UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS MEDIDOS IN SITU POR MEDIO DEL MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW).

Memoria de titulación presentada por:

Luis Roberto Suárez Gómez

Como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Civil

Profesor Guía:

Sr. Luis Fernando Rojas González, Ph.D.

Profesor Co-referente.

Sr. Miguel Petersen Acevedo.

Septiembre 2017

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, mi hermano y mi sobrina, por estar en todo momento, por la formación que me han dado, y por fomentar en mí el deseo de saber cada día más.

A mi abuelo Pedro Vicente que, aunque no esté físicamente presente siempre estará en mi corazón. Gracias por tus bendiciones desde el cielo.

A Catalina, porque siempre estas y seguirás estando, brindándome cariños y soporte.

A Oscar, por estar conmigo en todo momento, como mi amigo, mi compañero y como guía.

A Mauricio, por prestar todo su apoyo en la realización de mi memoria, gracia por estar amigo.

A mi tutor Luis Rojas, ha quien le agradezco la oportunidad de haber permitido realizar tan interesante trabajo de memoria. Porque ha sido pilar fundamental para la construcción de este trabajo, agradezco su gran apoyo, disposición y guía en cualquiera de los tantos momentos que lo necesite.

A todas las buenas personas que integran el Grupo de Geoconsultores por haberme tratado con tanta amabilidad y compartir conmigo gratos momentos durante todo este tiempo.

Y en general a todos aquellos que en cierta forma contribuyeron con la realización de este proyecto.

A MIS PADRES, HERMANO Y ABUELOS.

RESUMEN EJECUTIVO

En obras de ingeniería civil es fundamental conocer las propiedades geofísicas de los materiales que conforman el subsuelo. Existe un método sísmico llamado Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW, Multichannel Analysis of Surface Waves) que se ha utilizado en las últimas décadas para medir y evaluar la velocidad de onda de corte en diferentes sitios.

La extracción precisa de un perfil de velocidad de onda de corte es crítica para cualquier método de ondas superficiales. Aunque el método MASW resulta ser eficaz para este propósito, existen parámetros de adquisición de datos que al establecerse correctamente posibilitan la extracción óptima de estos perfiles.

Se determinaron los parámetros externos que influyen en la medición, los cuáles fueron: 1) la fuente emisora, 2) distancia de la fuente al receptor más cercano, 3) separación entre los geófonos y 4) longitud del arreglo. Con el objetivo de verificar la influencia de estos parámetros en la resolución de los perfiles obtenidos, se buscaron las diferentes variantes de ellos.

Obtenidos los perfiles se realizó un análisis donde se establecen recomendaciones respecto a la configuración de los parámetros óptimos con la finalidad de confeccionar perfiles de velocidad de onda de corte con mayor precisión.

ABSTRACT

In civil Engineering works It is fundamental to know the geophysical properties of the materials that shape the subsoil. There is a seismic method called Multichannel Analysis of superficial waves (MASW) that has been used in the last decades to measure and evaluate the shear wave velocity in different sites.

The accurate extraction of the cutting wave speed profile is critical to any surface wave method. Although, Multichannel Analysis of superficial waves (MASW) method turn out to be effective for this purpose, there are data acquisition parameters which If they are achieve to establish correctly they will possible the optimize extraction of these profiles.

The external parameters which influencing the measurement were determined, these are: 1) the offset source, 2) the distance from this source and the nearest receiver, 3) the distance between the geophone and 4) the receiver spread length. To check the influence of these parameters within the resolution of the obtained profiles, the different variants were looked of them.

Finally, when the profiles are obtained, the next step is to analyses them and establish recommendations related to the configuration of the ideal parameters, where the main objective will be making the shear wave velocity profiles with greater precision.

.

GLOSARIO

V_s	=	Velocidad de propagación de ondas de corte [m/s].
V_{s30}	=	Velocidad de onda de corte equivalente de los 30 [m] superiores del terreno.
V_P	=	Velocidad de propagación de onda de compresión [m/s].
C(w)	=	Velocidad de fase de la onda Rayleigh [m/s].
w	=	Frecuencia [Hz].
G	=	Módulo secante de corte o cizalle [Pa].
G_{max}	=	Módulo de corte máximo o a pequeñas deformaciones [Pa].
K	=	Módulo de Bulk o Compresibilidad [Pa].
E	=	Módulo de Young o elástico [Pa].
μ	=	Módulo de Poisson.
H	=	Profundidad [m].
ρ	=	Densidad natural del suelo [T/m^3].
σ'_v	=	Presión Vertical efectiva [MPa].
γ_C	=	Deformación por corte cíclico [%].
λ	=	Longitud de onda [m].

INDICE DE CONTENIDOS

1 Introducción 14
1.1 Descripción general 14
1.2 Objetivos generales del estudio 15
1.3 Objetivos específicos del estudio 15
1.4 Metodología de trabajo 16
1.5 Estructura de la memoria 17
2 Marco Teórico. 19
2.1 Introducción 19
2.2 Ondas Sísmicas 19
2.2.1 Ondas de cuerpo. 20
2.2.2 Ondas de Superficie. 21
2.2.2.1 Ondas Love u ondas L. 21
2.2.2.2 Ondas Rayleigh. 21
2.2.3 Velocidad de ondas sísmicas y módulo elástico. 24
2.3 Caracterización mediante ondas Superficiales. 26
2.4 Ensayos Geofísicos. 27
2.4.1 Ensayos Invasivos. 27
2.4.1.1 Ensayo Downhole. 27
2.4.1.2 Ensayo Crosshole 29
2.4.2 Ensayos no invasivos. 30
2.4.2.1 Ensayo de Reflexión Sísmica. 30
2.4.2.2 Ensayo de Refracción sísmica. 31
2.4.2.3 Análisis espectral de ondas superficiales. 35
2.4.2.4 Análisis Multicanal de ondas superficiales. 36
3 Método de Análisis Multicanal de ondas superficiales (MASW) 39
3.1 Procedimiento general 40
3.1.1 Adquisición de datos. 40
3.1.2 Construcción de la Curva de Dispersión. 41
3.1.3 Inversión de los datos 44
3.2 Procedimiento de campo mediante metodología MASW. 45

4 Metodología 49
4.1 Ensayo experimentales tipo masw. 49
4.2 Parámetros influyentes en la adquisicion de datos sismicos en el ensayo masw. 51
4.3 Registro de datos sismicos. 53
5 Descripción y caracterización del sitio de estudio. 57
5.1 Caracteristicas geologicas de la zona de estudio. 58
5.2 Estratigrafia de la zona de estudio. 59
6 Resultados y análisis de datos. 62
6.1 Variación de la distancia entre los geófonos. 62
6.1.1 Geófonos espaciados a 1 m. 62
6.1.2 Geófonos espaciados a 4 m. 66
6.1.3 Geófonos espaciados a 6 m. 69
6.1.4 Análisis de Resultados. 72
6.2 Variación de la distancia de la fuente sísmica. 73
6.2.1 Distancia de la Fuente a 0.5 m. 73
6.2.2 Distancia de la Fuente a 5 m. 77
6.2.3 Distancia de la Fuente a 10 m. 80
6.2.4 Análisis de Resultados. 83
6.3 Variación de la masa de la fuente sísmica. 84
6.3.1 Fuente sísmica (masa de martillo 8 Lb.). 84
6.3.2 Fuente sísmica (masa de martillo 12 Lb.). 89
6.3.3 Fuente sísmica (masa de martillo 20 Lb.). 92
6.3.4 Análisis de Resultados. 95
6.4 Variación de Longitud total del arreglo. 96
6.4.1 Longitud total de arreglo de 24 m. 96
6.4.2 Longitud total de arreglo de 33 m. 100
6.4.3 Longitud total de arreglo de 132 m. 104
6.4.4 Análisis de Resultados. 108
7 Conclusiones y futuras líneas de acción. 110
7.1 Conclusiones del estudio. 110
7.2 Futura líneas de acción en el tema. 112
Referencias. 113

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Deformación producida por Ondas de Compresión. 20
Figura 2-2 Deformación producida por Ondas de Corte. 20
Figura 2-3 Deformación producida por Ondas de Love. 21
Figura 2-4 Deformación producida por Ondas de Rayleigh. 22
Figura 2-5 Atenuación de las ondas de Rayleigh con la profundidad. 23
Figura 2-6 Curva de Esfuerzo deformación con variación del módulo de corte (G) y Curva de reducción del módulo de corte (G). 24
Figura 2-7 Representación del ensayo Downhole. 28
Figura 2-8 Representación de los arribos de las ondas. 28
Figura 2-9 Representación del ensayo Crosshole. 29
Figura 2-10 Trayectoria de las ondas incidentes y las ondas reflejadas. 30
Figura 2-11 Variación del tiempo de viaje de las ondas directas y reflejadas. 31
Figura 2-12 Representación del ensayo de Refracción sísmica. 32
Figura 2-13. Diagrama de ley de Snell. 33
Figura 2-14 Representación Método SASW. 35
Figura 2-15 Esquema Procedimiento Método MASW. 37
Figura 3-1 Esquema proceso de adquisición de datos por medio del método MASW. 40
Figura 3-2. Sismograma generado por una fuente sísmica puntual. 41
Figura 3-3. Curva de Dispersión. 43
Figura 3-4. Perfil de Velocidad de onda de corte. 44
Figura 3-5. Proceso de adquisición de datos por medio del método MASW 45
Figura 3-6. Condiciones Topográficas del terreno. 47
Figura 4-1. Sismógrafo Geometrics modelo Geode. 49
Figura 4-2 Arreglo Lineal de geófonos para los ensayos MASW. 50
Figura 4-3. Geófono vertical de 4.5 Hz. 50
Figura 4-4 Fuente generadora de ondas superficiales. 51
Figura 4-5. Esquema de análisis de resultados. 55
Figura 5-1 Ubicación de los ensayos MASW 57
Figura 5-2 Zona geológica de Quillota. 58
Figura 6-1. Registro de Caso 1 dx=1m. 63
Figura 6-2. Curva de Dispersión Caso 1 dx=1 m. 63
Figura 6-3. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 1 dx=1 m. 64
Figura 6-4. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 1 dx=1m. 65
Figura 6-5. Registro de Caso 2 dx=4m. 66
Figura 6-6. Curva de Dispersión Caso 2 dx=4 m. 67
Figura 6-7. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 2 dx=4 m. 67
Figura 6-8. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 2 dx=4m. 68
Figura 6-9. Registro de Caso 3 dx=6m. 69
Figura 6-10. Curva de Dispersión Caso 3 dx=6 m 70

Figura 6-11. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 3 dx=6 m. 70
Figura 6-12. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 3 dx=6m. 71
Figura 6-13. Registro de Caso 4 X1=0.5m. 74
Figura 6-14. Curva de Dispersión Caso 4 X1=0.5 m. 74
Figura 6-15. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 4 X1=0.5 m. 75
Figura 6-16. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 4 X1=0.5m. 76
Figura 6-17. Registro de Caso 5 X1=5m. 77
Figura 6-18. Curva de Dispersión Caso 5 X1=5 m. 78
Figura 6-19. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 5 X1=5 m. 78
Figura 6-20. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 5 X1=5m. 79
Figura 6-21. Registro de Caso 6 X1=10m. 80
Figura 6-22. Curva de Dispersión Caso 6 X1=10 m. 81
Figura 6-23. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 6 X1=10 m. 81
Figura 6-24. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 6 X1=10m. 82
Figura 6-25. Registro de Caso 7 M=8 Lb. 85
Figura 6-26. Curva de Dispersión Caso 7 M=8 Lb. 86
Figura 6-27. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 7 M= 8 Lb. 87
Figura 6-28. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 7 M= 8 Lb. 88
Figura 6-29. Registro de Caso 8 M=12 Lb. 89
Figura 6-30. Curva de Dispersión Caso 8 M=12 Lb. 90
Figura 6-31. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 8 M= 12 Lb. 90
Figura 6-32. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 8 M=12 Lb. 91
Figura 6-33. Registro de Caso 9 M=20 Lb. 92
Figura 6-34. Curva de Dispersión Caso 9 M=20 Lb. 93
Figura 6-35. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 9 M= 20 Lb. 93
Figura 6-36. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 9 M= 20 Lb. 94
Figura 6-37. Registro de Caso 10 L=24 m. 97
Figura 6-38. Curva de Dispersión Caso 10 L=24 m. 98
Figura 6-39. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 10 L= 24 m. 98
Figura 6-40. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 10 L= 24 m. 99
Figura 6-41. Registro de Caso 11 L=33 m. 100
Figura 6-42. Curva de Dispersión Caso 11 L=33 m. 101
Figura 6-43. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 11 L= 33 m. 102
Figura 6-44. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 11 L= 33 m. 103
Figura 6-45. Registro de Caso 12 L=132 m. 104
Figura 6-46. Curva de Dispersión Caso 11 L=132 m. 105
Figura 6-47. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 11 L= 132 m. 106
Figura 6-48. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 11 L= 132 m. 107

INDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Parámetros de medición. 53
Tabla 4-2. Resumen de los parámetros a modificar ensayo experimental MASW. 54
Tabla 5-1. Análisis de material del sondaje..... 59
Tabla 6-1. Resumen de análisis de Resultados. 72
Tabla 6-2. Resumen de análisis de Resultados. 83
Tabla 6-3. Resumen de análisis de Resultados. 95
Tabla 6-4. Resumen de análisis de Resultados. 108

INDICE DE GRAFICOS.

Grafico 6-1. Comportamiento de la profundidad de exploración. 72
Grafico 6-2. Comportamiento de la profundidad de exploración. 83
Grafico 6-3. Comportamiento de la profundidad de exploración. 95
Grafico 6-4. Comportamiento de la profundidad de exploración. 108

CAPÍTULO 1

Introducción

1 INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El conocimiento de las propiedades geotécnicas de los suelos, tales como la rigidez de las capas superiores del suelo, el comportamiento dinámico entre otros, es esencial en diversos proyectos de ingeniería civil. Una de las propiedades que actualmente ha tomado una importante relevancia para el diseño sísmico de estructuras, es la velocidad de onda de corte (Vs). La normativa actual clasifica los tipos de suelos de fundación para el diseño sísmico de estructuras en función de este parámetro, lo cual ha generado un desafío importante para la ingeniería geotécnica, en el desarrollo de equipos de campo como en la formación de profesionales calificados.

Dentro los campos de la exploración de las propiedades dinámicas de los suelos existen métodos invasivos y no invasivos. Entre los métodos no invasivos que permiten determinar estas propiedades, existen los métodos sísmicos basados en ondas superficiales que son comúnmente utilizados para determinar la velocidad de propagación de onda de corte (Vs).

De los métodos de análisis de onda superficiales se encuentran los métodos de análisis espectral de ondas superficiales y de análisis multicanal de ondas superficiales, que se basan en las propiedades de dispersión de las ondas superficiales para calcular la velocidad de fase de estas ondas a distintas frecuencias. Luego, a través de un proceso de inversión, se busca un perfil de velocidades de propagación de onda de corte.

El presente estudio pretende dar una propuesta de optimización de los parámetros relevantes que influyen en la medición de ondas superficiales mediante el método no invasivo de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW, Multichannel Analysis of Surface Waves), de manera de tener datos más confiables para realizar la estimación del perfil de velocidad de propagación de ondas de corte (Vs)

1.2 OBJETIVOS GENERALES DEL ESTUDIO

Evaluar y aplicar la técnica de medición de datos a través del método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) variando parámetros de medición y verificando su influencia para obtener datos más confiables, comprobando la calidad de la resolución de los perfiles de velocidad de onda de corte.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ESTUDIO

- Indagar en los fundamentos teóricos existentes con relación a la medición de la velocidad de corte por medio de ondas superficiales.

- Establecer las variables que influyen directamente en la resolución de las mediciones obtenidas con el método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW).

- Aplicar el método (MASW) modificando parámetros que influyen en la medición, para determinar la variabilidad de la resolución de los datos obtenidos.

- Analizar de los datos obtenidos y generar conclusiones en función de los hallazgos, realizando recomendaciones y sugerencias al método de medición estudiado, para su aplicación práctica.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para desarrollar el estudio y alcanzar los objetivos planteados anteriormente se ha definido la siguiente metodología de trabajo:

- Estudio bibliográfico:
  - Métodos de ondas superficiales.
  - Revisión de los factores que influyen en la medición de la velocidad de onda de corte mediante métodos de ondas superficiales.
  - Investigación sobre la resolución de datos obtenidos mediante el método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW).

- Elaboración de metodología de para estudiar la resolución de datos medidos con el método MASW
  - Estudio de una metodología de evaluación de parámetros del método de análisis multicanal de ondas superficiales, con el fin de identificar cuál de estos presenta mayor incidencia para alcanzar en el ensayo una resolución deseada.

- Elaboración de una campaña de terreno de medición de datos con la ayuda de esta metodología.
- Análisis e interpretación de los resultados

- Conclusiones.

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Esta memoria está estructurada en 7 capítulos, los que se describen a continuación:

Capítulo 1: Introducción

Capítulo 2: Marco teórico: se indagan algunos antecedentes que sustentan la medición de la velocidad de ondas de corte mediante métodos de ondas superficiales. Se describen algunos principios físicos que dominan el proceso de medición y además se mencionan las principales metodologías existentes.

Capítulo 3: Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW): se describe con detalle el método, indicando el proceso completo de obtención de los datos de terreno y el procesamiento de los datos obtenidos.

Capítulo 4: Metodología: se plantean los pasos a seguir en los ensayos experimentales con el método MASW. Indicando los parámetros a modificar para observar la variabilidad de la resolución de los registros obtenidos.

Capítulo 5: Descripción y caracterización del sitio de estudio: se presenta la estratigrafía y se caracterizan cualitativamente los materiales que componen el subsuelo del sitio utilizado para realizar los ensayos experimentales.

Capítulo 6: Análisis de resultados: se presentan los análisis de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales. A raíz de este análisis se realizar el cumplimiento de los objetivos de esta memoria y se entregan las conclusiones respectivas.

Capítulo 7: Conclusiones, recomendaciones, sugerencias y futuras líneas de acción.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

2 MARCO TEÓRICO.

2.1 INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las propiedades geotécnicas de los suelos, tales como la rigidez de las capas del suelo, se transforma en una información esencial en diversos proyectos de ingeniería.

Entre los diversos factores que influyen en la respuesta sísmica de un sitio frente a la demanda de un sismo se encuentran: la fuente de excitación, la frecuencia y la amplitud de la onda incidente, las propiedades dinámicas de las distintas capas del suelo y la topografía de la zona.

La velocidad de onda de corte es una de las variables que entrega información de relevancia para estimar las propiedades dinámicas del suelo y permite estimar el comportamiento del suelo frente un eventual sismo.

Para comprender el procedimiento de la determinación del perfil de velocidad de onda de corte en la profundidad, es necesario reconocer y comprender los tipos de métodos existentes, junto con conocer la evolución y sus modificaciones en el tiempo.

2.2 ONDAS SÍSMICAS

Las ondas sísmicas según la definición son un tipo de onda elástica que se propaga en un medio provocando perturbaciones tensionales. Las fuentes causantes de este tipo de perturbaciones elásticas son las siguientes: sismos, golpe de una masa en el suelo, el ruido industrial, tráfico vehicular, el oleaje marino, el efecto de viento en los árboles, entre otros. Se llaman perturbaciones elásticas debido a que no alteran las propiedades elásticas de los materiales del terreno.

Después de una perturbación, varios tipos de ondas se propagan dentro de la tierra y a lo largo de la superficie. Las ondas generadas pueden ser divididas en dos categorías: ondas de cuerpo y ondas de superficie.

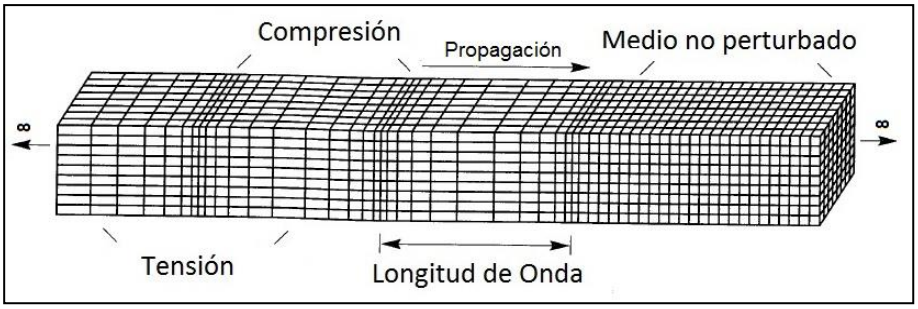
Cabe destacar que, al generar una perturbación en el suelo, el 67 % de la energía corresponde a ondas superficiales, el 26% a ondas de corte y el 7% a ondas de compresión (Wood, 1968).

2.2.1 Ondas de cuerpo.

Las ondas de cuerpo corresponden a las ondas que se propagan a través de un medio sólido de la Tierra, las cuales se pueden clasificar en dos tipos (Sauter, 1989):

- **Ondas Primarias u Ondas P**. Son un tipo de onda que hacen vibrar una partícula en el sentido de propagación de las ondas; su movimiento es similar al de las ondas sonoras, comprimiendo y dilatando alternativamente el medio sólido a través del cual viajan, a estas ondas también se les denomina ondas longitudinales o de compresión.

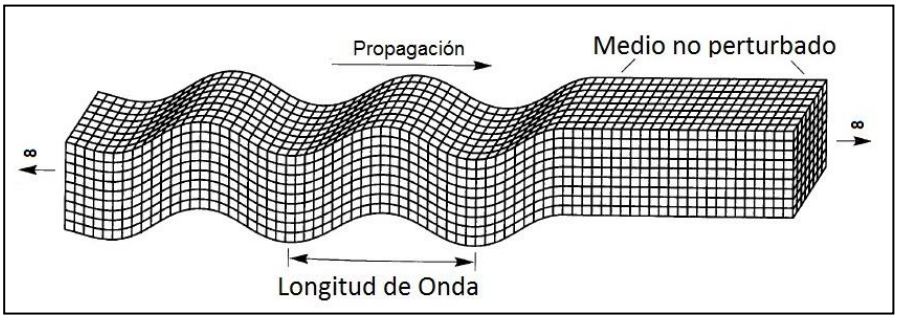
Figura 2-1 Deformación producida por Ondas de Compresión.



Fuente: Kramer (1996)

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

Figura 2-2 Deformación producida por Ondas de Corte.



Fuente: Kramer (1996)

La velocidad de las ondas de cuerpo varía según la rigidez de los materiales por los cuales viaja (Kramer, 1996).

En geotecnia, el parámetro de la velocidad de la onda de corte (Vs) es importante pues permite caracterizar dinámicamente depósitos de suelo, dado que en base a este parámetro es posible establecer y analizar el comportamiento del suelo ante cargas cíclica, fundamental para el diseño estructural de edificios.

2.2.2 Ondas de Superficie.

Las ondas superficiales son ondas que se propagan en la superficie de la Tierra, las cuales tienen una velocidad de propagación menor que las ondas de cuerpo. Pueden ser generadas por fuentes naturales (sismos, oleaje, viento, etc.) o artificiales (actividad humana), y pueden estar ubicadas tanto al interior como al exterior de la Tierra. El movimiento producido por las ondas superficiales está restringido a la parte superior de la corteza, a una profundidad de unos 30 km (Sauter, 1989)

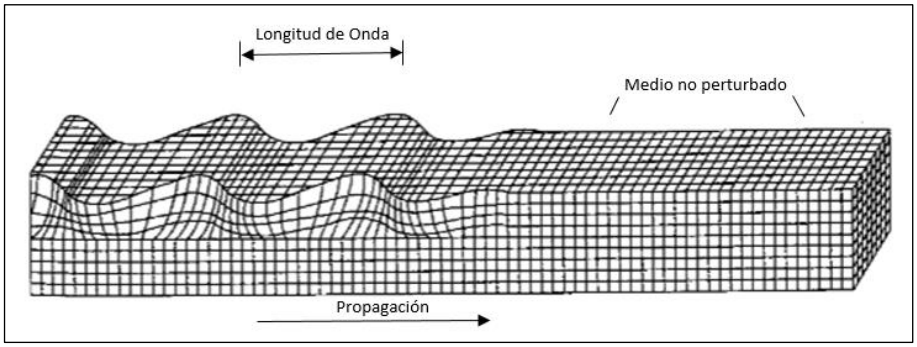
Existen dos tipos fundamentales de ondas superficiales:

- **Ondas Love u ondas L**
- **Ondas Rayleigh u ondas R**

2.2.2.1 Ondas Love u ondas L.

El movimiento de este tipo de ondas es horizontal y transversal a la dirección de propagación de la onda. Es movimiento de este tipo de ondas es similar al movimiento de las ondas S.

Figura 2-3 Deformación producida por Ondas de Love.



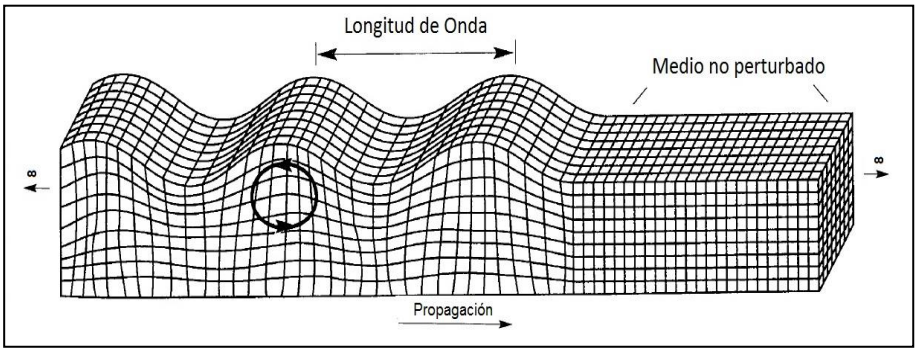
Fuente: Kramer (1996)

2.2.2.2 Ondas Rayleigh.

Las ondas Rayleigh son ondas superficiales que viajan a lo largo de una superficie “libre”, tal como las interfaces Tierra-aire o tierra-agua (Xia et al, 1999), su movimiento es similar al de las ondas en la superficie del agua, haciendo vibrar una partícula sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimientos elípticos horizontal y vertical simultáneamente. Estas ondas se caracterizan por tener relativamente, baja velocidad, baja frecuencia y gran amplitud. Las ondas Rayleigh son resultado de la interferencia de ondas P y el movimiento vertical de las ondas de corte (SV). En un medio homogéneo, el movimiento de las partículas del modo fundamental de las ondas Rayleigh que se desplazan de izquierda a derecha,

es elíptico a lo largo de la superficie libre, en dirección de las agujas del reloj (retrogrado). El movimiento está limitado a un plano vertical, consistente con la dirección de propagación de la onda. El ground roll es un tipo particular de las ondas Rayleigh y viaja a lo largo o cerca de la superficie del suelo. Aunque el ground roll se considera ruido en estudios de ondas de cuerpo (es decir, perfiles de reflexión y refracción), sus propiedades dispersivas son utilizadas para inferir propiedades elásticas cercanas a la superficie (Park et al, 1999).

Figura 2-4 Deformación producida por Ondas de Rayleigh.

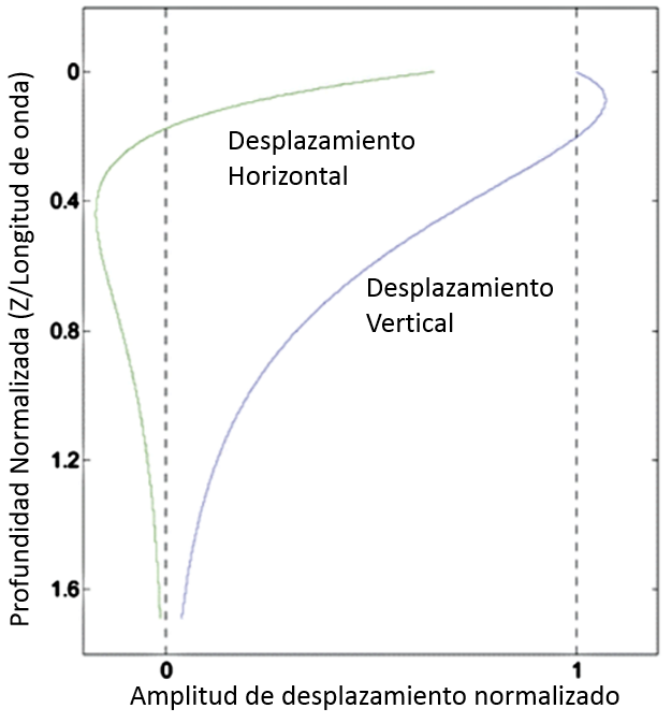


Fuente: Kramer (1996)

Una fuente sísmica vertical, por ejemplo, un martillo de impacto o una placa vibratoria, irradia una combinación de Ondas P, Ondas S u Ondas Rayleigh. Alrededor de 2 tercios (67%) de la energía sísmica, comúnmente se imparte en las ondas Rayleigh (Principalmente Ground Roll), mientras que el 23 % es impartido por las ondas S y el 7 % por las ondas P (Woods, 1968). Resultado del movimiento horizontal de las partículas, las ondas Love son raramente registradas en los ensayos en donde se usa una fuente sísmica vertical y receptores verticales. (Park 1997).

La amplitud de la onda Rayleigh decae exponencialmente con la profundidad. A una profundidad de penetración comparable a una longitud de onda, el desplazamiento por el medio se convierte en menos de 30% de su valor de superficie. Si se generan ondas Rayleigh por una fuente puntual, la energía de la onda decae a razón de 1/r, donde r es la distancia de la fuente sísmica. Así, la amplitud en el plano de una onda Rayleigh decae a de $1/\sqrt{r}$ si se asume una fuente puntual. (Woods, 1968).

Figura 2-5 Atenuación de las ondas de Rayleigh con la profundidad.



Fuente: Woods (1968).

En un semi espacio homogéneo, la velocidad de la onda de Rayleigh es independiente a la frecuencia; por ejemplo, la onda de Rayleigh no es dispersiva en un semi espacio sólido y homogéneo. Cuando el módulo de Poisson es igual a 0.25, la velocidad de las ondas de Rayleigh es un 91.94% de la velocidad de la onda de corte (onda S). Sin embargo, en el caso que exista un medio compuesto por capas, las ondas Rayleigh serán disipadas por el medio. Los componentes de la onda con diferentes longitudes de onda (y por tanto diferentes frecuencias) tendrán diferentes profundidades de penetración y se propagarán a diferentes velocidades.

La dispersión de las ondas de Rayleigh se puede apreciar mediante un ensayo con una fuente sísmica idealizada, que vibra a una sola frecuencia f en la superficie de un medio elástico de varias capas. La longitud de onda de las ondas de Rayleigh son constantes y puedes ser determinadas mediante la medición de la distancia entre los picos sucesivos (o valles) en el movimiento de la onda superficial observada. Una fuente de baja frecuencia genera ondas de Rayleigh de extensa amplitud de onda que excita múltiples capas del medio, mientras que una fuente sísmica de alta frecuencia genera ondas Rayleigh con amplitud de onda corta y de una menor profundidad de penetración en el medio.

La velocidad de fase de cada componente de la onda depende principalmente del módulo elástico de las capas que excita cada componente de la onda. Por lo tanto, solo el módulo elástico de las capas más superficiales tiene impacto en la velocidad de fase de las ondas Rayleigh. Cada

modo de una onda superficial dada, tiene una velocidad de fase única para cada frecuencia. (Xia et al, 2002)

Generalmente, se observa que la velocidad sísmica aumenta con la profundidad, por ejemplo, ondas con longitud de onda prolongada (baja frecuencia) se propaga más lento que las ondas con amplitud de onda menor. (Bessason & Erlingsson, 2001).

$$\lambda(f) = \frac{V_R(f)}{f}$$

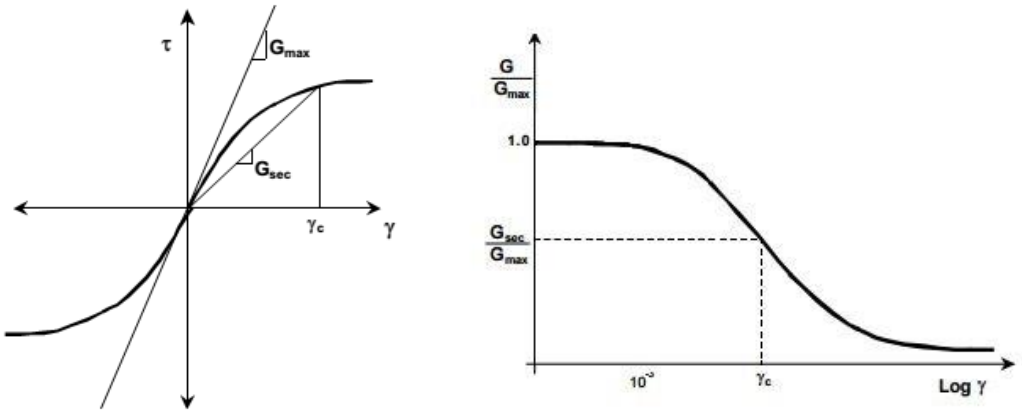
Donde f es la frecuencia, $V_R(f)$ es la velocidad de fase de la onda de Rayleigh en función de la frecuencia f y $\lambda(f)$ es la longitud de onda de la onda de Rayleigh en función de la frecuencia f.

