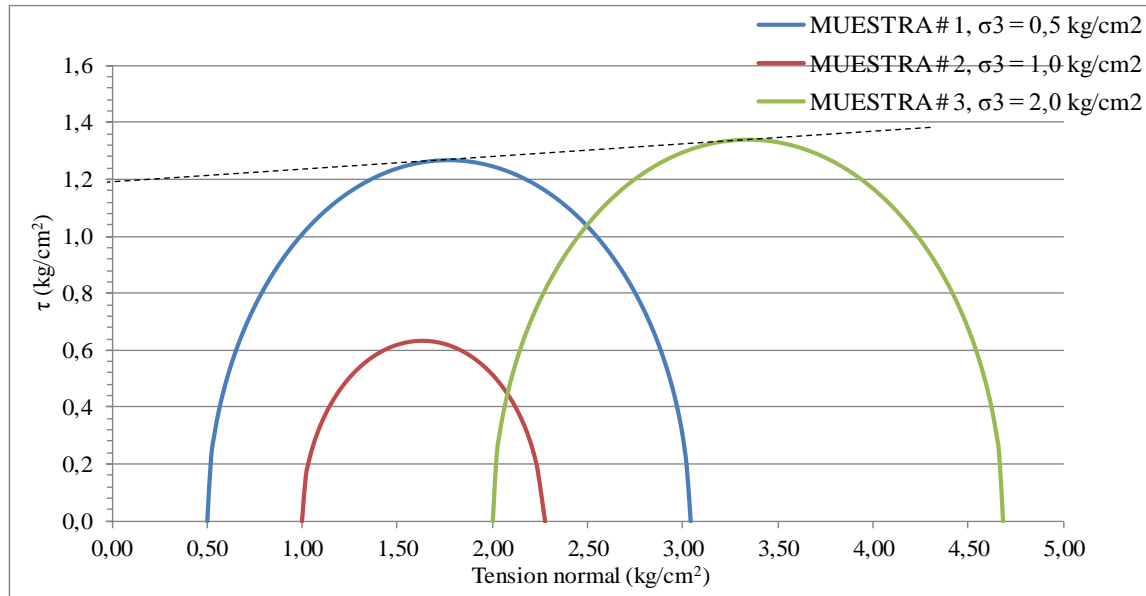
Anexo 3. Resultados obtenidos mediante los ensayos triaxiales.

TESIS:	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.		
UBICACIÓN:	AVE. GAPAL Y ALFREDO ESPINOSA, SECTOR GAPAL		
DESCRIPCION DEL SUELO:	SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR GRIS OSCURO		
FECHA:	30/07/2019	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:	1,5 - 2m
TRIAxIAL UU			ASTM D-2850

Resumen de datos:

MUESTRA #	TENSIONES		Criterio Mohr - Coulomb	
	σ_3 kg/cm ²	$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_f$ kg/cm ²	$\tau = c + \sigma \tan \phi$ c (kg/cm ²)	ϕ (°)
1	0,50	3,03	1,18	3
2	1,00	2,27		
3	2,00	4,68		

Grafico de la Envolvente de falla criterio de Mohr - Coulomb:



Resultados		
c =	1,18	kg/cm ²
ϕ =	3	°

Datos obtenidos en Autocad

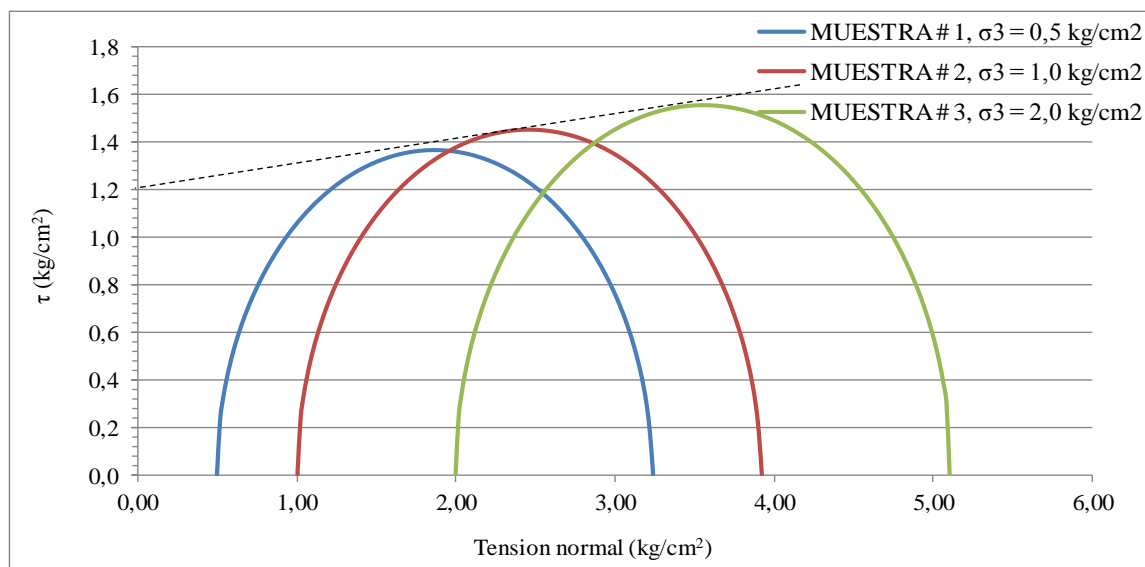


TESIS:	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.		
UBICACIÓN:	CALLE ROSALINO QUINTERO, SECTOR MIRAFLORES		
DESCRIPCION DEL SUELO:	SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR MARRÓN CLARO		
FECHA:	30/07/2019	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:	1,5 - 2m
TRIAxIAL UU			ASTM D-2850

Resumen de datos:

MUESTRA	TENSIONES		Criterio Mohr - Coulomb	
	σ_3	$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_f$	$\tau = c + \sigma \tan \phi$	
#	kg/cm ²	kg/cm ²	c (kg/cm ²)	ϕ (°)
1	0,50	3,231	1,20	5
2	1,00	3,912		
3	2,00	5,110		

Grafico de la Envolvente de falla criterio de Mohr - Coulomb:



Resultados		
c =	1,20	kg/cm ²
ϕ =	5	°

Datos obtenidos en Autocad

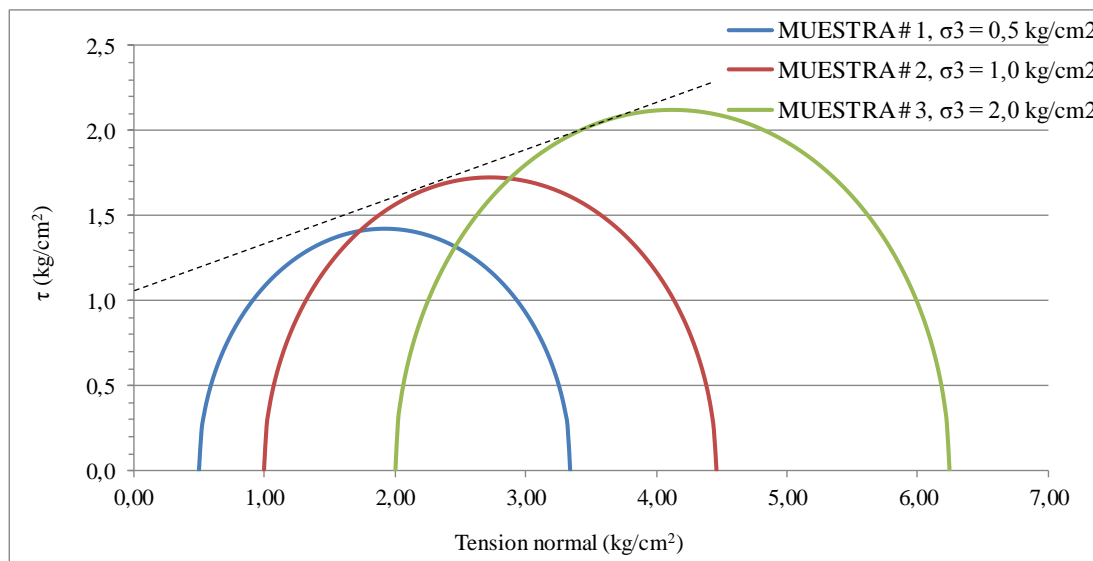


TESIS:	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.		
UBICACIÓN:	CALLE DEL SUBCENTRO DE SALUD, SECTOR RICAURTE		
DESCRIPCIÓN DEL SUELO:	SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR GRIS CLARO		
FECHA:	30/07/2019	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:	1,5 - 2m
TRIAxIAL UU			ASTM D-2850

Resumen de datos:

MUESTRA	TENSIONES		Criterio Mohr - Coulomb	
	σ_3	$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_f$	$\tau = c + \sigma \tan \phi$	
#	kg/cm ²	kg/cm ²	c (kg/cm ²)	ϕ (°)
1	0,50	3,344	1,10	12,85
2	1,00	4,457		
3	2,00	6,238		

Gráfico de la Envolvente de falla criterio de Mohr - Coulomb:



Resultados	
c =	1,10 kg/cm ²
ϕ =	12,85 °

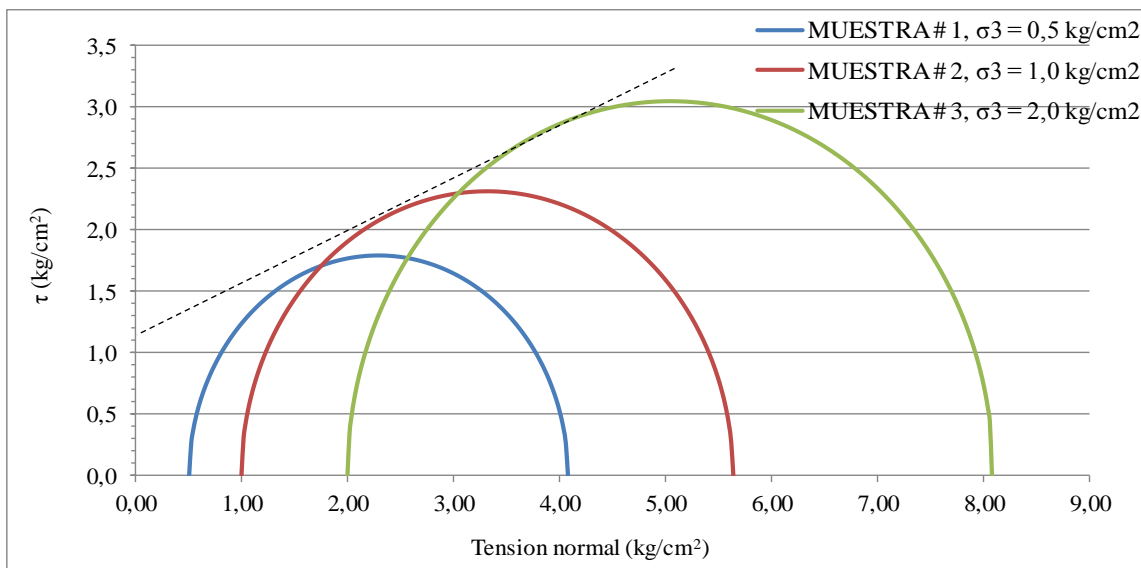
Datos obtenidos en Autocad

TESIS:	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FORMACIÓN MANGÁN, MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.		
UBICACIÓN:	CAMINO NUEVO A TURI, SECTOR TURI		
DESCRIPCIÓN DEL SUELO:	SUELO LIMOSO, CON ARENAS Y ARCILLAS DE COLOR MELOCOTON		
FECHA:	30/07/2019	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA:	1,5 - 2m
TRIAxIAL UU			ASTM D-2850

Resumen de datos:

MUESTRA	TENSIONES		Criterio Mohr - Coulomb	
	σ_3	$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_f$	$\tau = c + \sigma \tan \phi$	
#	kg/cm ²	kg/cm ²	c (kg/cm ²)	ϕ (°)
1	0,50	4,079	1,35	21,04
2	1,00	5,636		
3	2,00	8,091		

Gráfico de la Envolvente de falla criterio de Mohr - Coulomb:



Resultados	
c =	1,35 kg/cm ²
ϕ =	21,04 °

Datos obtenidos en Autocad

Anexo 4. Resultados obtenidos mediante los ensayos MASW.



MASW Analysis Report

Author: Pablo Marcelo Cárdenas Arias
Site: Ave. Gapal y Alfredo Espinosa, Sector Gapal
Date: 30/07/2019

Generated by MASW
(c) Vitantonio Roma. All rights reserved.

1 - Experimental data

Traces file name

C:\Users\GEO4\Desktop\GEOFISICA_P_CARDENAS\GEOFISICA_I\LM2\MASW\WF
RL5756_3D.dat

Number of sensors 11

Sensors distance: 1m

Number of time samples 16464

Acquisition timestep 0.125ms

Number of sensors used for the analysis 11

The interval considered for the analysis starts at 0ms

The interval considered for the analysis ends at 2057.88ms

Sensors are not reverted (the last one in the file is the last one for the analysis)

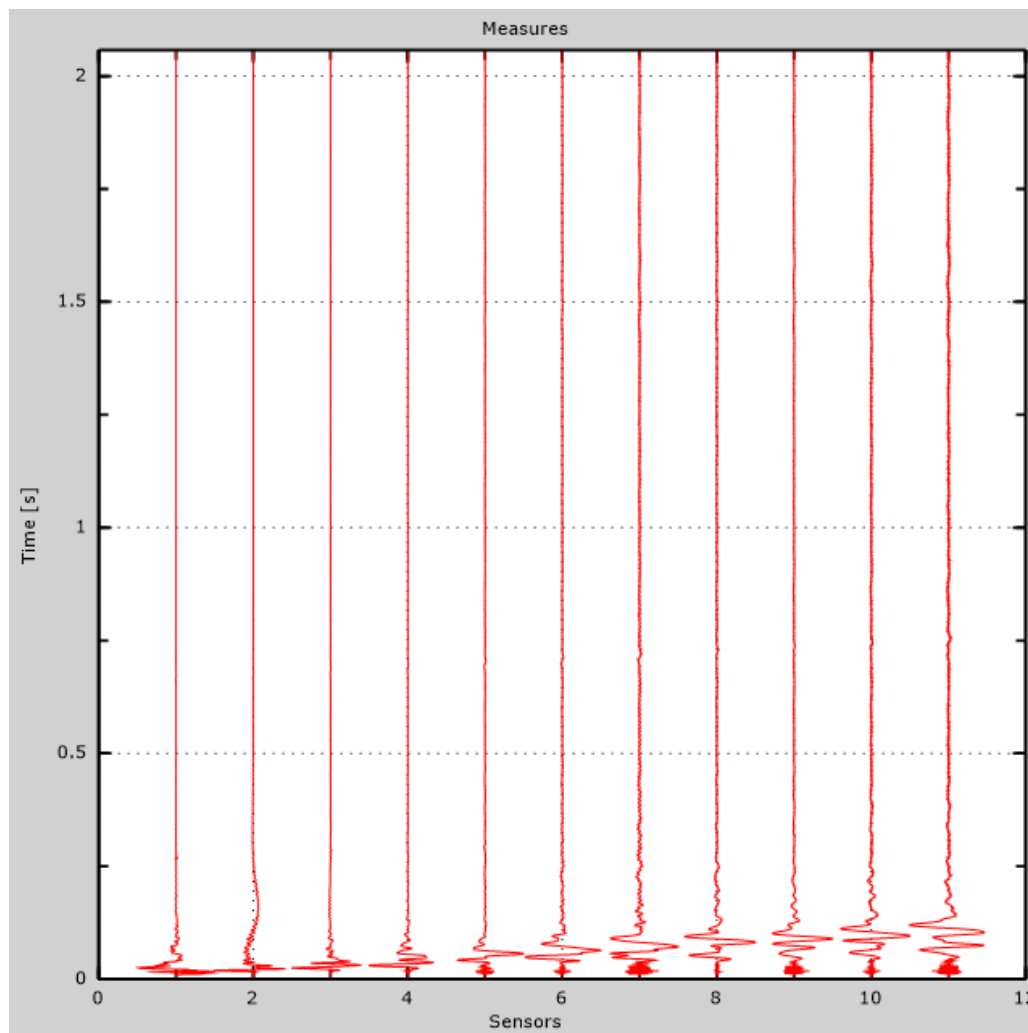


Figure 1: Experimental traces

2 - Analysis results

Final frequency 70Hz

Initial frequency 2Hz

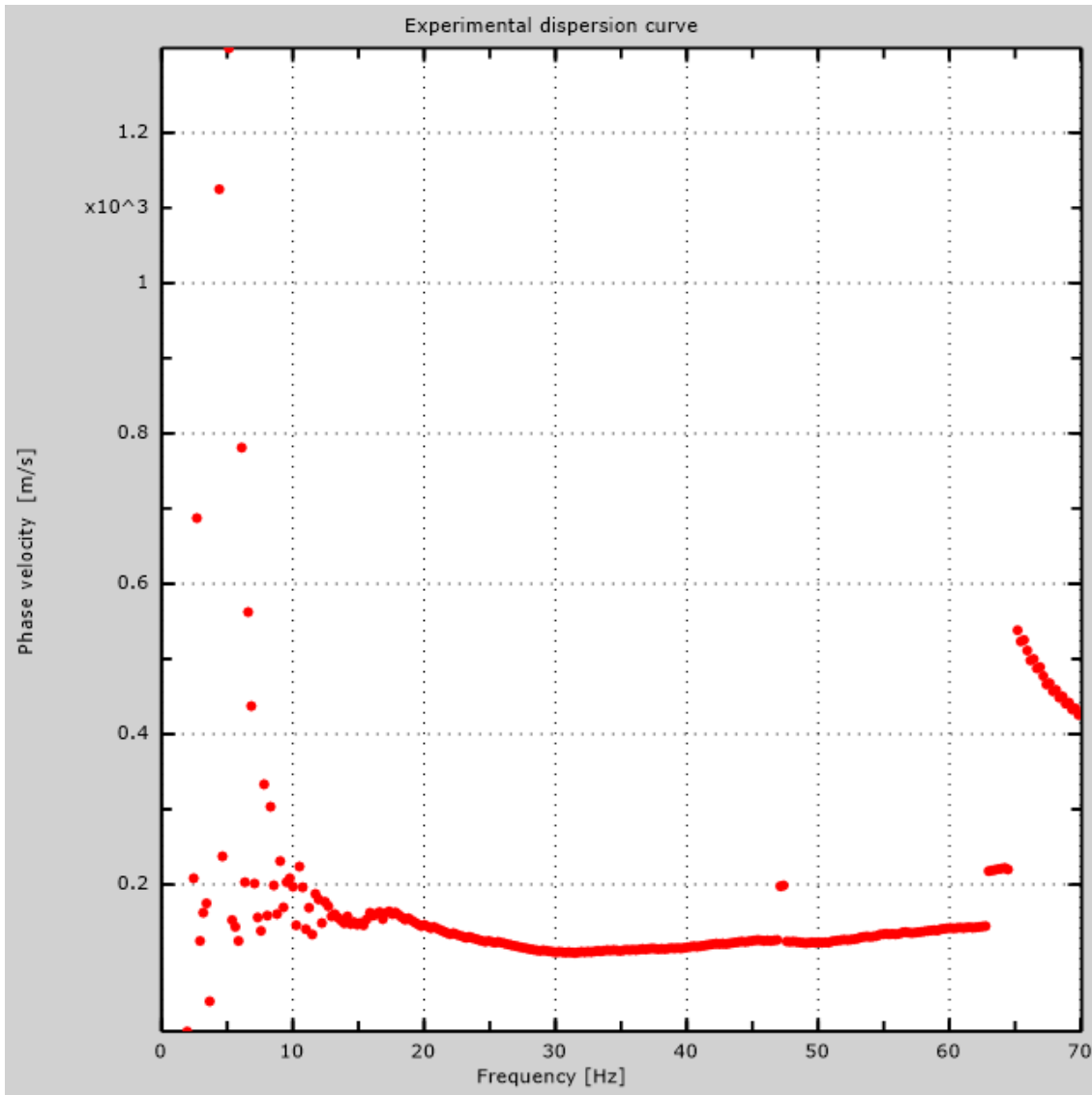


Figure 2: Experimental dispersion curve

3 - Analysis results (P)