2.2.3 Velocidad de ondas sísmicas y módulo elástico.

Las velocidades de las ondas de cuerpo de los geo-materiales, la velocidad de ondas de corte (Vs) y la velocidad de las ondas de compresión (Vp), pueden ser relacionadas con el módulo elástico del medio por el cual las ondas se propagan. La relación entre el módulo elástico y la velocidad de la onda de cuerpo es ampliamente utilizada en estudios de geofísica a fin de obtener información sobre la distribución espacial de las propiedades mecánicas del subsuelo en el sitio en estudio.

El módulo de corte de un suelo (G) es altamente dependiente sobre el nivel de esfuerzo como se indica por la curva esfuerzo deformación mostrada en la figura. Para pequeñas deformaciones de corte el comportamiento del suelo está muy cerca de ser elástica, por ejemplo, el módulo de corte para pequeños esfuerzos se puede suponer que es contante en su máximo valor, Gmax. Para incrementos de deformación, la rigidez del suelo disminuye como se indica por la pendiente decreciente de la curva esfuerzo deformación en la figura.

Figura 2-6 Curva de Esfuerzo deformación con variación del módulo de corte (G) y Curva de reducción del módulo de corte (G).



Fuente: Luna & Jadi, 2000.

El esfuerzo de corte inducido por muchos métodos geofísicos sísmicos, tal como los ensayos de análisis espectral de ondas superficiales (SASW, Spectral Analysis of Surface Waves) y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW, Multichannel Analysis of Surface Waves), es pequeño y está dentro del rango del comportamiento del suelo que se asume como elástico. Por lo tanto, la velocidad de onda de corte calculada puede ser utilizada para inferir la rigidez del material por el cual la onda se propaga.

$$G_{max} = \rho V_S^2$$

Donde ρ es la densidad de masa del suelo. (Luna & Jadi, 2000)

Basado en la relación entre el módulo de elasticidad, (E) y el módulo de corte (G) de un material elástico lineal isotrópico homogéneo, el módulo de elasticidad (pequeñas deformaciones) de una capa de suelo en estudio (Emax) puede ser estimada como (Bessason & Erlingsson, 2011):

$$E_{max} = 2G_{max}(1+\upsilon) = 2\rho V_S^2(1+\upsilon)$$

Donde υ es el módulo de Poisson. Para suelos compuestos por arenas y gravas, el valor del módulo de Poisson esta típicamente en el rango de $\upsilon \approx$ 0.25-0.35 (Bessason & Erlingsson, 2011).

Resolviendo las ecuaciones anteriores para Vs, se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_S = \sqrt{\frac{G_{max}}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_{max}}{2\rho(1+\upsilon)}}$$

Existe una expresión similar para la velocidad de onda de compresión, V_P (Kramer, 1999):

$$V_P = \sqrt{\frac{G_{max}(2-2\upsilon)}{\rho(1-2\upsilon)}}$$

Tomando la relación entre la ecuación de Vs y Vp, se obtiene (Kramer, 1999):

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2(1-\upsilon)}{1-2\upsilon}}$$

Por lo tanto, conociendo la velocidad de onda de corte y conociendo (estimado) el módulo de Poisson, la velocidad de la onda de compresión puede ser estimada por la ecuación determinada anteriormente.

La velocidad de la onda de Rayleigh (V_R) es siempre inferior que la velocidad de onda de corte (V_S). La relación entre V_R y V_S depende de las propiedades mecánicas de la media de las ondas. La velocidad de onda de Rayleigh para un suelo isotrópico elástico se puede aproximar como (Bessason & Erlingsson, 2011):

$$V_R = \frac{0.874 + 1.11\upsilon}{1 + \upsilon} V_S$$

Por lo tanto, para un material con $\upsilon = 0.3$, la estimación de la velocidad de onda de Rayleigh es:

$$V_R \approx 0.93 V_S$$

2.3 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE ONDAS SUPERFICIALES.

La utilización de las ondas superficiales en la caracterización del suelo se debe a la naturaleza de este tipo de ondas y algunas de sus propiedades. Debido a que estas ondas viajan cercanas a la superficie libre, es relativamente fácil medir el movimiento asociado a ellas, obteniendo información importante sobre las propiedades mecánicas del suelo.

La naturaleza dispersiva de las ondas superficiales Tipo Rayleigh en medios estratificado proporciona información clave respecto a las propiedades de los materiales cercanos a la superficie del suelo. La base de la mayoría de los métodos de análisis de ondas superficiales es una determinación exacta de la velocidad de fase dependiente de la frecuencia del modo fundamental de las ondas de Rayleigh (Park, 1997). Aparte de ser una función de la frecuencia, la velocidad de fase de las ondas de Rayleigh se relaciona con otras propiedades del terreno. La propiedad más importante es la velocidad de onda de corte de cada capa de suelo. Así, mediante la inversión de la velocidad de fase de las ondas de Rayleigh registradas, se logra obtener el perfil de ondas de corte en la profundidad en el sitio de prueba. (Xia, Miller y Park, 1999).

Debido al comportamiento de las ondas superficiales en su propagación en medios estratificados, se ha desarrollado aplicaciones en el campo de la sismología con el objetivo de inferir las características de la roca en donde se genera la propagación de las ondas. En particular, las ondas superficiales tienen una gran influencia en el movimiento asociado a los terremotos, por lo que se inició una investigación para utilizar la información obtenida en sismógrafos para obtener un conocimiento más profundo en cuanto a la estructura de la Tierra y su sistema de capas.

Aplicaciones a la caracterización geotécnica comenzaron por los años cincuenta, con el método geofísico SSRM (Steady-State Rayleigh Method). Posteriormente, en los años ochenta, se introduce el método llamado análisis espectral de ondas superficiales (SASW, Spectral Analysis of Surface Waves) junto con otras alternativas para la modelación de la propagación de las ondas superficiales y la obtención de un perfil de Velocidad de onda de corte asociado.

2.4 ENSAYOS GEOFÍSICOS.

Este tipo de ensayos han sido adoptados por la ingeniería geotécnica para poder estimar la velocidad de onda de corte en la profundidad. De acuerdo a la fuente de excitación que se utilice pueden clasificarse como pasivos o activos, siendo los activos aquellos que utilizan una fuente externa que genere una vibración en el medio, mientras que los ensayos pasivos utilizan la vibración medioambiental como fuente (ruido).

Otra forma de clasificar este tipo de ensayos, es si necesitan de un sondaje o no para poder realizar la medición. Este tipo de ensayos se conoce como invasivo, es decir, la instrumentación debe ser instalada en profundidad dentro de uno o más sondajes como es el caso de los ensayos downhole y crosshole. Los ensayos no invasivos son los que permiten posicionar la instrumentación en la superficie del terreno y realizar la medición con una fuente activa también ubicada en superficie. Dentro de estos ensayos encontramos los de tipo SASW (spectral analysis surface waves) y MASW (multichannel analysis surface waves).

2.4.1 Ensayos Invasivos.

Como se mencionó anteriormente, los ensayos Downhole y Crosshole son los más comunes dentro de esta clasificación. Estos fueron desarrollados a partir de 1960 como una adaptación de los ensayos de penetración de cono dinámico (SCPT)

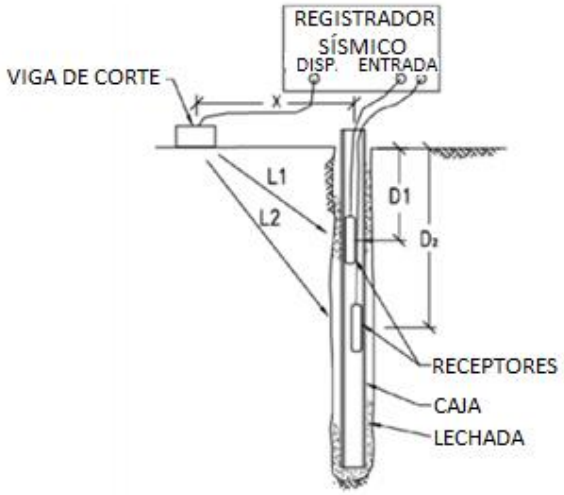
2.4.1.1 Ensayo Downhole.

El método downhole ha sido ampliamente utilizado para la medición de perfiles de velocidad de onda de corte in situ para el análisis de la respuesta sísmica de un terreno. De acuerdo al procedimiento detallado en la norma ASTM D7400 – 08 (Standard Test Methods for Downhole Seismic test), este método se limita a la determinación de las velocidades en intervalos de tiempo de la llegada de las ondas sísmicas de compresión y corte polarizadas, que se generan en las cercanías de la superficie y que viajan hacia abajo a un arreglo de sensores instalados verticalmente.

Por ello la norma recomienda el uso de 3 transductores ubicados ortogonalmente para formar un arreglo triaxial o en su defecto, utilizar sensores uniaxiales o biaxiales tomando en consideración que los transductores estén orientados en la dirección más paralela posible a la dirección de la fuente de ondas S o radialmente en el caso de las ondas P. además se plantea utilizar dos geófonos separados una distancia conocida, que van profundizados en el sondaje para realizar la medición, o en su defecto, realizar las mediciones con un solo geófono triaxial realizando las mediciones en profundidad y tomando las consideraciones necesarias en el cálculo de la velocidad de onda de corte.

En este ensayo se generan ondas sísmicas en la superficie, mediante golpes verticales y horizontales en una placa ubicada una distancia de 1 a 3 metros aproximadamente del pozo, registrándose los tiempos de llegada de las ondas de compresión (ondas P) y corte (ondas S). El objetivo del ensayo es tomar medidas de los tiempos de viaje de las ondas sísmicas internas generadas a partir de la energía de la fuente emisora.

Figura 2-7 Representación del ensayo Downhole.



Fuente: ASTM D7400-08

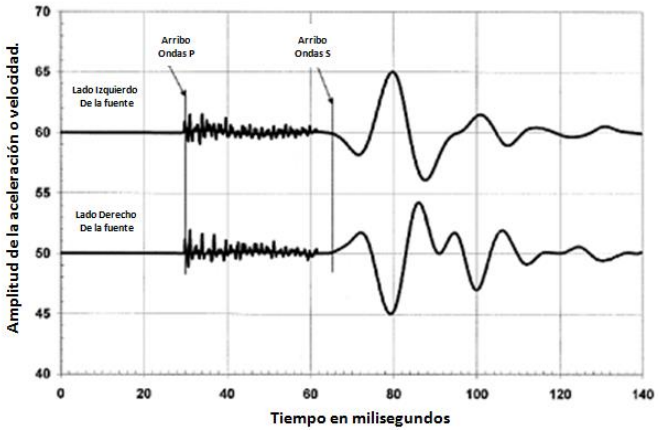
Las ondas P y S son registradas por el o los geófonos situados en la parte inferior de la sonda, midiéndose estas cada 1 o 2 metros (distancia nominal comúnmente empleada) hasta alcanzar la profundidad del pozo estudiado.

En la interpretación de datos, la norma ASTM D7400-08 propone que la identificación de la llegada de la onda P como la primera desviación horizontal luego del tiempo t=0. La onda S se puede identificar de acuerdo a dos características:

- Un incremento abrupto en la amplitud ó
- Un abrupto cambio en la frecuencia coincidente con el cambio de amplitud.

Gráficamente esto se presenta en la siguiente figura.

Figura 2-8 Representación de los arribos de las ondas.

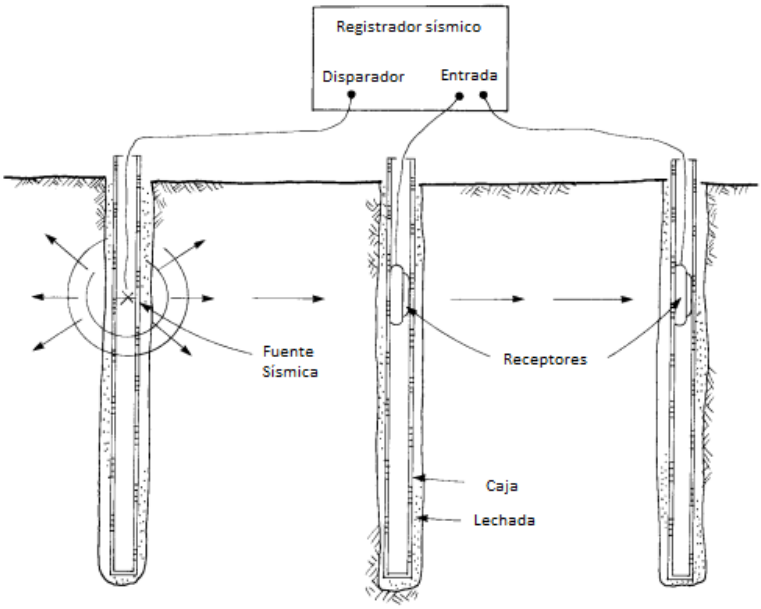


Fuente: ASTM D7400-08

2.4.1.2 Ensayo Crosshole

Este ensayo sísmico utiliza dos o más sondeos para medir la velocidad de las ondas sísmicas. El dispositivo consiste en dos sondajes, el primero con la fuente emisora de energía y el segundo con el receptor situados a la misma profundidad. De esta manera se mide la velocidad de propagación de las ondas a través del material situado entre ambos sondajes. Repitiendo el ensayo a distintas profundidades se obtiene un perfil de velocidades versus la profundidad.

Figura 2-9 Representación del ensayo Crosshole.



Fuente: ASTM D4428/D 4428M-00

Se recomienda utilizar por lo menos dos o tres sondajes para minimizar los errores provenientes de las medidas del tiempo de disparo, los efectos del material superficial e inter sondajes y la anisotropía. Las velocidades de onda se calculan a partir de la diferencia en los tiempos de llegada en el par de pozos. Los tiempos de llegada se determinan visualmente usando punto de fase común (primera llegada, primer peak, etc), o por medio de técnicas de correlaciones cruzadas usadas habitualmente en exploración petroleras.

En función del tipo de fuente emisora utilizada en la generación de las ondas sísmicas, el contenido de ondas P y S es diferente. Por ejemplo, para explosivos el contenido en ondas P es mayor particularmente cuando se utilizan grandes cantidades y se detona cerca de la superficie del suelo.

2.4.2 Ensayos no invasivos.

Un ensayo no invasivo no considera la extracción de muestras ni la necesidad de realizar uno o más sondajes de perforación, es decir, permite realizar el muestreo o ensayo sin tener que perturbar el terreno.

En comparación con los otros métodos disponibles, los métodos no invasivos son de bajo costo y además son respetuosos con el medio ambiente, ya que no requieren el uso de maquinaria pesada, lo cual significa que no se dejan marcas duraderas en la superficie del sitio donde se realiza el ensayo.

2.4.2.1 Ensayo de Reflexión Sísmica.

Es uno de los métodos más empleado en la investigación de formaciones rocosas, prospección petrolífera (tanto en tierra como el océano) e hidrogeología, ya que permite la obtención de información de capas muy profundas para la cuantificación de depósitos de roca y petróleo, determinación de límites (hasta 100 m. de profundidad), saturación (contenido de agua) y porosidad de un acuífero, así como en la localización de saltos en fallas geológicas. En la actualidad, su uso está siendo recientemente renovado para la investigación depósitos superficiales de suelo.

La reflexión sísmica permite determinar la velocidad de propagación de ondas y el espesor de las capas del suelo desde la superficie. El ensayo y su interpretación son conceptualmente muy simples. Este ensayo es muy usado para investigar estratigrafía a gran profundidad.

El ensayo consiste en producir un impulso (usualmente rico en ondas P) desde una fuente F y medir los tiempos de llegada de las ondas a un receptor R, ubicado a una cierta distancia. El impulso produce ondas de tensión que se irradian desde la fuente en todas las direcciones, con frente de ondas semiesférico.

Figura 2-10 Trayectoria de las ondas incidentes y las ondas reflejadas.

Fuente: Kramer, 1996

Parte de la energía de la onda sigue una trayectoria directa desde F a R y llega a R en:

$$t_d = \frac{distancia\ de\ llegada}{velocidad\ de\ la\ onda} = \frac{x}{V_{p1}}$$

Mediante la medición de x y t_d, la velocidad de las ondas p en la capa superior V_{p1} es fácilmente determinada. (Kramer, 1996)

Otra porción del pulso de energía se desplaza hacia abajo y golpea con el límite de la capa horizontal en un ángulo de incidencia:

$$i = tan^{-1}\frac{x}{2H}$$

La parte de la onda que se refleja de vuelta hacia la superficie del suelo llega al receptor en:

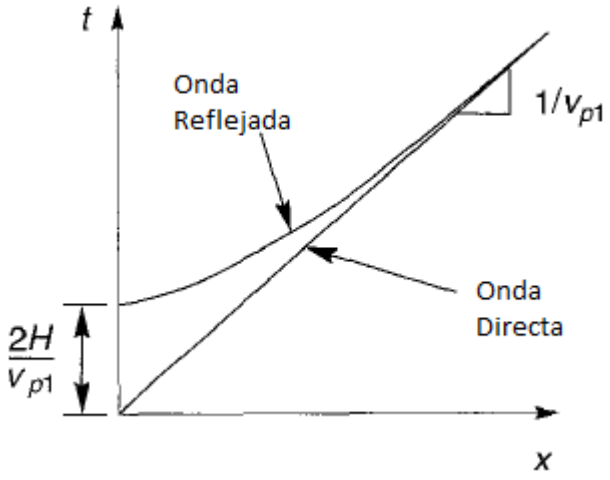
$$t_r = \frac{distancia\ de\ desplazamiento}{velocidad\ de\ onda} = \frac{2\sqrt{H^2 + (\frac{x}{2})^2}}{V_{p1}} = \frac{\sqrt{4H^2 + x^2}}{V_{p1}}$$

Mediante la medición de t_r y conociendo la distancia x y la velocidad V_{p1} desde el cálculo directo indicado anteriormente, se puede calcular el espesor de la capa superior como (Kramer, 1996):

$$H = 1/2\sqrt{t_r^2 V_{p1}^2 - x^2}$$

Según muestra la figura los tiempos de llegada de las ondas directas y reflejadas están relacionadas; la diferencia en los tiempos disminuye al aumentar la distancia.

Figura 2-11 Variación del tiempo de viaje de las ondas directas y reflejadas.



Fuente: Kramer, 1996.

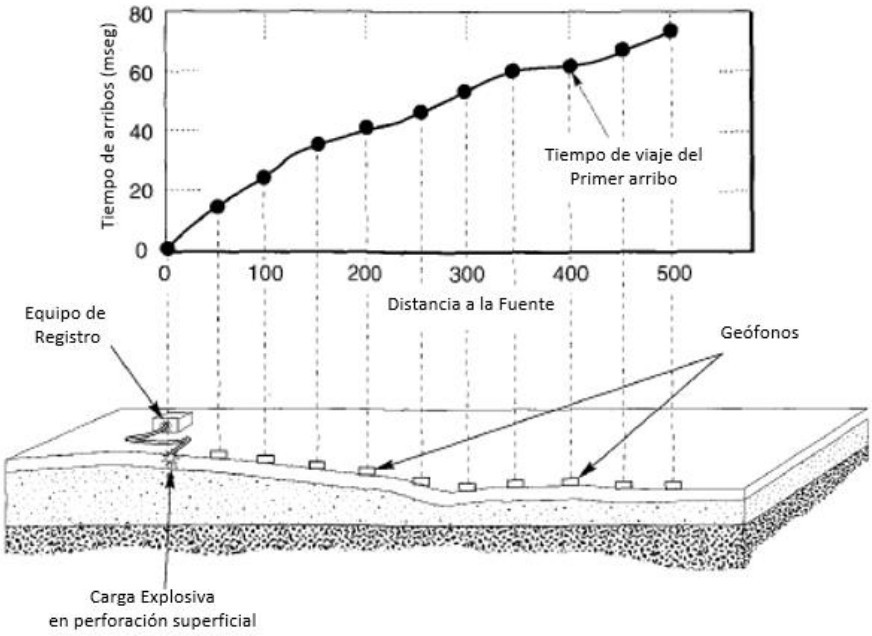
2.4.2.2 Ensayo de Refracción sísmica.

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

El ensayo de refracción sísmica elimina la limitación más importante del ensayo sísmico de reflexión mediante el uso de los tiempos de llegada de las primeras ondas, independientemente del camino, para llegar a un receptor dado. La prueba consiste en la medición de los tiempos de viaje de ondas P y/o S desde una fuente de impulso a una serie lineal de puntos a lo largo de la superficie de suelo a diferentes distancias. Este ensayo se utiliza con mayor frecuencia que el ensayo de reflexión. Debido a que su gran aplicación a la ingeniería sísmica.

Se muestra en la figura un típico ensayo de refracción. Donde se observa una fuente de energía impulsiva, que puede ser mecánica o explosiva, ésta se localiza en o cerca de la superficie del suelo. Una serie de receptores, usualmente geófonos, que se ubican en un arreglo lineal. Conectados a la fuente se ubica un equipo de registro, que almacena el momento cuando se provoca la carga de impulso. Desde el equipo de registro se puede determinar el tiempo de llegada de las primeras ondas en cada receptor, lo que permite dibujar la gráfica distancia-tiempo que se muestra en la figura.

Figura 2-12 Representación del ensayo de Refracción sísmica.



Fuente: Kramer, 1996.

Si todos los receptores se excitan por una sola onda tensional que viaja a través de la superficie de la tierra a una velocidad constante v, (el ensayo no discrimina en ondas P o ondas S, por lo que v puedes ser velocidad de ondas P o S), la gráfica tiempo de arribo versus la distancia sería una línea recta con una pendiente (1/v), pasando por el origen (Kramer, 1996).

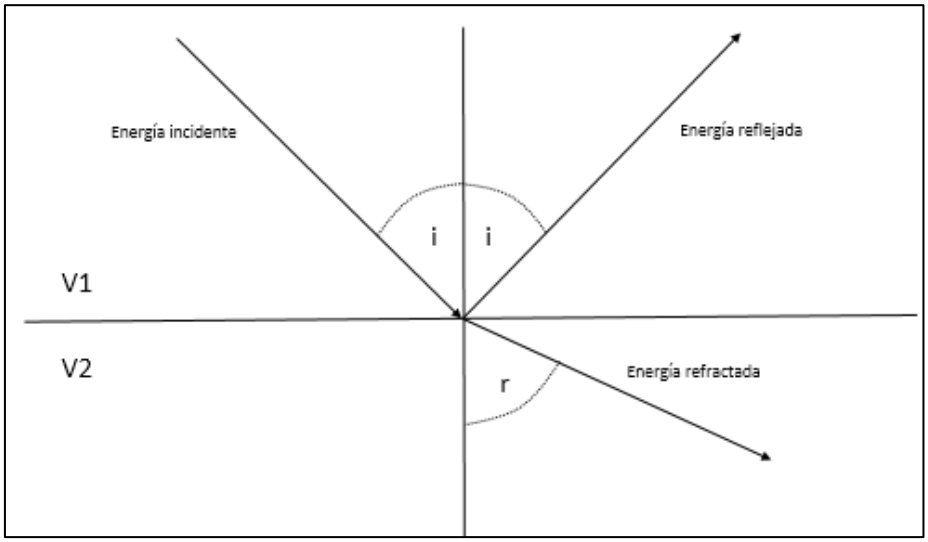
Suponiendo que el ensayo se realiza en un suelo elástico con una estratigrafía de dos capas, el impulso generado produce ondas tensiónales que viajan a través del medio con un frente de ondas semiesférico. Parte de la energía viaja directamente desde la fuente a los receptores en forma de onda directa, la cual arriba a los receptores en el siguiente tiempo:

$$t_{dn} = \frac{x_n}{v_1}$$

Donde v_1 es la velocidad de propagación de onda en el material 1. Cabe destacar que el subíndice n se refiere al receptor.

Otra parte de las ondas viajan hacia abajo del límite entre los materiales 1 y 2. En este límite, las ondas son reflejadas y refractadas, con una dirección de onda refractada determinada por la ley de Snell.

Figura 2-13. Diagrama de ley de Snell.



Fuente: Elaboración propia.

Cuando una onda ingresa con un grado de inclinación respecto de la línea perpendicular a la interface entre medios (llamado ángulo de incidencia, i), el ángulo de inclinación entre la línea perpendicular y la línea de energía en la onda refractada (ángulo de refracción, r), cambiar cuando el medio tiene una densidad distinta.

La relación de estos ángulos se relaciona directamente con la diferencia de velocidades de propagación de onda. Cuando la velocidad de fase del medio de incidencia es menor a la del medio de refracción, esta relación puede ser descrita mediante la Ley de Snell, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{sen\ i}{sen\ r} = \frac{V_1}{V_2}$$

En el Angulo crítico de incidencia, i_c, la dirección del frente de ondas refractado será paralela al límite entre las dos capas. Considerando el principio de Huygens (el cual postula que cualquier punto de un frente de ondas actúa como la fuente de una nueva perturbación) y la ley de Snell, esta onda critica refractada producirá una onda en el material 1 que viajara a v_1 en una dirección inclinada con un ángulo de 90-i_c hacia el límite de las dos capas, esta onda es llamada onda de cabeza. El frente de ondas resultante está constituido por una parte de ondas directas y una parte de ondas de cabeza. Los primeros arribos a los receptores más cercanos, son realizados por las ondas directas antes que las ondas de cabeza, sin embargo, las ondas de cabeza llegan primero a los receptores ubicados a una distancia mayor a la distancia critica x_c (Kramer,1996).

A distancias mayores a x_c, un frente de ondas que viaja abajo a una velocidad v1 a través del material 1 de espesor H, es críticamente refractada para viajar en el material 2 a velocidad v2 y a continuación refractada de nuevo a través del material 1 a velocidad v1, alcanzara un receptor más rápido que un frente de ondas que viaja a lo largo de la trayectoria directa más corta a velocidad v1. El tiempo requerido para que la onda de cabeza alcance un receptor n se representa por la siguiente ecuación:

$$t_{hn} = \frac{H}{V_1 \cos i_c} + \frac{x_n - 2H \tan i_c}{V_2} + \frac{H}{V_1 \cos i_c}$$

Con la incidencia critica determinada con la ley de Snell;

$$\sin i_c = \frac{V_1}{V_2}$$

Y la identidad trigonométrica;

$$cos^2 i_c = 1 - sin^2 i_c$$

Se llega a la siguiente ecuación:

$$t_{hn} = \frac{x_n}{V_2} + 2H\sqrt{\frac{1}{V_1^2} - \frac{1}{V_2^2}}$$

Si un receptor está ubicado exactamente a la distancia crítica, x_c, las ondas directas y las ondas de cabeza pueden llegar exactamente al mismo tiempo (kramer, 1996),

$$t_{dn} = t_{hn}$$

Consecuentemente, de las ecuaciones anteriores se determina:

$$\frac{x_c}{V_1} = \frac{x_c}{V_2} + 2H\sqrt{\frac{1}{V_1^2} - \frac{1}{V_2^2}}$$

Finalmente, se puede determinar que el espesor de la capa superior con la siguiente ecuación:

$$H = \frac{x_c}{2}\sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

Para el caso de esta en presencia de un suelo con múltiples capas, la ecuación para determinar el espesor de cada capa k-esima queda expresa por:

$$H_k = \frac{x_{ck}}{2}\sqrt{\frac{V_{k+1} - V_k}{V_{k+1} + V_k}} + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{H_j}{V_j} \frac{V_{k+1}\sqrt{V_k^2 - V_j^2} - V_k\sqrt{V_{k+1}^2 - V_j^2}}{\sqrt{V_{k+1}^2 - V_k^2}}$$

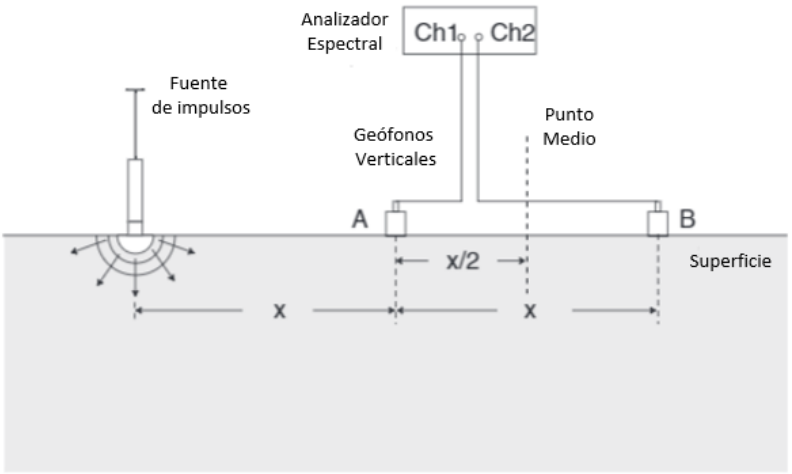
Para encontrar estas relaciones se ha supuesto que la velocidad de cada capa es menor que la de la capa que esta inmediatamente bajo ella. En general, y para la mayoría de las condiciones geológicas esta es una buena suposición, sin embargo, los resultados pueden ser erróneos cuando una capa de baja velocidad está por debajo de una capa de velocidad mayor, lo que no será reflejado claramente en la gráfica de arribos versus distancia a la fuente. Esto puede producir que se determine una profundidad de capa mayor que la real (Kramer, 1996).

Por otro lado, entre los métodos no invasivos se encuentran el análisis espectral de ondas superficial (SASW) y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), los cuales utilizan análisis de ondas superficiales para extraer las curvas de dispersión de las ondas de Rayleigh y con esta estimar los perfiles de velocidad de ondas de corte en las capas de suelos en el sitio de estudio.

2.4.2.3 Análisis espectral de ondas superficiales.

El método de análisis espectral Ondas Superficiales (SASW) se introdujo a principios de 1980. Este método utiliza las características dispersivas de ondas de Rayleigh, en un medio de múltiples capas para estimar la velocidad de onda de corte de las capas del suelo cerca de la superficie (Park et al. 1999, Xia et al. 1999). Las ondas superficiales se generan con una fuente impulsiva y se registran por geófonos ubicados en la superficie. Los datos recogidos se analizaron en el dominio de la frecuencia para determinar una curva de dispersión. La curva de dispersión se utiliza a continuación como base para el cálculo de un perfil de velocidad de onda de corte como una función de la profundidad para el sitio dado (Bessason y Erlingsson, 2011, Park et al, 1999).

Figura 2-14 Representación Método SASW.



Fuente: Everett, 2013.

Debido a las propiedades de dispersión de las ondas de Rayleigh, las ondas con diferentes frecuencias penetran a diferentes profundidades y proporcionan información sobre las propiedades del material de las capas del suelo a diversas profundidades (Xia et al 2002). Al procesar las mediciones de ensayo SASW, se utilizan las series de tiempo de dos geófonos a la

vez. Para un sitio dado, se debe tomar varias mediciones, con diferentes distancias de fuente y con diferentes tipos de carga de impacto, con el fin de excitar ondas con variado contenido de frecuencias. Además, el proceso se repite desde el otro extremo del arreglo de geófonos, con el fin de cubrir los posibles efectos del cambio de fase debido a los receptores y la instrumentación. Cuando las ondas son generadas con una carga aplicada manualmente, por ejemplo, un martillo, se pude estimar de manera fiable la velocidad de onda de corte hasta en 20 metro de profundidad en el mejor de los casos. (Bessason& Erlingsson, 2011).

Debido a la necesidad de repetir las mediciones con diferentes implementaciones en campo, la adquisición de los datos consume tiempo y mano de obra. Además, el procesamiento de los datos involucrados en el método SASW requiere mucho tiempo. Debido a que los cálculos deben repetirse para cada par de receptores por separado y evaluar la calidad de los resultados para cada par examinado. Por otra parte, como se utilizan las series de tiempo de solo dos receptores a la vez, pueden surgir dificultades en la distinción de las señales de las ondas superficiales confiables del ruido, como la inclusión de ondas de cuerpo y/o modos más altos. Esto puede causar errores en la curva de dispersión y en última instancia en el perfil de velocidades de onda de corte. Como criterio empírico, para cada sitio de prueba se pueden ajustar parámetros manualmente, para detectar el posible ruido, es por esto que el ensayo SASW no puede ser totalmente automatizado.

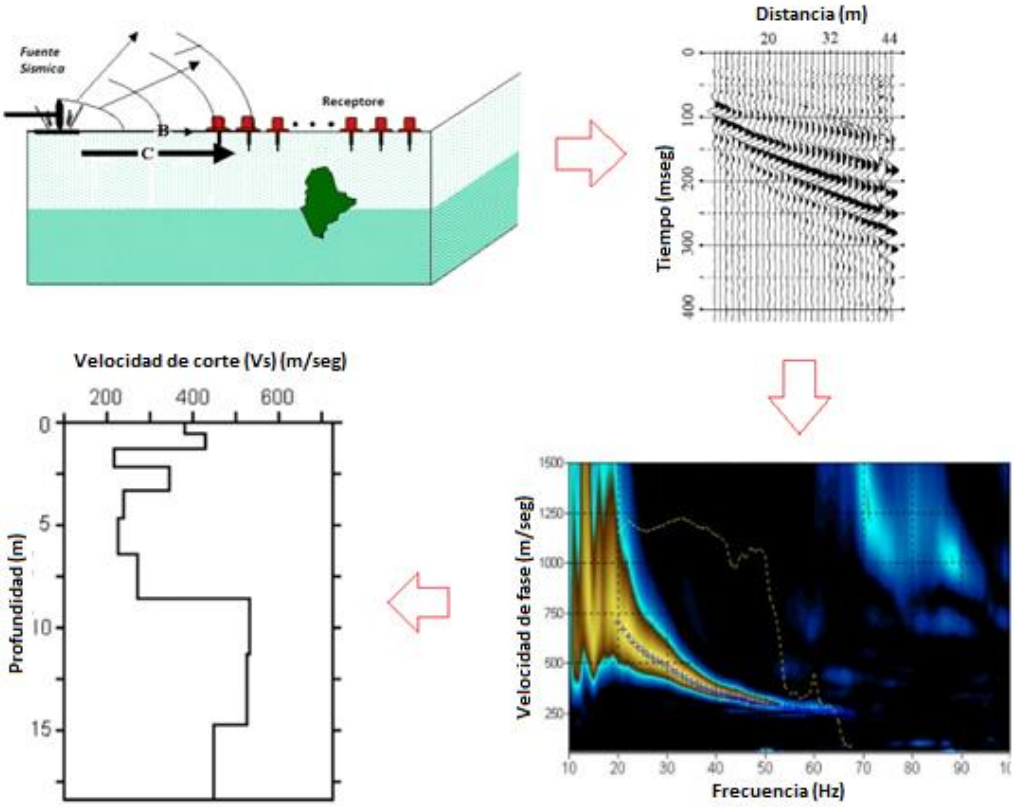
El ensayo SASW generalmente se divide en tres pasos:

- Mediciones de campo,
- Procesamiento de los datos obtenidos y
- Análisis de inversión de los datos obtenidos para determinar el perfil de velocidades de ondas de corte.

2.4.2.4 Análisis Multicanal de ondas superficiales.

El análisis multicanal de ondas Superficiales (MASW) fue introducido por Park et al. (1999). En general, el ensayo MASW puede ser dividido en ensayos pasivos y activos en función de cómo se adquieran las ondas de superficie necesarias para el análisis. En los ensayos MASW activos, las ondas superficiales son generadas activamente por impulsos o fuentes sísmicas vibratorias, mientras el ensayo MASW pasivo utiliza ondas superficiales generadas por fuentes naturales o actividades culturales, por ejemplo, el tráfico de una carretera. (Park, 2007). El ensayo MASW fue desarrollado con el fin de superar algunas de las debilidades del ensayo SASW.

Figura 2-15 Esquema Procedimiento Método MASW.



Fuente: Park, 2007.

En este ensayo, normalmente una fuente vibratoria aplica un pulso el cual es medido por un arreglo lineal de múltiples receptores. Este ensayo utiliza la propiedad de dispersión de las ondas superficiales con el propósito de generar el perfil de velocidad de onda de corte en función de la profundidad. Básicamente se trata de un ensayo de ingeniería sísmica que mide ondas superficiales de bajas frecuencia (3-30 Hz), las cuales son registradas por un sistema de múltiples receptores (12 o más receptores), desplegados en la superficie linealmente a una distancia de unos pocos a unos cientos de metros (2-200m).

El proceso completo del ensayo MASW por lo general consiste de tres pasos:

- Registro de datos de campo mediante el arreglo geófonos multicanal,
- Extracción de la curva de Dispersión y
- Análisis de inversión de la curva de dispersión para determinar el perfil de velocidad de onda de corte en función de la profundidad.

En la presente memoria se desarrolla con mayor detalle el Ensayo MASW activo, analizando las variables que influyen en la dispersión de los registros obtenidos con los arreglos lineales de receptores. Los siguientes capítulos se describe en mayor detalle el procedimiento del ensayo MASW activo.

CAPÍTULO 3

Método de Análisis Multicanal de ondas superficiales (MASW).

3 MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)

A principios de la década de los 80, fue introducido un método de ondas de propagación para generar perfiles de velocidad de ondas de corte en la superficie. Este método fue llamado análisis espectral de ondas superficiales (SASW) y utiliza el análisis espectral de los pulsos de ondas en el suelo generadas por una fuente impulsiva y registrada por un par de receptores. Se configura y reconfigura el par de receptores (basado en el cálculo de la longitud de ondas realizado durante la adquisición) tantas veces como se necesario para probar el rango de frecuencias deseados. Los datos se analizan en el dominio de la frecuencia para producir una curva de dispersión mediante el cálculo de las diferencias de fase entre cada despliegue de pares de receptores. La inclusión del ruido durante las mediciones (SASW) a veces se puede controlar mediante un conjunto de criterios empíricos según el sitio de investigación. La optimización de estos criterios es un reto debido a las singularidades existentes en los materiales del suelo cercano a la superficie. Existen dificultades inherentes al evaluar y distinguir la señal de ruido con solamente un par de receptores. Es por esto que surge la necesidad de registrar disparos repetidos en múltiples implementaciones de campo para un sitio determinado, lo cual se traduce en aumentar el tiempo y la mano de obra durante el proceso de adquisición de datos de campo.

El análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) intenta superar estos puntos débiles que posee el método SASW.

El método MASW tiene varias ventajas sobre el método SASW:

- Menor inversión de tiempo en la adquisición de datos.
- Un rápido procesamiento de datos.
- Las fuentes de ruido, tales como la inclusión de ondas de cuerpo y las ondas reflejadas dispersas, pueden ser identificadas y eliminadas en comparación con el método SASW con facilidad.

El método análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) se puede dividir en tres pasos:

1. Adquisición de datos: proceso durante el cual la onda relacionada con la propagación de una perturbación generada por una fuente dinámica controlada es registrada por geófonos o acelerógrafos en la superficie del terreno.
2. Extracción de la curva de dispersión desde los datos sísmicos.
3. Proceso de inversión de la curva de dispersión, basado en la propagación de ondas en medios estratificados, que permite establecer el perfil de velocidad de ondas de corte con un margen de incertidumbre o error.

Al dar un impulso en el suelo se generan diversos tipos de ondas, entre ellas están las ondas de Rayleigh de modo fundamental. Además de estas ondas se encuentran las ondas de cuerpo, las ondas superficiales no planas y el ruido ambiental. El ruido empeora la resolución de las mediciones de las ondas generadas. Cada tipo de ruido normalmente tiene distintas propiedades a distintas velocidades, pero con ayuda del método MASW se puede identificar el tipo de ruido y atenuar su efecto en los registros.

La descomposición de los campos de onda registrados mediante el barrido de frecuencia permite la identificación de la mayoría del ruido a distintas frecuencias de fase y offset de la fuente. Esto combinado con un registro de multicanales se logra minimizar el ruido durante la etapa de adquisición de ondas.

3.1 PROCEDIMIENTO GENERAL

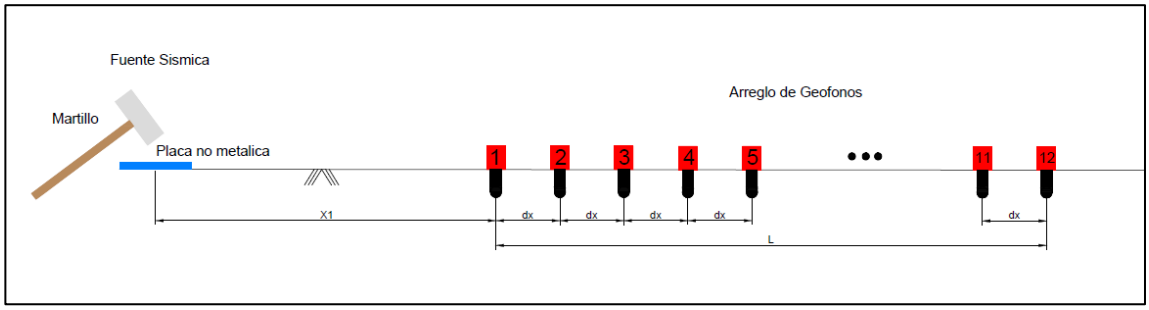
A continuación, se describe en detalle cada una de etapas que componen la metodología de análisis multicanal de ondas superficiales.

3.1.1 Adquisición de datos.

Para la adquisición de datos, se instalan geófonos en una línea recta en la superficie del sitio de prueba. Los geófonos registran movimientos verticales, es importante que se coloquen verticalmente en la superficie del suelo. Estos geófonos están conectados a una tarjeta de adquisición, esta tarjeta está conectada a un computador que dispone de un software que transcribe los datos. Los geófonos generalmente ocupados son de baja frecuencia (por ejemplo, 4,5 Hz).

Luego, para generar las ondas sísmicas es necesaria una fuente sísmica capaz de crear ondas de superficie. Una común elección es un mazo razonablemente pesado (por ejemplo, 10 Kg) que puede generar ondas de baja frecuencia y gran amplitud, aumentando la profundidad de resolución de los perfiles de velocidad de onda de corte. El uso de una plaza de impacto (placa base), no metálica, ayuda a generar ondas de superficie de baja frecuencia, logrando resolución del perfil de velocidad de onda de corte en las capas más superficiales del suelo.

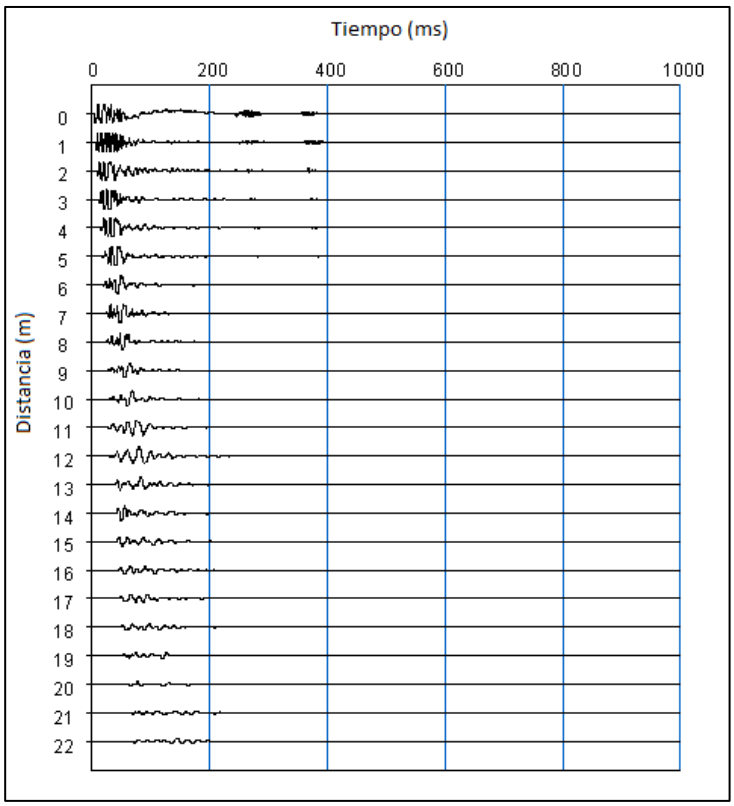
Figura 3-1 Esquema proceso de adquisición de datos por medio del método MASW.



Fuente: Elaboración Propia.

Generado el tren de ondas sísmicas se inicia la recopilación de datos para luego ocupar éstos en la determinación de los perfiles de velocidad de onda de corte. Un registro sísmico de buena calidad requiere configuraciones de campo y parámetros de adquisición óptimos, garantizando la grabación de ondas de Rayleigh en su modo fundamental, lo cual aumenta la calidad de la curva de dispersión obtenida en el proceso de análisis de datos.

Figura 3-2. Sismograma generado por una fuente sísmica puntual.



Fuente: SeisImager SW.

3.1.2 Construcción de la Curva de Dispersión.

Determinar una curva de dispersión confiable es el paso más importante del análisis y ejecución del método MASW. El método asume que los registros están compuestos en la mayoría por el modo fundamental de ondas superficiales e ignora los modos superiores. Como los registros obtenidos contienen modos superiores y en algunos casos con una energía no despreciable. Toma mucha relevancia la detección estos modos para no incurrir en resultados no óptimos.

EL proceso de construcción de la curva de dispersión considera en primer lugar el sismograma cuyo dominio corresponde a desplazamiento – tiempo (x,t), donde x es el desplazamiento medido por los receptores en m y t el tiempo de medición en milisegundos. El sismograma se representa por la siguiente función f(x,t), a la cual se aplica la siguiente transformada de Fourier.

$$F(x,w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,t) e^{-i\omega t} dt$$

Transformado la función f(x,t) cuyo dominio es el desplazamiento - tiempo a un función F(x,w) con dominio del desplazamiento – frecuencia.

F(x,w) puede ser expresada como:

$$F(x,w) = P(x,w)A(x,w)$$

Donde A(x,w) corresponde a espectro de amplitudes y P(x,w) corresponde al espectro de fase.

El espectro de fase P(x,w) conserva todas las propiedades dispersivas de las ondas generadas y el espectro de amplitud conserva las propiedades de atenuación de las ondas. De esta manera se puede expresar F(x,w) también como :

$$F(x,w) = e^{-i\varphi x}A(x,w)$$

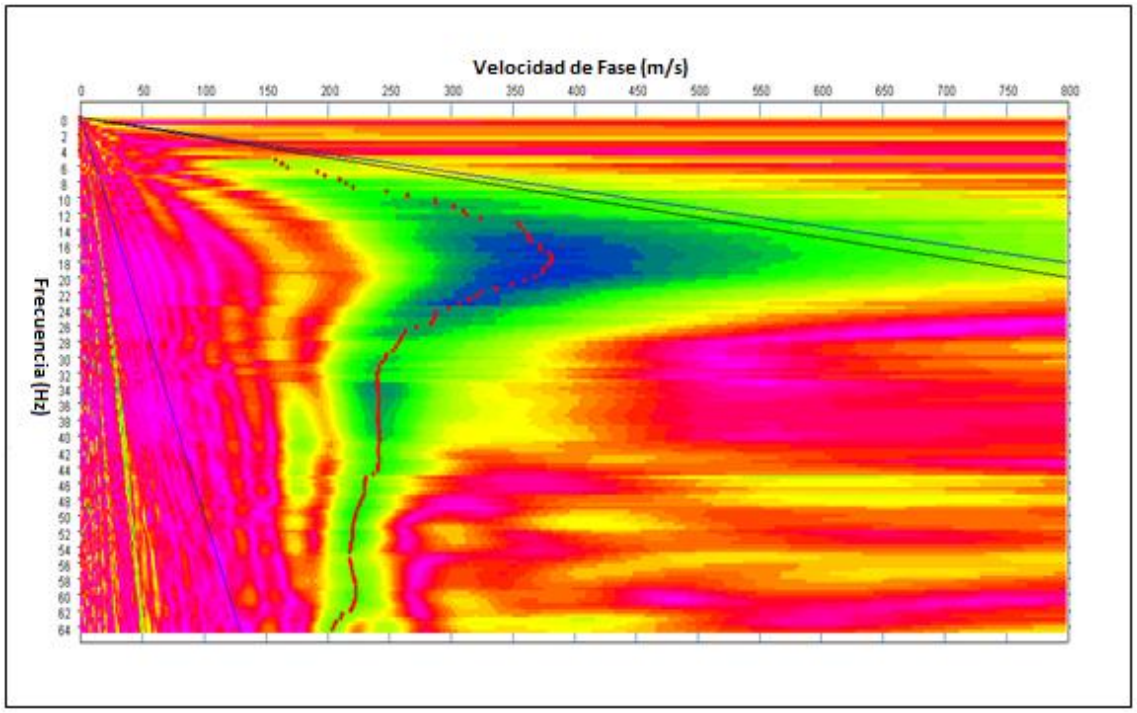
Donde $\varphi = w/c_w$, w= frecuencia en radianes y c_w = velocidad de fase en función de la frecuencia.

Luego la gráfica de dispersión se genera apilando en función de los cambios de fase a través de la siguiente transformada:

$$F(c,w) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x,w)te^{-i\omega\frac{x}{c}}\,dx$$

Luego la función F(c,w) tendrá máximos a lo largo del dominio de c_w, lo cual permitirá graficar la curva de dispersión.

Figura 3-3. Curva de Dispersión.



Fuente: Pickwin.

Una vez obtenidos los pares de F(c,w) con las velocidades de fase $c_{w,}$, se procede a combinar todos los pares construyendo el grafico de dispersión. La curva de dispersión es el resultado de máximas amplitudes asociadas a la velocidad de fase y la frecuencia.

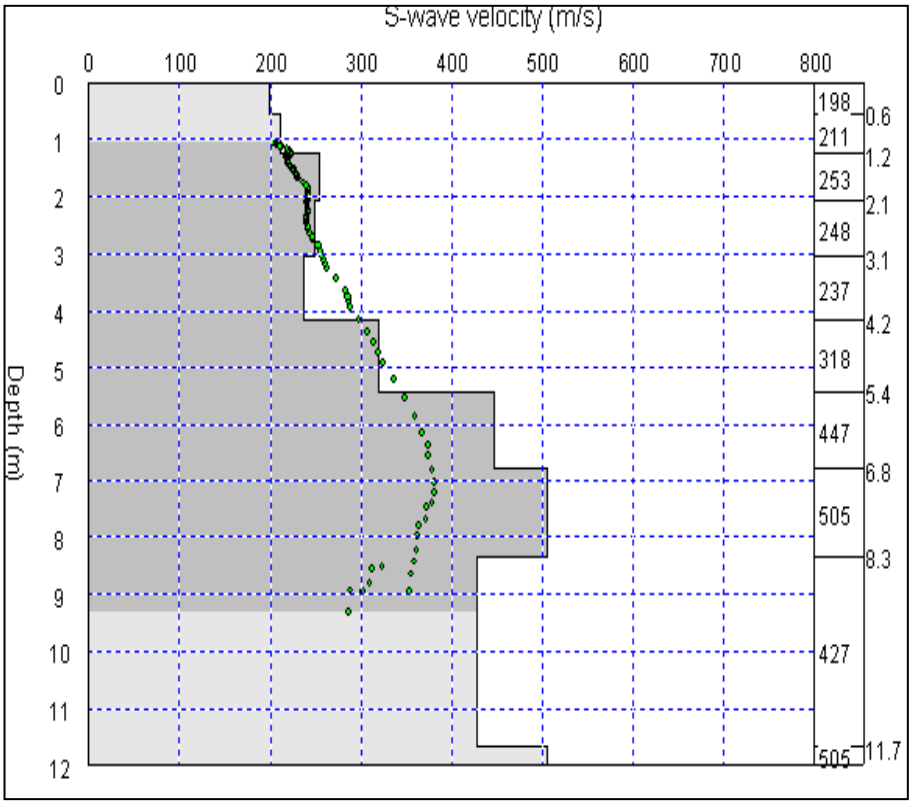
3.1.3 Inversión de los datos

Los perfiles de velocidad de la onda cortante Vs, se calculan utilizando un proceso de inversión iterativo que requiere de los datos de dispersión y de estimaciones a-priori de la distribución de la densidad y del módulo de Poisson. Posterior a dicha determinación se recurre a metodologías de inversión de los registros obtenidos por medio de un proceso de optimización denominado algoritmos genéticos (GAs) por medio del cual, se obtiene un resultado más fiable y presenta una estimación de resultados ajustados.

Como la curva de dispersión obtenida, posee información de baja calidad, esto provoca que el modelo de inversión, al ser un proceso iterativo, tenga dificultad en converger a un perfil definitivo. Es por esto que antes de proceder con la ejecución de modelo de iteración para la inversión de los datos, se procede a eliminar los datos de baja calidad en la curva de dispersión. Este estudio considera eliminar el 15 % de los datos con peor calidad de la curva de dispersión.

Para comenzar con el proceso iterativo de inversión de datos, es necesario especificar un modelo inicial como punto de partida. El modelo consta de la velocidad de la onda de corte, la densidad, y el parámetro de espesores de capa del suelo. Entre estos parámetros, Vs tiene efectos más significativos en la convergencia fiable del algoritmo.

Figura 3-4. Perfil de Velocidad de onda de corte.



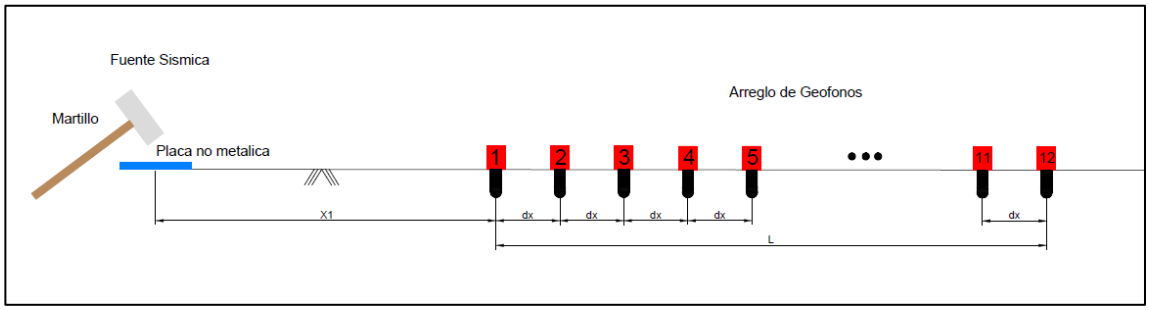
Fuente: Pickwin.

3.2 PROCEDIMIENTO DE CAMPO MEDIANTE METODOLOGÍA MASW.

A continuación, se describe el procedimiento de campo de la metodología MASW. Como se explicó anteriormente para la adquisición de datos de terreno, para lo cual se alinean geófonos en línea recta en la superficie del sitio de prueba.

En una prueba de campo comúnmente se utilizan 12 geófonos o más, cada uno conectados a un canal de grabación (Park, 1997). Generalmente, el aumento del número de los geófonos utilizados para el registro, se puede obtener una resolución más alta en la curva de dispersión (Park,2001). Los receptores deben esta alineados con el mismo espaciamiento (Park, 1997).

Figura 3-5. Proceso de adquisición de datos por medio del método MASW



Fuente: Elaboración Propia.

En la figura dx es la distancia entre geófonos, X1 la distancia desde la fuente sísmica y el primer geófono y L es la longitud total del arreglo.

Para el proceso de adquisición de los datos sísmicos se requiere de un tiempo de grabación. Para registros de ondas de superficie generados por una vibración sísmica, se requiere de tiempos de grabación más largos (Park, 1999).

La máxima profundidad de investigación (Z_{max}) varía con el tipo de fuente usado y del sitio donde se desarrolla la prueba. La máxima profundidad de investigación está determinada por la longitud de onda más extensa obtenida durante la adquisición (λ_{max}). Un criterio comúnmente adoptado es (Park, 2010):

$$Z_{max} \approx 0.5\lambda_{max}$$

La longitud del arreglo (L) está relacionado con la longitud de onda más larga que se puede registrar y, por lo tanto, también relacionado con la profundidad máxima de investigación. Un criterio común es que la longitud de onda máxima que se puede analizar, con la mayor precisión posible, es aproximadamente igual a la longitud del arreglo de geófonos (Park, 2010).

$$\lambda_{max} \approx L$$

Utilizando la ecuación anteriormente presentada y combinándola con la ecuación de los criterios empíricos de profundidad máxima de investigación. La profundidad de investigación se puede escribir en términos de la longitud total del arreglo como:

$$Z_{max} \approx 0.5L$$

Se debe evitar longitudes de arreglo muy extensas. Ya que las ondas superficiales generadas por las fuentes sísmicas más comunes se atenúan por debajo del nivel de ruido al final de un arreglo excesivamente largo, haciendo que la señal registrada por los receptores más lejanos sea muy ruidosa impidiendo su utilización en el análisis (Park, 1999).

El espaciamiento entre los receptores (dx) se relaciona con la longitud de onda más cortas que se puede analizar, determinando así la profundidad de investigación mínima (Z_{min}).

$$dx = n * z_{min}$$

donde n es una constante varía entre 0.3 y 1.0.

Otro parámetro importante en el proceso de adquisición de datos, es la distancia entre la fuente y el receptor más cercano, la cual se denomina comúnmente como distancia a la fuente, designado por X1. Optimizar este parámetro, para un perfil de medición dado, puede minimizar los riesgos de tener ondas superficiales no totalmente desarrolladas que sean capturadas por los geófonos.

Un distanciamiento de la fuente entre el receptor más cercano mayor o igual a la longitud del arreglo, es decir, X1≥L, podría mejorar la energía para las ondas de superficie, aumentando así la longitud de onda máxima para de un arreglo de receptores dado. Sin embargo, un espaciamiento entre la fuente y el receptor más cercano muy largo puede resultar en una atenuación excesiva de la onda generada. Es por esto que se recomienda como mínimo considerar:

$$x_{1,min} = 0.2L$$

Y como máximo:

$$x_{1,max} = L$$

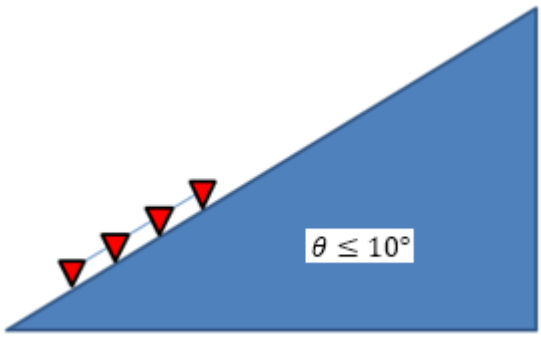
En general, una fuente capaz de proporcionar más potencia de impacto a la tierra crea ondas de superficie de frecuencias más bajas (longitudes de ondas más largas y gran amplitud), aumentado así la profundidad de investigación. Comúnmente se elige una masa de martillo razonablemente pesado (por ejemplo, 10 Kg) logrando profundidades de exploración de 10 – 30 m. Utilizando una placa de impacto (placa base), metálica o no metálica, se puede generar ondas de superficie de baja frecuencia. Para las pruebas realizadas en esta tesis se utiliza una placa

base no metálica de polietileno de alta densidad generando ondas de baja frecuencia y perceptible por los instrumentos.

Las condiciones topográficas tienen efecto sobre la calidad de los datos de onda superficial registrados y por lo tanto sobre la calidad de las curvas de dispersión resultantes. Para obtener resultados óptimos, los receptores deben instalarse sobre un terreno relativamente plano.

La pendiente de la superficie a lo largo de los geófonos puede afectar la exactitud de las curvas de dispersión resultantes. Una investigación reciente realizada por Zeng et al. (2012) demostró que la dispersión sufre errores inferiores al 4% cuando la pendiente topográfica a lo largo del arreglo de geófonos es inferior a 10°.

Figura 3-6. Condiciones Topográficas del terreno.



Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO 4

Metodología

4 METODOLOGÍA

El presente capítulo describe el conjunto de actividades y procedimientos realizados con el fin de lograr el objetivo principal de la presente tesis, el cual consiste en evaluar la metodología de ejecución propuesta en la literatura, permitiendo validar la calidad de la resolución obtenida mediante la ejecución del ensayo *MASW*, variando los parámetros del procedimiento de adquisición de datos en terreno.

4.1 ENSAYO EXPERIMENTALES TIPO MASW.

En el presente acapice se realiza una descripción de los procesos realizados para la adquisición de registros de campo, definiendo las variables y constantes, y las suposiciones que se hacen en cada caso.

Las variables determinantes en los ensayos geofísicos tipo *MASW* son el espesor de cada una de las capas que componen el perfil y su respectiva velocidad de onda de corte asociada. Para cada caso de análisis parámetros como la densidad y Poisson de una de las capas fueron asignadas a priori con valores típicos, debido a la poca sensibilidad que presenta la curva de dispersión de onda Rayleigh en función a la variación de dichos parámetros.

El sismógrafo Geometrics modelo Geode, consiste en una unidad central que se conecta a una computadora portátil, la cual, mediante el software de recopilación, brinda las posibilidades de adquirir registros sísmicos y adicionalmente funciona como unidad de visualización en tiempo real de los registros almacenados durante la ejecución de los ensayos.

Figura 4-1. Sismógrafo Geometrics modelo Geode.

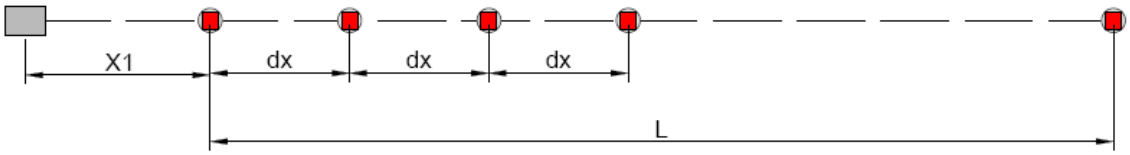
Fuente: Geometrics.com.

El equipo permite tiempos de muestreo de 0,02 a 16 milisegundos en cada uno de los 24 canales, con suficiencia de una duración máxima de registro de 64000 milisegundos, y permite el uso de filtros digitales una vez realizada la adquisición del registro sísmico.

Topográficamente los sitios de estudio no presentan variaciones en cuanto a la inclinación del terreno, definiendo características superficiales con pendientes inferiores al 1%

La distribución de los receptores en campo se realiza mediante una línea recta fija, logrando de esta manera comparar los perfiles obtenidos después del procesamiento de los datos adquiridos en terreno.

Figura 4-2 Arreglo Lineal de geófonos para los ensayos MASW



Fuente: Elaboración Propia

Los Geófonos utilizados capta señales verticales (uni axial) y con resolución mínima de 4,5 Hz.

Figura 4-3. Geófono vertical de 4.5 Hz.

Fuente: Elaboración Propia.

Como fuente sísmica se utiliza un mazo y una paca de polietileno de alta densidad, con este conjunto se puede generar ondas superficiales de diferentes frecuencias y longitudes de onda.

Figura 4-4 Fuente generadora de ondas superficiales.

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente cabe destacar que, durante el desarrollo del procedimiento de adquisición de las ondas sísmicas, se ejecuta entre 5 y 10 golpes para cada registro sísmico; promediando los golpes generados, logrando un registro libre de ondas que contaminan el registro y que provocan una distorsión en los resultados. Dicho proceso se realiza con la finalidad de contrarrestar el ruido existente en cada una de las adquisiciones, mejorando así, la razón señal-ruido.

4.2 PARÁMETROS INFLUYENTES EN LA ADQUISICION DE DATOS SISMICOS EN EL ENSAYO MASW.

Como se comentó en capítulos anteriores sobre el funcionamiento del análisis de MASW, corresponde mencionar los parámetros que influyen en la toma de registros de terreno, desde el punto de vista de la resolución y fidelidad de los datos obtenidos, lo cual se transforma en una situación clave a la hora de realizar los análisis que se desean. Saber que parámetros a modificar es fundamental para lograr optimizar el proceso del ensayo de terreno.

Los parámetros se dividen en dos tipos: externos e internos. Los parámetros externos, son aquellos que son modificables en el proceso del ensayo, fuera del programa de medición. Los parámetros internos son los modificables mediante el uso del programa de medición.

La presente metodología pretende modificar algunos parámetros externos, con el fin de determinar la variabilidad de los registros obtenidos.

Los Parámetros seleccionados son los siguientes:

Fuente emisora: este parámetro influye en los tipos de ondas que se pueden generar, en específico en las longitudes de ondas máximas de las ondas superficiales. Por lo tanto, este parámetro influye en la profundidad máxima de exploración del método.