Traces file name

C:\Users\GEO4\Desktop\GEOFISICA_P_CARDENAS\GEOFISICA_I\LM2\REMI\PAS I\WFRM0847.dat

Number of sensors23

Number of time samples3.26787e-312

Acquisition timestep2ms

Number of sensors used for the analysis.....23

The interval considered for the analysis starts at0ms

The interval considered for the analysis ends at65534ms

Sensors are not reverted (the last one in the file is the last one for the analysis)

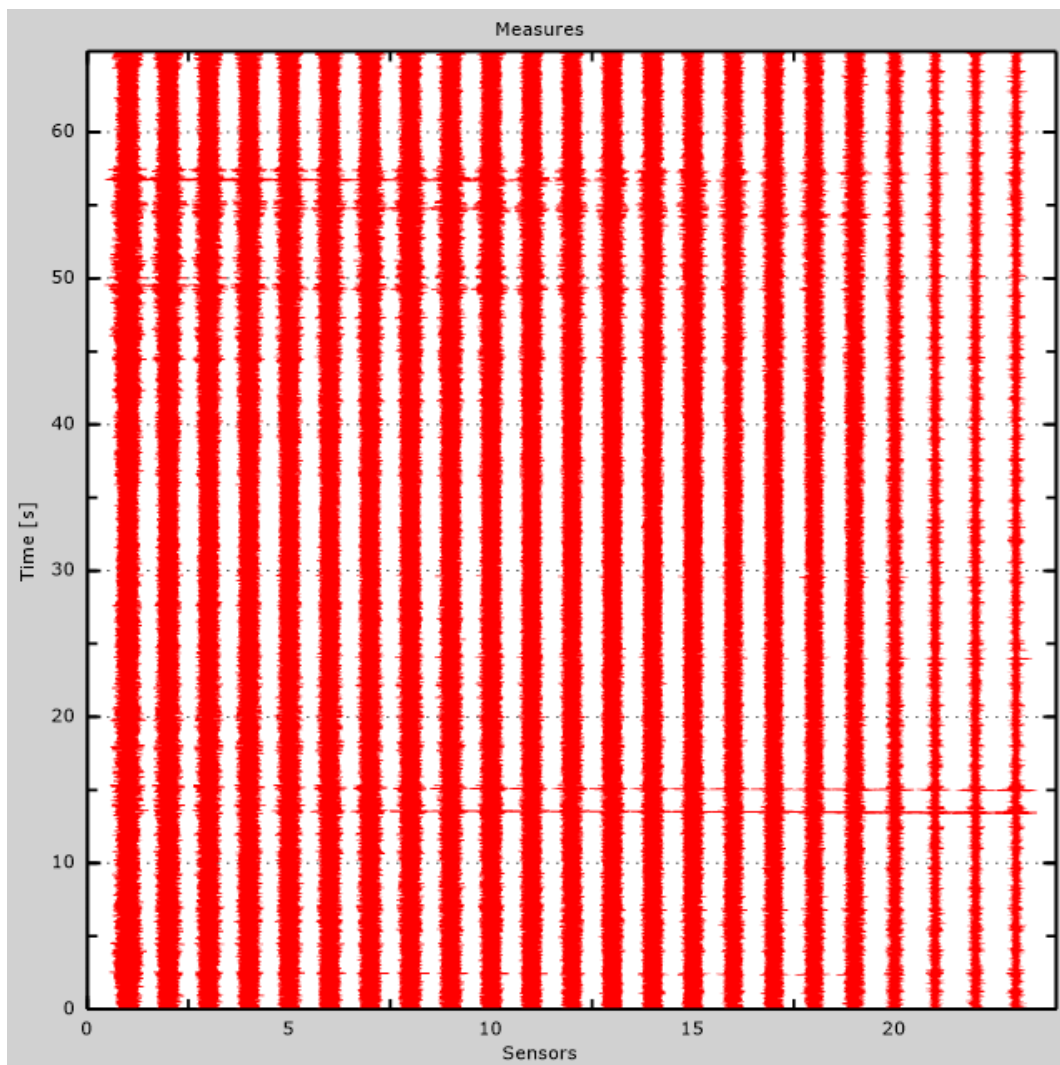


Figure 3: Experimental traces

4 - ESAC analysis

Traces file name

C:\Users\GEO4\Desktop\GEOFISICA_P_CARDENAS\GEOFISICA_I\LM2\ESAC\WF
RM3627.dat

Number of sensors 12
Number of time samples 327680
Acquisition timestep 2ms
The interval considered for the analysis starts at 0ms
The interval considered for the analysis ends at 655358ms
Window duration 10s
Overlap 0s
Smoothing 0.1
Cleaning threshold 0sd
Number of iterations 2

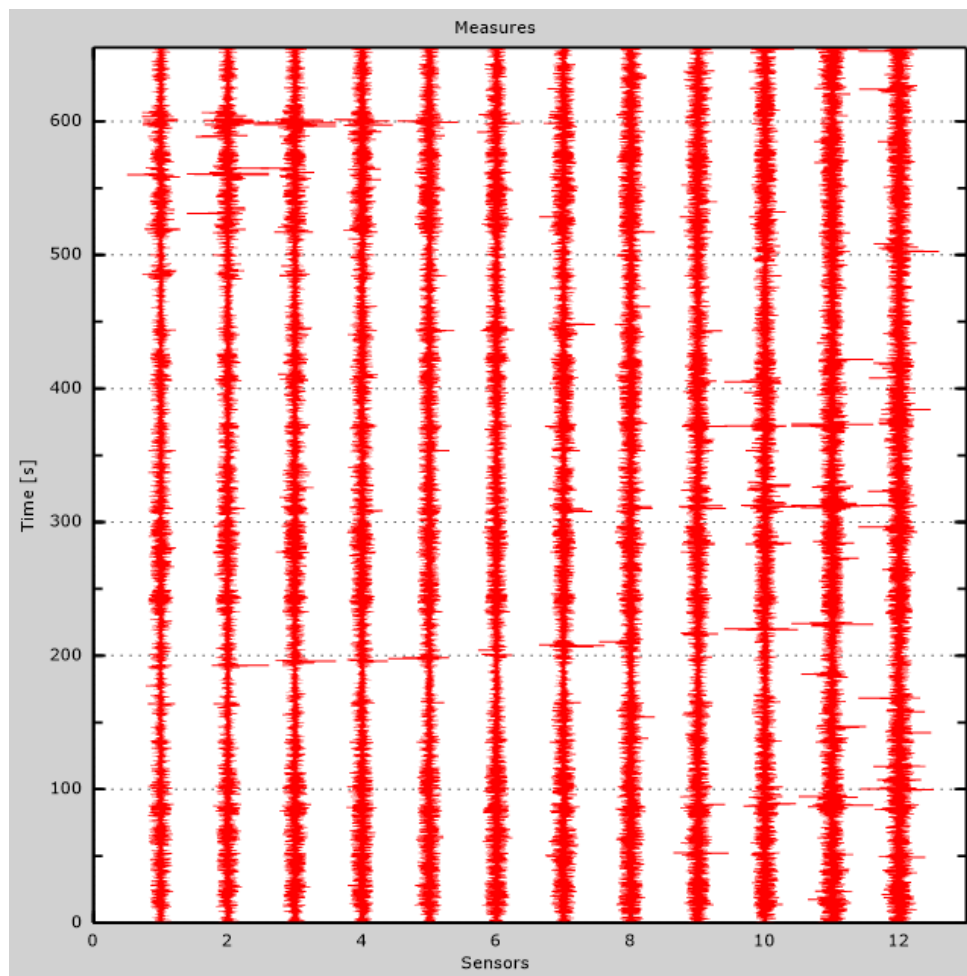


Figure 4: Experimental traces



Table 1: Geophones positions

X [m]	Y [m]
0	0
-3	0
-6	0
-9	0
-12	0
-15	0
-15	-5
-15	-10
-15	-15
-15	-20
-15	-25

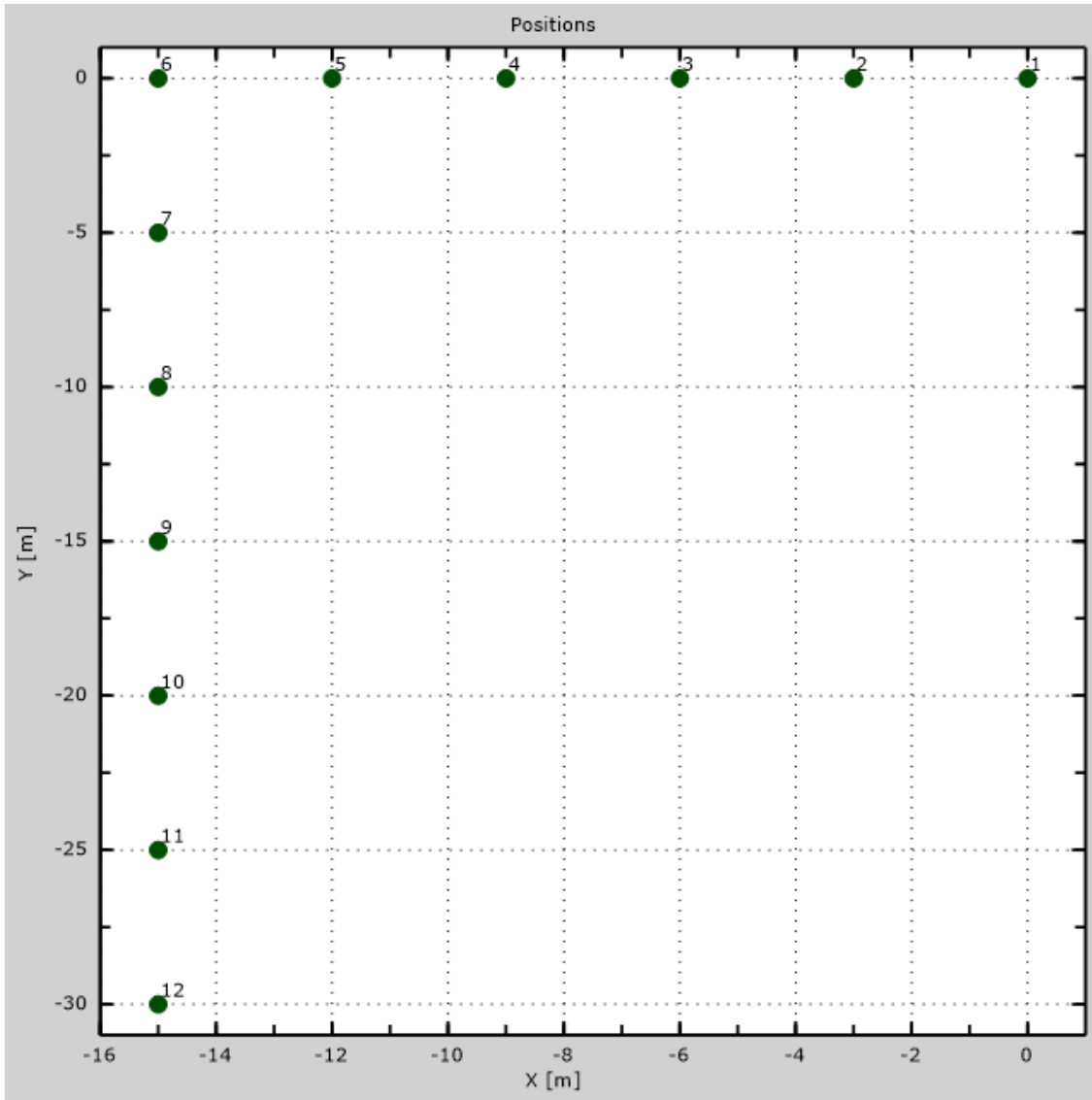


Figure 5: Geophones positions

5 - Dispersion curve

Table 2:Dispersion curve

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
3.97449	377.643	367.493	387.793
4.46755	364.448	360.388	368.508
4.86199	332.983	330.953	335.013
5.45365	319.788	315.728	323.848
6.11105	288.323	279.188	297.458
8.18187	272.083	268.023	276.143
9.75963	243.664	239.604	247.724
12.1263	212.199	206.109	218.289
13.6383	185.809	180.734	190.884
15.5448	171.599	159.419	183.779
16.4323	161.449	155.359	167.539
19.1605	150.284	144.194	156.374
25.7011	121.25	117.015	125.484
30.0031	108.017	103.782	112.251
33.9771	111.193	107.487	114.898
44.5499	122.838	119.133	126.543
50.6702	122.22	118.891	125.549
62.7951	142.858	138.863	146.852

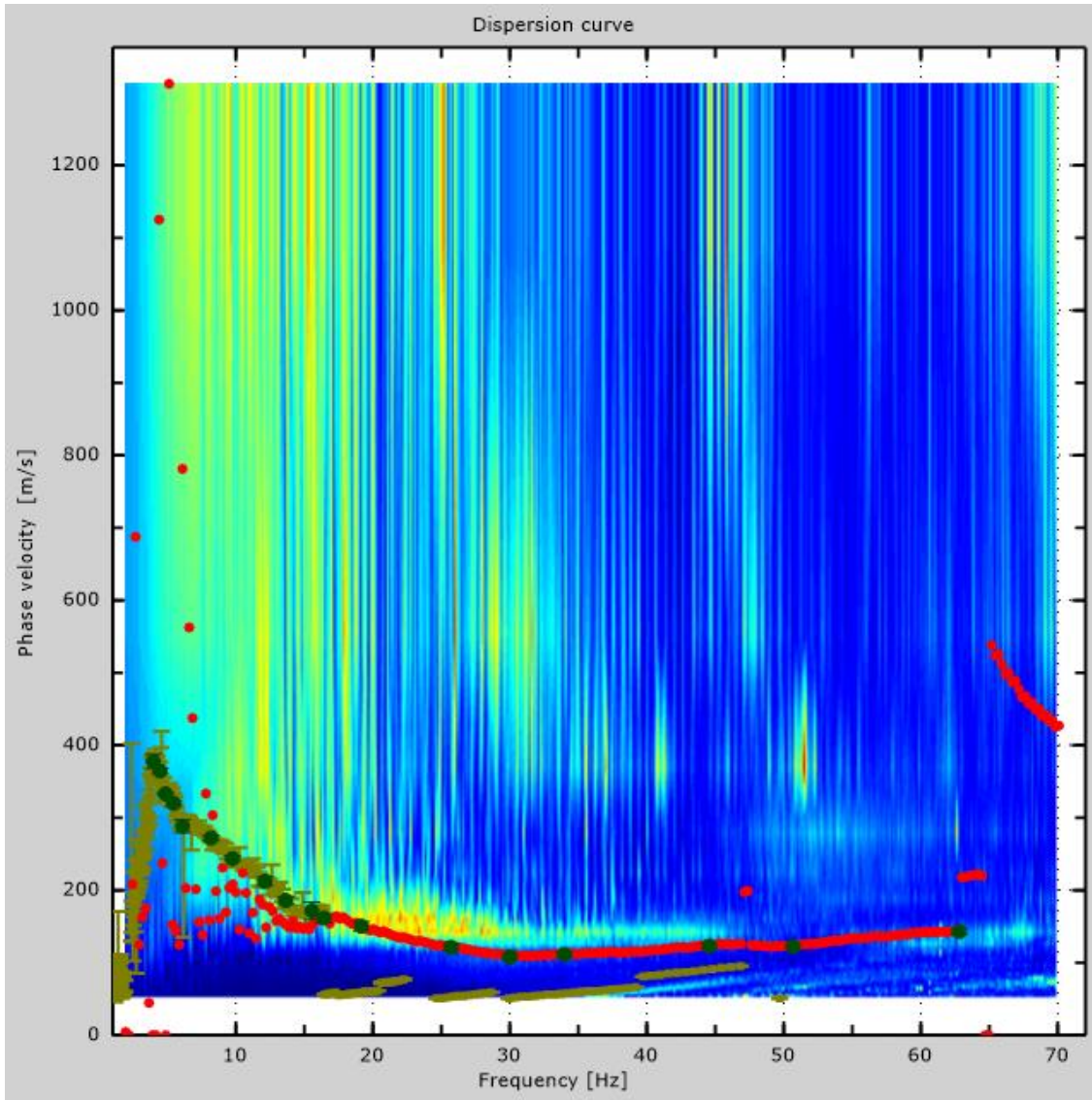


Figure 6: Dispersion curve



6 - Field profile

Number of layers (half-space excluded).....	9
Receivers spacing.....	1m
Number of receivers.....	11
Number of modes.....	1

Layer 1

h [m].....	1.5
z [m].....	-1.5
Density [kg/m ³].....	1441
Poisson.....	0.33
Vs [m/s].....	185
Vp [m/s].....	280
Vs min [m/s].....	68
Vs max [m/s].....	272
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s].....	185

Layer 2

h [m].....	3
z [m].....	-4.5
Density [kg/m ³].....	1516
Poisson.....	0.43
Vs [m/s].....	167
Vp [m/s].....	477
Vs min [m/s].....	83
Vs max [m/s].....	334
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s].....	167

Layer 3

h [m].....	3.5
z [m].....	-8
Density [kg/m ³].....	1653
Poisson.....	0.47
Vs [m/s].....	236
Vp [m/s].....	992
Vs min [m/s].....	118
Vs max [m/s].....	472