Distancia de la Fuente Emisora al receptor más cercano (X1): Como el método de ondas superficiales requiere el análisis de ondas Rayleigh que viajan horizontalmente, es importante evitar el registro de componentes no planares. Las ondas superficiales sólo se vuelven planas después de viajar a cierta distancia de la fuente. Esta distancia es una función de la longitud de onda (longitudes de onda más largas requieren desplazamientos mayores).

Separación de los geófonos (dx): La separación de los geófonos esta influye en registro de la longitud de onda mínima y, por lo tanto, este parámetro determina la profundidad más superficial de exploración del ensayo. Si el contenido de frecuencia generado a parte de la fuente es suficientemente alto, se requiere un espaciamiento corto para capturar la variación pequeña de Vs a poca profundidad.

Longitud del arreglo (L): La longitud del arreglo está directamente relacionada con la longitud de onda máxima que puede ser registrada, que a su vez determina la profundidad máxima de exploración. La longitud del arreglo tiene que ser igual o mayor a la profundidad de exploración deseada.

4.3 REGISTRO DE DATOS SISMICOS.

Para el registro de datos en campo se realiza la variación de los parámetros indicados anteriormente, un por cada prueba. Se utiliza tres variaciones de cada parámetro, dejando fijos los otros parámetros de procedimiento.

Para todos los casos de registro de campo se usa los siguientes parámetros de medición:

Tabla 4-1. Parámetros de medición.

Parámetros de Medición		
Numero de Geófonos	12	unidades
Tipo de Geófonos	4,5	Hz
Intervalo de Grabación	0,125	milisegundos
Tiempo de Grabación	2	segundos
Retraso	0,004	segundos

Fuente: Elaboración Propia.

Los parámetros variados son los siguientes:

- Tipos de Fuentes emisoras: Se utilizan tres tipos de martillos de distintas masas cada uno. Masa de martillo utilizados: 8 Lb, 12 Lb y 20 Lb.
- Distancia de la fuente: Se ubica la fuente en tres distancias distintas. Distancias utilizadas: 0.5 m, 5 m y 10 m.
- Espaciamientos entre geófonos: Los geófonos se ubican con tres espaciamientos distintos. Espaciamientos utilizados: 1 m, 4 m y 6 m.
- Largo arreglo de geófonos: Se consideran tres largos de arreglos. Las longitudes utilizadas: 24 m, 33 m y 132 m.

En la siguiente tabla se resumen todas las combinaciones a realizar en los ensayos experimentales.

Tabla 4-2. Resumen de los parámetros a modificar ensayo experimental MASW.

Prueba Numero	Separación entre geófonos [m]	Tipo de fuente (masa de martillo) [Lb]	Distancia de la fuente [m]	Longitud de arreglo [m]	Número de registros
1	1	12	0,5	22	5
2	4	12	2	24	5
3	6	12	3	24	5
4	1	12	0,5	22	5
5	1	12	5	22	5
6	1	12	10	22	5
7	3	8	10	33	5
8	3	12	10	33	5
9	3	20	10	33	5
10	3	12	2	24	5
11	3	12	10	33	5
12	3	12	1,5	132	5

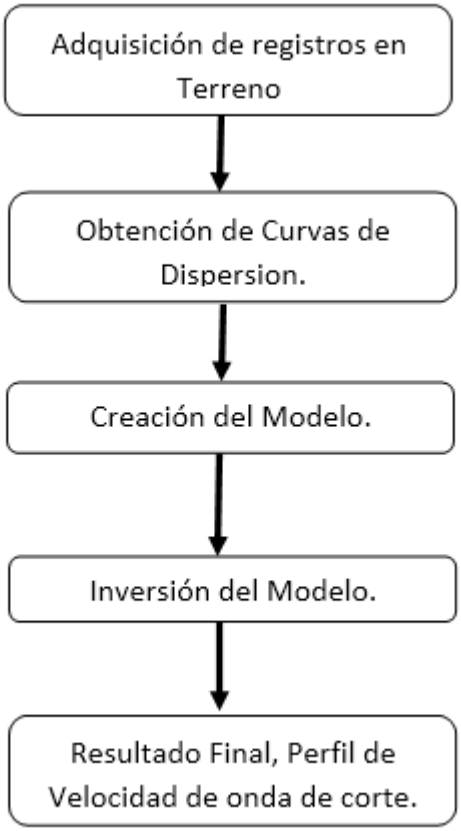
Fuente: Elaboración Propia.

Generados los ensayos experimentales en campo, los registros obtenidos se someten a un proceso de análisis que se realiza con la ayuda de un programa de procesamiento de datos sísmicos (Pickwin de Geometrics). Este software obtiene las curvas de dispersión y luego el perfil de velocidades de onda de corte fácilmente.

El procesamiento que utiliza este programa para la obtención de los perfiles de velocidad de onda de corte es el siguiente:

1. Con los datos registrados se realiza una transformada de Fourier rápida en el tiempo, donde se transforma la señal del dominio de tiempo al dominio de la frecuencia. Obteniendo una función dependiente de la posición y la frecuencia.
2. A continuación, se procede a la determinación de la curva de dispersión, en donde el programa calcula la transformada directa de Fourier. Y se determina la velocidad de fase para cada Δx. Obtenido esto se realiza a la construcción de la curva de dispersión.
3. Por último, se procede a la obtención del perfile Vs a través de la inversión de la curva de dispersión. Para esto, primero se crea un modelo inicial introduciendo al programa tanto la profundidad como el número de capas, luego el programa realiza el ajuste por medio de mínimos cuadros, teniendo como resultado el modelo de velocidad de ondas de corte con respecto a la profundidad.

Figura 4-5. Esquema de análisis de resultados.



Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO 5

Descripción y caracterización del sitio de estudio.

5 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.

De acuerdo con la idea fundamental de validar la calidad de los resultados obtenidos mediante la ejecución del ensayo MASW, para la determinación indirecta de velocidad de onda cortante, se elige como sitio de estudio los terrenos de aeródromo el Boco, Sector de Lo Rojas, Quillota.

Figura 5-1 Ubicación de los ensayos MASW

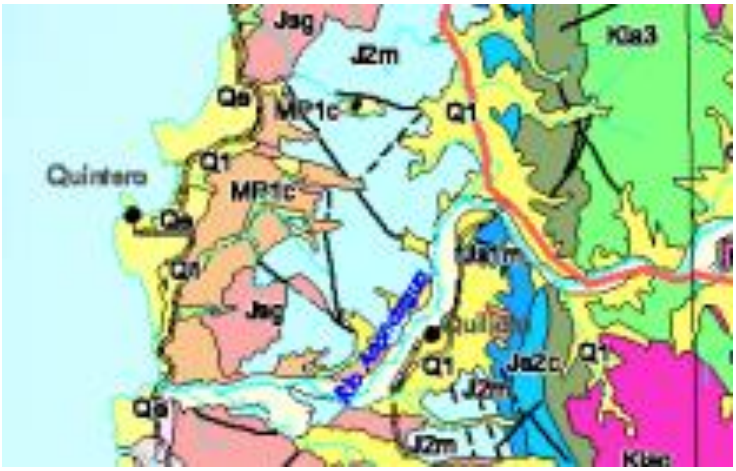
Fuente: Elaboración Propia.

Dentro de las principales características del sitio de estudio determinado se encuentran perfiles que contemplan amplios espesores de horizontes de meteorización, estratigrafía sin contrastes marcados, profundidad del basamento rocoso superior a la profundidad de exploración, topografía conformada por baja pendiente y posibilidad de presentar capas de mayor densidad.

5.1 CARACTERISTICAS GEOLOGICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El sector de Quillota presenta dos secuencias geologías, una secuencia sedimentaria y una secuencia volcanosedimentaria.

Figura 5-2 Zona geológica de Quillota.



Fuente: Mapa Geológico de Chile Sernageomin.

El mapa geológico indica que Quillota presenta dos secuencias:

Q1 Pleistoceno – Heloceno. Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados.

J2m Jurasico. Secuencias volcánicas y sedimentarias marinas: lavas y brechas, andesiticas y basálticas, calizas y areniscas marinas fosilíferas.

En general en el sitio de estudio, se observa la presencia de gravas arenosas de depositación fluvial. Producto del arrastre de material por el rio Aconcagua.

Es de espera tener estratos de suelo con densidades mayores en la profundidad. Así mismo, perfiles con mayores velocidades a grandes profundidades.

5.2 ESTRATIGRAFIA DE LA ZONA DE ESTUDIO.

Según sondajes cercanos a la zona de El Boco, se evidencia la presencia del siguiente perfil estratigráfico: en 30 m de exploración se evidencian dos horizontes claramente demarcados.

El primer horizonte desde 0 a 2 m, está compuesto por rellenos. limos algo arenosos, color café, con algo de finos plásticos, algo denso. Contienen gravas de canto redondeados TM 2”.

Luego el segundo horizonte desde los 2 a 30 m, está compuesto por suelo natural, gravas arenosas densas, matriz areno limosa, color café, grano fino a medio, finos no plásticos, densa. Las gravas son de cantos redondeados TM 4”.

Cabe desatacar que los ensayos de penetración estándar evidencian que existe rechazo en los golpes desde los 2 primeros metros hasta el fin del sondaje (30 m).

Análisis del material del sondaje.

Tabla 5-1. Análisis de material del sondaje.

IDENTIFICACION								
MUESTRA INFORMADA N°		1	2	3 a 6	7	8	9	10
SONDAJE N°		S-01	S-01	S-01	S-01	S-01	S-01	S-01
HORIZONTE		1	1	1	2	2	2	2
PROFUNDIDAD	Desde (m)	0,00	1,50	1,80	7,05	8,55	10,05	11,05
	Hasta (m)	1,50	1,80	7,00	8,50	10,00	11,00	12,50
ANALISIS GRANULOMETRICO LNV-105								
SOBRETAMAÑO	(%)	Gravas de relleno.		Gravas de cantos redondeados, subredondeados, subangulares y angulares TM 2½" con pérdida de la matriz areno limosa, densa.	Gravas de cantos redondeados, subredondeados, subangulares y angulares TM 4" con pérdida de la matriz areno limosa, densa.	Gravas de cantos redondeados, subredondeados, subangulares y angulares TM 3" con pérdida de la matriz areno limosa, densa.	Gravas de cantos redondeados, subredondeados, subangulares y angulares TM 4" con pérdida de la matriz areno limosa, densa.	Gravas de cantos redondeados, subredondeados, subangulares y angulares TM 2½" con pérdida de la matriz areno limosa, densa.
TAMIZ								
(mm)	(pulg)							
125	5"							
100	4"							
75	3"							
63	2 1/2"							
50	2"							
40	1 1/2"							
25	1"		100					
20	3/4"		74					
10	3/8"		57					
5	N°4		52					
2	N°10		47					
0,5	N°40		43					
0,08	N°200		36					
DIAMETRO MEDIO DE PART. D_{50}		-	3,466	-	-	-	-	-
LIMITES DE CONSISTENCIA NCh 1517/I, NCh 1517/II								
LIMITE LIQUIDO (%)		-	-	-	-	-	-	-
LIMITE PLASTICO (%)		-	-	-	-	-	-	-
INDICE DE PLASTICIDAD (%)		-	NP	-	-	-	-	-
CLASIFICACION								
USCS		-	GM	-	-	-	-	-
AASHTO		-	A-4(0)	-	-	-	-	-
PROPIEDADES INDICES NCh 1532, NCH 1515								
PESO ESPECIFICO	Gs	-	2,679	-	-	-	-	-
HUMEDAD (%)		-	13,8	-	-	-	-	-

OBSERVACIONES :

IDENTIFICACION							
MUESTRA INFORMADA Nº		11	12 a 18	19	20	21	22
SONDAJE N°		S-01	S-01	S-01	S-01	S-01	S-01
HORIZONTE		2	2	2	2	2	2
PROFUNDIDAD	Desde (m)	12,55	14,05	24,05	25,55	27,05	28,55
	Hasta (m)	14,00	24,00	25,50	27,00	28,50	30,00
ANALISIS GRANULOMETRICO LNV-105							
SOBRETAMAÑO	(%)	Gravas de cantos redondeados, subredondeados, subangulares y angulares TM 3" con pérdida de la matriz areno limosa, densa.	Gravas de cantos redondeados y angulares TM 3" con pérdida de la matriz areno limosa, densa.	Gravas de cantos redondeados, subredondeados, subangulares y angulares TM 4" con pérdida de la matriz areno limosa, densa.	Gravas de cantos redondeados, subredondeados, subangulares y angulares TM 3" con pérdida de la matriz areno limosa, densa.	Gravas de cantos redondeados, subredondeados, subangulares y angulares TM 4" con pérdida de la matriz areno limosa, densa.	Gravas de cantos redondeados, subredondeados, subangulares y angulares TM 3" con pérdida de la matriz areno limosa, densa.
TAMIZ							
(mm)	(pulg)						
125	5"						
100	4"						
75	3"						
63	2 1/2"						
50	2"						
40	1 1/2"						
25	1"						
20	3/4"						
10	3/8"						
5	Nº4						
2	Nº10						
0,5	Nº40						
0,08	Nº200						
DIAMETRO MEDIO DE PART. D_{50}		-	-	-	-	-	-
LIMITES DE CONSISTENCIA NCh 1517/I, NCh 1517/II							
LIMITE LIQUIDO (%)		-	-	-	-	-	-
LIMITE PLASTICO (%)		-	-	-	-	-	-
INDICE DE PLASTICIDAD (%)		-	-	-	-	-	-
CLASIFICACION							
USCS		-	-	-	-	-	-
AASHTO		-	-	-	-	-	-
PROPIEDADES INDICES NCh 1532, NCH 1515							
PESO ESPECIFICO	Gs	-	-	-	-	-	-
HUMEDAD (%)		-	-	-	-	-	-

OBSERVACIONES :

Fuente: Geoconsultores, 2016.

CAPÍTULO 6

Resultados y análisis de datos.

6 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los 13 casos seleccionados para analizar los efectos de los parámetros de medición en la metodología de Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW). Se utiliza el procedimiento de campo descrito en el capítulo 4 Metodología.

6.1 VARIACIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE LOS GEÓFONOS.

El espaciamiento entre los geófonos está directamente relacionado con la adquisición de ondas superficiales de longitud de onda de menor magnitud ($\lambda_{\min}$) y por tanto estos parámetros determina la menor profundidad resoluble de exploración (Z_{min}).

Para analizar el comportamiento de los perfiles de velocidad de onda de corte resultantes se realizan tres casos:

1. Geófonos espaciados a 1 m.
2. Geófonos espaciados a 4 m.
3. Geófonos espaciados a 6 m.

Todos los otros parámetros de medición se mantienen constantes durante la realización de las mediciones.

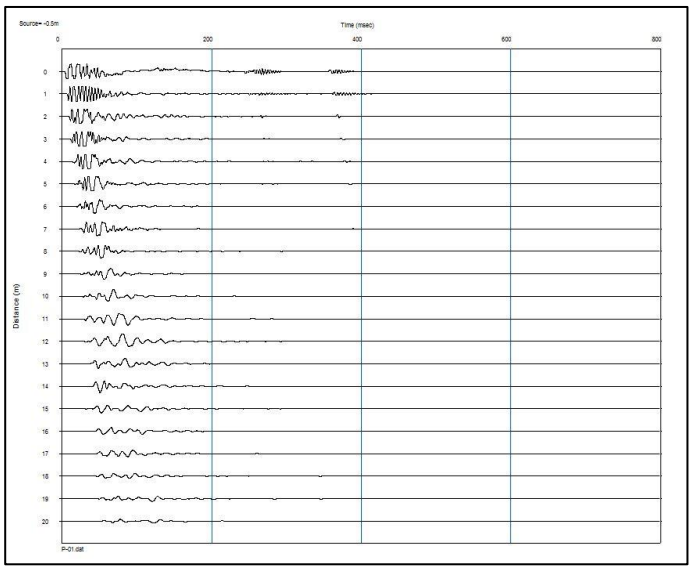
6.1.1 Geófonos espaciados a 1 m.

Parámetros de campos utilizados:

- Espaciamiento entre geófonos: 1 m.
- Distancia del Arreglo: 22 m.
- Masa fuente sísmica: 12 Lb
- Distancia de la Fuente: 0,5 m

Ajustados los parámetros de campo se inicia la adquisición de datos, para esto se generan 5 golpes, obteniéndose por cada golpe un registro. Luego de esto, y con la ayuda del software de procesamiento de la información recopilada (Pickwin), se promedian los datos obtenidos y se determinar un registro limpio de ruido ambiental.

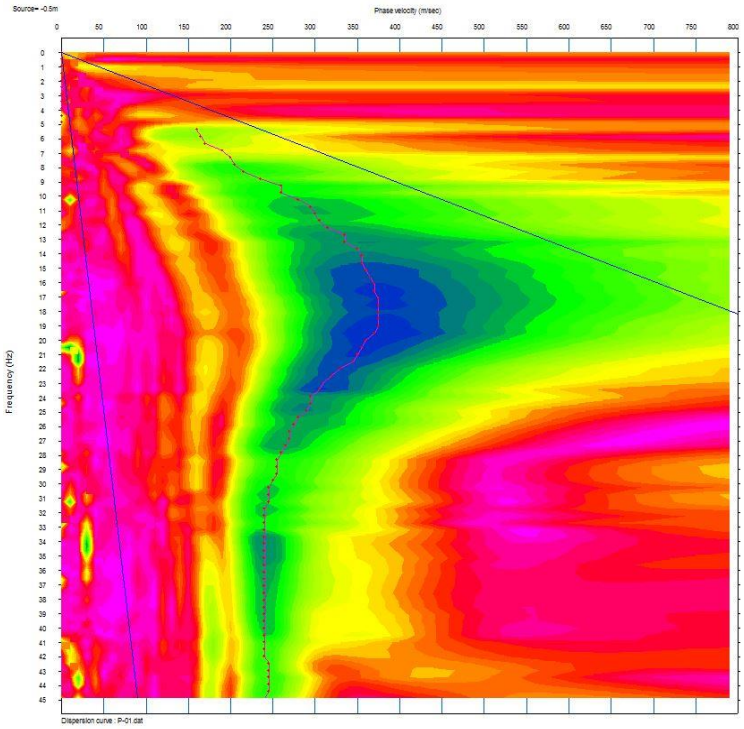
Figura 6-1. Registro de Caso 1 dx=1m.



Fuente: Pickwin.

Luego de obtener el registro, se determinar la curva de dispersión de los datos sísmicos registrados.

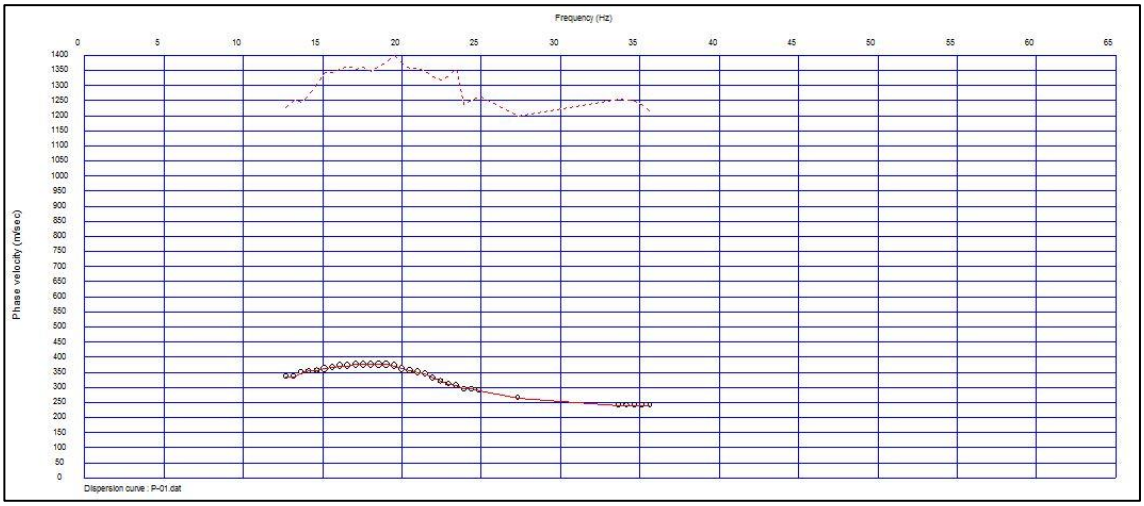
Figura 6-2. Curva de Dispersión Caso 1 dx=1 m.



Fuente: Pickwin.

Como se mencionó en el capítulo 3, la curva de dispersión posee información de baja calidad, es por esto que este estudio considera eliminar el 15 % de los datos con peor calidad de la curva de dispersión.

Figura 6-3. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 1 dx=1 m.

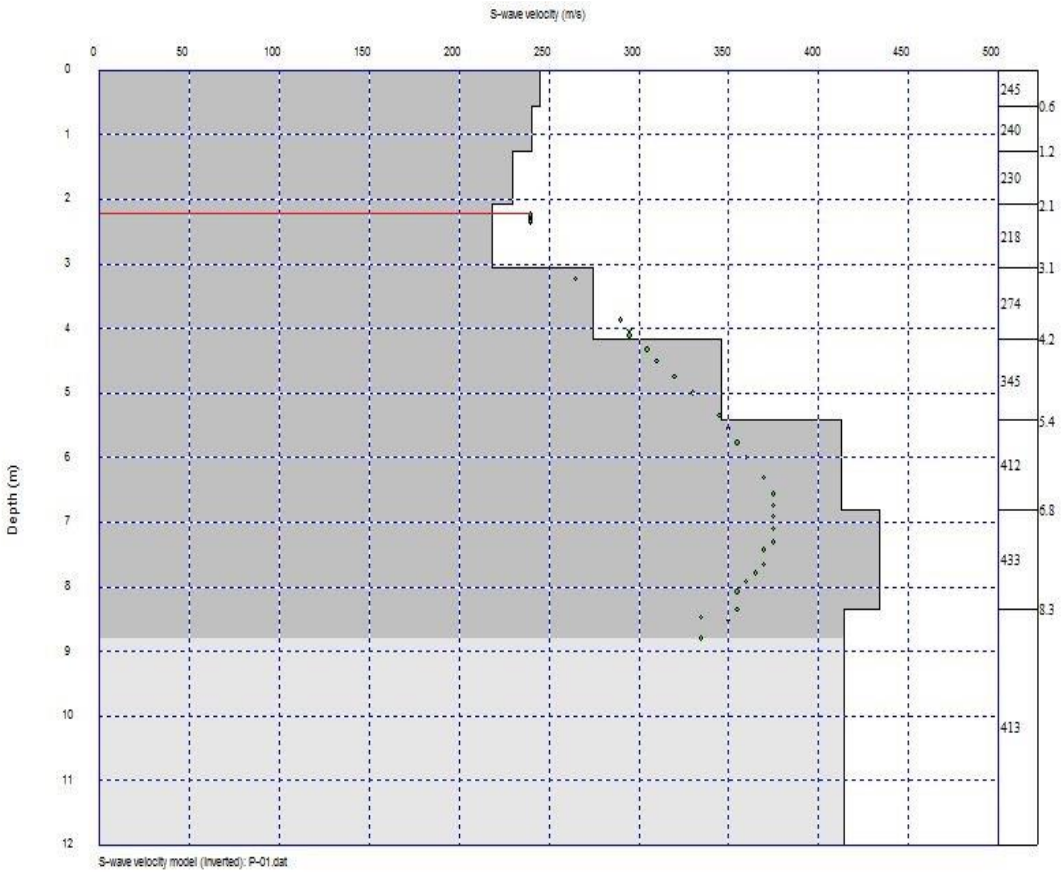


Fuente: Pickwin.

Obtenida la curva de dispersión sin los datos de baja calidad, se procede a la obtención del perfil de velocidad de onda de corte a través del proceso de inversión.

Luego de este proceso se determina el siguiente perfil de velocidad de onda de corte en la profundidad.

Figura 6-4. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 1 dx=1m.



Fuente: Pickwin.

Del perfil resultante se puede deducir los siguientes datos:

- Z_{min}= 2,25 m
- Z_{max}= 8,80 m.
- Error de iteración = 4,1%

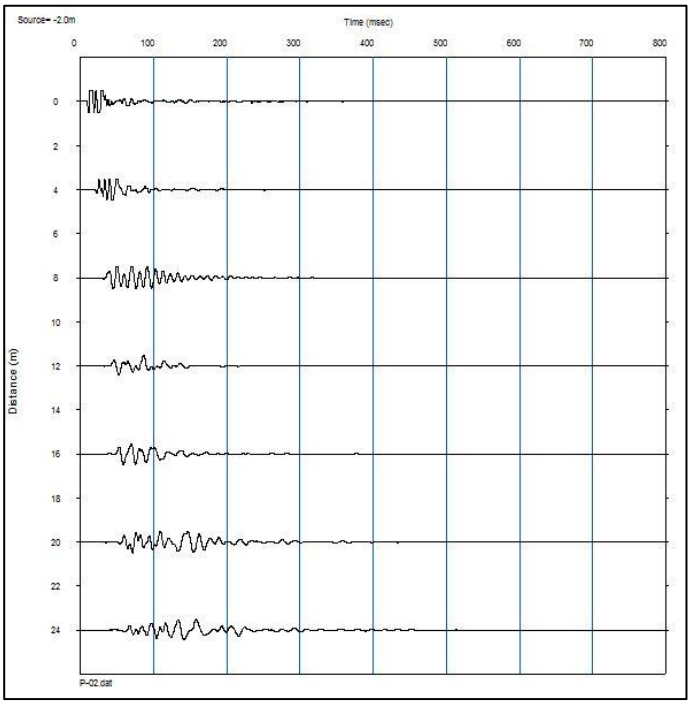
6.1.2 Geófonos espaciados a 4 m.

Parámetros de campos utilizados:

- Espaciamiento entre geófonos: 4 m.
- Distancia del Arreglo: 24 m.
- Masa fuente sísmica: 12 Lb.
- Distancia de la Fuente: 2 m.

Ajustados los parámetros de campo se inicia la adquisición de datos, para esto se generan 5 golpes, obteniéndose por cada golpe un registro. Luego de esto, y con la ayuda del software de procesamiento de la información recopilada (Pickwin), se promedian los datos obtenidos y se determinar un registro limpio de ruido ambiental.

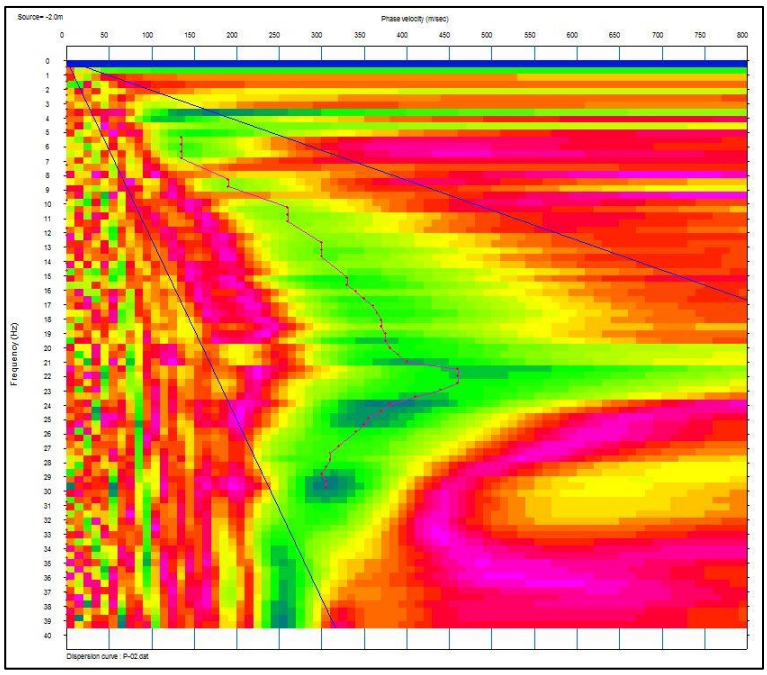
Figura 6-5. Registro de Caso 2 dx=4m.



Fuente: Pickwin.

Luego de obtener el registro, se determinar la curva de dispersión de los datos sísmicos registrados.

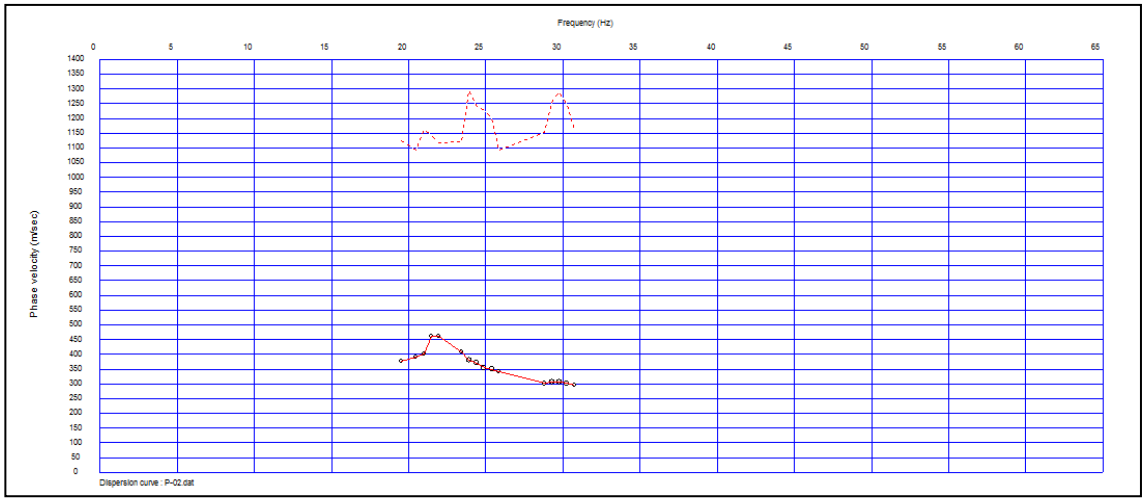
Figura 6-6. Curva de Dispersión Caso 2 dx=4 m.



Fuente: Pickwin.

Como se mencionó en el capítulo 3, la curva de dispersión posee información de baja calidad, es por esto que este estudio considera eliminar el 15 % de los datos con peor calidad de la curva de dispersión.

Figura 6-7. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 2 dx=4 m.

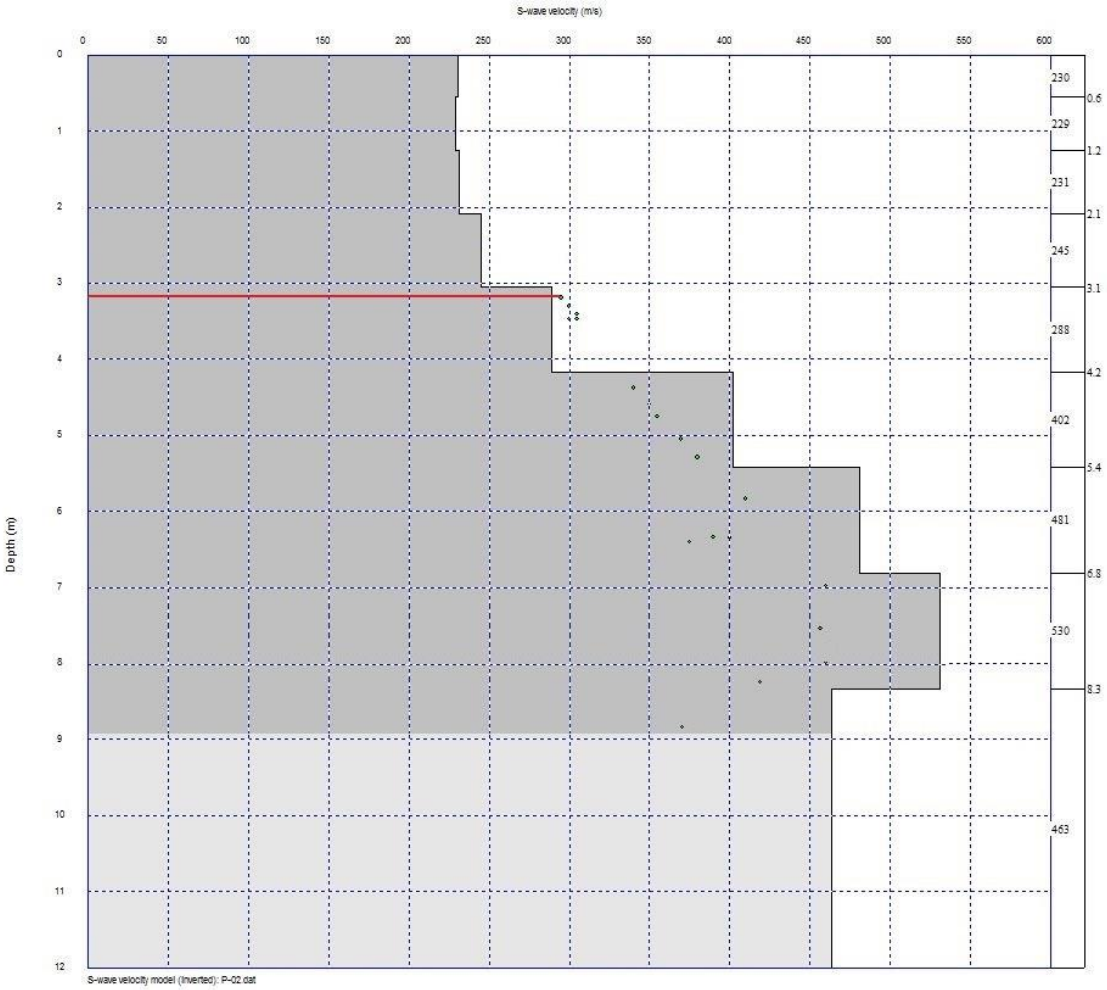


Fuente: Pickwin.

Obtenida la curva de dispersión sin los datos de baja calidad, se procede a la obtención del perfil de velocidad de onda de corte a través del proceso de inversión.

Luego de este proceso se determina el siguiente perfil de velocidad de onda de corte en la profundidad.

Figura 6-8. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 2 dx=4m.



Fuente: Pickwin.

Del perfil resultante se puede deducir los siguientes datos:

- Z_{min}= 3,2 m
- Z_{max}= 8,9 m.
- Error de iteración = 4,5%

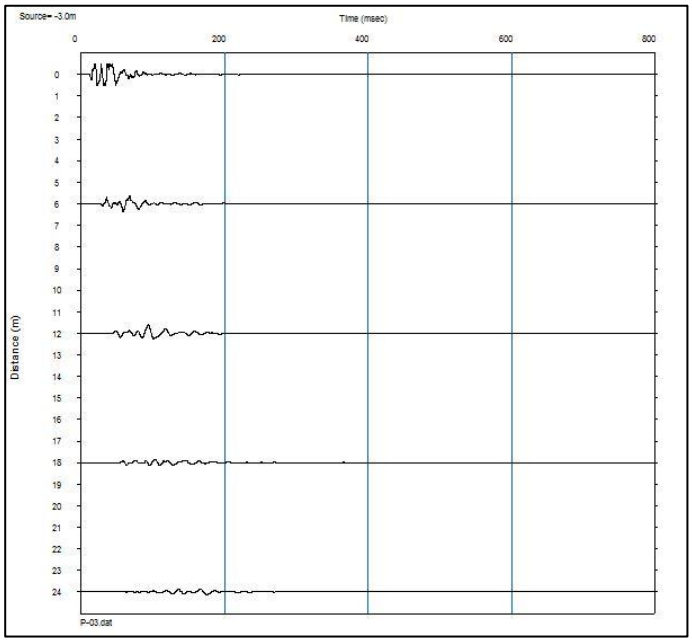
6.1.3 Geófonos espaciados a 6 m.

Parámetros de campos utilizados:

- Espaciamiento entre geófonos: 6 m.
- Distancia del Arreglo: 24 m.
- Masa fuente sísmica: 12 Lb.
- Distancia de la Fuente: 3 m.

Ajustados los parámetros de campo se procede a ejecutar la adquisición de datos, para esto se registran 5 golpes, obteniendo por cada golpe un registro. Luego de esto, y con la ayuda del software de procesamiento de la información recopilada (Pickwin), se promedian los datos obtenidos y se determinar un registro limpio de ruido ambiental.

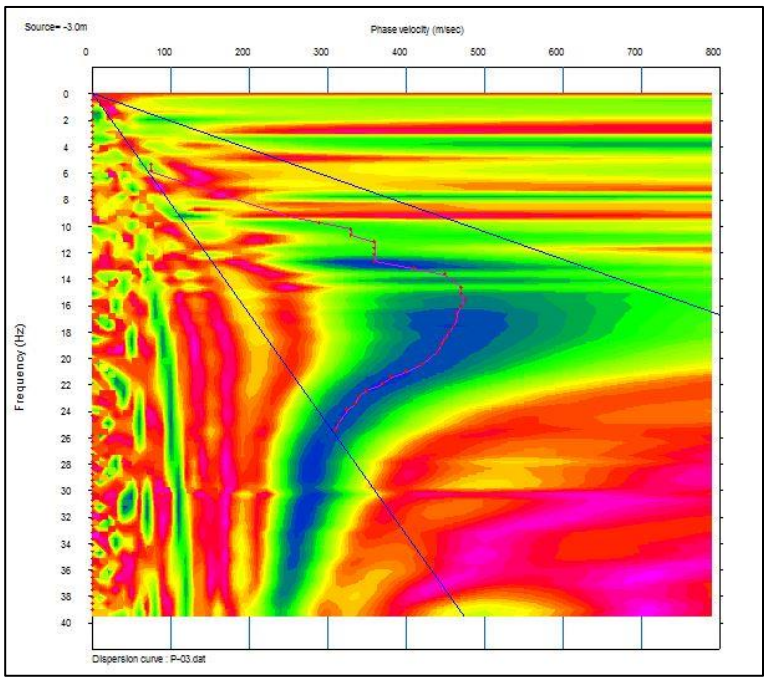
Figura 6-9. Registro de Caso 3 dx=6m.



Fuente: Pickwin.

Luego de obtener el registro, se determinar la curva de dispersión de los datos sísmicos registrados.

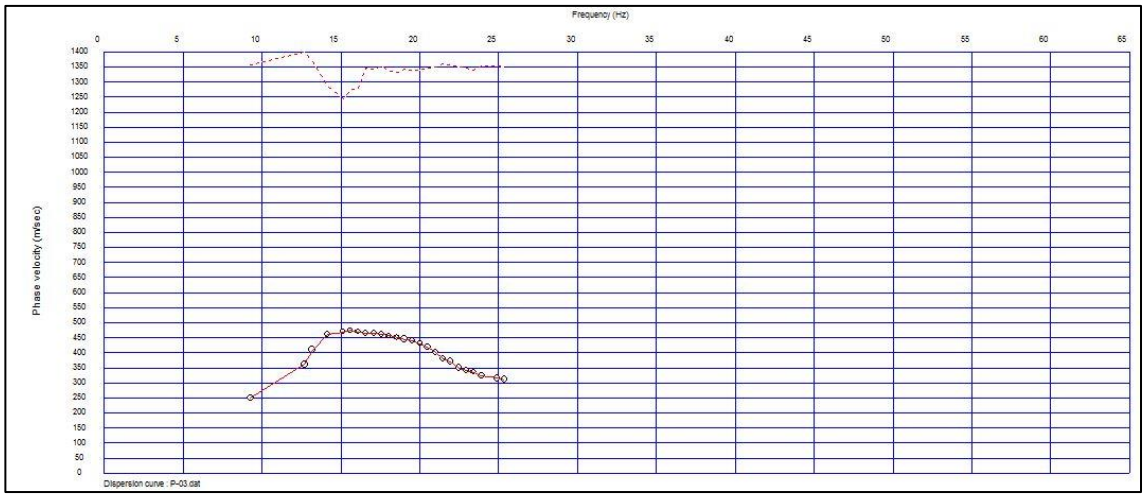
Figura 6-10. Curva de Dispersión Caso 3 dx=6 m



Fuente: Pickwin.

Como se mencionó en el capítulo 3, la curva de dispersión posee información de baja calidad, es por esto que este estudio considera eliminar el 15 % de los datos con peor calidad de la curva de dispersión.

Figura 6-11. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 3 dx=6 m.

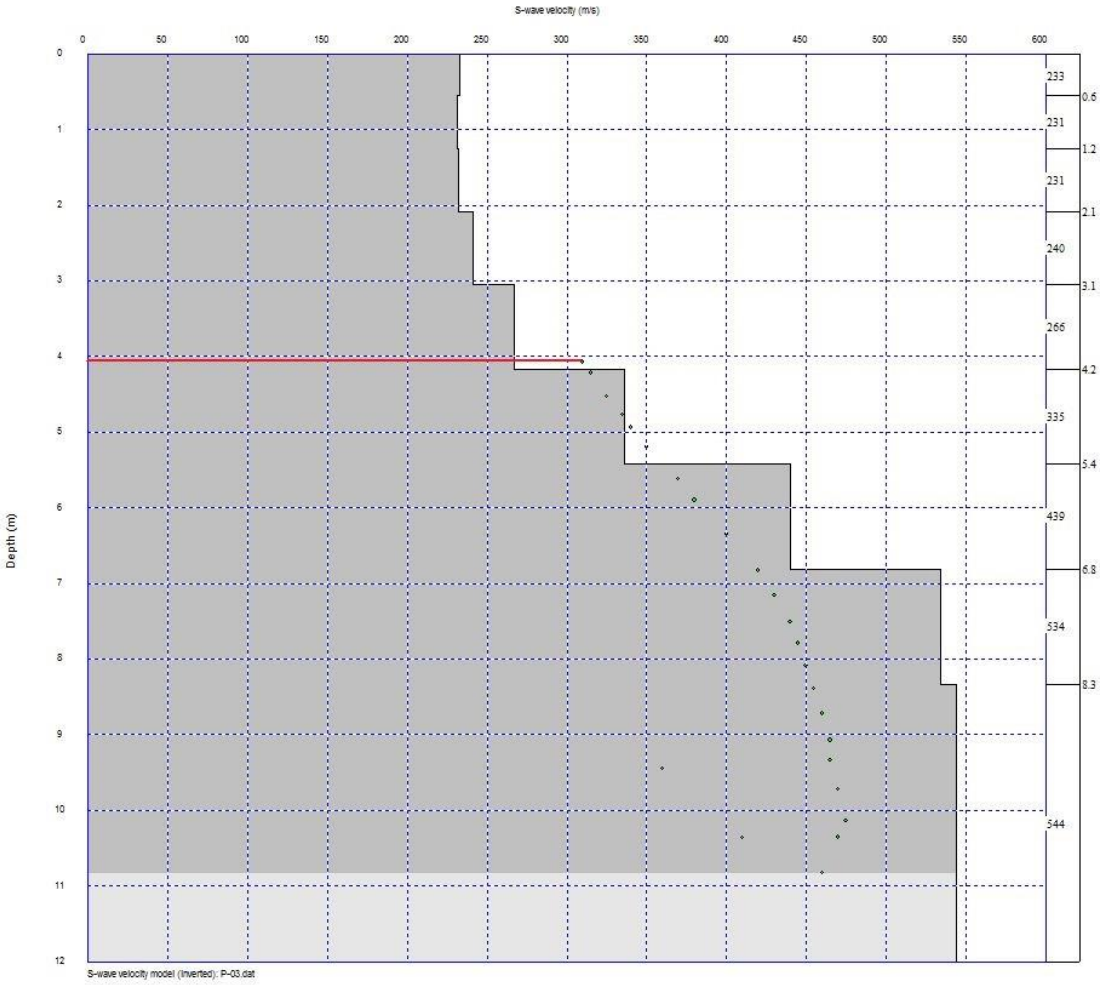


Fuente: Pickwin.

Obtenida la curva de dispersión sin los datos de baja calidad, se procede a la obtención del perfil de velocidad de onda de corte a través del proceso de inversión.

Luego de este proceso se determina el siguiente perfil de velocidad de onda de corte en la profundidad.

Figura 6-12. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 3 dx=6m.



Fuente: Pickwin.

Del perfil resultante se puede deducir los siguientes datos:

- Z_{min}= 4,1 m
- Z_{max}= 10,8 m.
- Error de iteración = 3,9%

6.1.4 Análisis de Resultados.

Se observa que los perfiles resultantes de los casos estudiados difieren en la profundidad mínima de exploración del método.

Queda en evidencia que al aumentar el espaciamiento entre los geófonos aumenta la profundidad mínima de exploración, es decir, que el perfil de velocidades obtenido tendrá datos validos desde una profundidad mayor.

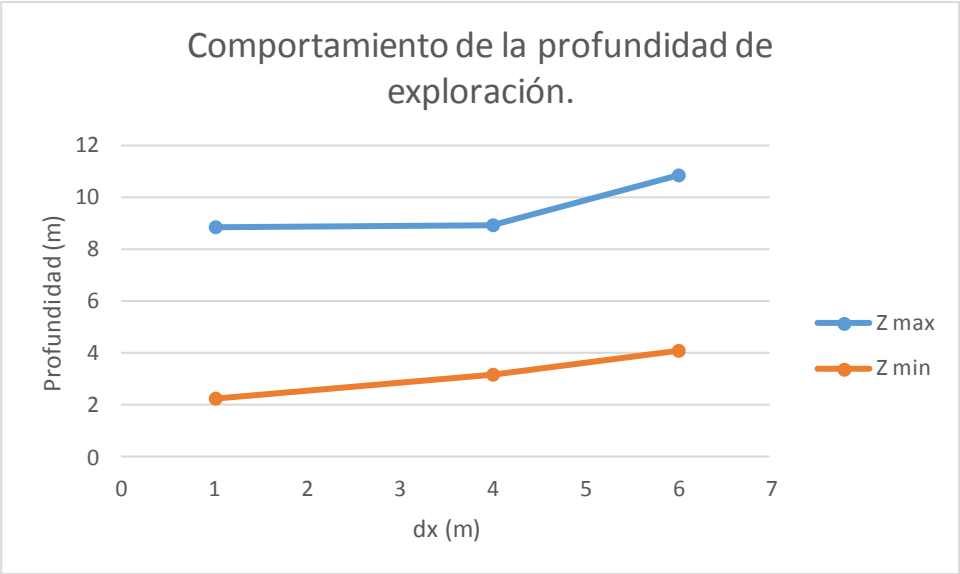
La siguiente tabla resume los rangos de profundidades donde el perfil entrega velocidades válidas.

Tabla 6-1. Resumen de análisis de Resultados.

Resumen de análisis de Resultados.			
Caso	**dx [m]**	**Zmin [m]**	**Zmax [m]**
1	1	2,25	8,80
2	4	3,20	8,90
3	6	4,10	10,80

Fuente: Elaboración Propia.

Grafico 6-1. Comportamiento de la profundidad de exploración.



Fuente: Elaboración Propia.

6.2 VARIACIÓN DE LA DISTANCIA DE LA FUENTE SÍSMICA.

La distancia de la fuente sísmica esta relaciona con las propiedades de propagación de las ondas superficiales, a medida que las ondas superficiales se desplazan se convierten en ondas planas (o algunas veces llamadas estabilizadas), aptas para el análisis del método de ondas superficiales. Uno onda con longitud de onda más larga toma una mayor distancia antes de que se vuelva plana.

Para analizar el comportamiento de los perfiles de Velocidad de onda de corte resultantes se realizan tres casos:

4. Distancia de la fuente a 0.5 m.
5. Distancia de la fuente a 5 m.
6. Distancia de la fuente a 10 m.

Todos los otros parámetros de medición se mantienen constantes durante la realización de las mediciones.

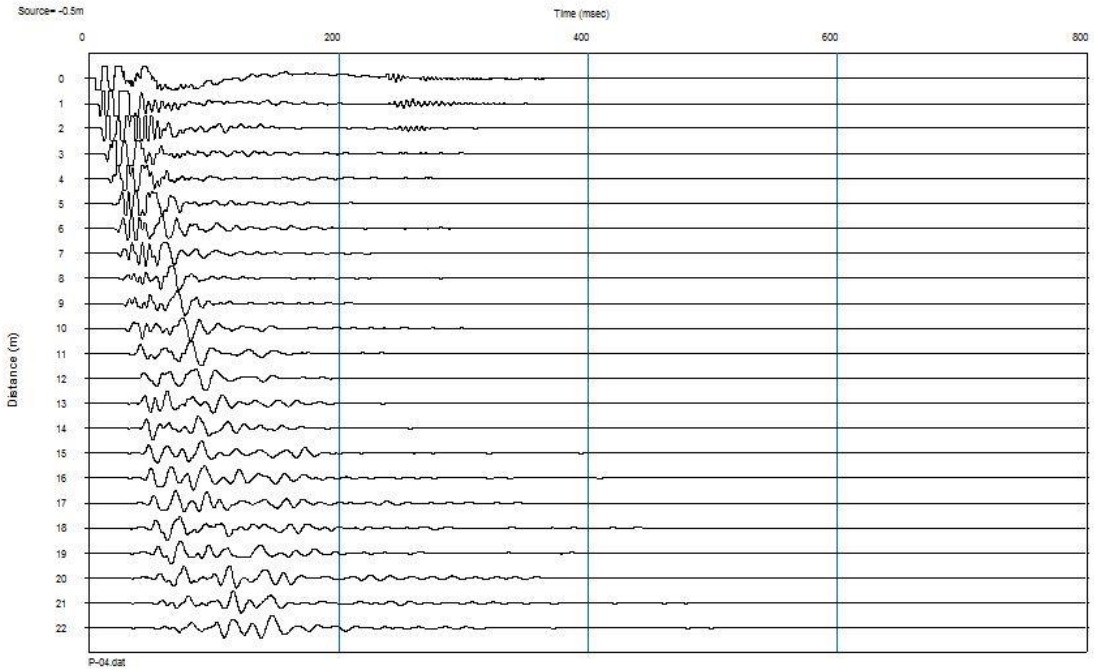
6.2.1 Distancia de la Fuente a 0.5 m.

Parámetros de campos utilizados:

- Espaciamiento entre geófonos: 1 m.
- Distancia del Arreglo: 22 m.
- Masa fuente sísmica: 12 Lb
- Distancia de la Fuente: 0,5 m

Ajustados los parámetros de campo se inicia la adquisición de datos, para esto se generan 5 golpes, obteniéndose por cada golpe un registro. Luego de esto, y con la ayuda del software de procesamiento de la información recopilada (Pickwin), se promedian los datos obtenidos y se determinar un registro limpio de ruido ambiental.

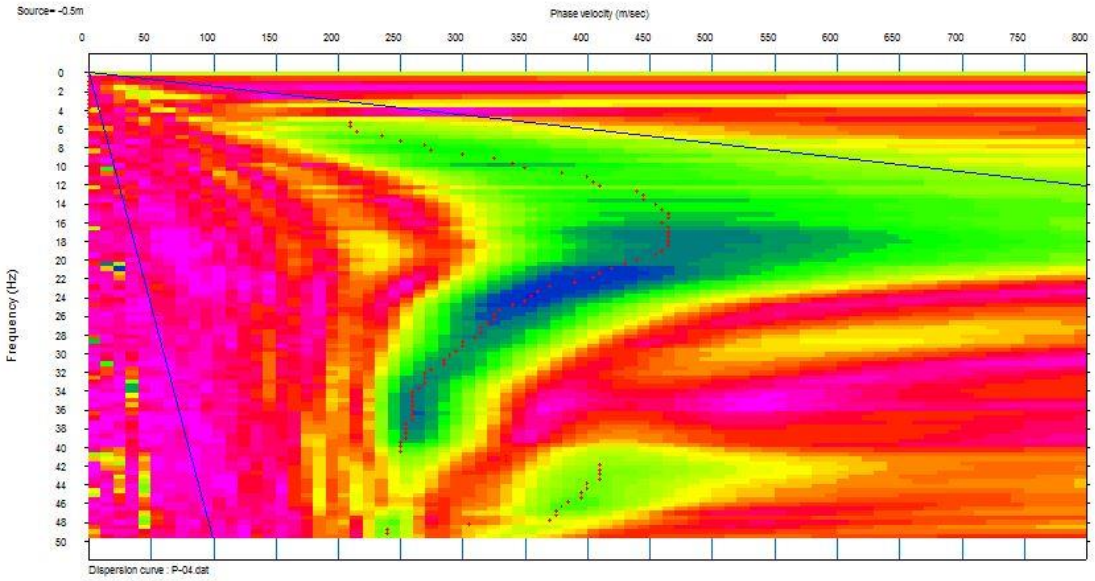
Figura 6-13. Registro de Caso 4 X1=0.5m.



Fuente: Pickwin.

Luego de obtener el registro, se determinar la curva de dispersión de los datos sísmicos registrados.

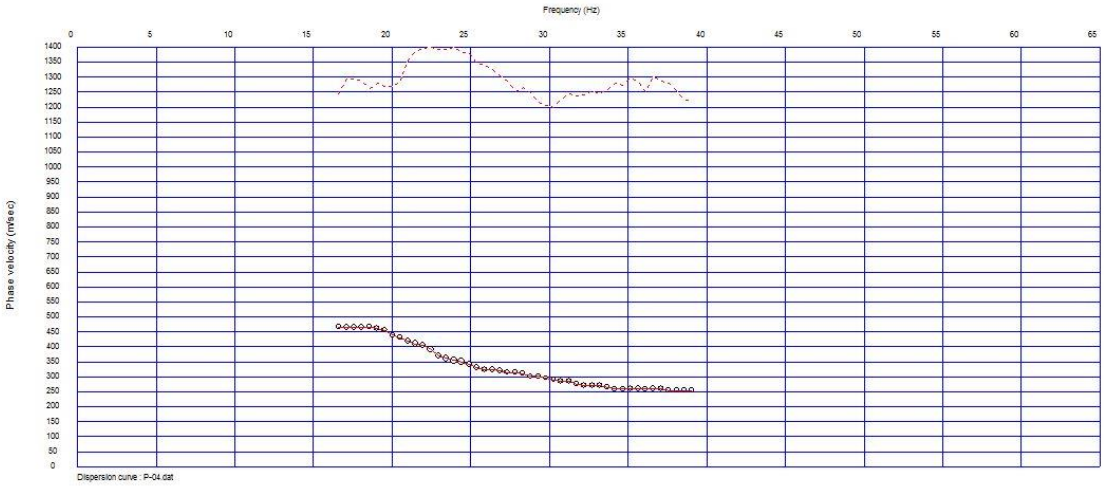
Figura 6-14. Curva de Dispersión Caso 4 X1=0.5 m.



Fuente: Pickwin.

Como se mencionó en el capítulo 3, la curva de dispersión posee información de baja calidad, es por esto que este estudio considera eliminar el 15 % de los datos con peor calidad de la curva de dispersión.

Figura 6-15. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 4 X1=0.5 m.

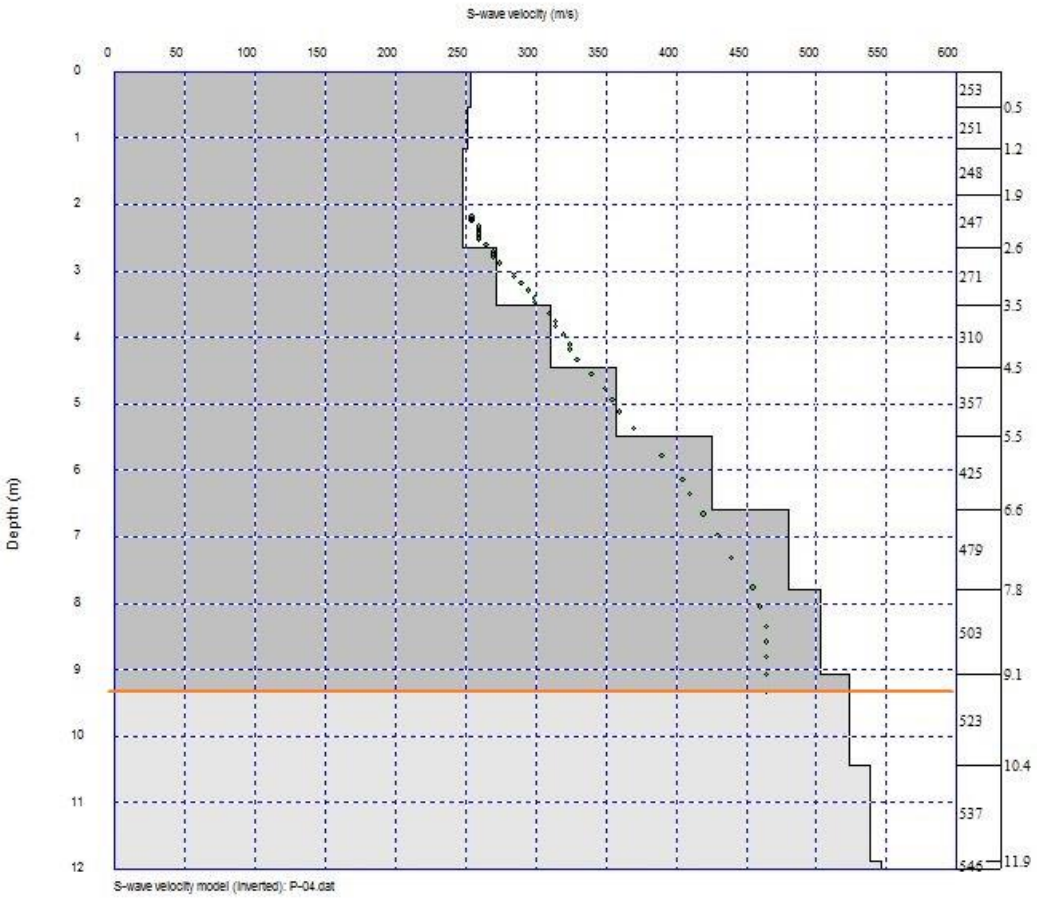


Fuente: Pickwin.

Obtenida la curva de dispersión sin los datos de baja calidad, se procede a la obtención del perfil de velocidad de onda de corte a través del proceso de inversión.

Luego de este proceso se determina el siguiente perfil de velocidad de propagación de onda de corte en la profundidad.

Figura 6-16. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 4 X1=0.5m.



Fuente: Pickwin.

Del perfil resultante se puede deducir los siguientes datos:

- Z_{min}= 2,2 m
- Z_{max}= 9,3 m.
- Error de iteración = 3,5%

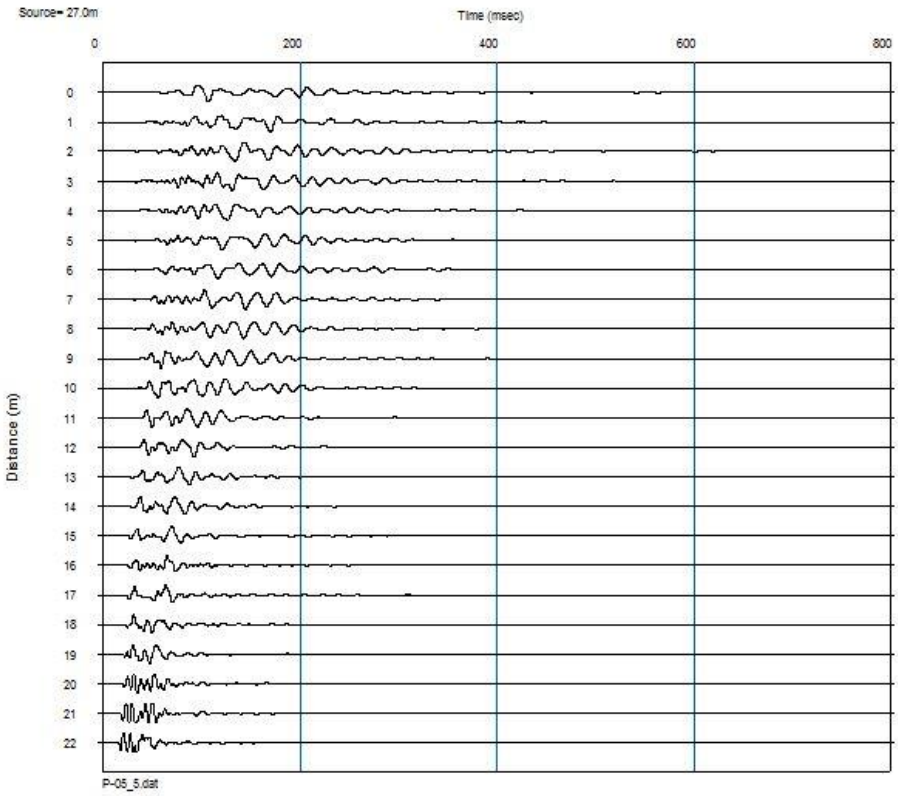
6.2.2 Distancia de la Fuente a 5 m.

Parámetros de campos utilizados:

- Espaciamiento entre geófonos: 1 m.
- Distancia del Arreglo: 22 m.
- Masa fuente sísmica: 12 Lb
- Distancia de la Fuente: 5 m

Ajustados los parámetros de campo se inicia la adquisición de datos, para esto se generan 5 golpes, obteniéndose por cada golpe un registro. Luego de esto, y con la ayuda del software de procesamiento de la información recopilada (Pickwin), se promedian los datos obtenidos y se determinar un registro limpio de ruido ambiental.

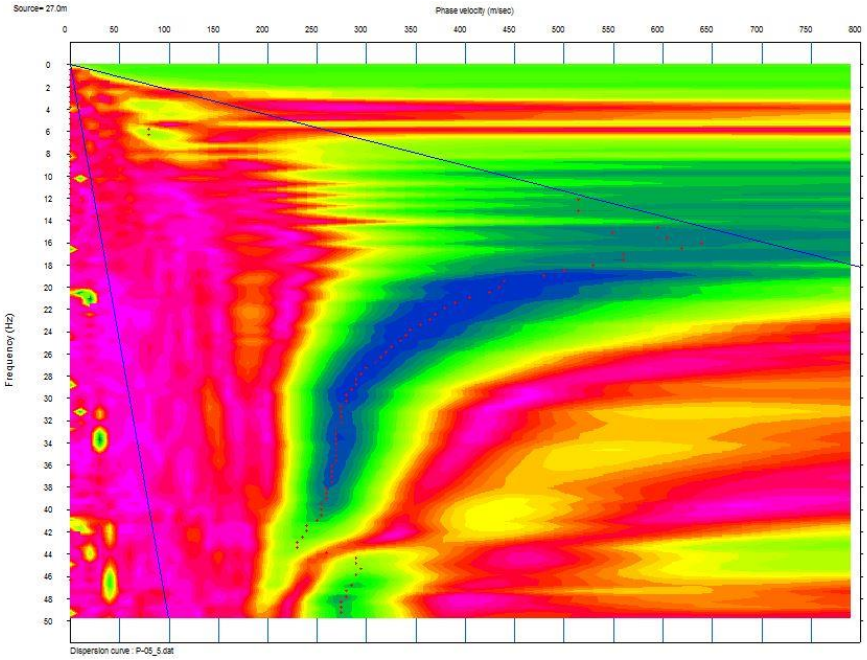
Figura 6-17. Registro de Caso 5 X1=5m.



Fuente: Pickwin.

Luego de obtener el registro, se determinar la curva de dispersión de los datos sísmicos registrados.

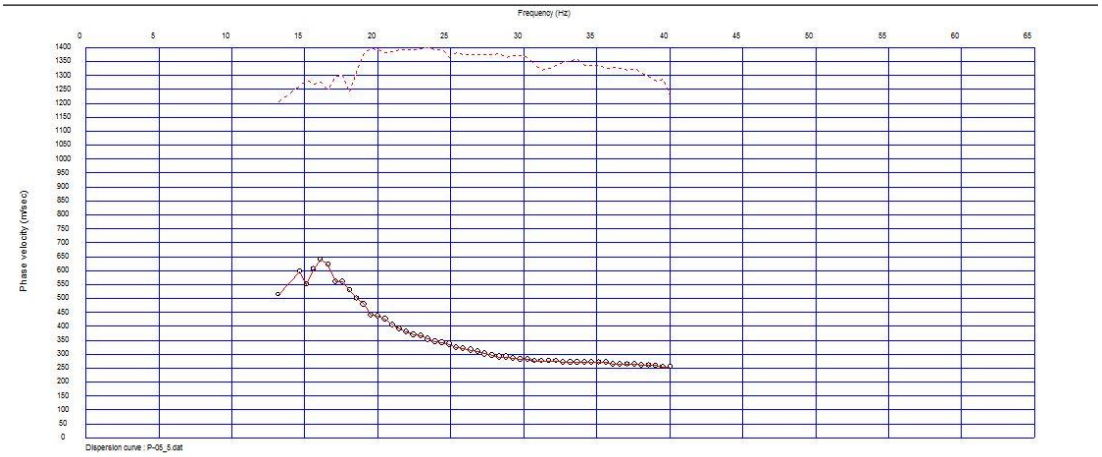
Figura 6-18. Curva de Dispersión Caso 5 X1=5 m.



Fuente: Pickwin.