This layer is not water table

This layer is not alluvional

Vs fin.[m/s]236

Layer 4

h [m]4

z [m] -12

Density [kg/m³]1712

Poisson0.48

Vs [m/s].....271

Vp [m/s]1382

Vs min [m/s]135

Vs max [m/s].....541

This layer is not water table

This layer is not alluvional

Vs fin.[m/s]271

Layer 5

h [m]4

z [m] -16

Density [kg/m³]1758

Poisson0.2

Vs [m/s].....302

Vp [m/s]493

Vs min [m/s]151

Vs max [m/s].....605

This layer is not water table

This layer is not alluvional

Vs fin.[m/s]302

Layer 6

h [m]5

z [m] -21

Density [kg/m³]1784

Poisson0.2

Vs [m/s].....320

Vp [m/s]523

Vs min [m/s]160

Vs max [m/s].....641

This layer is not water table

This layer is not alluvional

Vs fin.[m/s]320



Layer 7

h [m].....	5
z [m].....	-26
Density [kg/m ³]	1831
Poisson	0.2
Vs [m/s].....	355
Vp [m/s]	580
Vs min [m/s]	178
Vs max [m/s].....	711
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	355

Layer 8

h [m].....	6
z [m].....	-32
Density [kg/m ³]	1910
Poisson	0.2
Vs [m/s].....	420
Vp [m/s]	686
Vs min [m/s]	185
Vs max [m/s].....	630
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	420

Layer 9

h [m].....	0
z [m].....	-00
Density [kg/m ³]	1910
Poisson	0.2
Vs [m/s].....	420
Vp [m/s]	686
Vs min [m/s]	210
Vs max [m/s].....	839
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	420

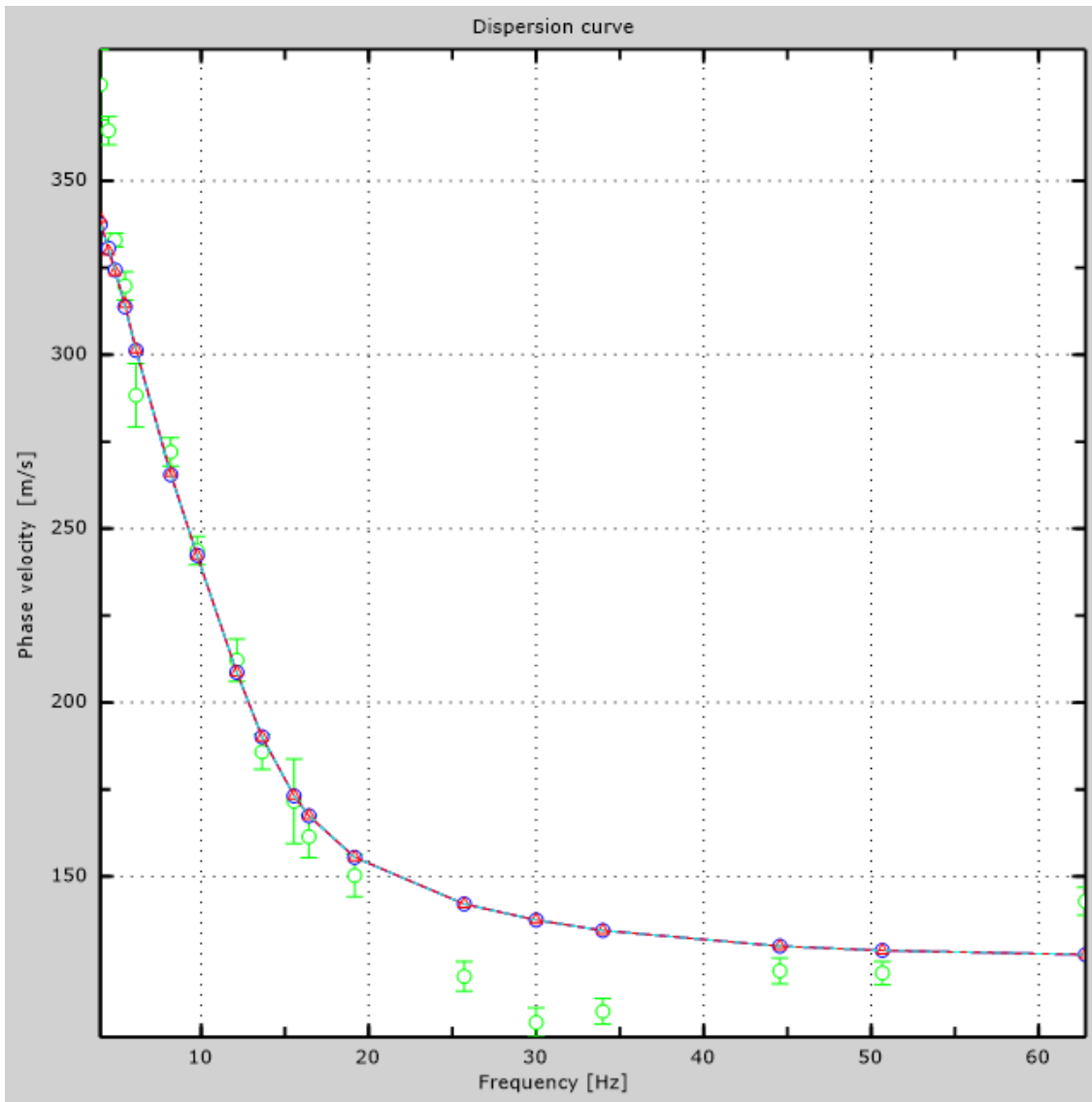


Figure 7: Numerical velocities - experimental points (green), Rayleigh modes (cyan), apparent curve (blue), numerical curve (red)

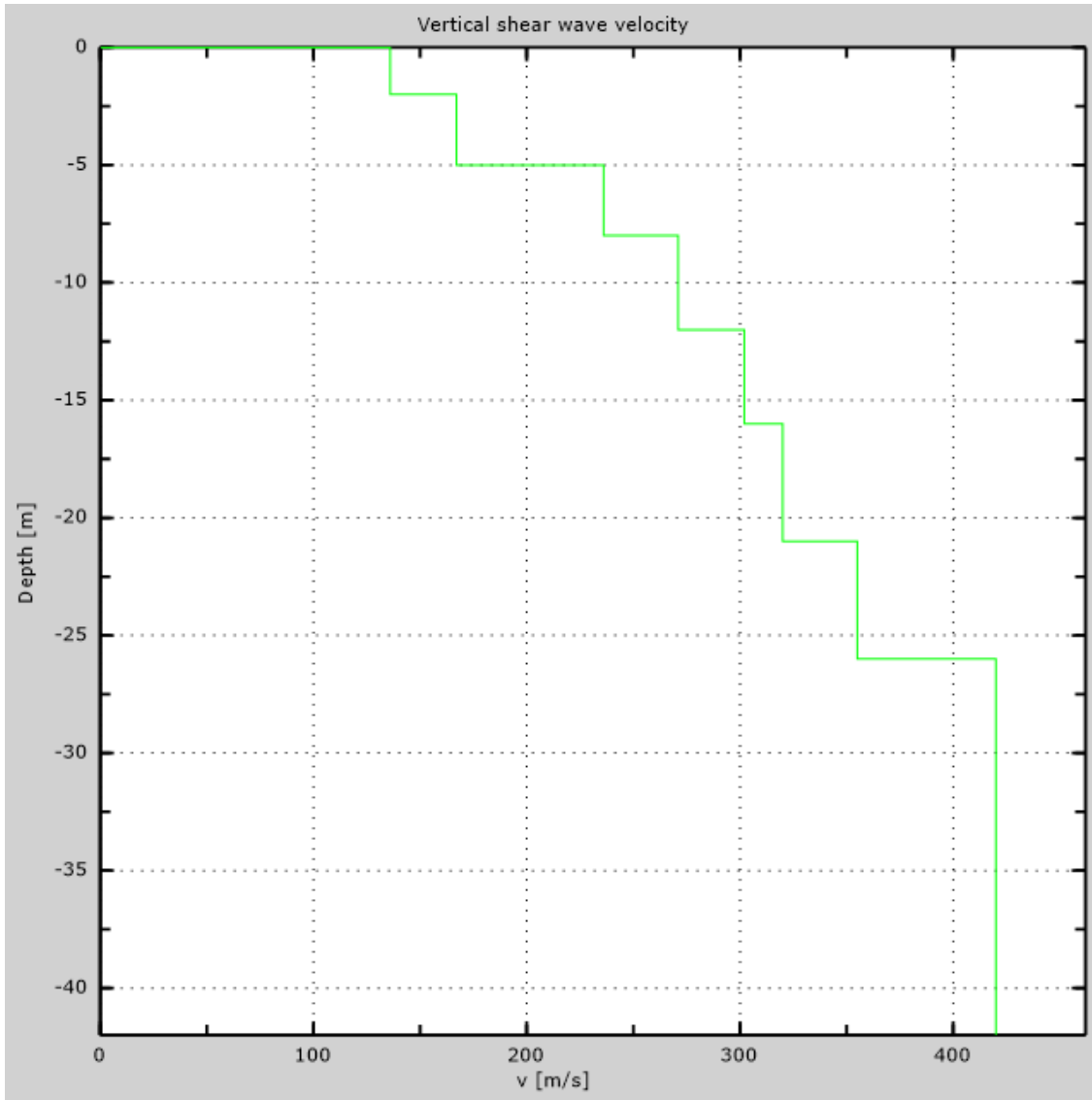


Figure 8: Numerical Vs profile



7 - Final results

Reference plane $z=0$ [m].....	0
V_{s30} [m/s].....	266
You are using the definitions included in O.P.C.M. n. 3274/2003 "Ex Testo Unico sulle costruzioni" and Eurocodice 8	
The site does belongs to classes A, B, C, D, E or S1 (alluvional soil, gravel, sand, silt, clay, rock).	
The site is not susceptible to liquefaction or there is not sensitive clay.	
Soil type	S2

Appendix Type of ground

Type A: Lithoid formations or very rigid homogenous soils characterized by values of $V_{s30} > 800$ m/s, inclusive of any superficial alteration strata with a maximum thickness of 5m

Type B: Deposits of very thickened gravels or sands or very consistent clays, with a thickness of several tens of meters, characterized by a gradual improvement of mechanical properties with depth and by V_{s30} values between 360 m/s and 800 m/s

Type C: Deposits of medium thickened gravels or sands or medium consistent clays, with a thickness varying from several tens to hundreds of meters, characterized by V_{s30} values between 180 m/s and 360 m/s

Type D: Deposits of granular matter, from loose to lightly thickened, or cohesive matter, of light to medium consistence, characterized by values of $V_{s30} < 180$ m/s

Type E: Soil profiles made of alluvial surface strata, with V_s values similar to the C or D type and with a thickness between 5m and 20m, lying on a substratum of more rigid material with $V_s > 800$ m/s

Type S1: Deposits made of, or including, one stratum at least 10m thick of clays/silts of low consistency, with a high level of plasticity ($IP > 40$) and water content, characterized by values of $V_{s30} < 100$ m/s

Type S2: Deposits of soils that are subject to liquefaction, of sensitive clays or of any other soil category that cannot be classified in the previous types



MASW Analysis Report

Author: Pablo Marcelo Cárdenas Arias
Site: Calle Rosalino Quintero, Sector Miraflores
Date: 30/07/2019

Generated by MASW
(c) Vitantonio Roma. All rights reserved.

1 - Experimental data

Traces file name G:\2019\20_ROSALINO\GEOFISICA\LM1\MASW\VGLM5427_3I.dat

Number of sensors 12

Sensors distance: 1.5m

Number of time samples 16464

Acquisition timestep 0.125ms

Number of sensors used for the analysis 12

The interval considered for the analysis starts at 0ms

The interval considered for the analysis ends at 2057.88ms

Sensors are reverted (the last one in the file is the first one for the analysis)

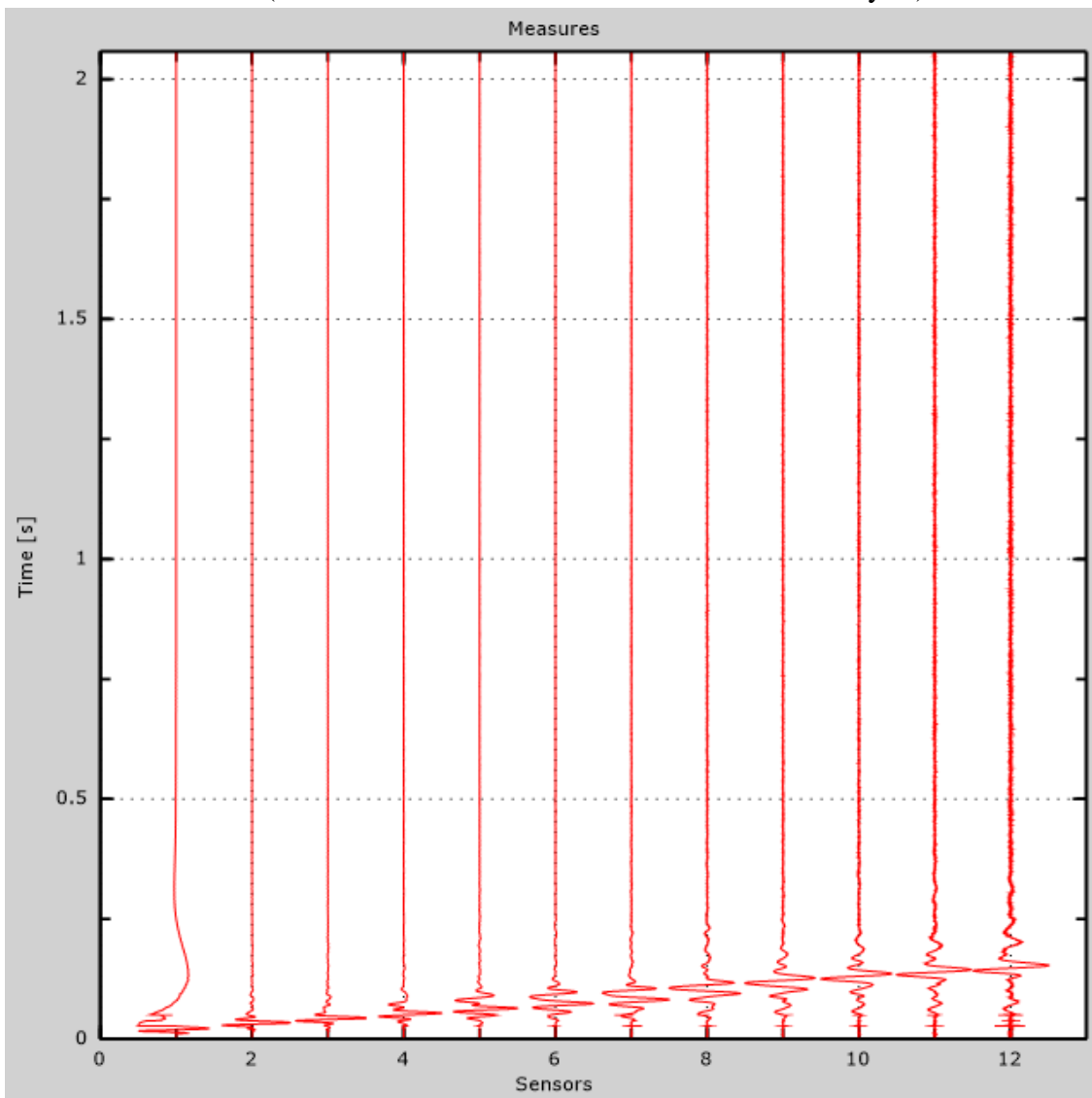


Figure 1: Experimental traces

2 - Analysis results

Final frequency 70Hz

Initial frequency 2Hz

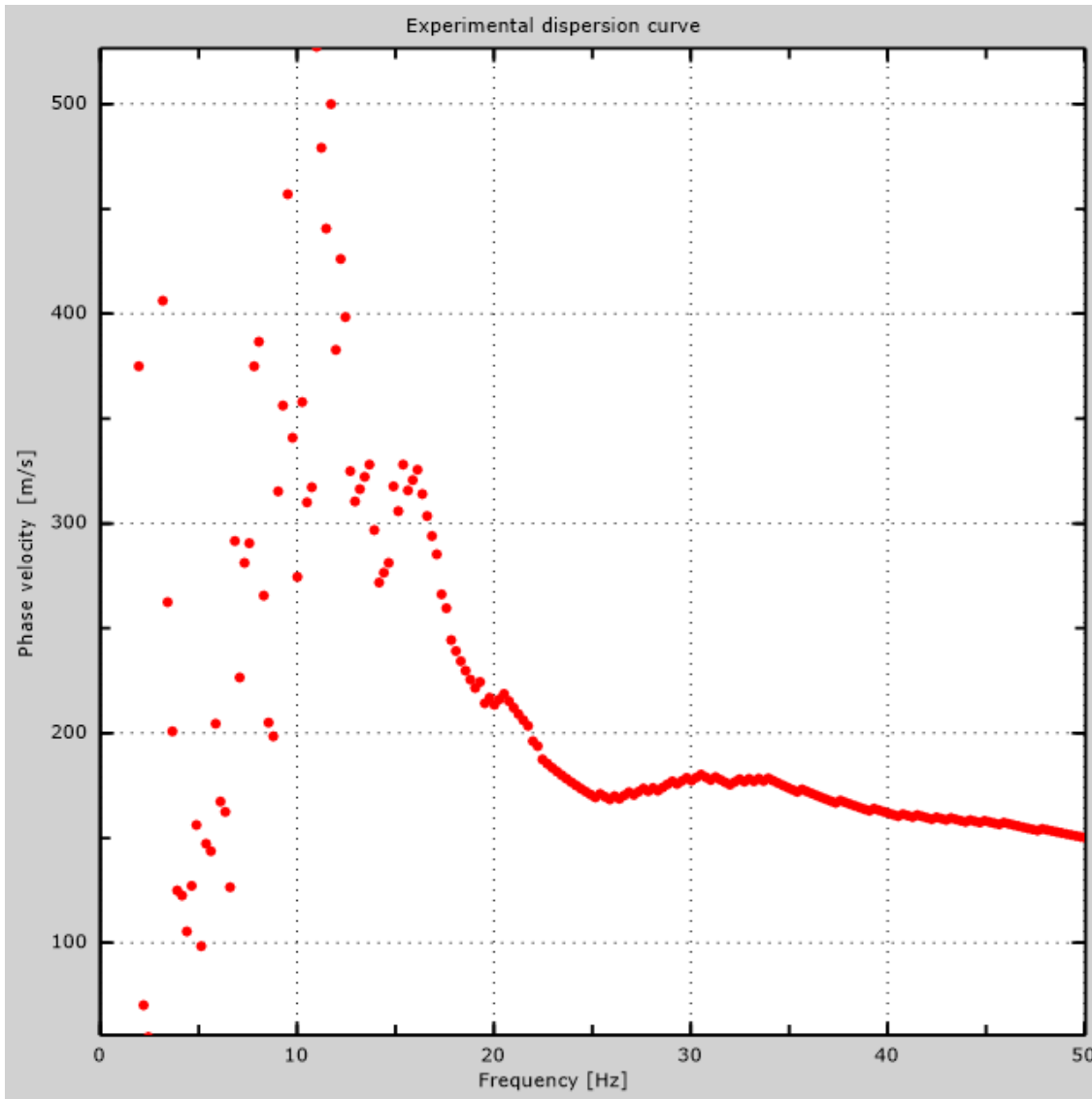


Figure 2: Experimental dispersion curve

3 - Analysis results (P)