Como se mencionó en el capítulo 3, la curva de dispersión posee información de baja calidad, es por esto que este estudio considera eliminar el 15 % de los datos con peor calidad de la curva de dispersión.

Figura 6-19. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 5 X1=5 m.

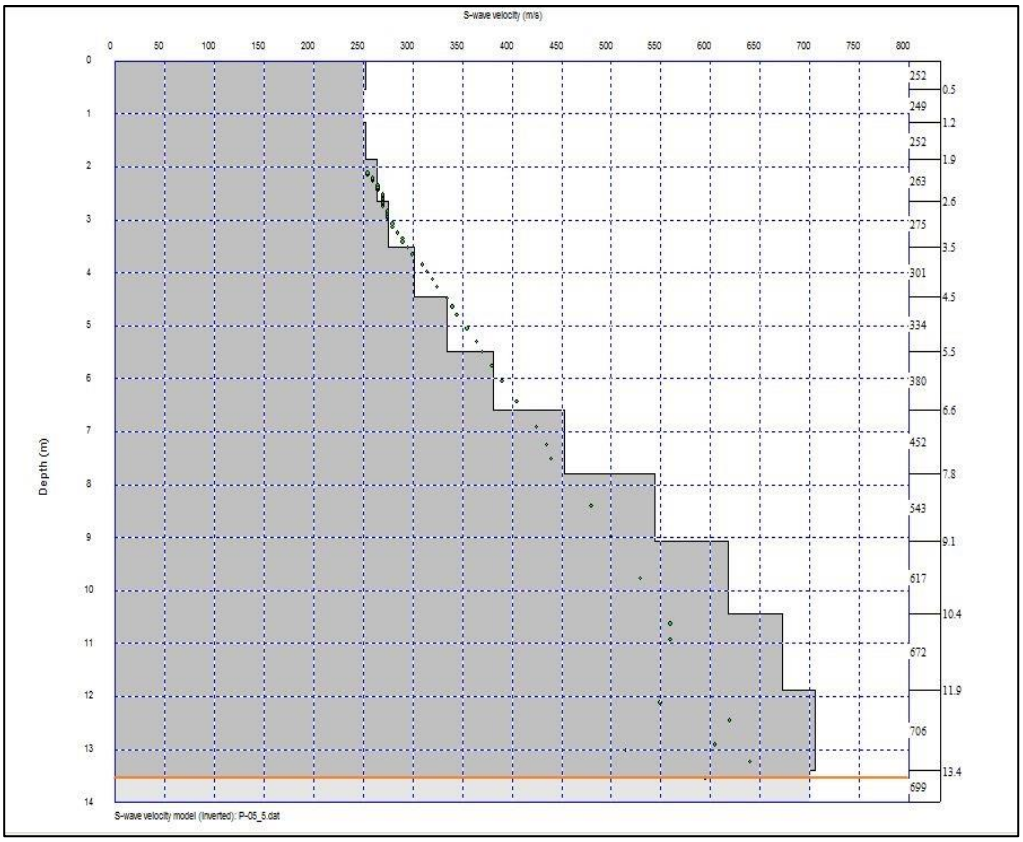


Fuente: Pickwin.

Obtenida la curva de dispersión sin los datos de baja calidad, se procede a la obtención del perfil de velocidad de onda de corte a través del proceso de inversión.

Luego de este proceso se determina el siguiente perfil de velocidad de propagación de onda de corte en la profundidad.

Figura 6-20. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 5 X1=5m.



Fuente: Pickwin.

Del perfil resultante se puede deducir los siguientes datos:

- Z_{min}= 2,1 m
- Z_{max}= 13,5 m.
- Error de iteración = 4,2%

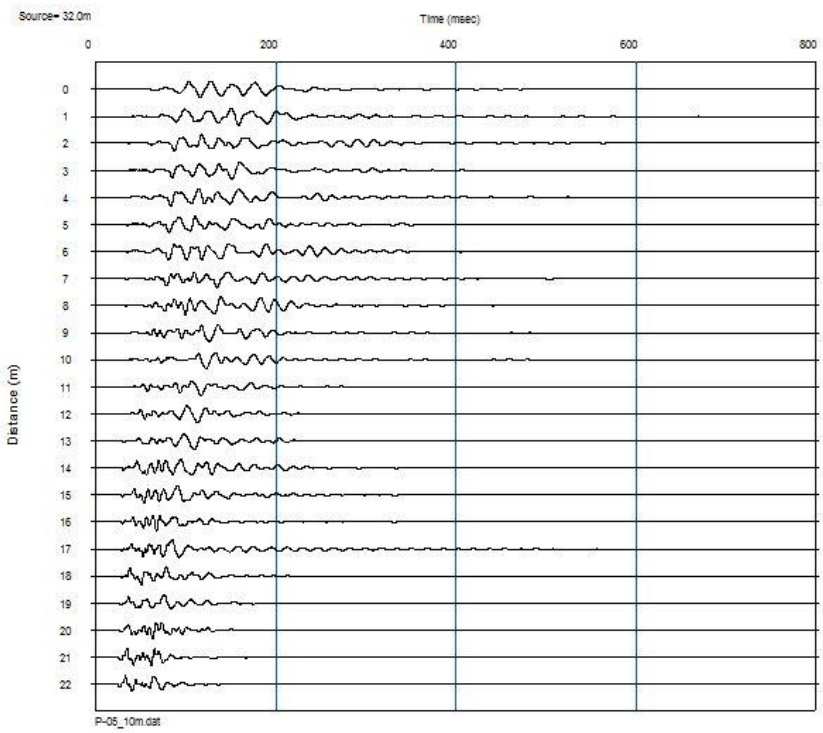
6.2.3 Distancia de la Fuente a 10 m.

Parámetros de campos utilizados:

- Espaciamiento entre geófonos: 1 m.
- Distancia del Arreglo: 22 m.
- Masa fuente sísmica: 12 Lb
- Distancia de la Fuente: 10 m

Ajustados los parámetros de campo se inicia la adquisición de datos, para esto se generan 5 golpes, obteniéndose por cada golpe un registro. Luego de esto, y con la ayuda del software de procesamiento de la información recopilada (Pickwin), se promedian los datos obtenidos y se determinar un registro limpio de ruido ambiental.

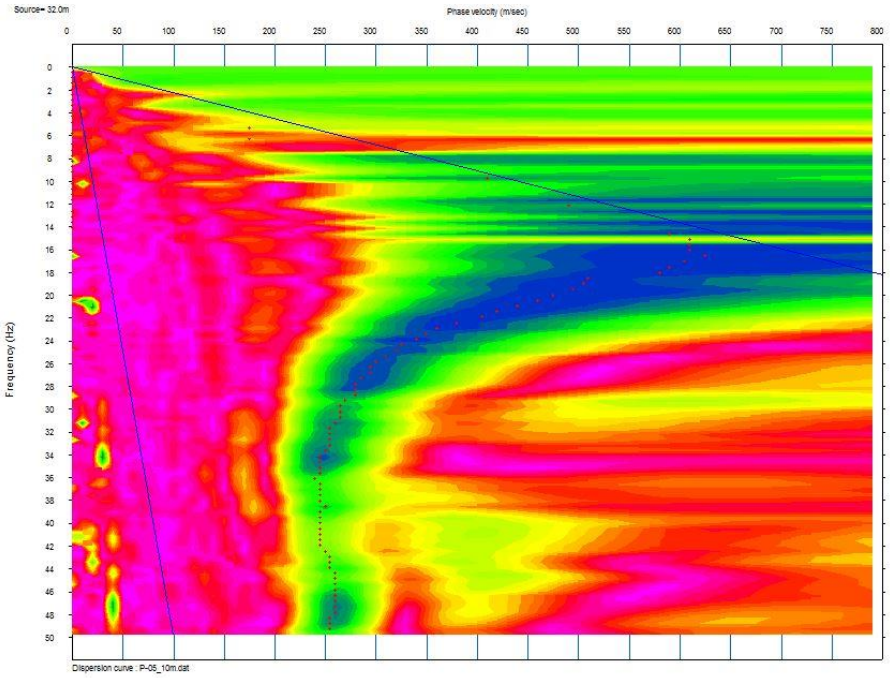
Figura 6-21. Registro de Caso 6 X1=10m.



Fuente: Pickwin.

Luego de obtener el registro, se determinar la curva de dispersión de los datos sísmicos registrados.

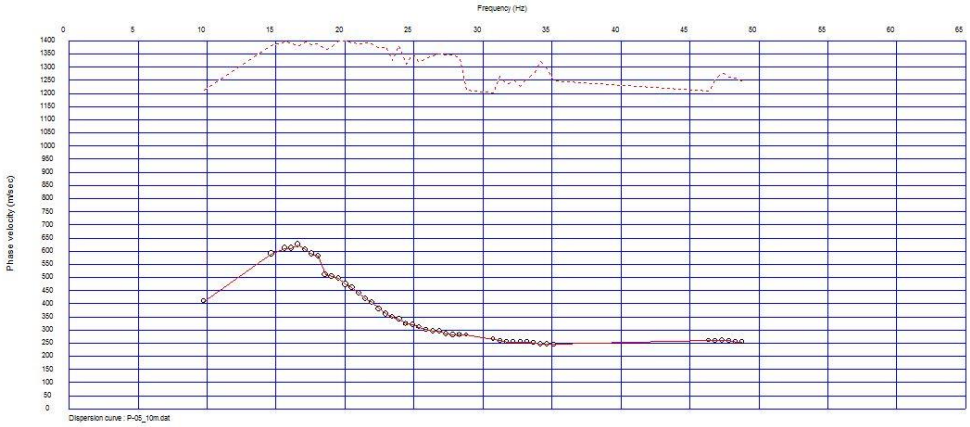
Figura 6-22. Curva de Dispersión Caso 6 X1=10 m.



Fuente: Pickwin.

Como se mencionó en el capítulo 3, la curva de dispersión posee información de baja calidad, es por esto que este estudio considera eliminar el 15 % de los datos con peor calidad de la curva de dispersión.

Figura 6-23. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 6 X1=10 m.

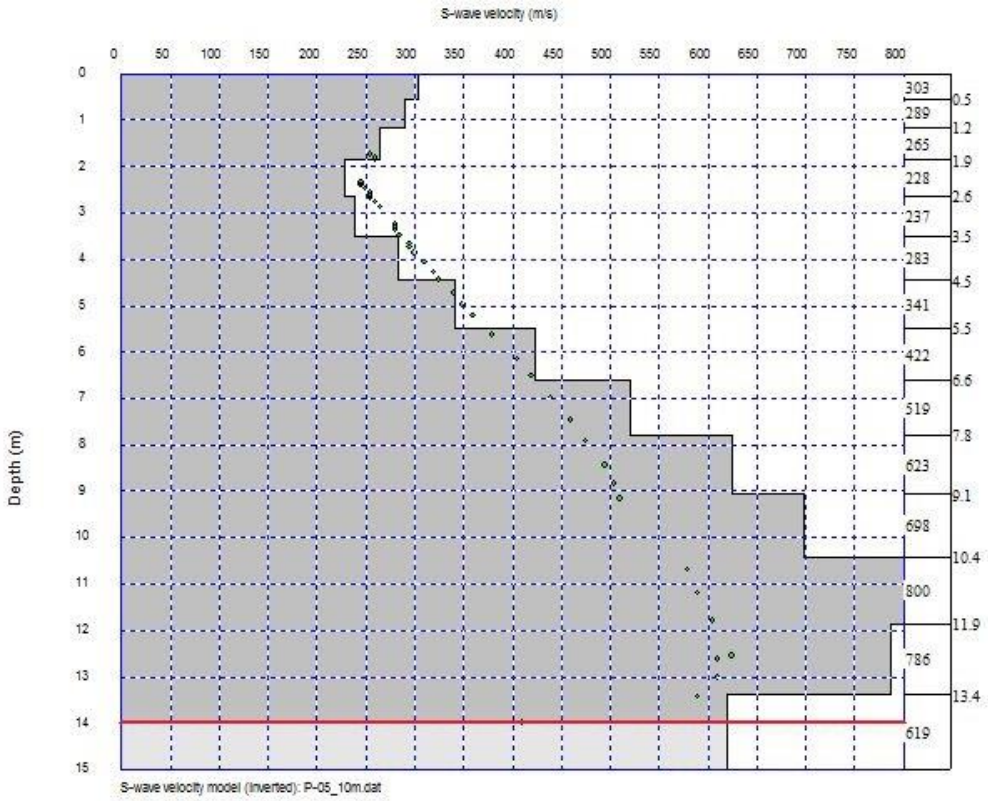


Fuente: Pickwin.

Obtenida la curva de dispersión sin los datos de baja calidad, se procede a la obtención del perfil de velocidad de onda de corte a través del proceso de inversión.

Luego de este proceso se determina el siguiente perfil de velocidad de propagación de onda de corte en la profundidad.

Figura 6-24. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 6 X1=10m.



Fuente: Pickwin.

Del perfil resultante se puede deducir los siguientes datos:

- Z_{min}= 1,7m
- Z_{max}= 14,0 m.
- Error de iteración = 4,1%

6.2.4 Análisis de Resultados.

Se observa que los perfiles resultantes de los casos estudiados difieren en la profundidad máxima de exploración del método.

Queda en evidencia que, al aumentar la distancia de la fuente sísmica, las ondas superficiales tienen mayor distancia para desarrollarse, logrando así, registrar ondas planas y de frecuencia más bajas. Lo que se traduce en un aumento en la profundidad máxima resoluble en el perfil de velocidad de onda de corte, dentro de lo que permite la longitud total de arreglo.

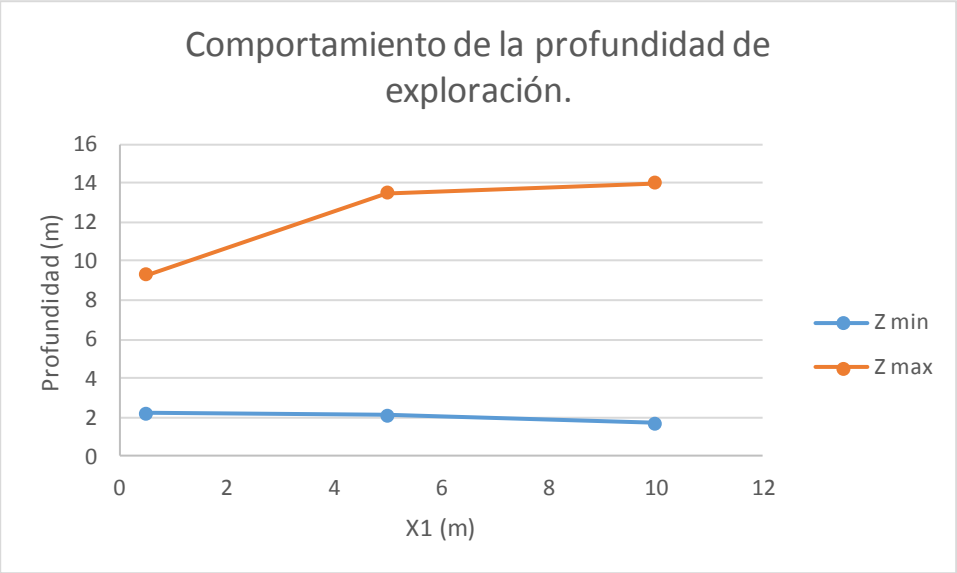
La siguiente tabla resume los rangos de profundidades donde el perfil entrega velocidades válidas.

Tabla 6-2. Resumen de análisis de Resultados.

Resumen de análisis de Resultados.			
Caso	**X1 [m]**	**Zmin [m]**	**Zmax [m]**
4	0,5	2,2	9,3
5	5	2,1	13,5
6	10	1,7	14,0

Fuente: Elaboración Propia.

Grafico 6-2. Comportamiento de la profundidad de exploración.



Fuente: Elaboración Propia.

6.3 VARIACIÓN DE LA MASA DE LA FUENTE SÍSMICA.

Como ya se mencionó en capítulos anteriores una fuente sísmica capaz de proporcionar más potencia de impacto a la tierra para crear ondas de superficie de frecuencias más bajas (longitudes de ondas más largas), aumentado así la profundidad de investigación.

Para analizar el comportamiento de los perfiles de Velocidad de onda de corte resultantes se realizan tres casos:

7. Masa de matillo de 8 Lb.
8. Masa de martillo de 12 Lb.
9. Masa de martillo de 20 Lb.

Todos los otros parámetros de medición se mantienen constantes durante la realización de las mediciones.

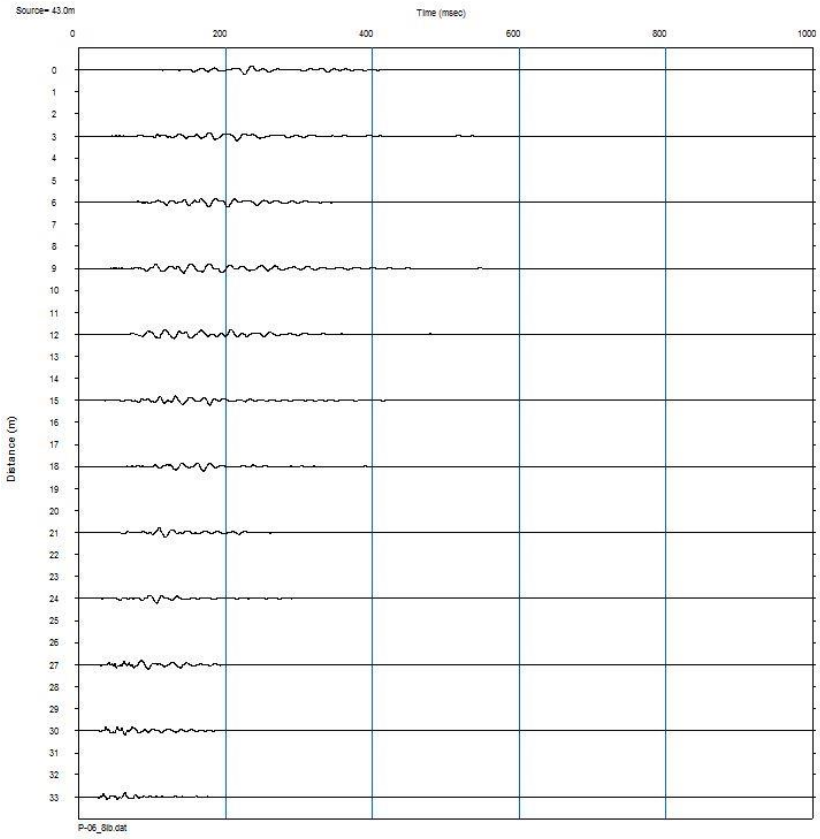
6.3.1 Fuente sísmica (masa de martillo 8 Lb.).

Parámetros de campos utilizados:

- Espaciamiento entre geófonos: 3 m.
- Distancia del Arreglo: 33 m.
- Masa fuente sísmica: 8 Lb
- Distancia de la Fuente: 10 m

Ajustados los parámetros de campo se inicia la adquisición de datos, para esto se generan 5 golpes, obteniéndose por cada golpe un registro. Luego de esto, y con la ayuda del software de procesamiento de la información recopilada (Pickwin), se promedian los datos obtenidos y se determinar un registro limpio de ruido ambiental.

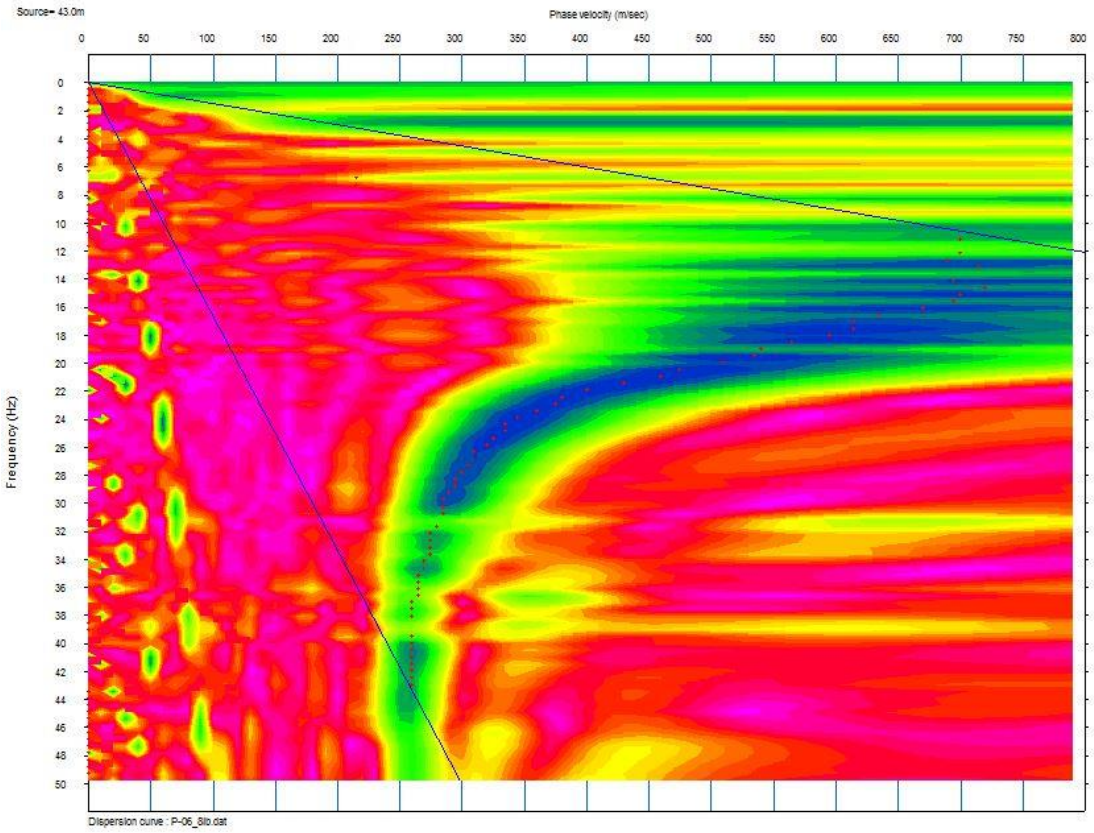
Figura 6-25. Registro de Caso 7 M=8 Lb.



Fuente: Pickwin.

Luego de obtener el registro, se determinar la curva de dispersión de los datos sísmicos registrados.

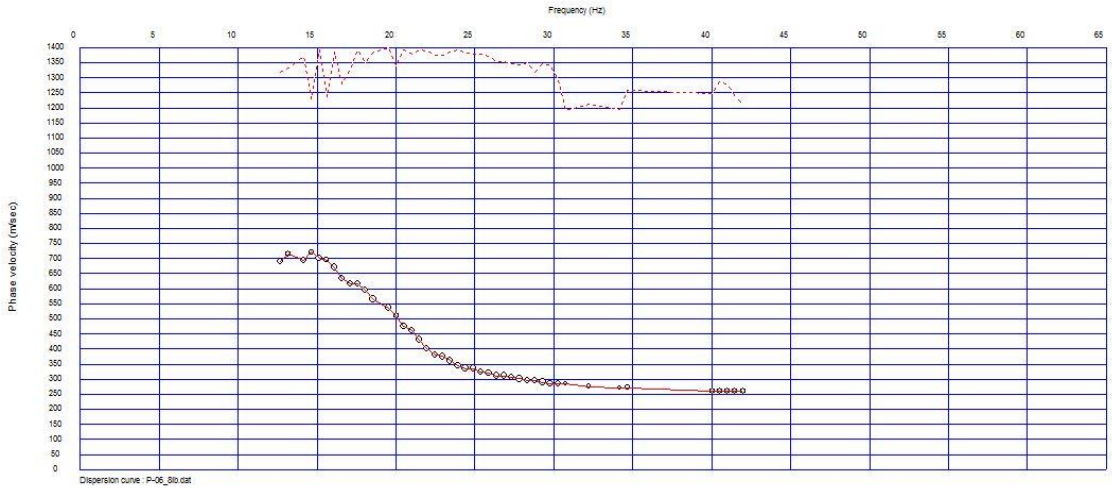
Figura 6-26. Curva de Dispersión Caso 7 M=8 Lb.



Fuente: Pickwin.

Como se mencionó en el capítulo 3, la curva de dispersión posee información de baja calidad, es por esto que este estudio considera eliminar el 15 % de los datos con peor calidad de la curva de dispersión.

Figura 6-27. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 7 M= 8 Lb.

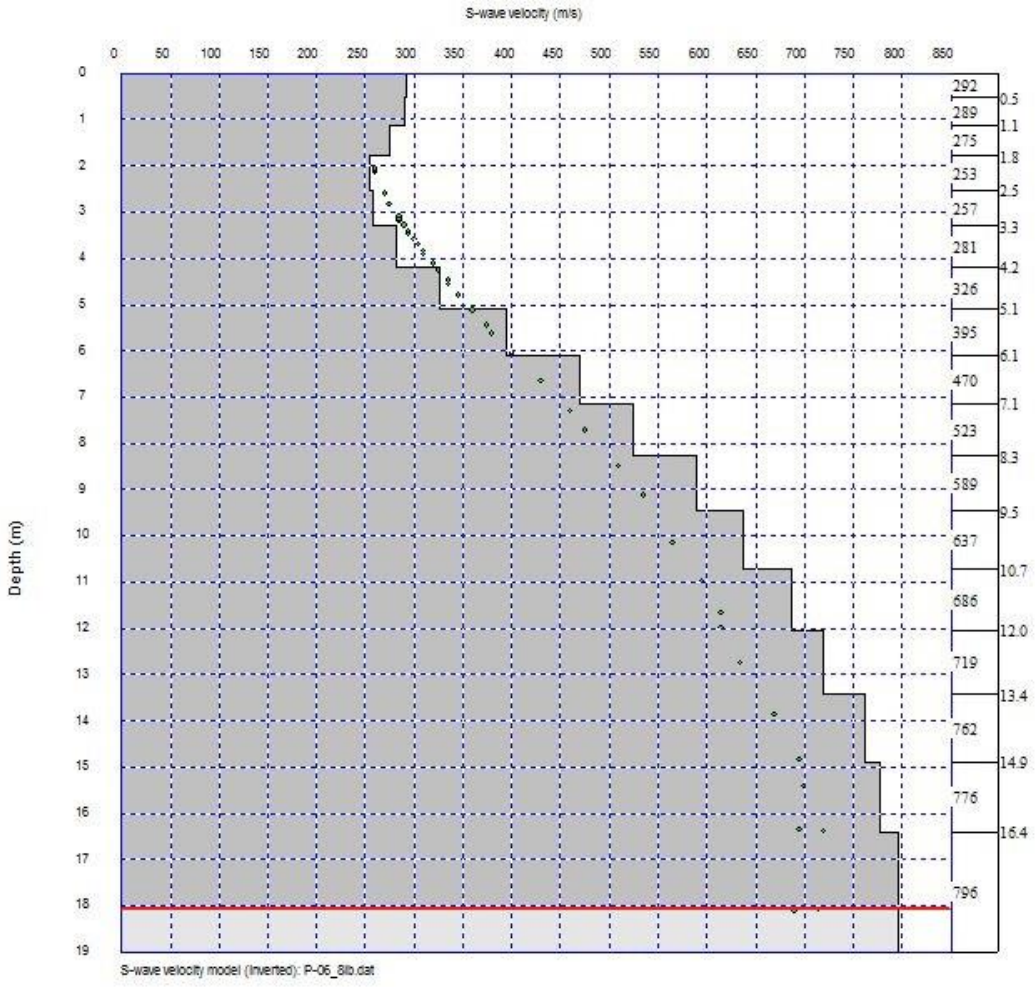


Fuente: Pickwin.

Obtenida la curva de dispersión sin los datos de baja calidad, se procede a la obtención del perfil de velocidad de onda de corte a través del proceso de inversión.

Luego de este proceso se determina el siguiente perfil de velocidad de propagación de onda de corte en la profundidad.

Figura 6-28. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 7 M= 8 Lb.



Fuente: Pickwin.

Del perfil resultante se puede deducir los siguientes datos:

- Z_{min}= 2,0 m
- Z_{max}= 18,1m.
- Error de iteración = 4,1%

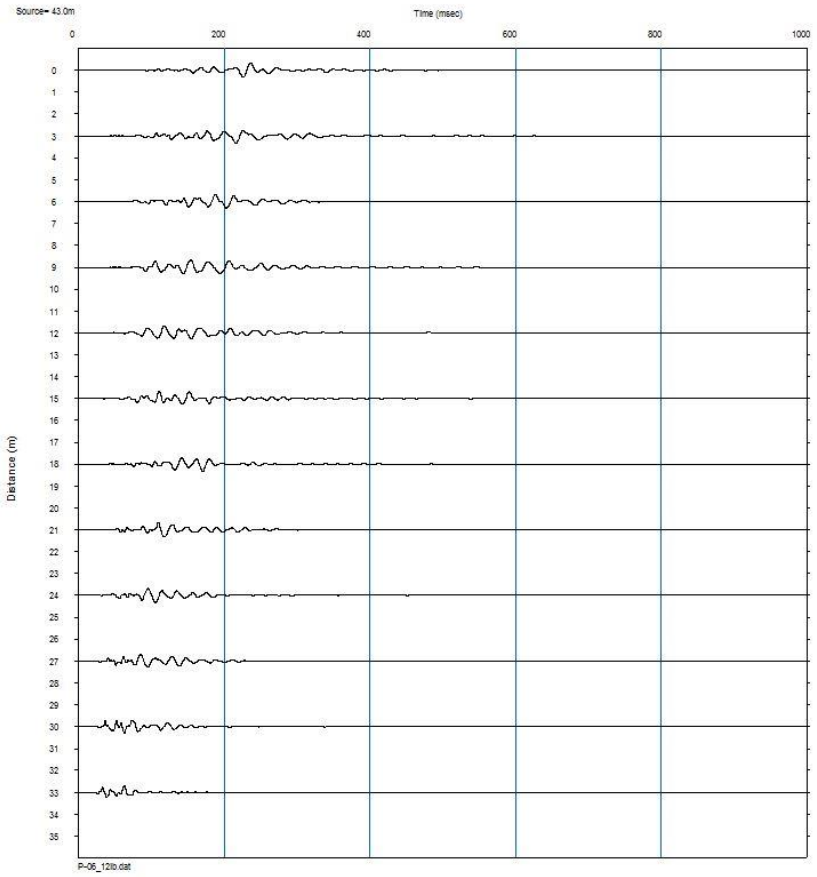
6.3.2 Fuente sísmica (masa de martillo 12 Lb.).

Parámetros de campos utilizados:

- Espaciamiento entre geófonos: 3 m.
- Distancia del Arreglo: 33 m.
- Masa fuente sísmica: 12 Lb
- Distancia de la Fuente: 10 m

Ajustados los parámetros de campo se inicia la adquisición de datos, para esto se generan 5 golpes, obteniéndose por cada golpe un registro. Luego de esto, y con la ayuda del software de procesamiento de la información recopilada (Pickwin), se promedian los datos obtenidos y se determinar un registro limpio de ruido ambiental.

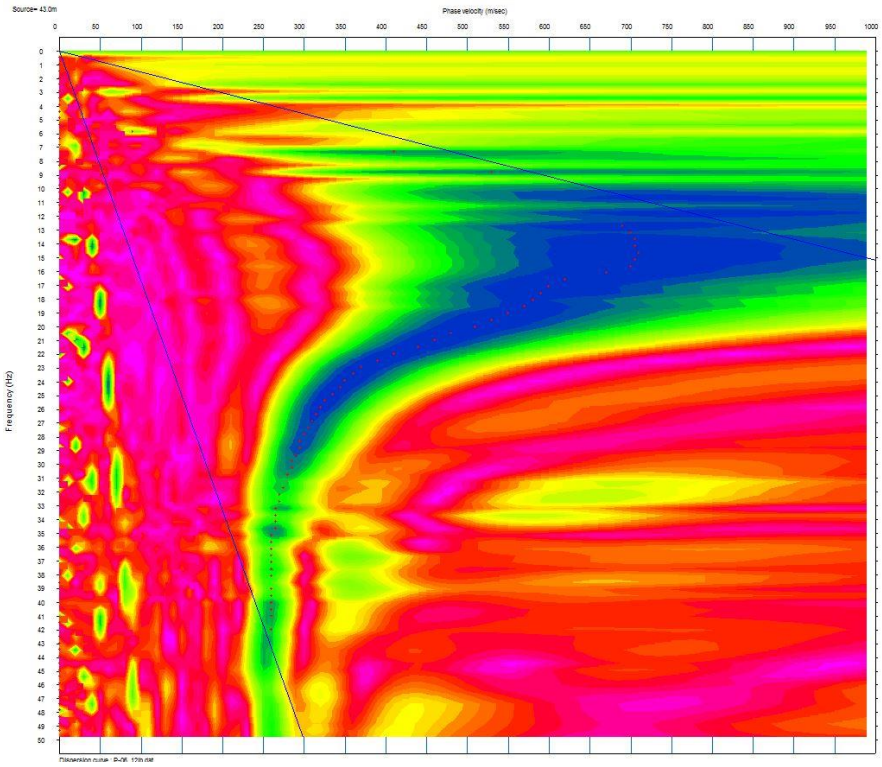
Figura 6-29. Registro de Caso 8 M=12 Lb.