Traces file name G:\2019\20_ROSALINO\GEOFISICA\LM1\REMI\VGLN0700.dat
Number of sensors23
Number of time samples3.26787e-312
Acquisition timestep 2ms
Number of sensors used for the analysis.....23
The interval considered for the analysis starts at 0ms
The interval considered for the analysis ends at 65534ms
Sensors are not reverted (the last one in the file is the last one for the analysis)

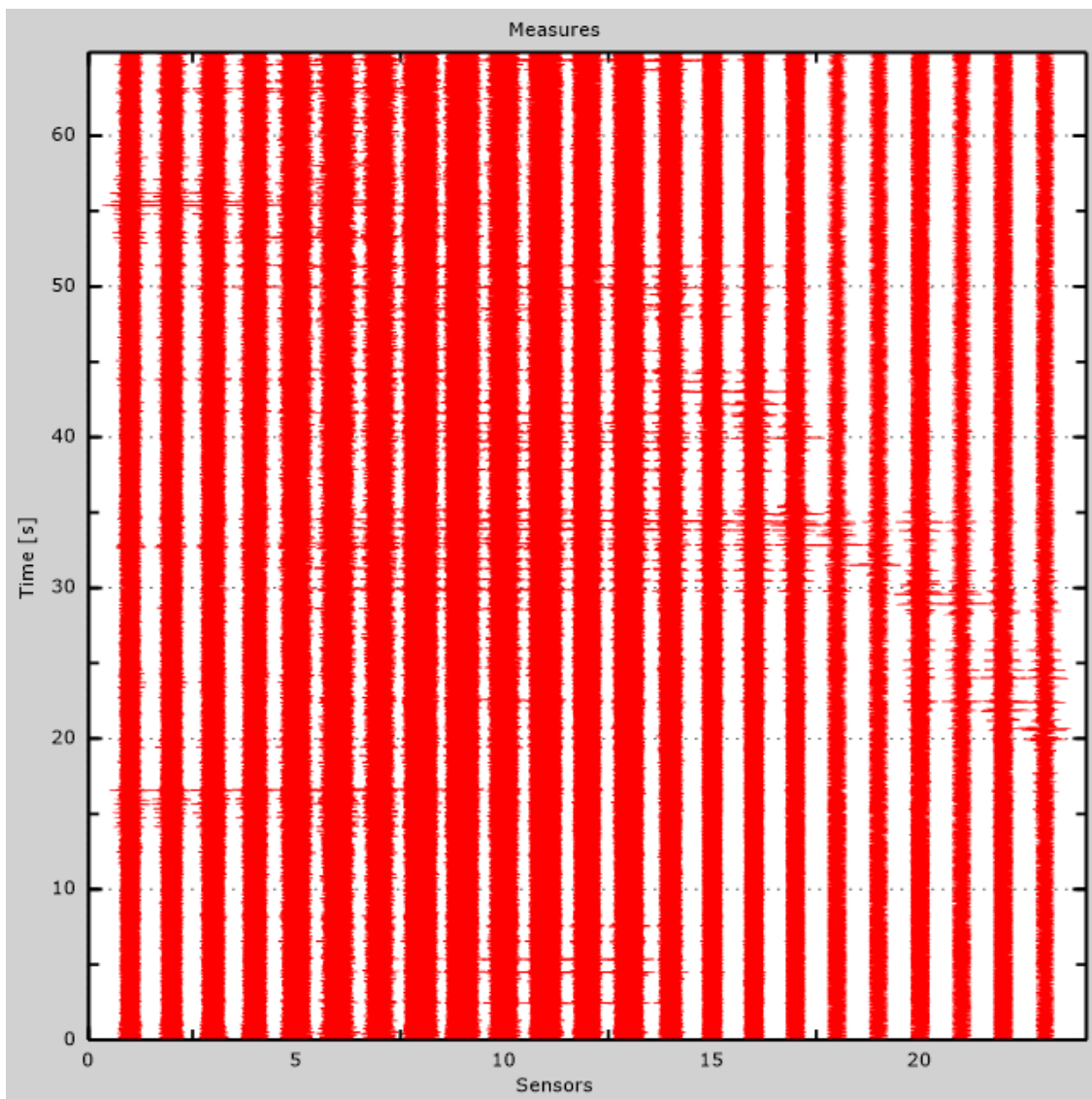


Figure 3: Experimental traces

4 - Dispersion curve

Table 1:Dispersion curve

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
16.0898	331.916	323.862	339.97
17.0996	284.192	278.99	289.395
17.4576	259.913	252.629	267.197
17.8533	243.611	240.143	247.08
19.0969	220.719	217.251	224.188
20.5855	217.597	213.435	221.76
21.735	204.07	199.908	208.233
23.6946	179.444	173.895	184.994
25.4282	172.507	167.651	177.363
31.2099	179.254	176.306	182.203
33.8976	178.861	175.323	182.399
37.5733	168.837	164.906	172.768
40.7748	161.762	158.617	164.906
44.9249	158.813	156.062	161.565
47.8892	155.865	152.524	159.207
49.9445	150.362	148.789	151.934

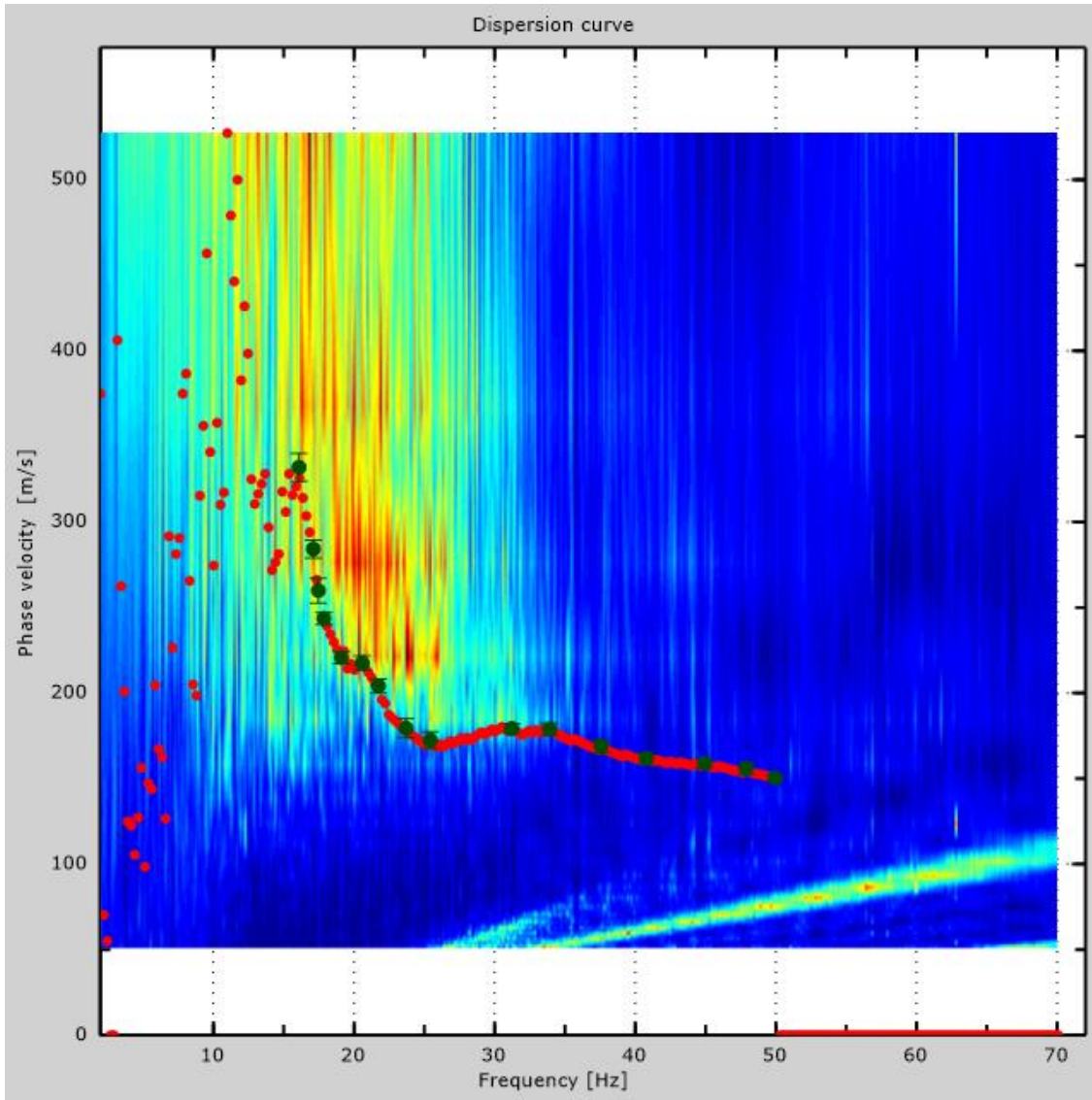


Figure 4: Dispersion curve



5 - Field profile

Number of layers (half-space excluded)	9
Receivers spacing.....	1.5m
Number of receivers.....	12
Number of modes.....	1

Layer 1

h [m]	1.5
z [m]	-1.5
Density [kg/m ³]	1516
Poisson	0.4
Vs [m/s].....	220
Vp [m/s]	380
Vs min [m/s]	84
Vs max [m/s].....	334
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	220

Layer 2

h [m]	4
z [m]	-5.5
Density [kg/m ³]	1637
Poisson	0.42
Vs [m/s].....	227
Vp [m/s]	611
Vs min [m/s]	113
Vs max [m/s].....	453
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	227

Layer 3

h [m]	4.5
z [m]	-10
Density [kg/m ³]	1849
Poisson	0.4
Vs [m/s].....	369
Vp [m/s]	904
Vs min [m/s]	184



Vs max [m/s].....554
 This layer is not water table
 This layer is not alluvional
 Vs fin.[m/s]369

Layer 4

h [m]4
 z [m] -14
 Density [kg/m³] 1849
 Poisson0.4
 Vs [m/s].....369
 Vp [m/s]904
 Vs min [m/s]184
 Vs max [m/s].....738
 This layer is not water table
 This layer is not alluvional
 Vs fin.[m/s]369

Layer 5

h [m]4
 z [m] -18
 Density [kg/m³] 1849
 Poisson0.4
 Vs [m/s].....369
 Vp [m/s]904
 Vs min [m/s]184
 Vs max [m/s].....738
 This layer is not water table
 This layer is not alluvional
 Vs fin.[m/s]369

Layer 6

h [m]5
 z [m] -23
 Density [kg/m³] 1849
 Poisson0.4
 Vs [m/s].....369
 Vp [m/s]904
 Vs min [m/s]184
 Vs max [m/s].....738
 This layer is not water table
 This layer is not alluvional
 Vs fin.[m/s]369



Layer 7

h [m].....	5
z [m].....	-28
Density [kg/m^3]	1849
Poisson	0.4
Vs [m/s].....	369
Vp [m/s]	904
Vs min [m/s]	184
Vs max [m/s].....	738
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	369

Layer 8

h [m].....	6
z [m].....	-34
Density [kg/m^3]	1849
Poisson	0.4
Vs [m/s].....	369
Vp [m/s]	904
Vs min [m/s]	184
Vs max [m/s].....	738
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	369

Layer 9

h [m].....	0
z [m].....	-00
Density [kg/m^3]	1849
Poisson	0.4
Vs [m/s].....	369
Vp [m/s]	904
Vs min [m/s]	184
Vs max [m/s].....	738
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	369

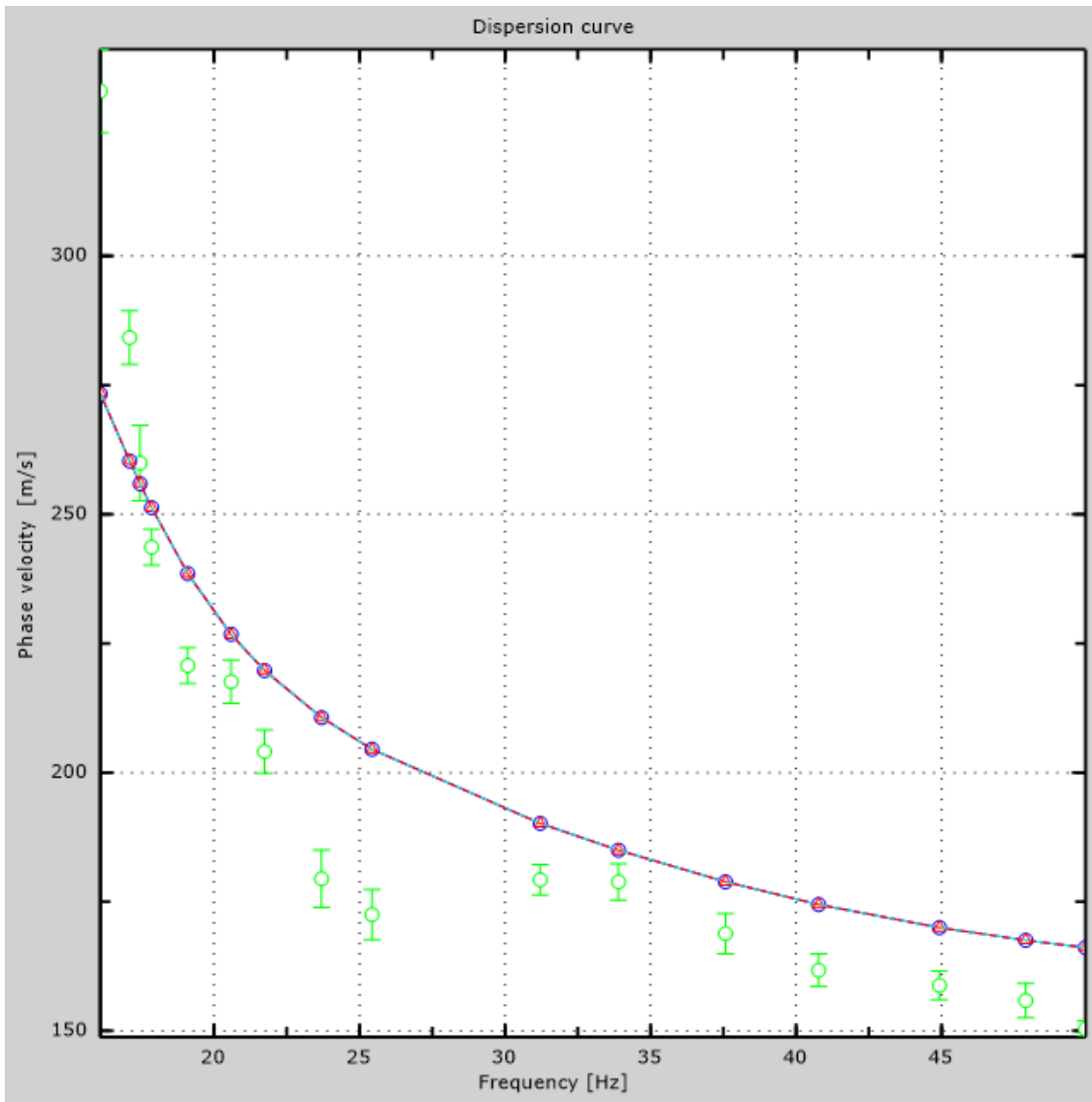


Figure 5: Numerical velocities - experimental points (green), Rayleigh modes (cyan), apparent curve (blue), numerical curve (red)

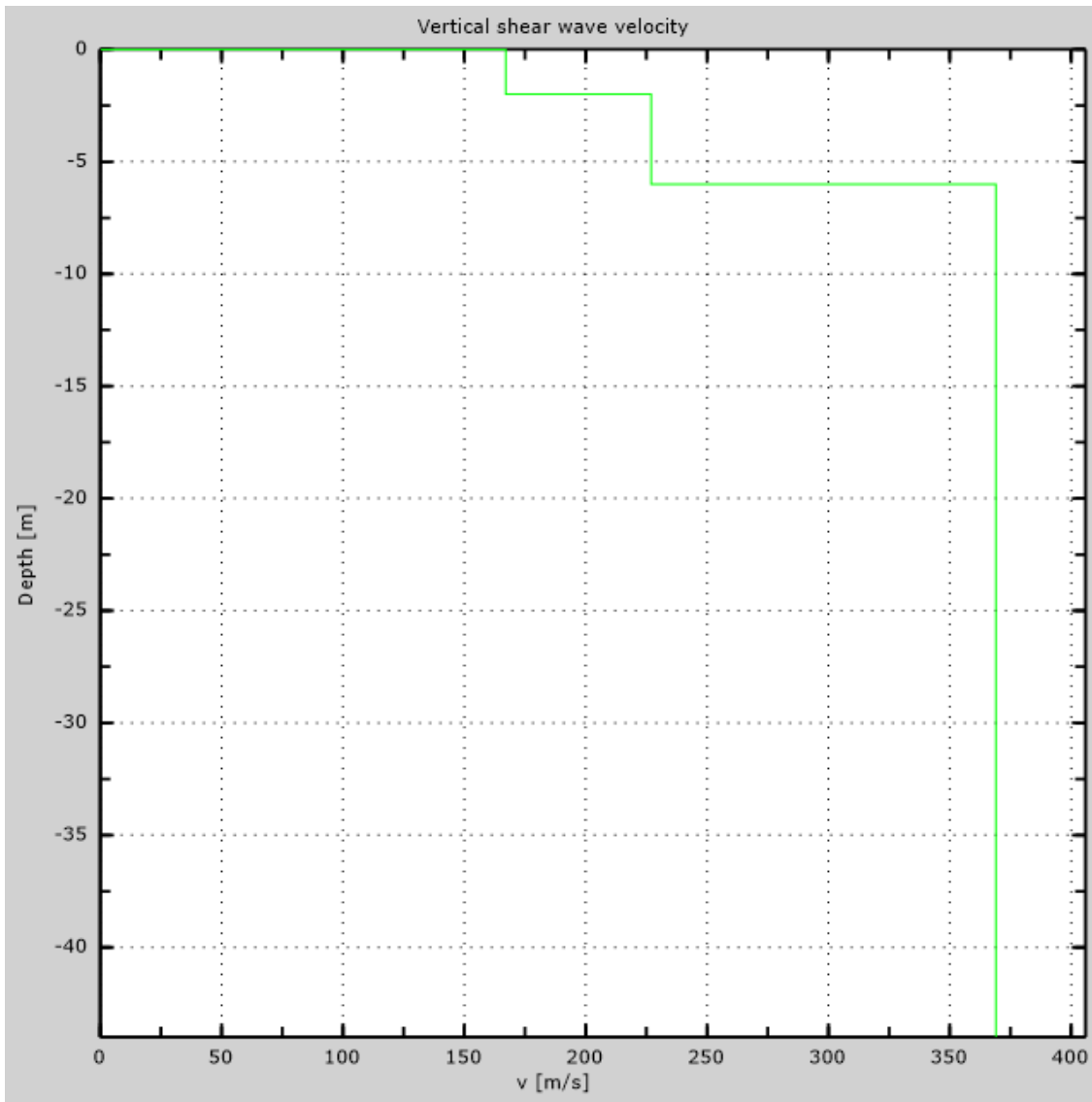


Figure 6: Numerical Vs profile



6 - Final results

Reference plane $z=0$ [m]0

Vs30 [m/s].....316

You are using the definitions included in DM 14 gennaio 2008

The site does belongs to classes A, B, C, D, E or S1 (alluvional soil, gravel, sand, silt, clay, rock).