Fuente: Pickwin.

Luego de obtener el registro, se determinar la curva de dispersión de los datos sísmicos registrados.

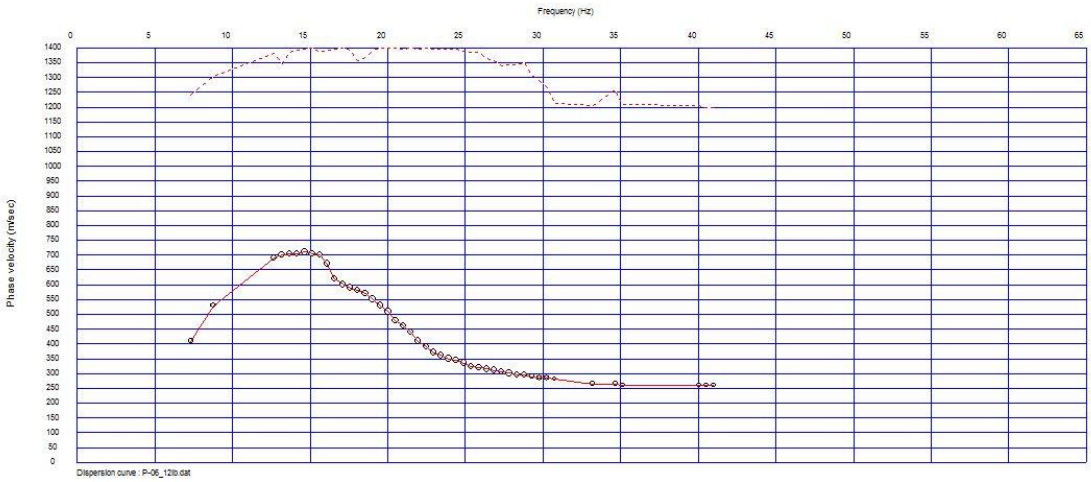
Figura 6-30. Curva de Dispersión Caso 8 M=12 Lb.



Fuente: Pickwin.

Como se mencionó en el capítulo 3, la curva de dispersión posee información de baja calidad, es por esto que este estudio considera eliminar el 15 % de los datos con peor calidad de la curva de dispersión.

Figura 6-31. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 8 M= 12 Lb.

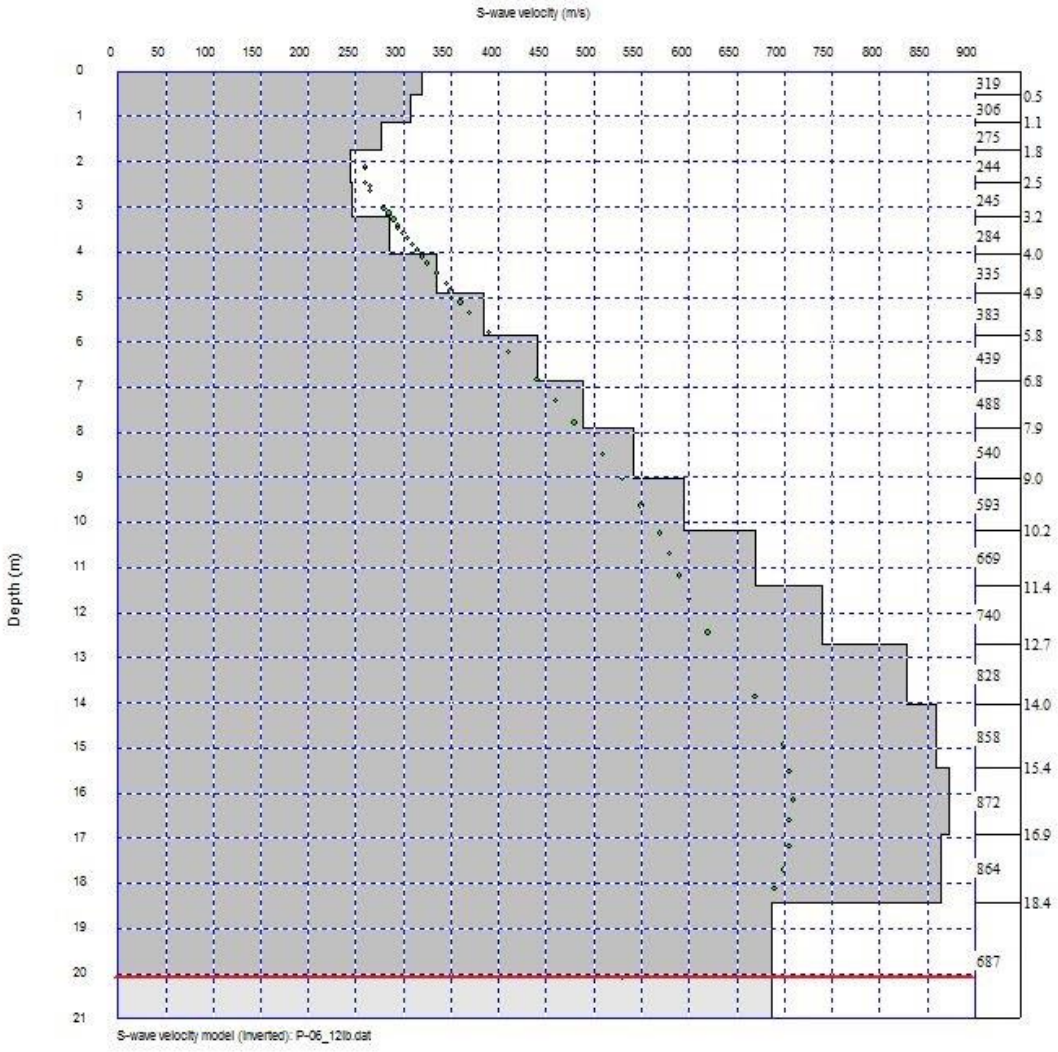


Fuente: Pickwin.

Obtenida la curva de dispersión sin los datos de baja calidad, se procede a la obtención del perfil de velocidad de onda de corte a través del proceso de inversión.

Luego de este proceso se determina el siguiente perfil de velocidad de propagación de onda de corte en la profundidad.

Figura 6-32. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 8 M=12 Lb.



Fuente: Pickwin.

Del perfil resultante se puede deducir los siguientes datos:

- Z_{min}= 2,0 m
- Z_{max}= 20,0m.
- Error de iteración = 5,0%

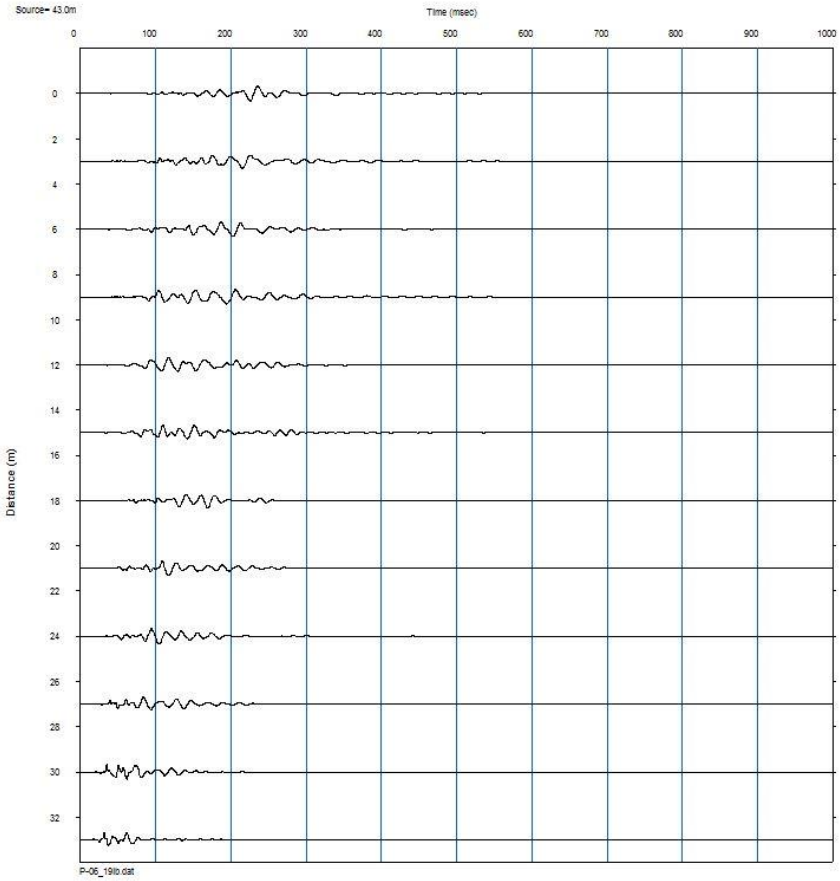
6.3.3 Fuente sísmica (masa de martillo 20 Lb.).

Parámetros de campos utilizados:

- Espaciamiento entre geófonos: 3 m.
- Distancia del Arreglo: 33 m.
- Masa fuente sísmica: 20 Lb
- Distancia de la Fuente: 10 m

Ajustados los parámetros de campo se inicia la adquisición de datos, para esto se generan 5 golpes, obteniéndose por cada golpe un registro. Luego de esto, y con la ayuda del software de procesamiento de la información recopilada (Pickwin), se promedian los datos obtenidos y se determinar un registro limpio de ruido ambiental.

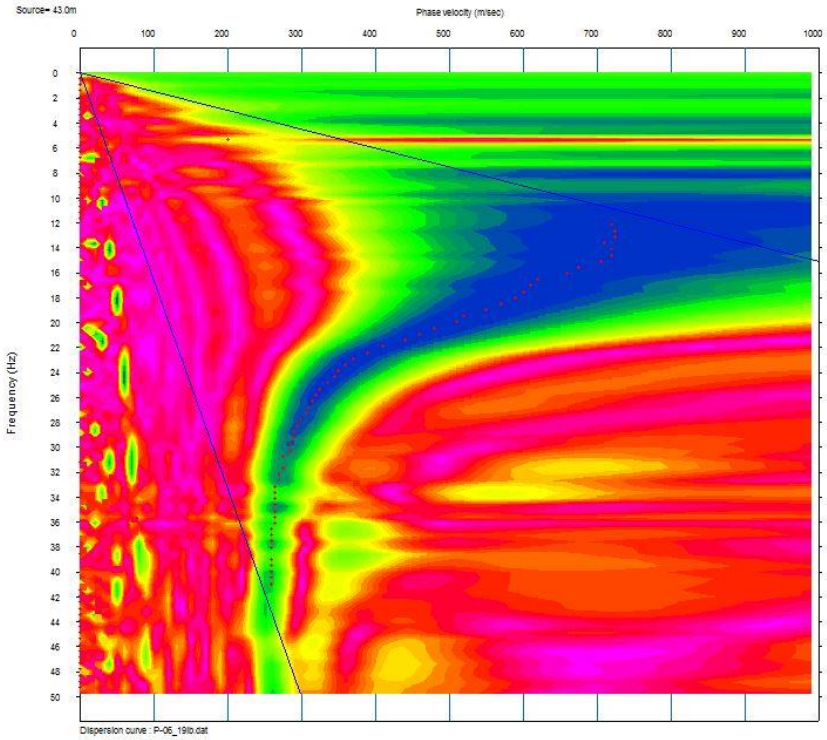
Figura 6-33. Registro de Caso 9 M=20 Lb.



Fuente: Pickwin.

Luego de obtener el registro, se determinar la curva de dispersión de los datos sísmicos registrados.

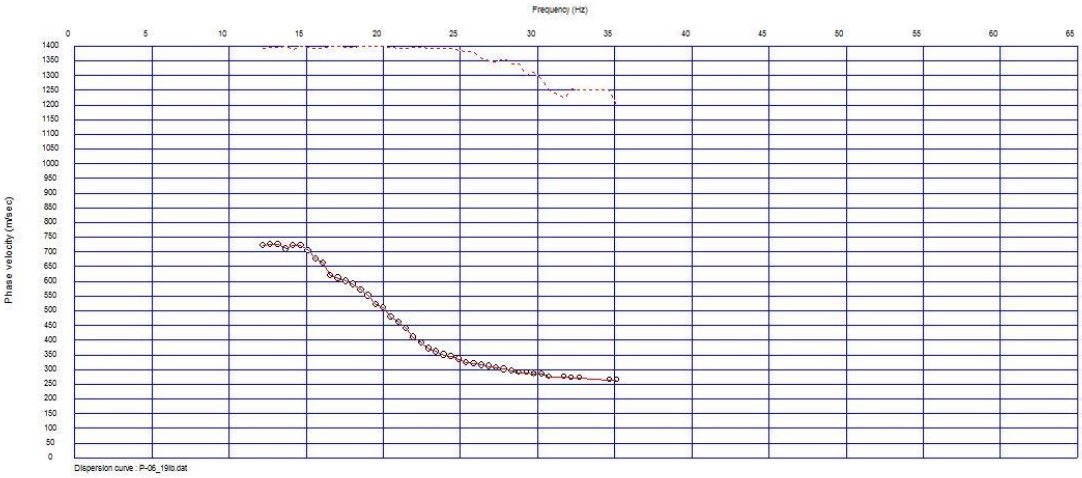
Figura 6-34. Curva de Dispersión Caso 9 M=20 Lb.



Fuente: Pickwin.

Como se mencionó en el capítulo 3, la curva de dispersión posee información de baja calidad, es por esto que este estudio considera eliminar el 15 % de los datos con peor calidad de la curva de dispersión.

Figura 6-35. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 9 M= 20 Lb.

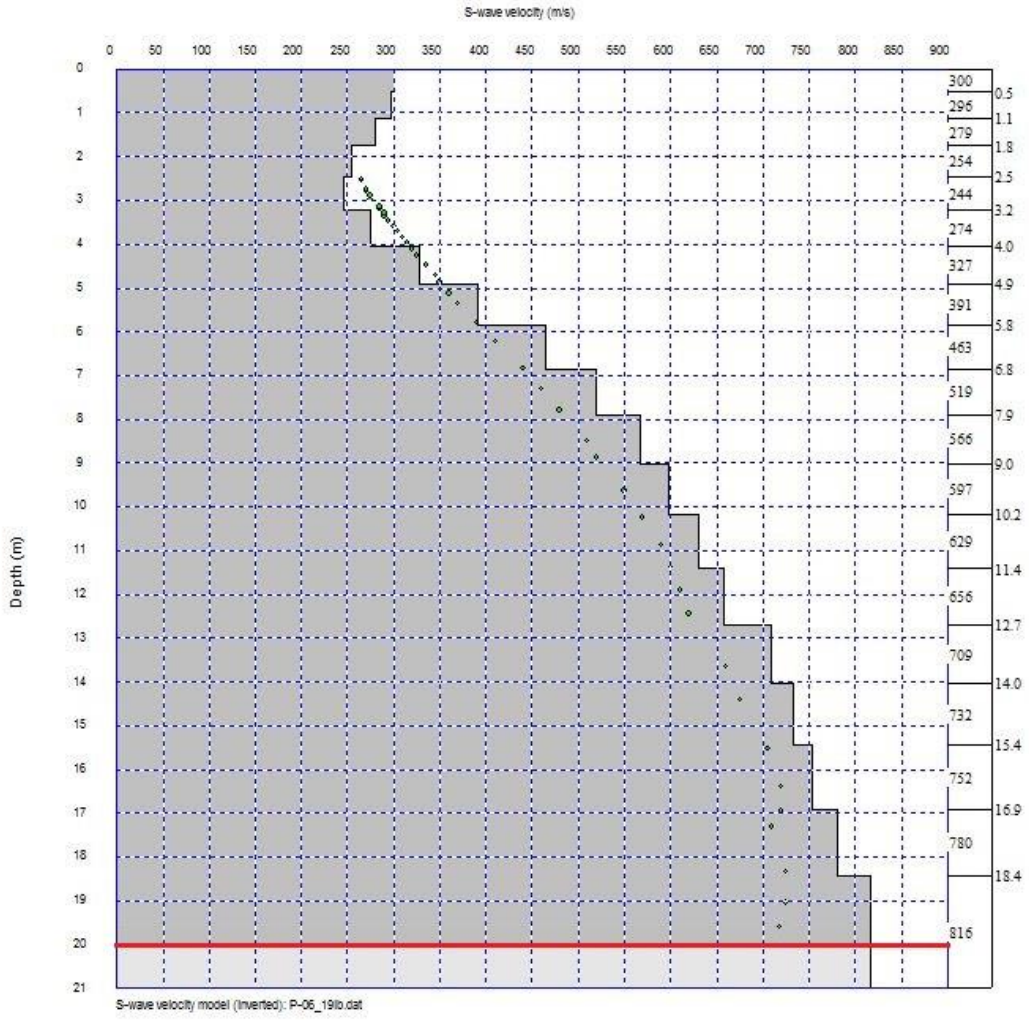


Fuente: Pickwin.

Obtenida la curva de dispersión sin los datos de baja calidad, se procede a la obtención del perfil de velocidad de onda de corte a través del proceso de inversión.

Luego de este proceso se determina el siguiente perfil de velocidad de propagación de onda de corte en la profundidad.

Figura 6-36. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 9 M= 20 Lb.



Fuente: Pickwin.

Del perfil resultante se puede deducir los siguientes datos:

- Z_{min}= 2,4 m
- Z_{max}= 20,0 m.
- Error de iteración = 4,4%

6.3.4 Análisis de Resultados.

Se observa que los perfiles resultantes de los casos estudiados difieren en la profundidad máxima de exploración del método.

Queda en evidencia que, al aumentar la masa de la fuente sísmica, las ondas superficiales generadas poseen mayor energía, logrando así, el registro de ondas con mayor contenido energético y frecuencia mucho más bajas. Lo que se traduce en un aumento en la profundidad máxima resoluble en el perfil de velocidad de onda de corte, de igual forma como sucedió en el caso de variación de distancia de la fuente.

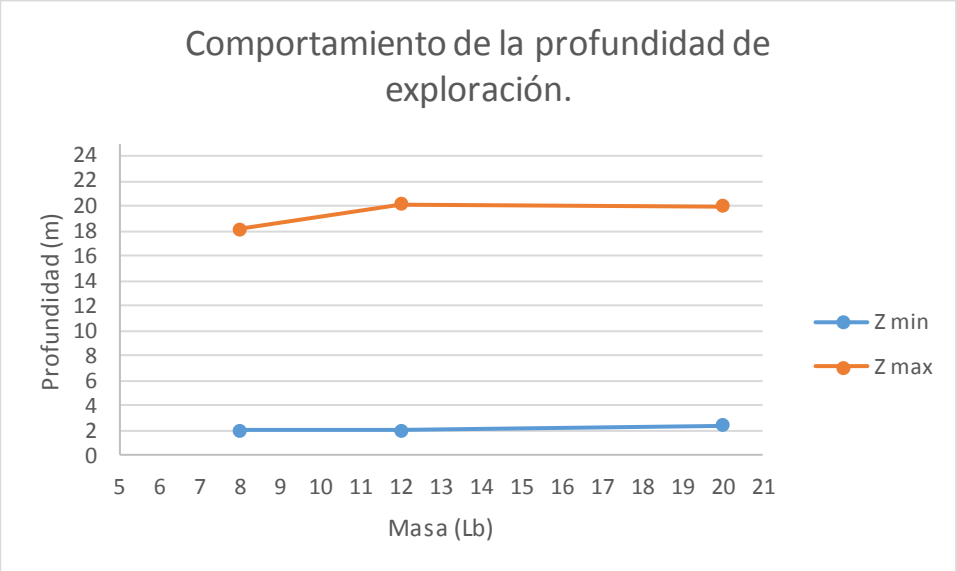
La siguiente tabla resume los rangos de profundidades donde el perfil entrega velocidades válidas.

Tabla 6-3. Resumen de análisis de Resultados.

Resumen de análisis de Resultados.			
Caso	**Masa [Lb]**	**Zmin [m]**	**Zmax [m]**
7	8	2,0	18,1
8	12	2,0	20,0
9	20	2,4	20,0

Fuente: Elaboración Propia.

Grafico 6-3. Comportamiento de la profundidad de exploración.



Fuente: Elaboración Propia.

6.4 VARIACIÓN DE LONGITUD TOTAL DEL ARREGLO.

La importancia de la longitud total del arreglo está relacionada con la perspectiva del procesamiento de datos, ya que la longitud del arreglo determina que longitudes de onda máximas pueden ser analizadas, lo que a su vez determina la profundidad máxima de exploración (Z_{max}).

Para analizar el comportamiento de los perfiles de Velocidad de onda de corte resultantes se realizan tres casos:

10. Longitud total de arreglo de 24 m.
11. Longitud total de arreglo de 33 m.
12. Longitud total de arreglo de 132 m.

Todos los otros parámetros de medición se mantienen constantes durante la realización de las mediciones.

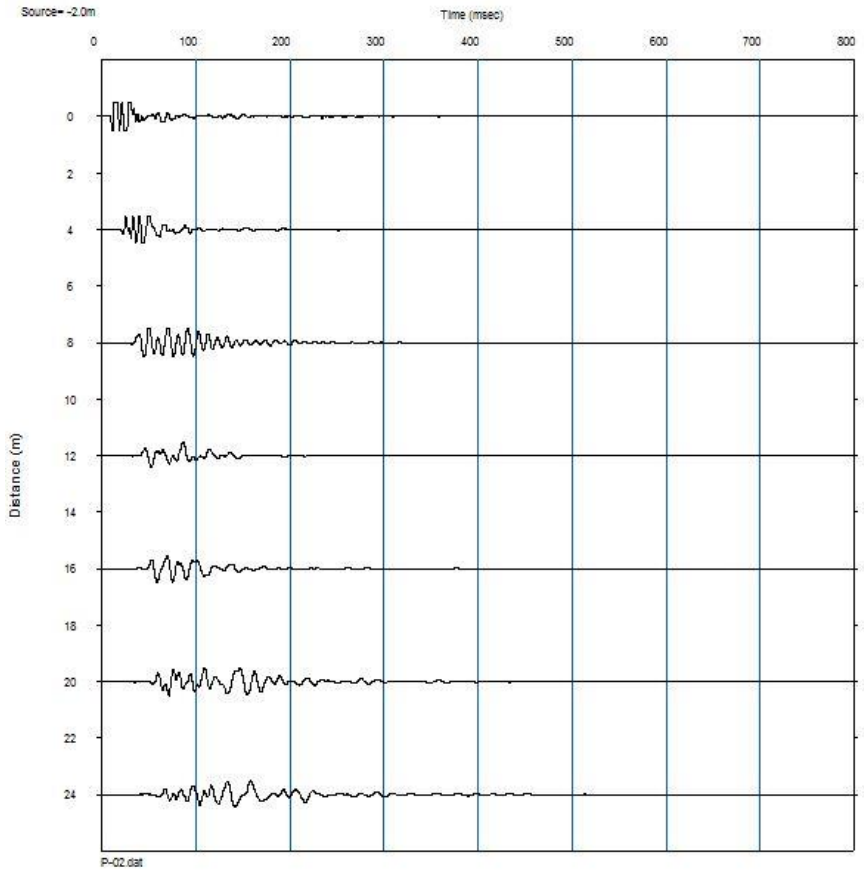
6.4.1 Longitud total de arreglo de 24 m.

Parámetros de campos utilizados:

- Espaciamiento entre geófonos: 4 m.
- Distancia del Arreglo: 24 m.
- Masa fuente sísmica: 12 Lb.
- Distancia de la Fuente: 2 m.

Ajustados los parámetros de campo se inicia la adquisición de datos, para esto se generan 5 golpes, obteniéndose por cada golpe un registro. Luego de esto, y con la ayuda del software de procesamiento de la información recopilada (Pickwin), se promedian los datos obtenidos y se determinar un registro limpio de ruido ambiental.

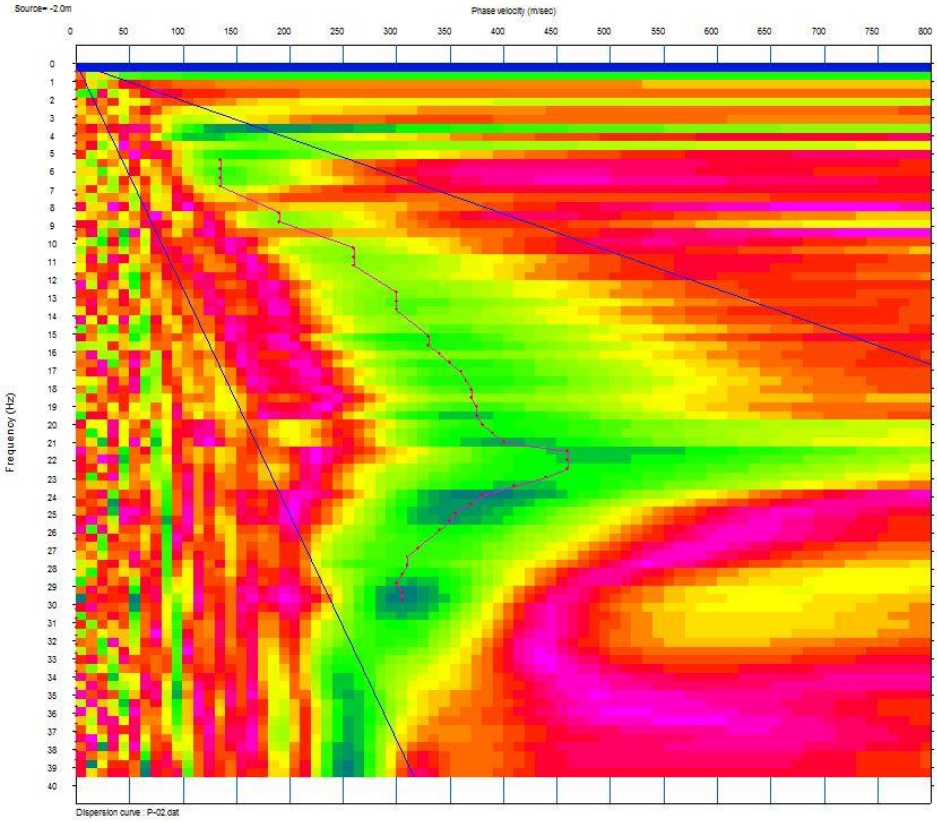
Figura 6-37. Registro de Caso 10 L=24 m.



Fuente: Pickwin.

Luego de obtener el registro, se determinar la curva de dispersión de los datos sísmicos registrados.

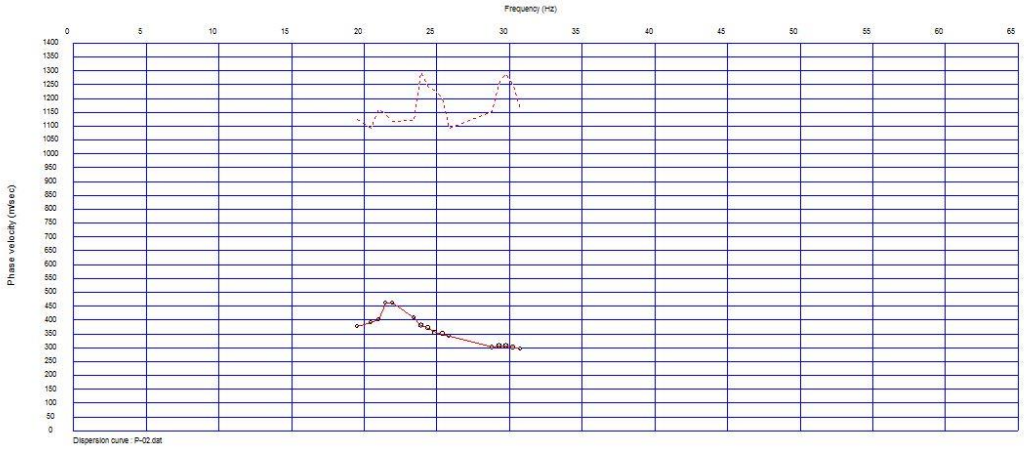
Figura 6-38. Curva de Dispersión Caso 10 L=24 m.



Fuente: Pickwin.

Como se mencionó en el capítulo 3, la curva de dispersión posee información de baja calidad, es por esto que este estudio considera eliminar el 15 % de los datos con peor calidad de la curva de dispersión.

Figura 6-39. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 10 L= 24 m.

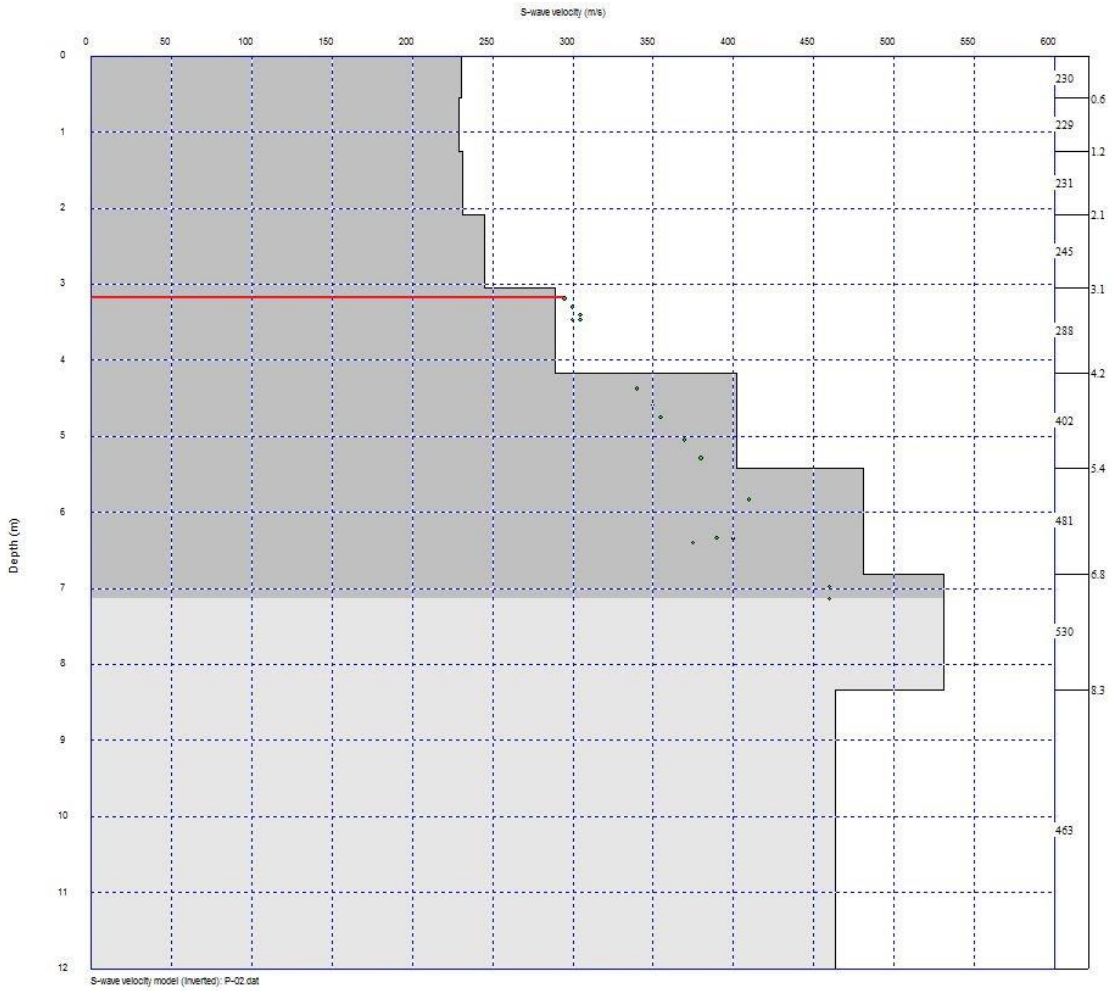


Fuente: Pickwin.

Obtenida la curva de dispersión sin los datos de baja calidad, se procede a la obtención del perfil de velocidad de onda de corte a través del proceso de inversión.

Luego de este proceso se determina el siguiente perfil de velocidad de propagación de onda de corte en la profundidad.