The site is not susceptible to liquefaction or there is not sensitive clay.

The geotechnic unit 2 is the bed rock

The mechanic characteristics of the layers gradually improve with depth

Soil type E

Appendix Type of ground

Type A: Rock or other rock-like geological formation, including at most 3 m of weaker material at the surface

Type B: Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least 30 m in thickness, characterised by a gradual increase of mechanical properties with depth, Vs30 between 360m/s and 800m/s

Type C: Deep deposits of dense or medium dense sand, gravel or stiff clay with thickness greater than 30 m, Vs30 between 180m/s and 360m/s

Type D: Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil with thickness greater than 30 m, Vs30 lower than 180m/s

Type E: A soil profile consisting of a surface alluvium layer with vs values of type C or D and thickness lower than 20 m, underlain by stiffer material with $vs > 800$ m/s

Type S1: Deposits of soils with $Vs30 < 100$ m/s (or $10 < cu,30 < 20$ kPa), which include a layer of fine-grained and low consistency soil with a thickness greater than 8m, or a layer of peat or highly organic clay with a thickness greater than 3m.

Type S2: Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A - E or S1



MASW Analysis Report

Author: Pablo Marcelo Cárdenas Arias
Site: Calle del Subcentro de Salud, Sector Ricaurte
Date: 30/07/2019

Generated by MASW
(c) Vitantonio Roma. All rights reserved.

1 - Experimental data

Traces file name
Number of sensors 11
Sensors distance: 1m
Number of time samples 16464
Acquisition timestep 0.125ms
Number of sensors used for the analysis 11
The interval considered for the analysis starts at 0ms
The interval considered for the analysis ends at 2057.88ms
Sensors are not reverted (the last one in the file is the last one for the analysis)

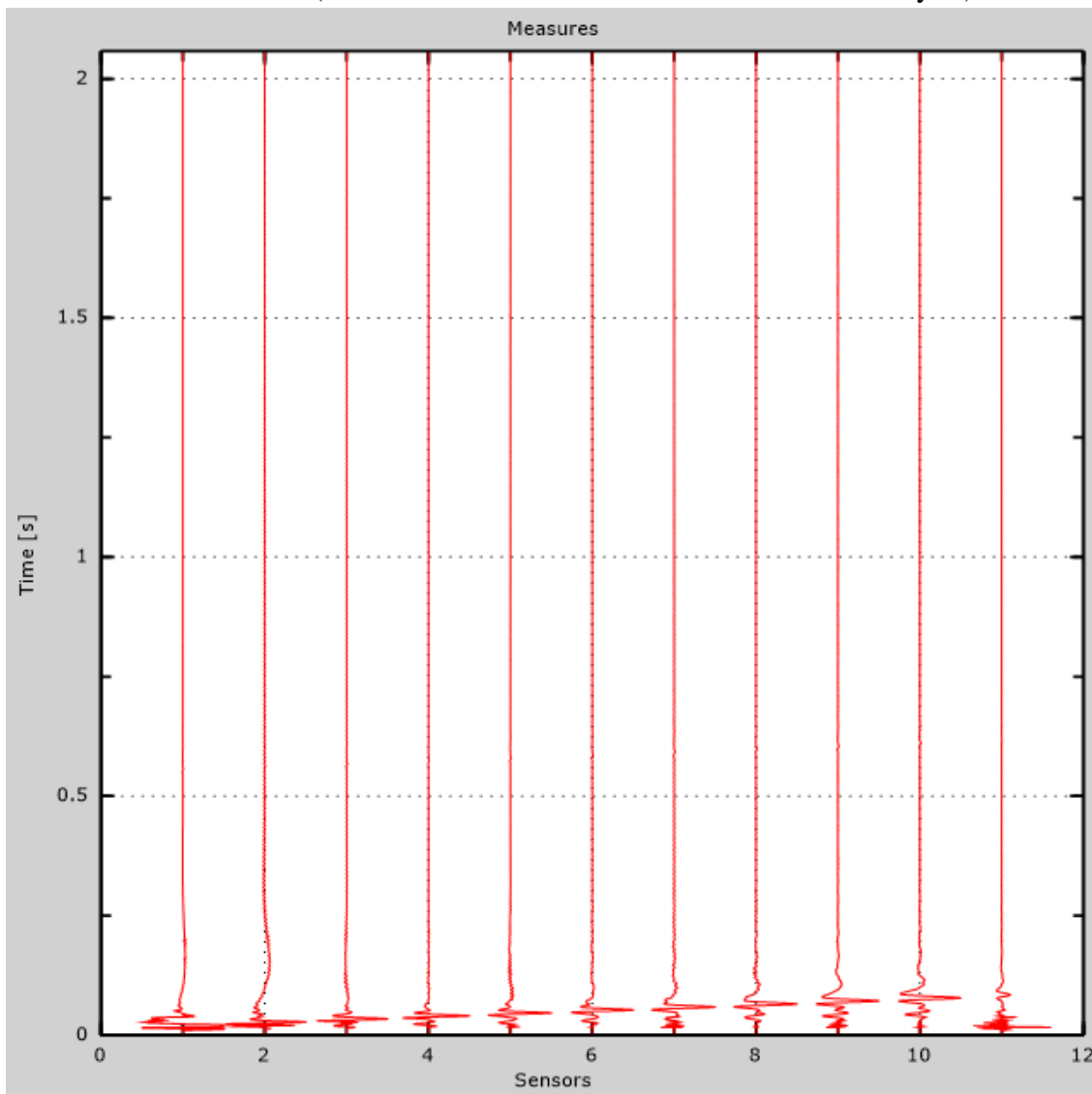


Figure 1: Experimental traces

2 - Analysis results

Final frequency 70Hz

Initial frequency 2Hz

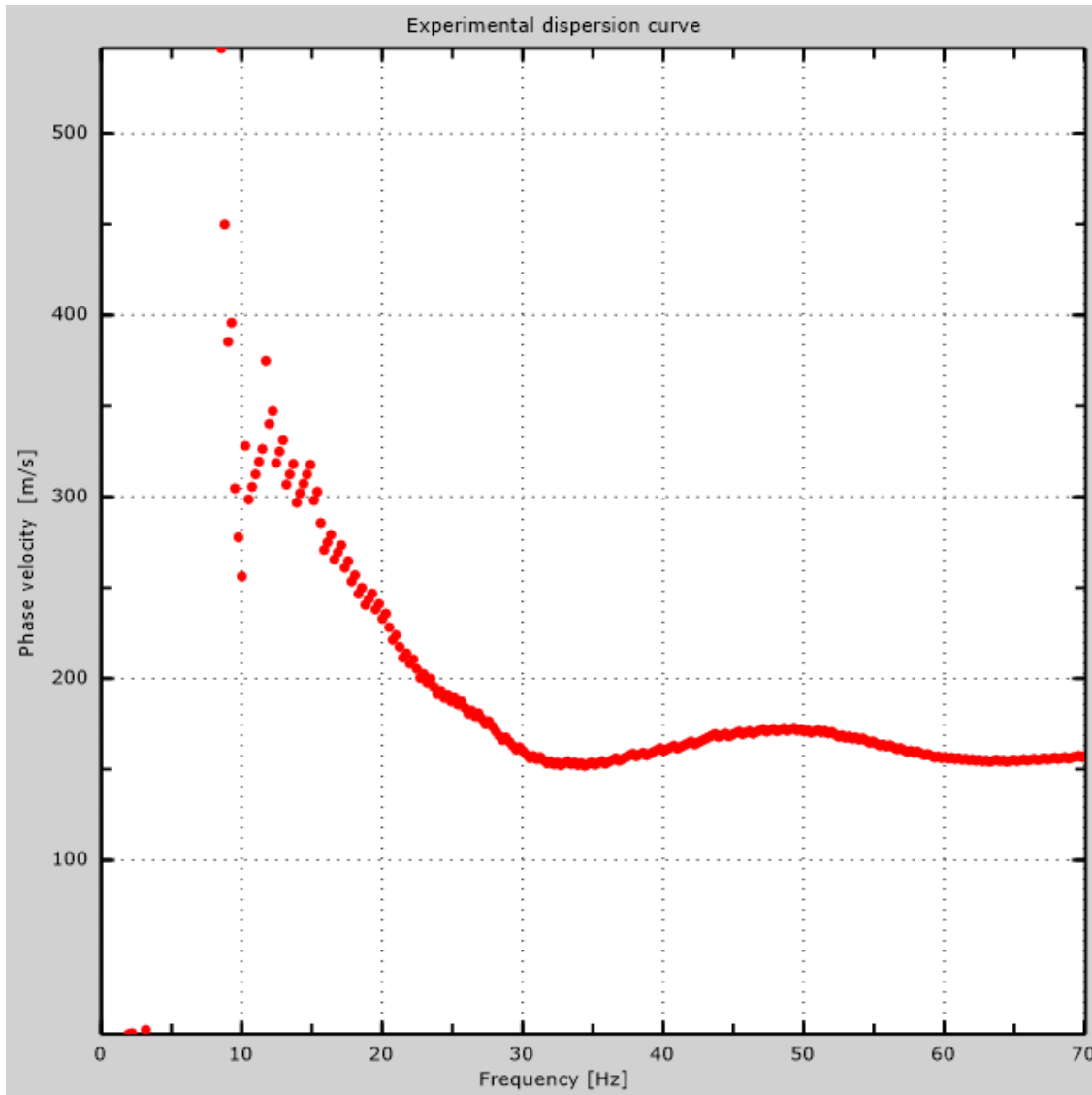


Figure 2: Experimental dispersion curve

3 - Analysis results (P)

Traces file name
Number of sensors23
Number of time samples3.26787e-312
Acquisition timestep 2ms
Number of sensors used for the analysis.....23
The interval considered for the analysis starts at 0ms
The interval considered for the analysis ends at 65534ms
Sensors are not reverted (the last one in the file is the last one for the analysis)

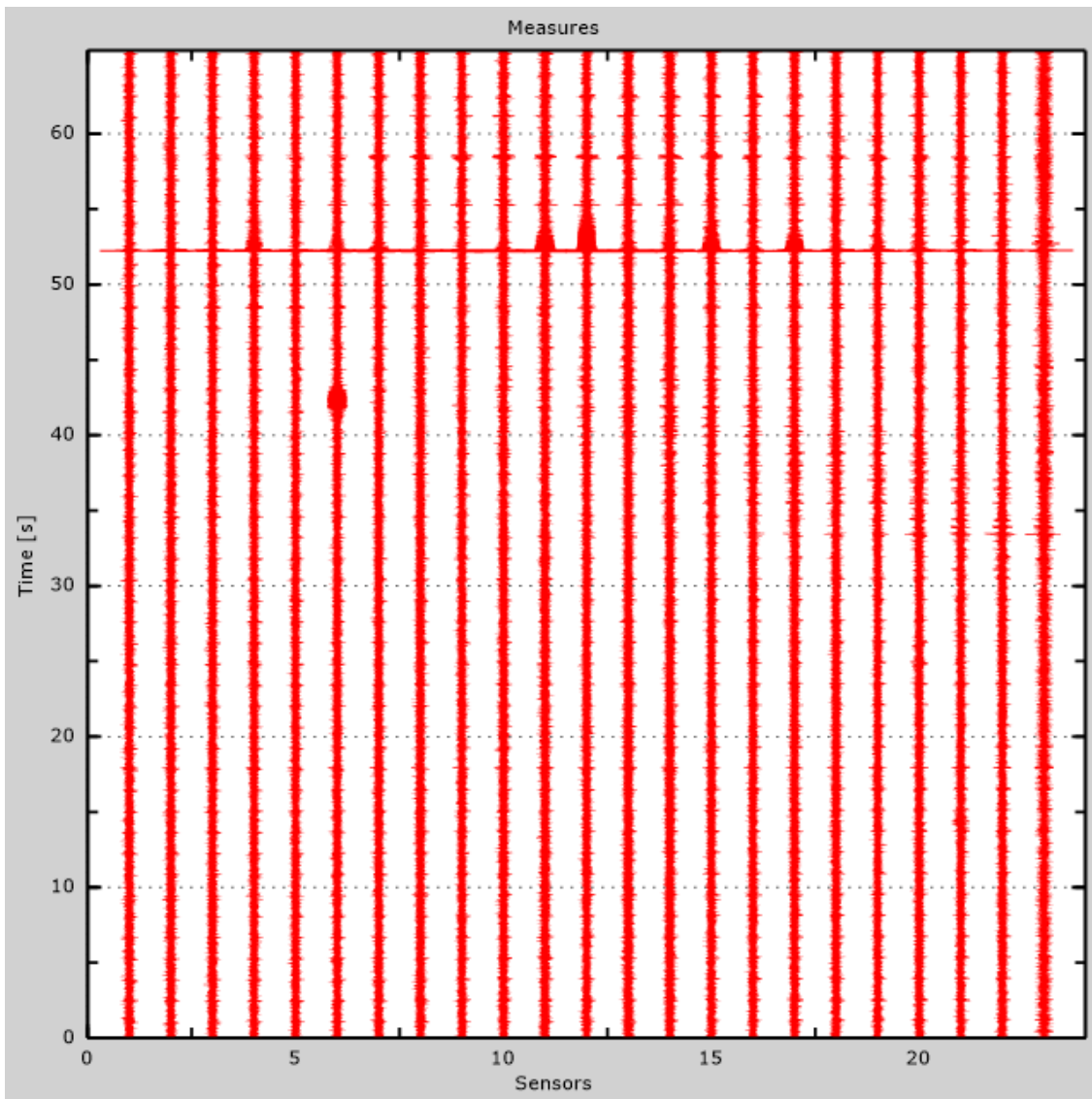


Figure 3: Experimental traces

4 - ESAC analysis

Traces file name

C:\Users\GEO4\Desktop\GEOFISICA_P_CARDENAS\GEOFISICA_I\LM3\ESAC\WFRQ5158.dat

Number of sensors 12

Number of time samples 327680

Acquisition timestep 2ms

The interval considered for the analysis starts at 0ms

The interval considered for the analysis ends at 655358ms

Window duration 10s

Overlap..... 0s

Smoothing..... 0.1

Cleaning threshold 0sd

Number of iterations 2

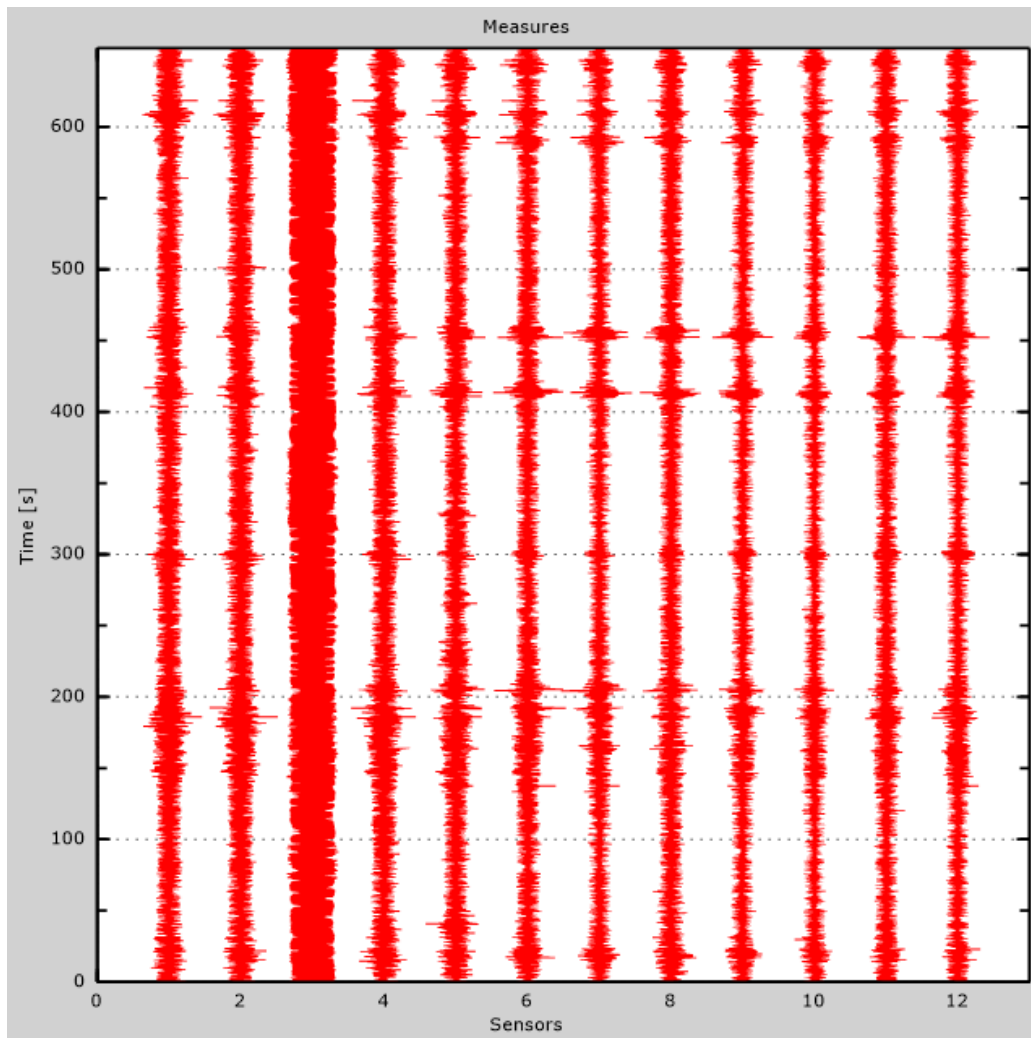


Figure 4: Experimental traces



Table 1: Geophones positions

X [m]	Y [m]
0	0
5	0
10	0
15	0
20	0
25	0
30	0
30	-4
30	-8
30	-12
30	-16

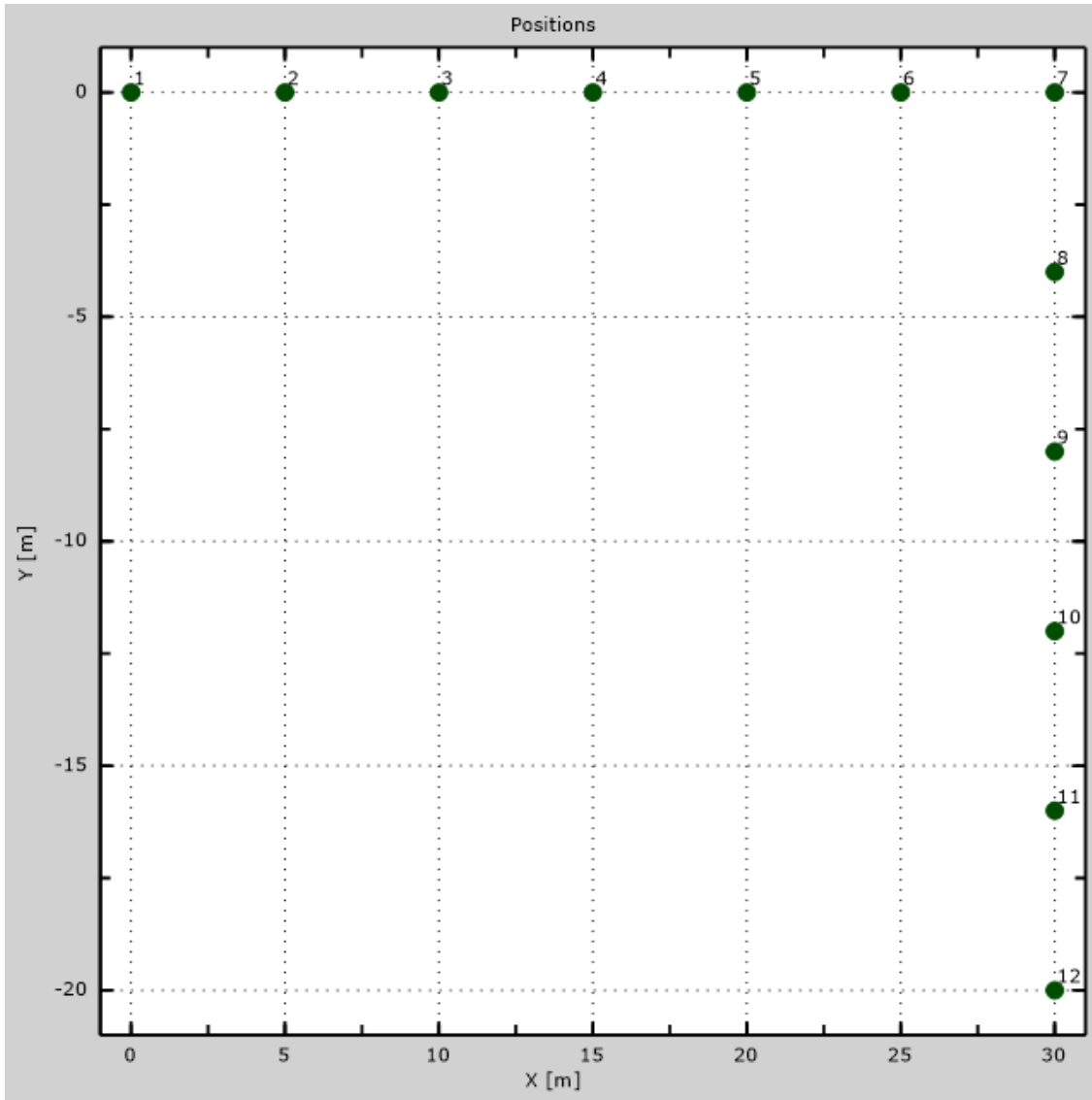


Figure 5: Geophones positions

5 - Dispersion curve

Table 2:Dispersion curve

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
4.61173	673.868	653.517	694.22
5.27006	649.156	628.805	669.508
6.82444	621.537	602.64	640.434
8.4154	591.01	553.215	628.805
10.3538	493.616	415.118	572.113
12.2374	384.592	310.455	458.728
15.5676	291.828	270.719	312.936
19.0977	244.333	235.538	253.129
27.8071	173.972	164.297	183.647
34.1043	152.721	150.662	154.78
49.1983	172.794	170.735	174.853
67.0682	156.066	154.265	157.868

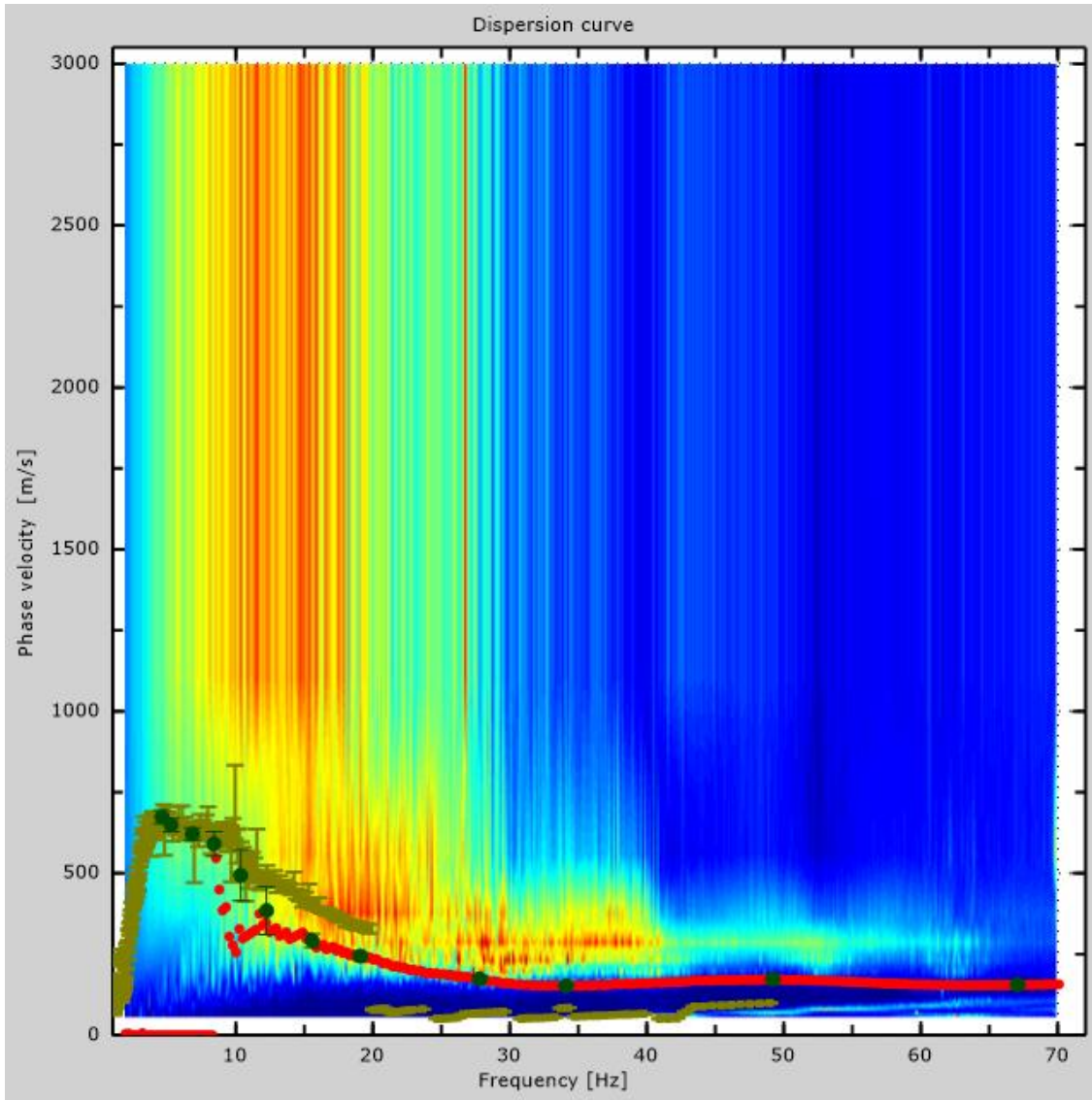


Figure 6: Dispersion curve



6 - Field profile

Number of layers (half-space excluded)	9
Receivers spacing.....	1m
Number of receivers.....	11
Number of modes.....	1

Layer 1

h [m]	2
z [m]	-1.5
Density [kg/m ³]	1530
Poisson	0.40
Vs [m/s].....	205
Vp [m/s]	450
Vs min [m/s]	87
Vs max [m/s].....	347
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	205

Layer 2

h [m]	2
z [m]	-3.5
Density [kg/m ³]	1572
Poisson	0.37
Vs [m/s].....	193
Vp [m/s]	425
Vs min [m/s]	97
Vs max [m/s].....	387
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	193

Layer 3

h [m]	3.5
z [m]	-7
Density [kg/m ³]	1790
Poisson	0.47
Vs [m/s].....	324
Vp [m/s]	1362
Vs min [m/s]	162



Vs max [m/s].....649
 This layer is not water table
 This layer is not alluvional
 Vs fin.[m/s]324

Layer 4

h [m]4
 z [m] -11
 Density [kg/m³] 1790
 Poisson0.47
 Vs [m/s].....324
 Vp [m/s] 1362
 Vs min [m/s] 162
 Vs max [m/s].....649
 This layer is not water table
 This layer is not alluvional
 Vs fin.[m/s]324

Layer 5

h [m]4
 z [m] -15
 Density [kg/m³] 1918
 Poisson0.47
 Vs [m/s].....427
 Vp [m/s] 1795
 Vs min [m/s] 214
 Vs max [m/s].....855
 This layer is not water table
 This layer is not alluvional
 Vs fin.[m/s]427

Layer 6

h [m]5
 z [m] -20
 Density [kg/m³] 2207
 Poisson0.40
 Vs [m/s].....749
 Vp [m/s] 1835
 Vs min [m/s] 274
 Vs max [m/s].....1124
 This layer is not water table
 This layer is not alluvional
 Vs fin.[m/s]749



Layer 7

h [m].....	5
z [m].....	-25
Density [kg/m ³]	2207
Poisson	0.40
Vs [m/s].....	749
Vp [m/s]	1835
Vs min [m/s]	274
Vs max [m/s].....	1124
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	749

Layer 8

h [m].....	6
z [m].....	-31
Density [kg/m ³]	2207
Poisson	0.40
Vs [m/s].....	749
Vp [m/s]	1835
Vs min [m/s]	328
Vs max [m/s].....	1124
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	749

Layer 9

h [m].....	0
z [m].....	-00
Density [kg/m ³]	2207
Poisson	0.40
Vs [m/s].....	749
Vp [m/s]	1835
Vs min [m/s]	374
Vs max [m/s].....	1497
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	749

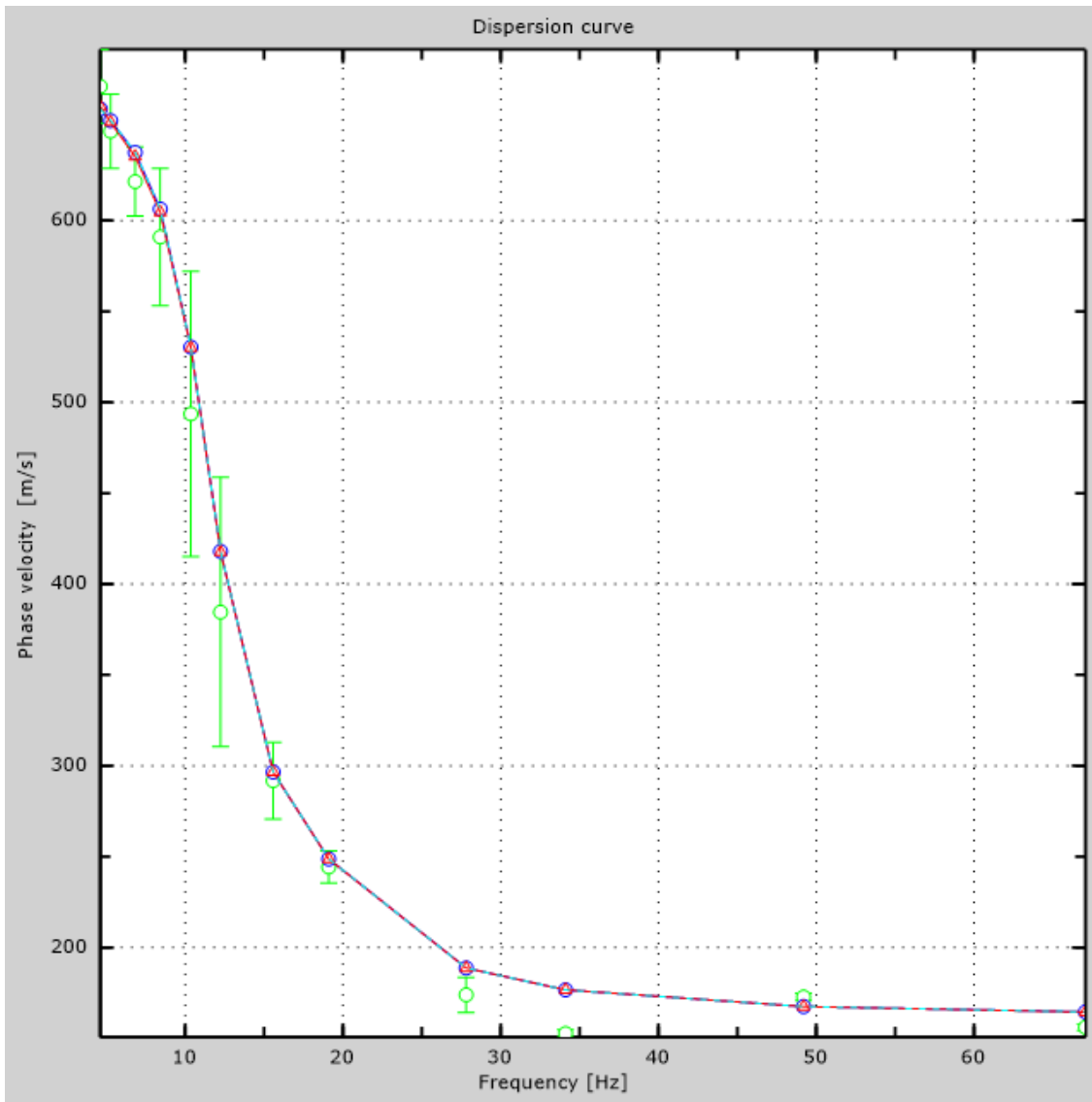


Figure 7: Numerical velocities - experimental points (green), Rayleigh modes (cyan), apparent curve (blue), numerical curve (red)

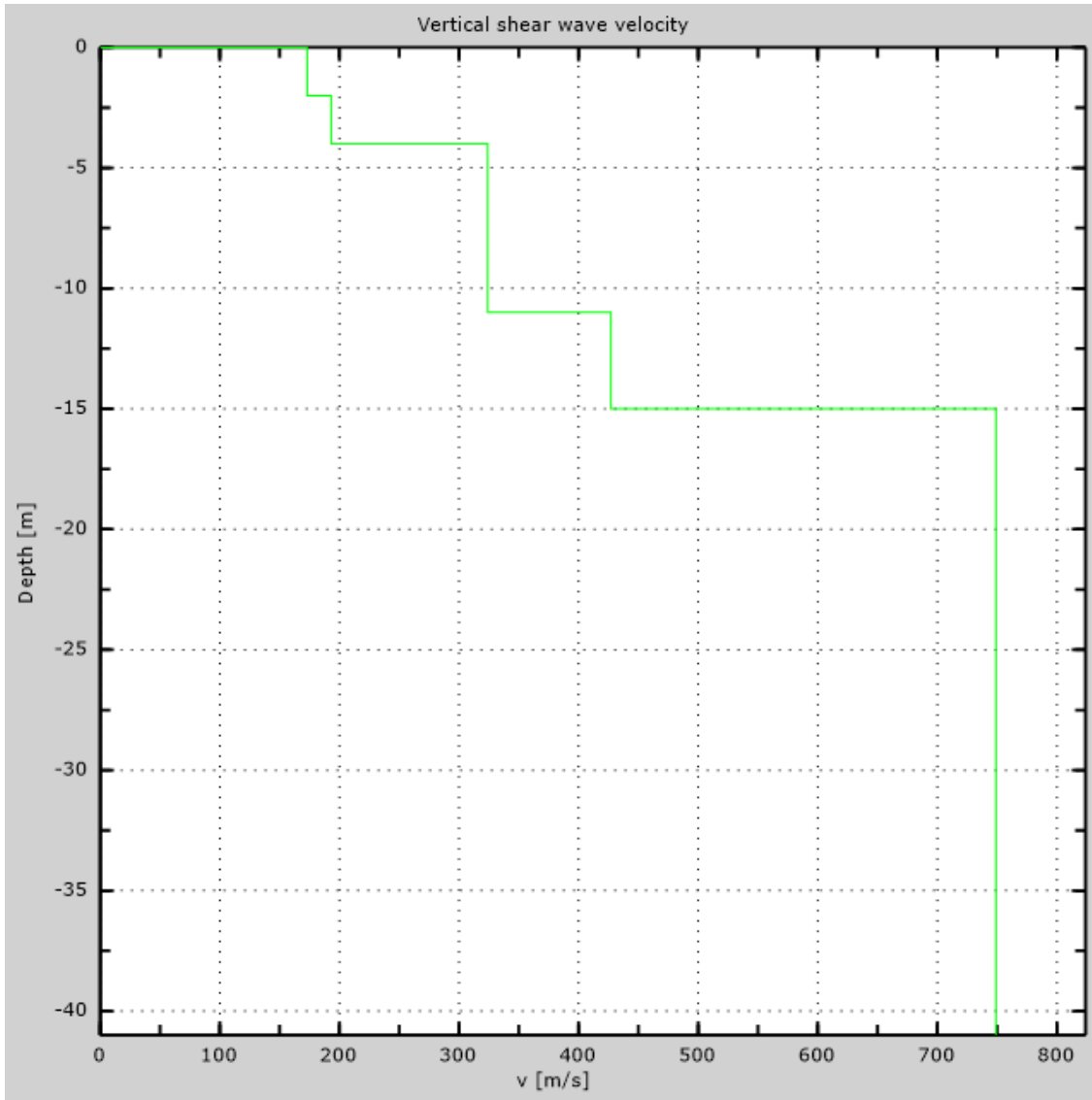


Figure 8: Numerical Vs profile



7 - Final results

Reference plane $z=0$ [m]0

Vs30 [m/s].....411

You are using the definitions included in DM 14 gennaio 2008

The site does belongs to classes A, B, C, D, E or S1 (alluvional soil, gravel, sand, silt, clay, rock).

The site is not susceptible to liquefaction or there is not sensitive clay.

The geotechnic unit 5 is the bed rock

Soil typeS2

Appendix Type of ground

Type A: Rock or other rock-like geological formation, including at most 3 m of weaker material at the surface

Type B: Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least 30 m in thickness, characterised by a gradual increase of mechanical properties with depth, Vs30 between 360m/s and 800m/s

Type C: Deep deposits of dense or medium dense sand, gravel or stiff clay with thickness greater than 30 m, Vs30 between 180m/s and 360m/s

Type D: Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil with thickness greater than 30 m, Vs30 lower than 180m/s

Type E: A soil profile consisting of a surface alluvium layer with vs values of type C or D and thickness lower than 20 m, underlain by stiffer material with $vs > 800$ m/s

Type S1: Deposits of soils with $Vs30 < 100$ m/s (or $10 < cu,30 < 20$ kPa), which include a layer of fine-grained and low consistency soil with a thickness greater than 8m, or a layer of peat or highly organic clay with a thickness greater than 3m.

Type S2: Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A - E or S1



MASW Analysis Report

Author: Pablo Marcelo Cárdenas Arias
Site: Camino Nuevo a Turi, Sector Turi
Date: 30/07/2019

Generated by MASW
(c) Vitantonio Roma. All rights reserved.

1 - Experimental data

Traces file name ..G:\2019\VIA_TURI\GEOFISICA\LM1\MASW\VGLM5020.dat
Number of sensors23
Sensors distance:1.5m
Number of time samples16464
Acquisition timestep0.125ms
Number of sensors used for the analysis.....23
The interval considered for the analysis starts at0ms
The interval considered for the analysis ends at2057.88ms
Sensors are not reverted (the last one in the file is the last one for the analysis)

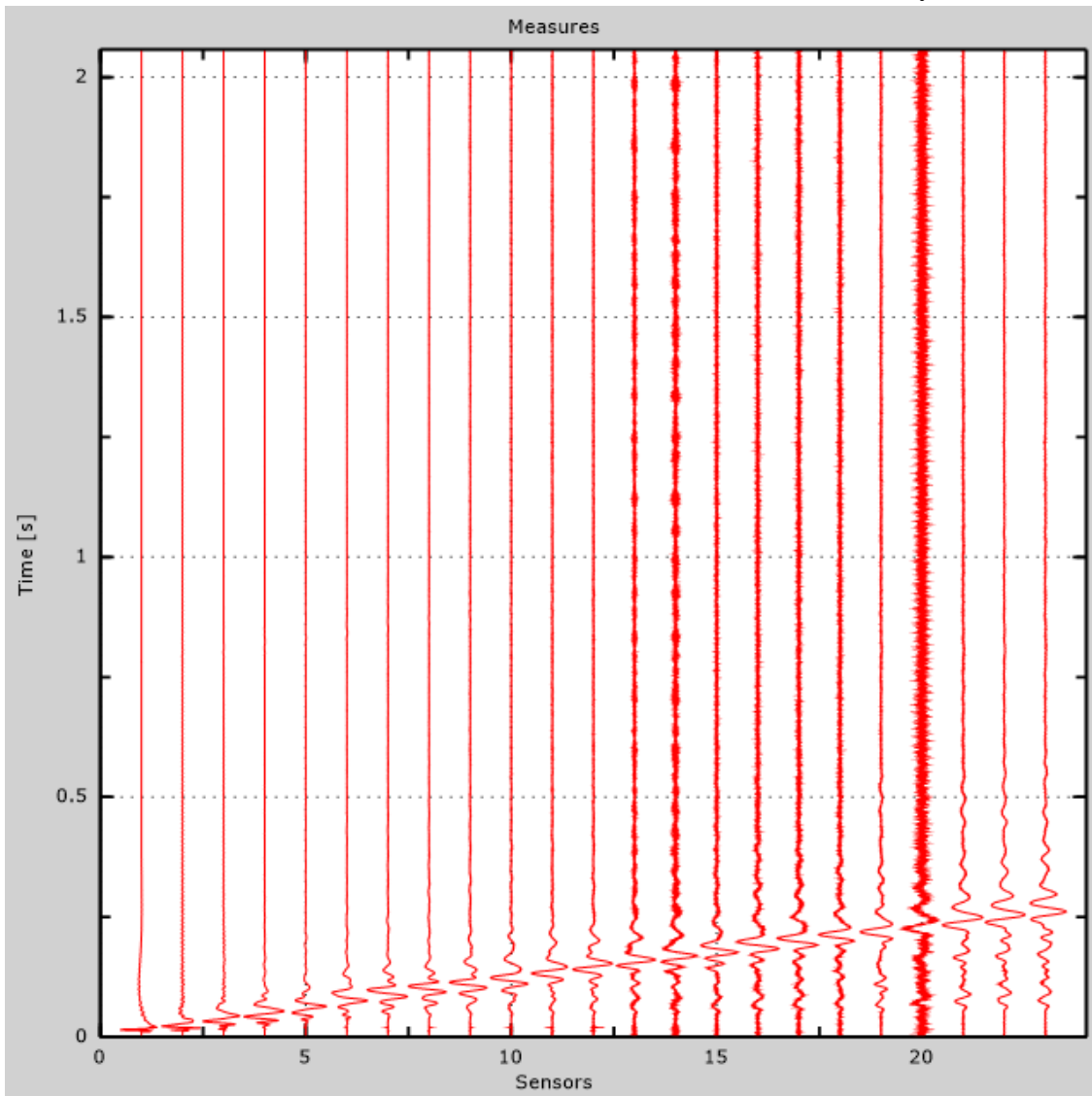


Figure 1: Experimental traces

2 - Analysis results

Final frequency 70Hz

Initial frequency 2Hz

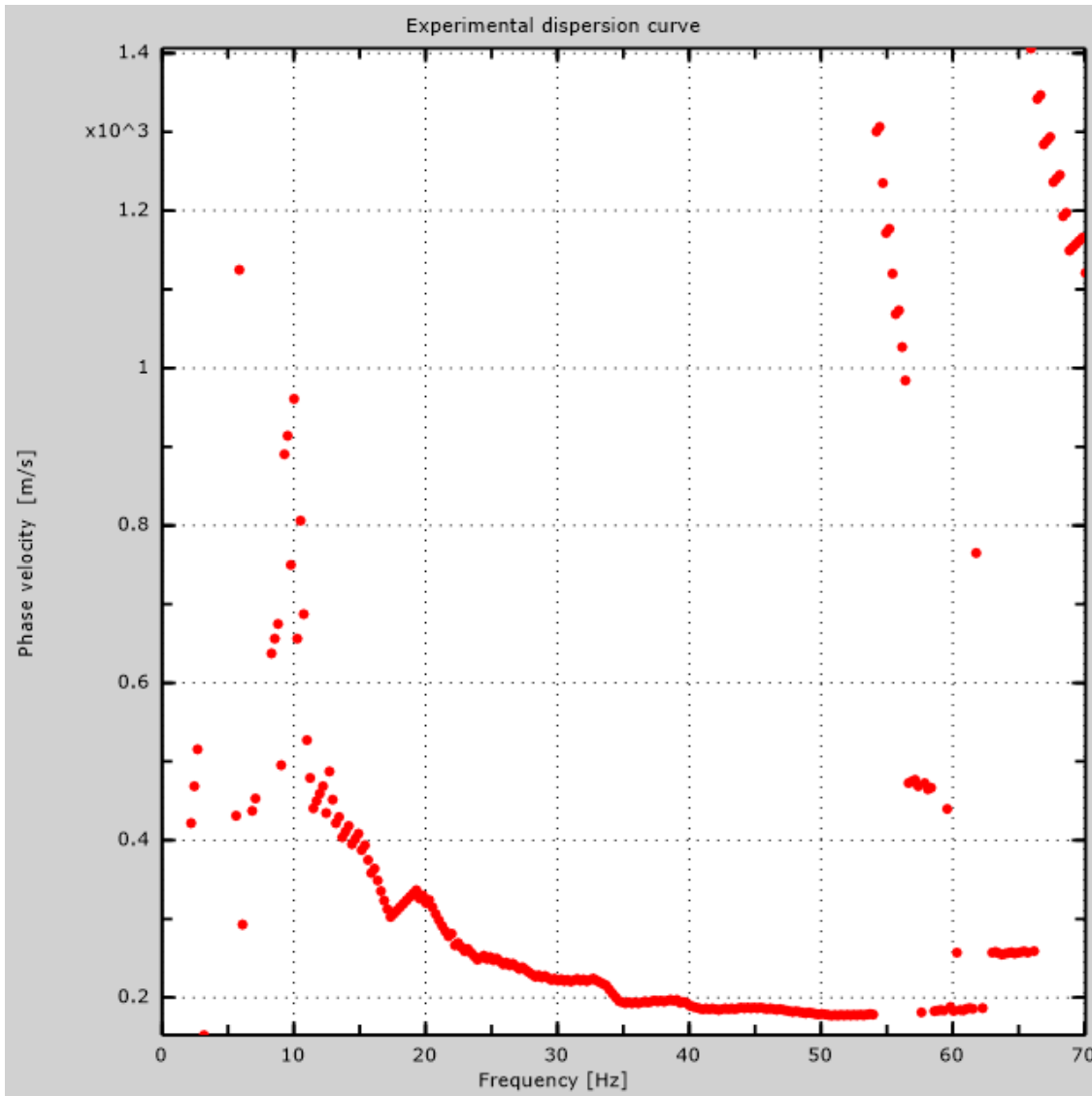


Figure 2: Experimental dispersion curve

3 - Analysis results (P)

Traces file nameG:\2019\VIA_TURI\GEOFISICA\LM1\REMI\VGLN0230.dat
Number of sensors23
Number of time samples3.26787e-312
Acquisition timestep 2ms
Number of sensors used for the analysis.....23
The interval considered for the analysis starts at 0ms
The interval considered for the analysis ends at 65534ms
Sensors are not reverted (the last one in the file is the last one for the analysis)

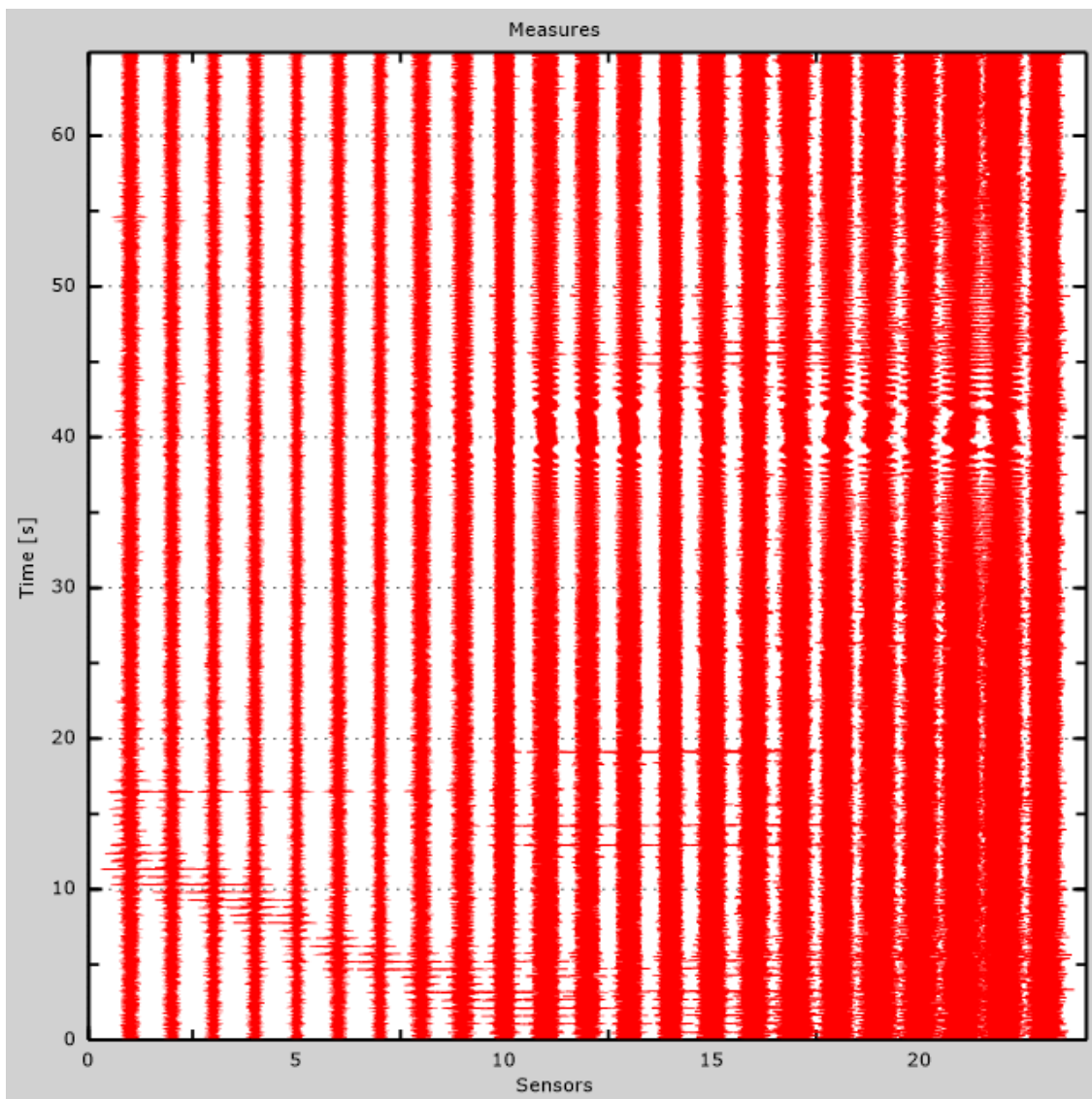


Figure 3: Experimental traces

4 - ESAC analysis

Traces file nameG:\2019\VIA_TURI\GEOFISICA\LM1\REMI\VGLN0700.dat
Number of sensors23
Number of time samples196608
Acquisition timestep 2ms
The interval considered for the analysis starts at 0ms
The interval considered for the analysis ends at 393214ms
Window duration 10s
Overlap..... 0s
Smoothing.....0.1
Cleaning threshold 0sd
Number of iterations2

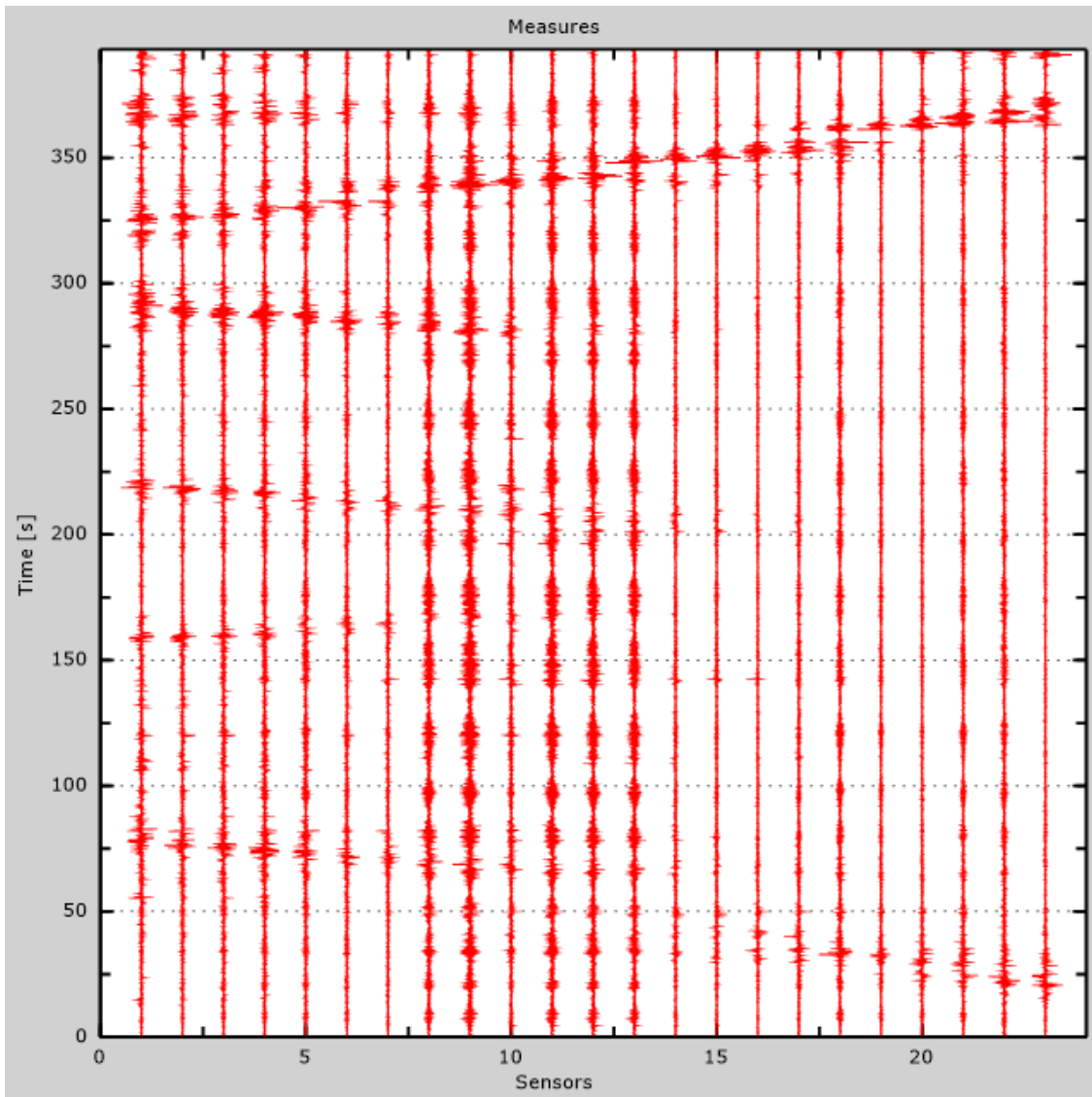


Figure 4: Experimental traces



Table 1: Geophones positions

X [m]	Y [m]
0	0
1.5	0
3	0
4.5	0
6	0
7.5	0
9	0
10.5	0
12	0
13.5	0
15	0
16.5	0
18	0
19.5	0
21	0
22.5	0
24	0
25.5	0
27	0
28.5	0
30	0

31.5	0
------	---

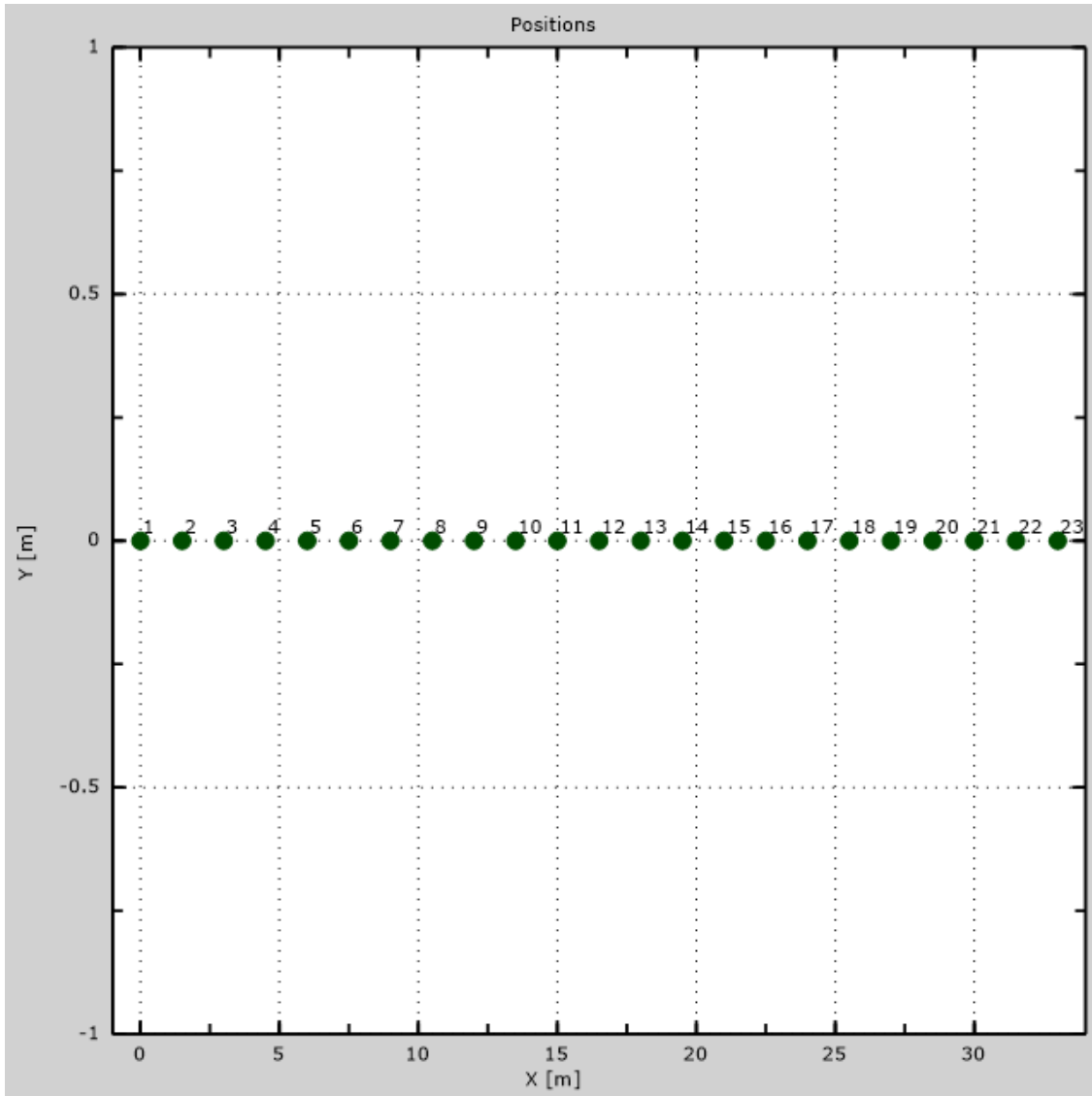


Figure 5: Geophones positions



5 - Dispersion curve

Table 2: Dispersion curve

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
12.2449	458.879	424.798	492.961
14.4542	399.511	379.722	419.301
18.3579	321.454	291.77	351.138
21.9399	275.279	264.285	286.273
26.2297	244.496	233.502	255.49
32.2161	222.613	216.651	228.574
37.915	197.277	191.316	203.239
45.3122	186.845	178.649	195.042
53.5775	180.139	175.668	184.61

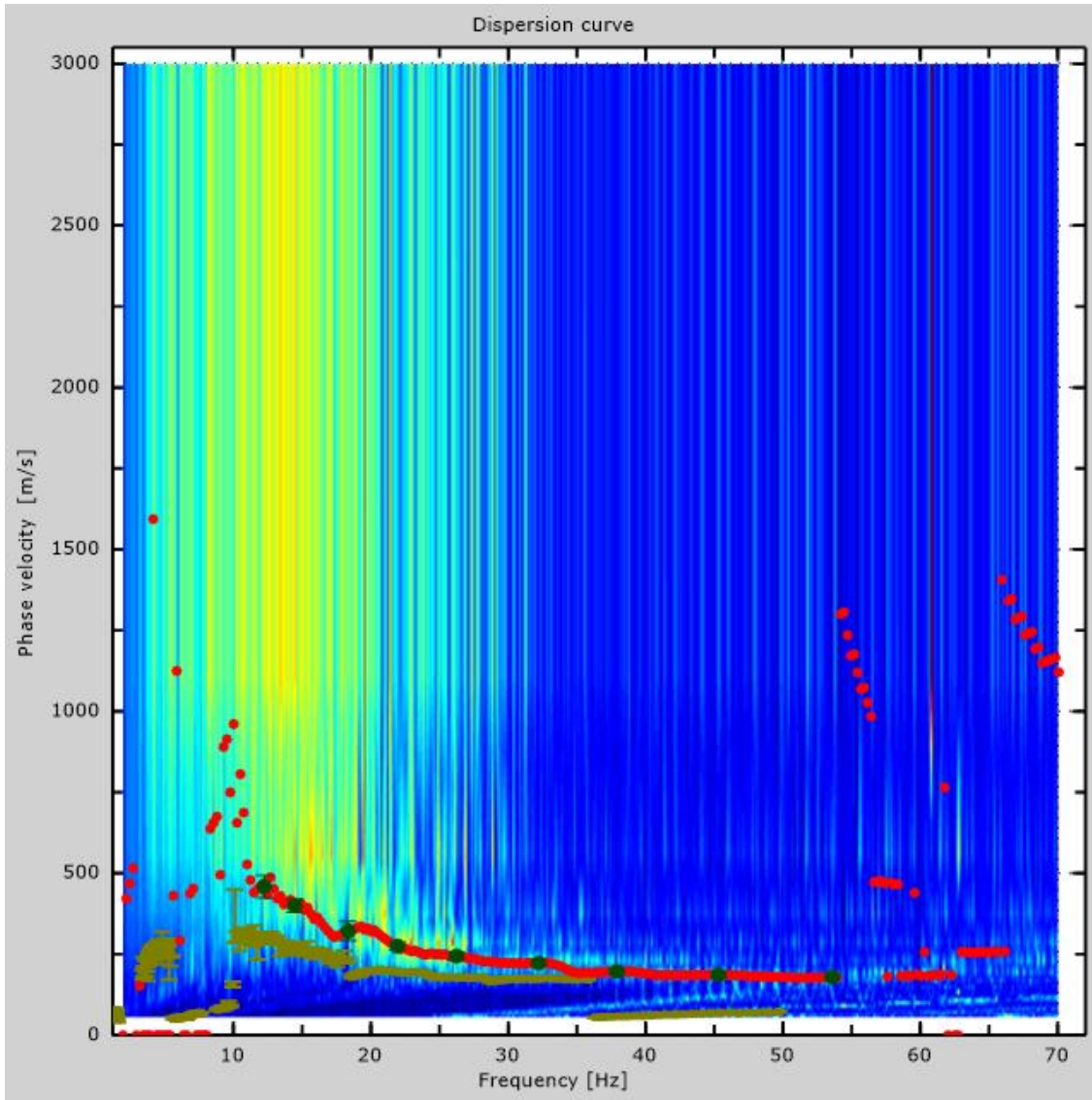


Figure 6: Dispersion curve



6 - Field profile

Number of layers (half-space excluded)	9
Receivers spacing.....	1.5m
Number of receivers.....	23
Number of modes.....	1

Layer 1

h [m]	1.5
z [m]	-1.5
Density [kg/m ³]	1586
Poisson	0.38
Vs [m/s].....	230
Vp [m/s]	550
Vs min [m/s]	100
Vs max [m/s].....	400
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	230

Layer 2

h [m]	3
z [m]	-4.5
Density [kg/m ³]	1713
Poisson	0.30
Vs [m/s].....	272
Vp [m/s]	509
Vs min [m/s]	136
Vs max [m/s].....	543
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	272

Layer 3

h [m]	5.5
z [m]	-10
Density [kg/m ³]	2005
Poisson	0.16
Vs [m/s].....	510
Vp [m/s]	802
Vs min [m/s]	179



Vs max [m/s].....765
 This layer is not water table
 This layer is not alluvional
 Vs fin.[m/s]510

Layer 4

h [m]4
 z [m] -14
 Density [kg/m³]2005
 Poisson0.16
 Vs [m/s].....510
 Vp [m/s]802
 Vs min [m/s]222
 Vs max [m/s].....765
 This layer is not water table
 This layer is not alluvional
 Vs fin.[m/s]510

Layer 5

h [m]4
 z [m] -18
 Density [kg/m³]2005
 Poisson0.16
 Vs [m/s].....510
 Vp [m/s]802
 Vs min [m/s]255
 Vs max [m/s].....1020
 This layer is not water table
 This layer is not alluvional
 Vs fin.[m/s]510

Layer 6

h [m]5
 z [m] -23
 Density [kg/m³]2005
 Poisson0.16
 Vs [m/s].....510
 Vp [m/s]802
 Vs min [m/s]255
 Vs max [m/s].....1020
 This layer is not water table
 This layer is not alluvional
 Vs fin.[m/s]510



Layer 7

h [m].....	5
z [m].....	-28
Density [kg/m ³]	2005
Poisson	0.16
Vs [m/s].....	510
Vp [m/s]	802
Vs min [m/s]	255
Vs max [m/s].....	1020
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	510

Layer 8

h [m].....	6
z [m].....	-34
Density [kg/m ³]	2005
Poisson	0.16
Vs [m/s].....	510
Vp [m/s]	802
Vs min [m/s]	255
Vs max [m/s].....	1020
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	510

Layer 9

h [m].....	0
z [m].....	-00
Density [kg/m ³]	2005
Poisson	0.16
Vs [m/s].....	510
Vp [m/s]	802
Vs min [m/s]	255
Vs max [m/s].....	1020
This layer is not water table	
This layer is not alluvional	
Vs fin.[m/s]	510

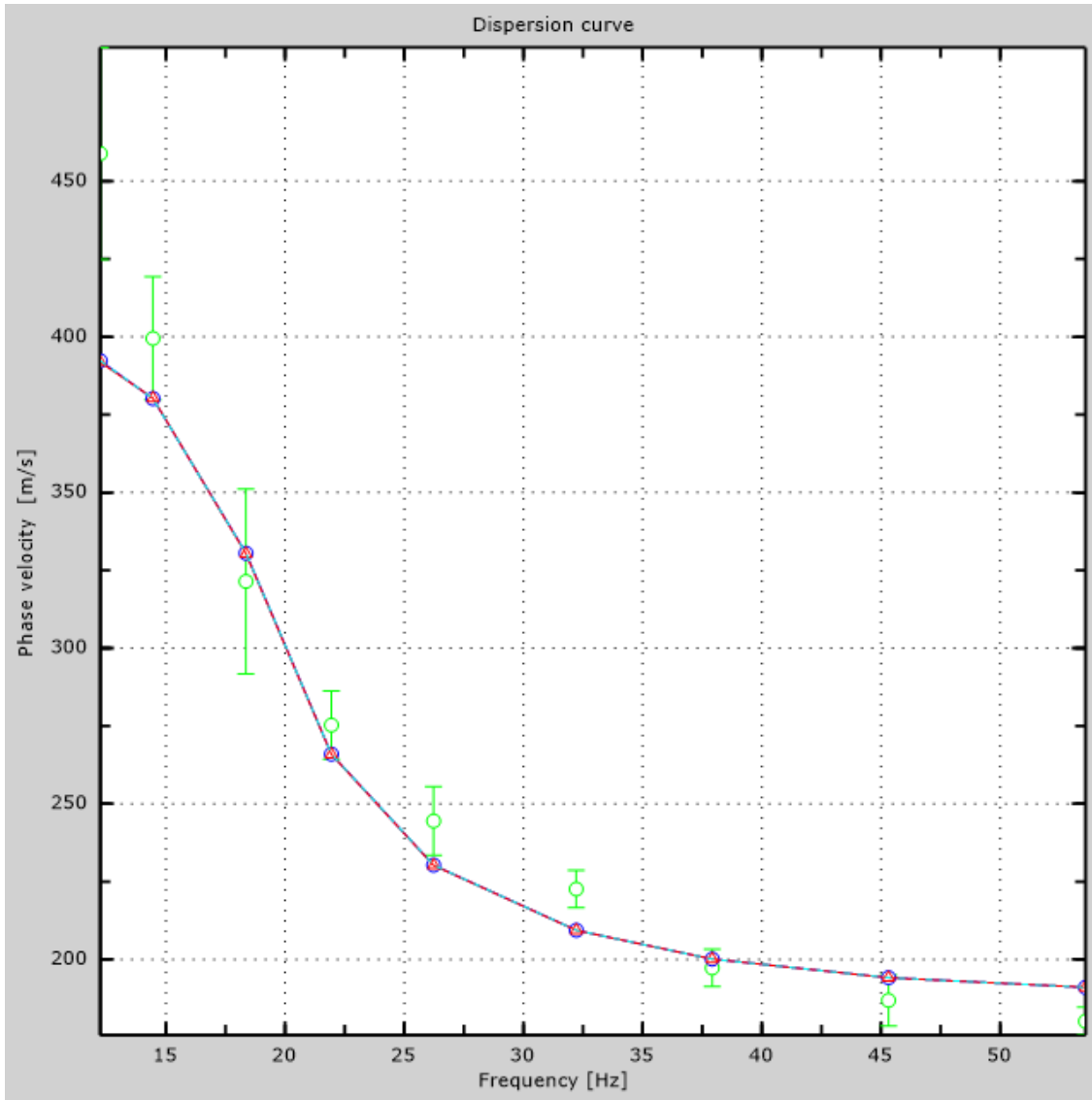


Figure 7: Numerical velocities - experimental points (green), Rayleigh modes (cyan), apparent curve (blue), numerical curve (red)

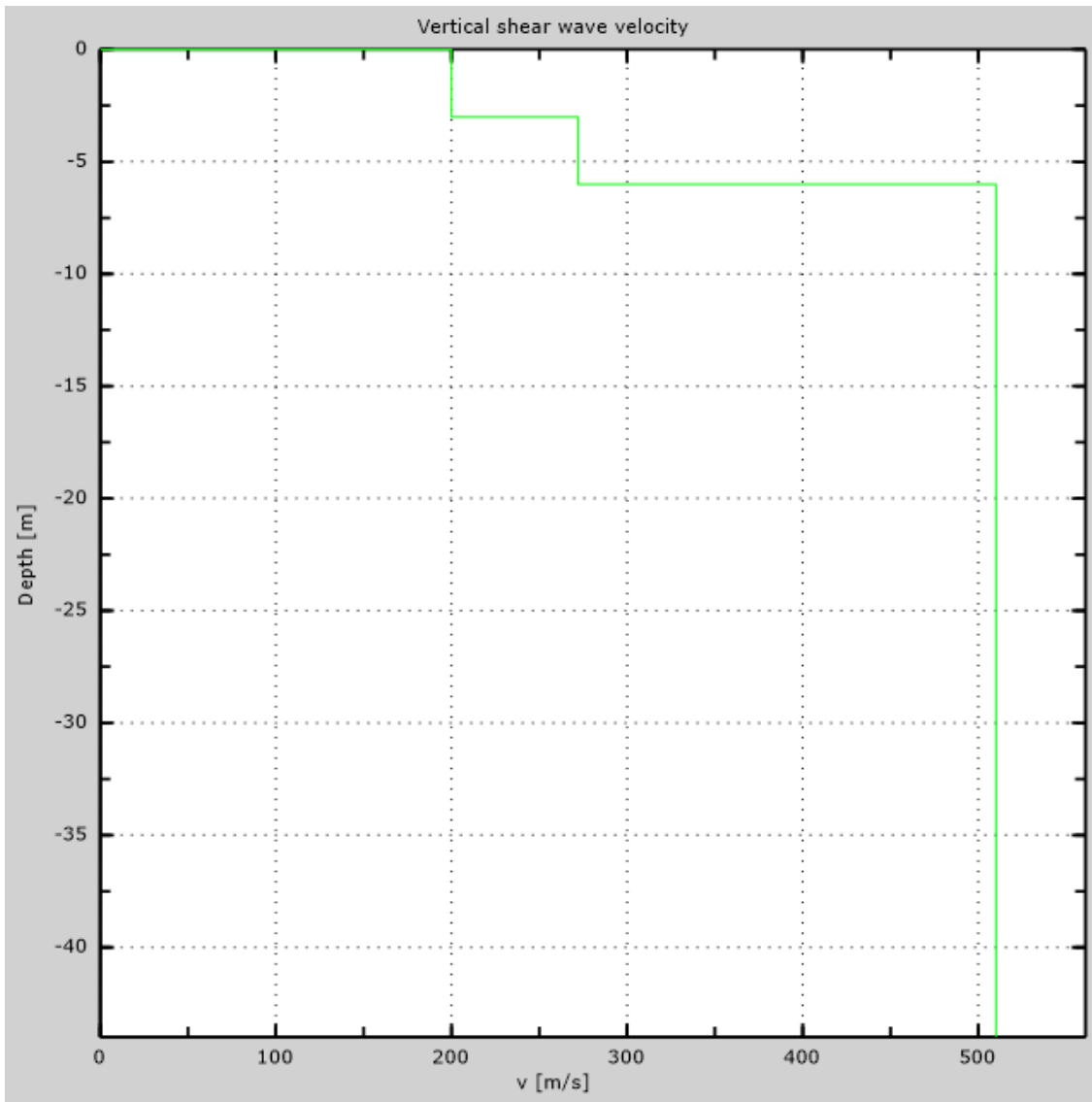


Figure 8: Numerical Vs profile



7 - Final results

Reference plane $z=0$ [m]0

Vs30 [m/s].....410

You are using the definitions included in DM 14 gennaio 2008

The site does belongs to classes A, B, C, D, E or S1 (alluvional soil, gravel, sand, silt, clay, rock).

The site is not susceptible to liquefaction or there is not sensitive clay.

The geotechnic unit 2 is the bed rock

Soil typeS2

Appendix Type of ground

Type A: Rock or other rock-like geological formation, including at most 3 m of weaker material at the surface

Type B: Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least 30 m in thickness, characterised by a gradual increase of mechanical properties with depth, Vs30 between 360m/s and 800m/s

Type C: Deep deposits of dense or medium dense sand, gravel or stiff clay with thickness greater than 30 m, Vs30 between 180m/s and 360m/s

Type D: Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil with thickness greater than 30 m, Vs30 lower than 180m/s

Type E: A soil profile consisting of a surface alluvium layer with vs values of type C or D and thickness lower than 20 m, underlain by stiffer material with $vs > 800$ m/s

Type S1: Deposits of soils with $Vs30 < 100$ m/s (or $10 < cu,30 < 20$ kPa), which include a layer of fine-grained and low consistency soil with a thickness greater than 8m, or a layer of peat or highly organic clay with a thickness greater than 3m.

Type S2: Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A - E or S1