Figura 6-40. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 10 L= 24 m.



Fuente: Pickwin.

Del perfil resultante se puede deducir los siguientes datos:

- Z_{min}= 3,2 m
- Z_{max}= 7,1 m.
- Error de iteración = 4,6%

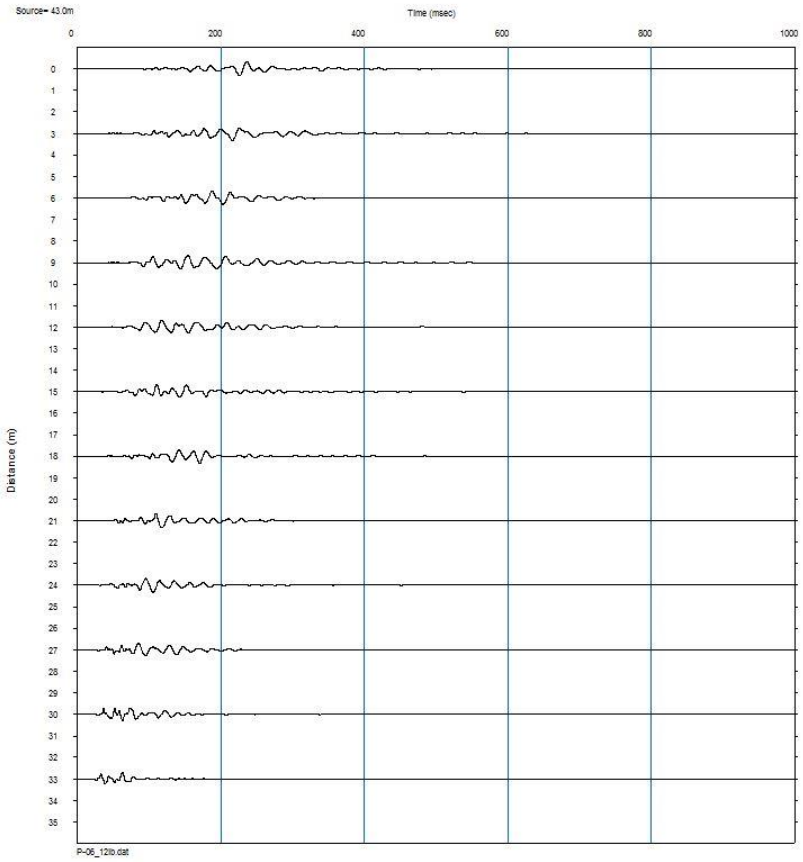
6.4.2 Longitud total de arreglo de 33 m.

Parámetros de campos utilizados:

- Espaciamiento entre geófonos: 3 m.
- Distancia del Arreglo: 33 m.
- Masa fuente sísmica: 12 Lb.
- Distancia de la Fuente: 10 m.

Ajustados los parámetros de campo se inicia la adquisición de datos, para esto se generan 5 golpes, obteniéndose por cada golpe un registro. Luego de esto, y con la ayuda del software de procesamiento de la información recopilada (Pickwin), se promedian los datos obtenidos y se determinar un registro limpio de ruido ambiental.

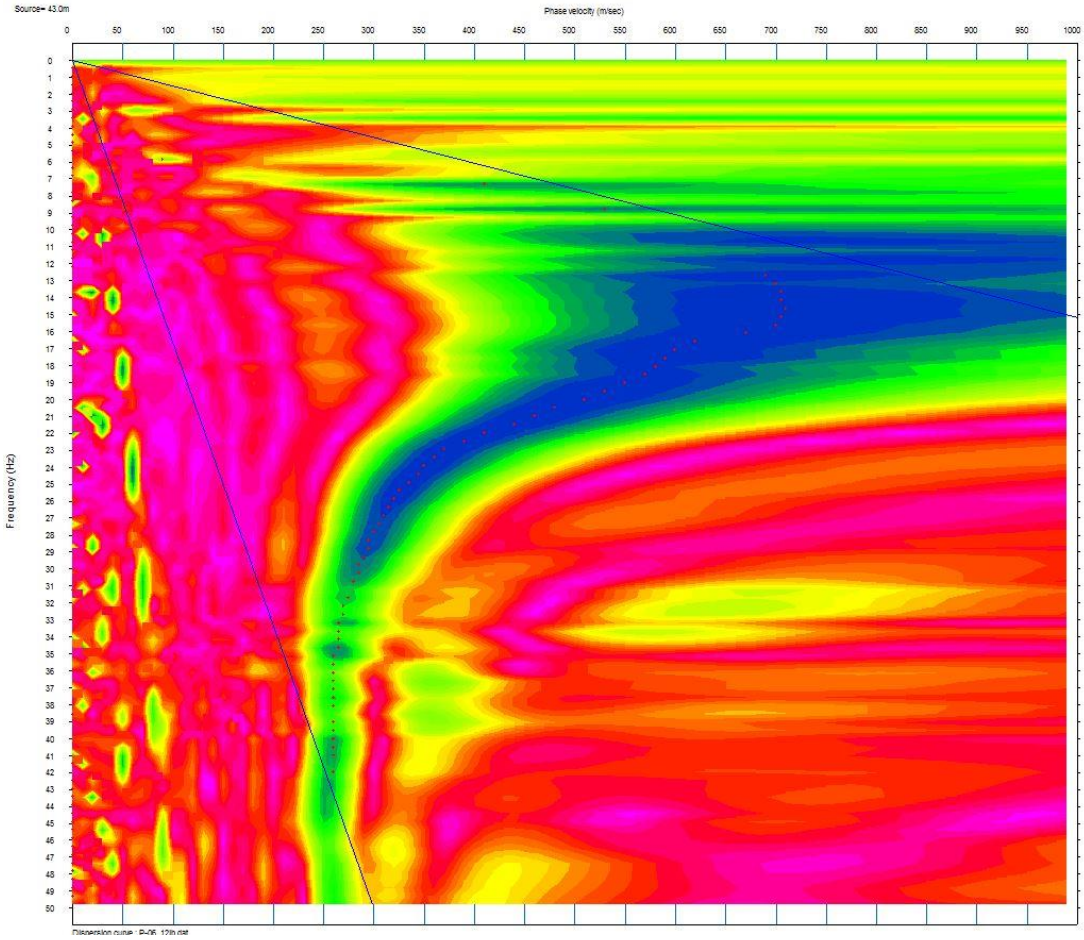
Figura 6-41. Registro de Caso 11 L=33 m.



Fuente: Pickwin.

Luego de obtener el registro, se determinar la curva de dispersión de los datos sísmicos registrados.

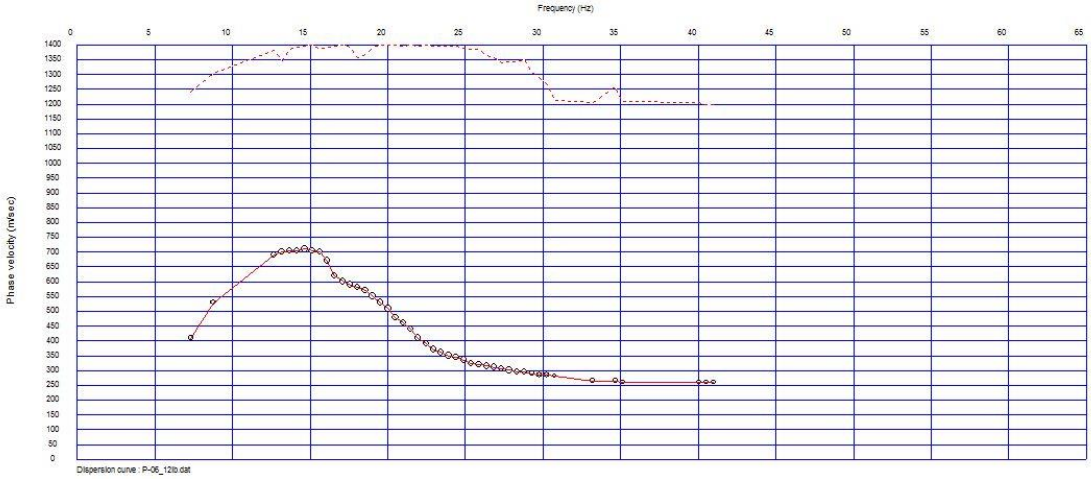
Figura 6-42. Curva de Dispersión Caso 11 L=33 m.



Fuente: Pickwin.

Como se mencionó en el capítulo 3, la curva de dispersión posee información de baja calidad, es por esto que este estudio considera eliminar el 15 % de los datos con peor calidad de la curva de dispersión.

Figura 6-43. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 11 L= 33 m.

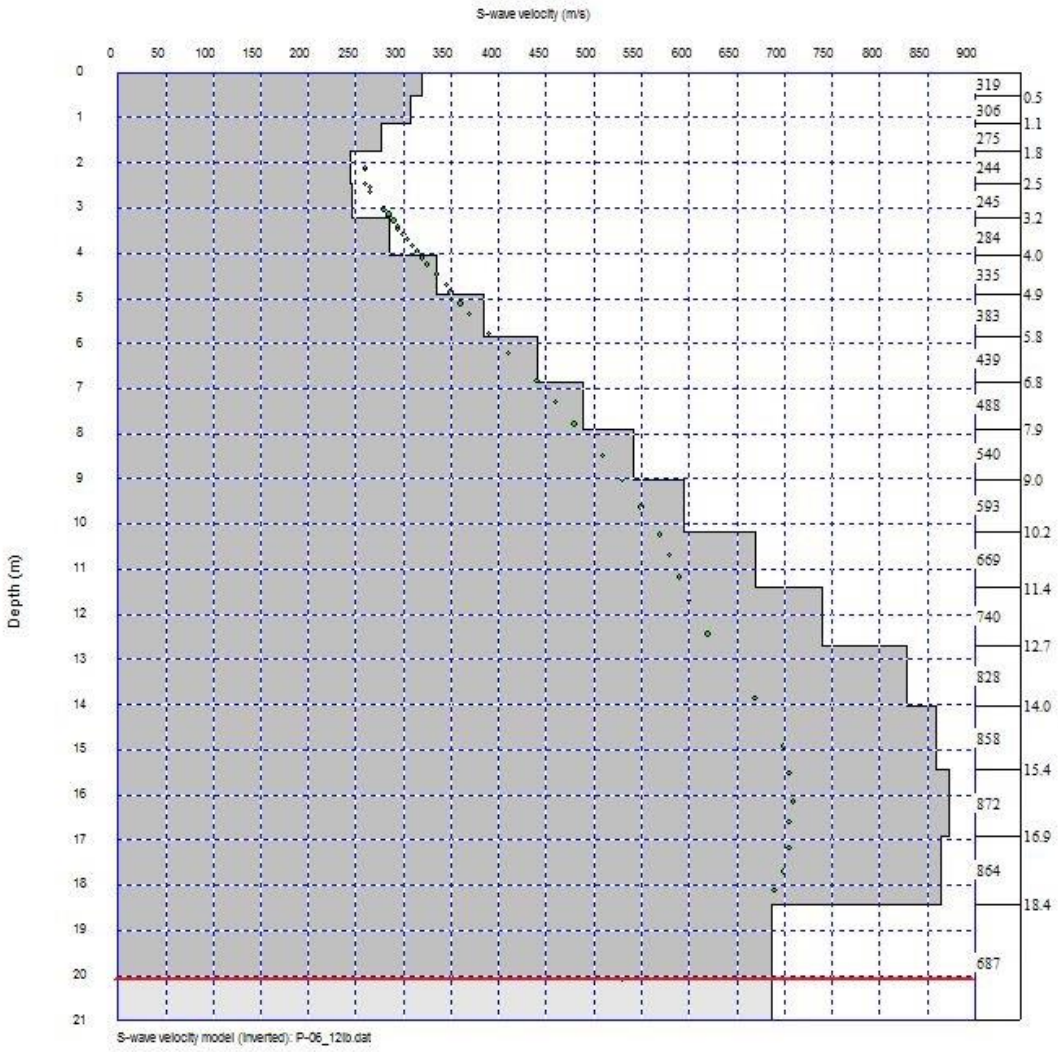


Fuente: Pickwin.

Obtenida la curva de dispersión sin los datos de baja calidad, se procede a la obtención del perfil de velocidad de onda de corte a través del proceso de inversión.

Luego de este proceso se determina el siguiente perfil de velocidad de propagación de onda de corte en la profundidad.

Figura 6-44. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 11 L= 33 m.



Fuente: Pickwin.

Del perfil resultante se puede deducir los siguientes datos:

- Z_{min}= 2,0 m
- Z_{max}= 20,0m.
- Error de iteración = 5,0%

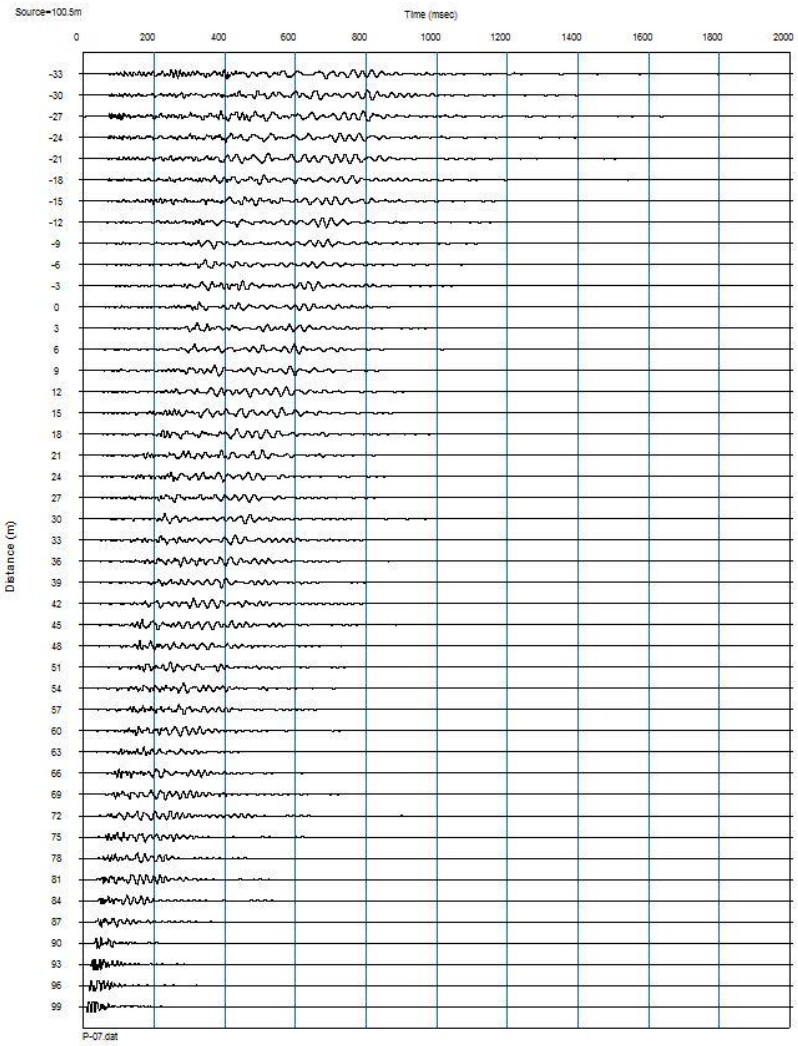
6.4.3 Longitud total de arreglo de 132 m.

Parámetros de campos utilizados:

- Espaciamiento entre geófonos: 3 m.
- Distancia del Arreglo: 132 m.
- Masa fuente sísmica: 12 Lb.
- Distancia de la Fuente: 1,5 m.

Ajustados los parámetros de campo se inicia la adquisición de datos, para esto se generan 5 golpes, obteniéndose por cada golpe un registro. Luego de esto, y con la ayuda del software de procesamiento de la información recopilada (Pickwin), se promedian los datos obtenidos y se determinar un registro limpio de ruido ambiental.

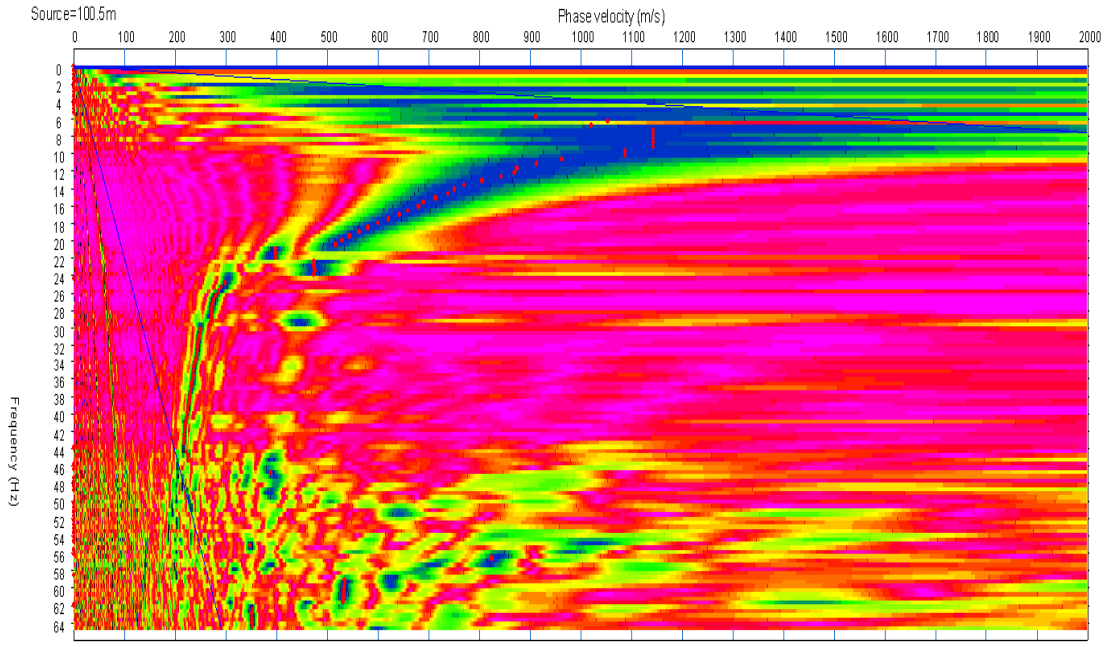
Figura 6-45. Registro de Caso 12 L=132 m.



Fuente: Pickwin.

Luego de obtener el registro, se determinar la curva de dispersión de los datos sísmicos registrados.

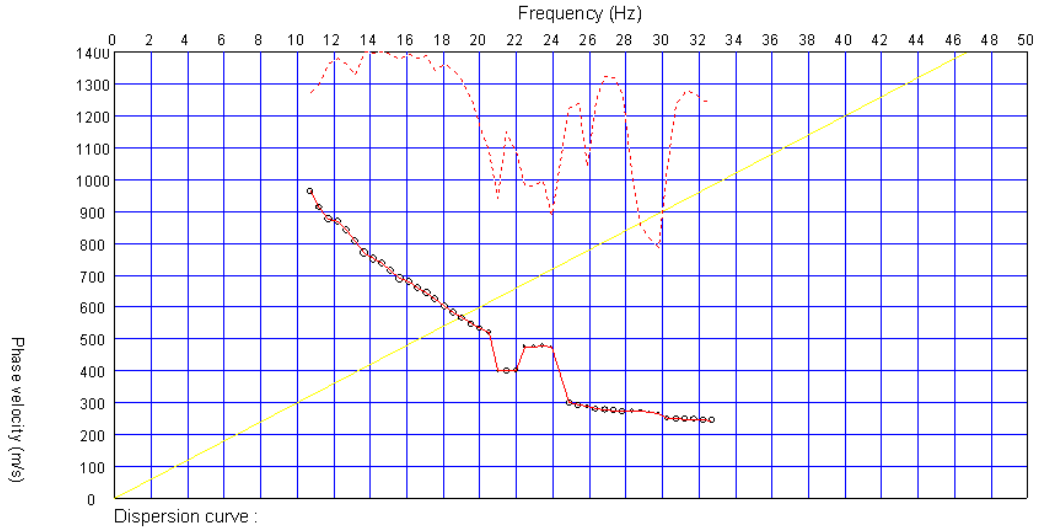
Figura 6-46. Curva de Dispersión Caso 11 L=132 m.



Fuente: Pickwin.

Como se mencionó en el capítulo 3, la curva de dispersión posee información de baja calidad, es por esto que este estudio considera eliminar el 15 % de los datos con peor calidad de la curva de dispersión.

Figura 6-47. Curva dispersión sin datos de baja calidad Caso 11 L= 132 m.

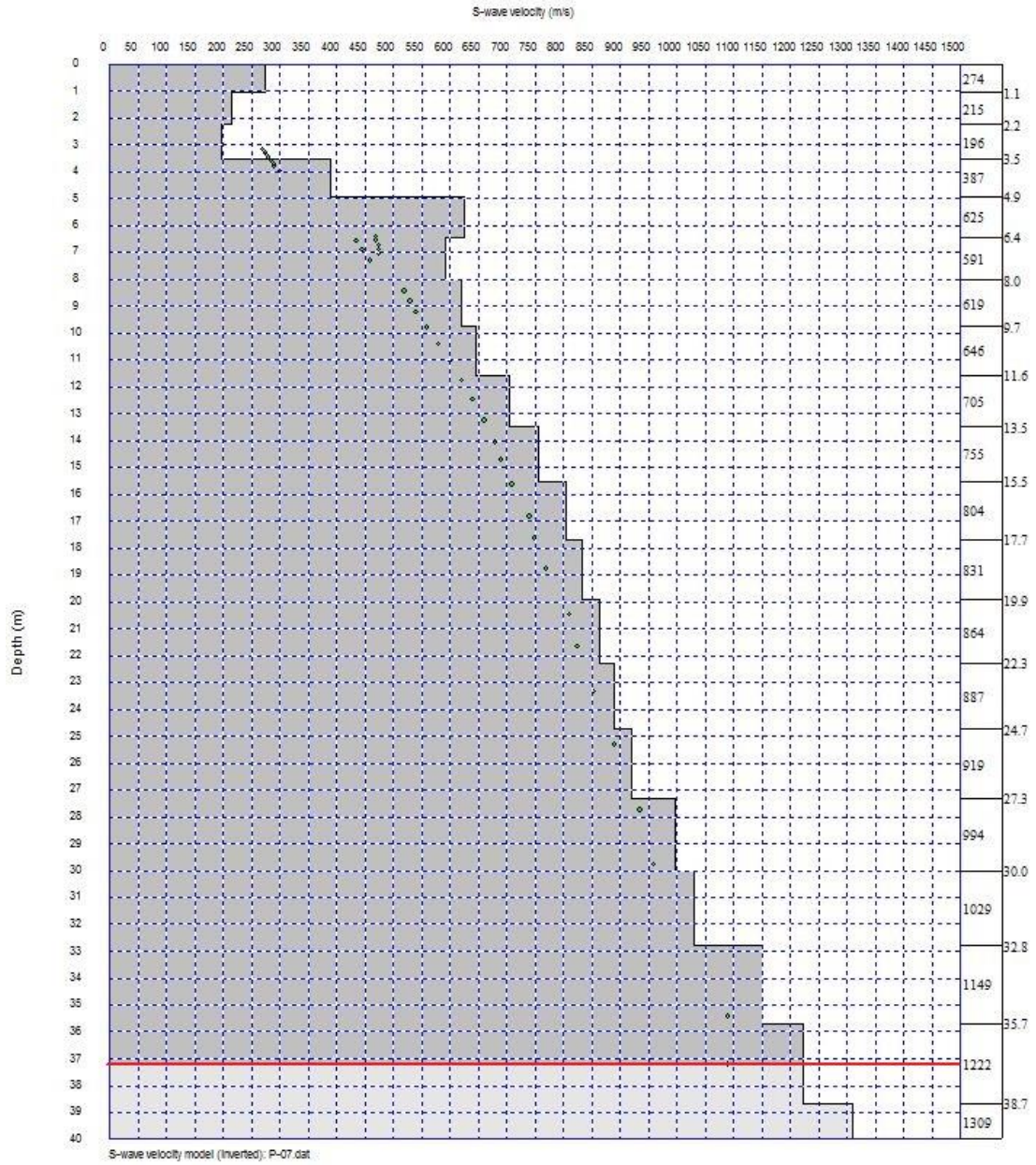


Fuente: Pickwin.

Obtenida la curva de dispersión sin los datos de baja calidad, se procede a la obtención del perfil de velocidad de onda de corte a través del proceso de inversión.

Luego de este proceso se determina el siguiente perfil de velocidad de propagación de onda de corte en la profundidad.

Figura 6-48. Perfil de Velocidad de propagación de onda de corte Caso 11 L= 132 m.



Fuente: Pickwin.

Del perfil resultante se puede deducir los siguientes datos:

- Z_{min}= 3 m
- Z_{max}= 37,2 m.
- Error de iteración = 4,9%

6.4.4 Análisis de Resultados.

Se observa que los perfiles resultantes de los casos estudiados difieren en la profundidad máxima de exploración del método.

Queda en evidencia que al aumentar la longitud del arreglo aumenta la profundidad máxima donde el método es efectivo, es decir, que el perfil de velocidades obtenido tendrá datos validos hasta una profundidad mayor.

Al aumentar la longitud del arreglo onda con mayor longitud pueden ser registrada y por ende mayor será la profundidad del perfil de velocidades de propagación de onda de corte.

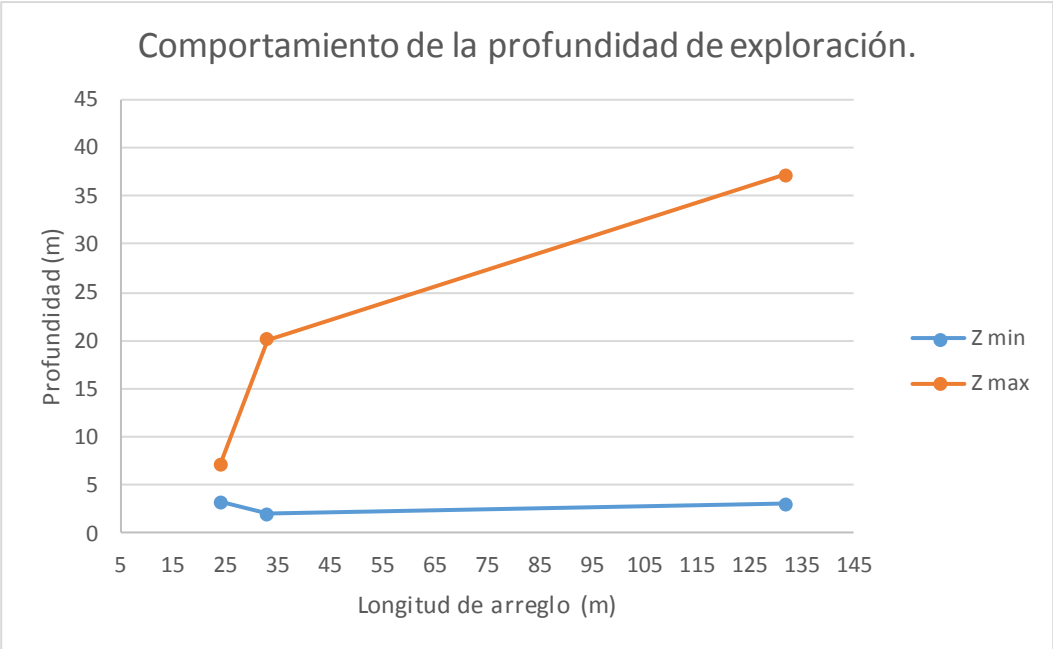
La siguiente tabla resume los rangos de profundidades donde el perfil entrega velocidades válidas.

Tabla 6-4. Resumen de análisis de Resultados.

Resumen de análisis de Resultados.			
Caso	**L [m]**	**Zmin [m]**	**Zmax [m]**
10	24	3,2	7,1
11	33	2,0	20,1
12	132	3,0	37,2

Fuente: Elaboración Propia.

Grafico 6-4. Comportamiento de la profundidad de exploración.



Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO 7

Conclusiones y futuras líneas de acción.

7 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE ACCIÓN.

7.1 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO.

Después de analizar todos los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente.

- Respecto a la distancia entre los geófonos: se comprueba que este parámetro, influye en la profundidad mínima desde donde el perfil de velocidad de onda de corte contiene información válida para estudio. Mientras menos espaciamiento entre los geófonos, el arreglo es capaz de registrar ondas con menos longitud de onda, ondas que penetran solo capas superficiales de suelo.

  Por lo tanto, se recomienda que mientras el contenido de frecuencias generado a partir de la fuente sea suficientemente alto, se requiere un dx corto para capturar variaciones pequeñas de velocidad de propagación de onda de corte a poca profundidad.

  Según lo evidenciado en los ensayos realizados, el rango óptimo para este parámetro está dentro del siguiente intervalo:

  $$1\,m \leq dx \leq 3\,m$$

  Ajustado este parámetro en este intervalo, se espera tener perfiles de velocidad de propagación de onda de corte con información valida a partir de 1 a 3 m de profundidad.
- Respecto a la distancia de la fuente sísmica: se comprueba que este parámetro, influye en la profundidad máxima hasta donde el perfil de velocidad de onda de corte entrega información válida para estudio. Cabe destacar que las ondas superficiales se vuelven planas después de viajar cierta distancia. Esta distancia es una función de la longitud de onda (Ondas con longitudes de onda más amplia, requieren mayores distancias para desarrollarse).

  Revisando los resultados obtenidos se comprueba que el rango propuesto por Park et. Al., 1999, es lícito.

  Por lo tanto, se recomienda que el valor óptimo para este parámetro este en el siguiente intervalo:

  $$0{,}2\,L \leq X1 \leq 0{,}5\,L$$

  Ajustando este parámetro en este intervalo, se espera tener perfiles con mayor profundidad máxima de validez.
- Respecto al tipo de fuente sísmica: se comprueba que este parámetro, al igual que la distancia de la fuente sísmica, influye en la profundidad máxima hasta donde el perfil de velocidad de onda de corte entrega información válida para estudio. Una fuente que es capaz de proporcionar más energía de impacto al suelo, tiene potenciales para crear ondas superficiales de frecuencias más bajas (longitudes de onda más largas), aumentado así la profundidad de exploración del método.

  Según lo evidenciado en las pruebas desarrolladas, se comprueba que a medida que aumentaba la masa de martillo, aumentaba la profundidad máxima de exploración.

  Determinando que una masa razonable para desarrollar las pruebas de campo corresponde a un mazo de 20 Lb. Este tipo de masa logró la mayor profundidad de exploración en los perfiles resultante.

- Respecto a la longitud total del arreglo. Este parámetro es uno de los más importantes, ya que, está directamente relacionado con la longitud de onda más larga que se puede analizar, y por lo tanto, también se relaciona con la profundidad máxima de exploración. Un criterio común es que la longitud de onda máxima que se puede analizar, con la mayor precisión posible, es aproximadamente igual a la longitud total del arreglo (Park, 2010).

  Por otro lado, la profundidad máxima de investigación se determina por la onda superficial de longitud de onda más larga obtenida en el proceso de adquisición de datos (Park, 2010).

  Dicho esto, se establece como un criterio común adoptar que:

  $$Z_{max} = 0{,}5\ L$$

  De análisis de resultados de las pruebas desarrolladas, se evidencia el cumplimiento de este criterio. Por lo tanto, se recomienda seguir dicho criterio para determinar la profundidad máxima valida de los perfiles de propagación de onda de corte.

Si bien es cierto, en esta conclusión se entregan recomendaciones de optimización de parámetros para obtener perfiles de velocidad de onda de corte de la mejor calidad posible, se recomienda que el proceso de adquisición de datos se debe desarrollar con personal capacitado en el método y con una vasta experiencia. Ya que el desarrollo de las pruebas de campo demanda una dedicación especial en su proceso, de esto depende obtener una buena data, y por lo tanto, determinar perfiles de buena calidad.

7.2 FUTURA LÍNEAS DE ACCIÓN EN EL TEMA.

La investigación desarrollada contribuye a despejar algunas incógnitas sobre el tema tratado, pero, simultáneamente, genera nuevas preguntas, nuevas ideas y abre nuevas vías de trabajo. Es por esto que este apartado presenta algunas líneas de investigación que pueden ser objeto de interés para futuros trabajos de memorias.

En relación a la metodología de análisis multicanal de ondas superficiales, a parte de los parámetros estudiados, esta metodología se ve influenciada por otros parámetros, los cuales son también fundamentales en la calidad los resultados obtenidos.

Futuras investigaciones:

- Estudio de la relación señal versus ruidos en los registros sísmicos.
  En el proceso de adquisición de datos de campo, se evidencia que el ruido ambiental o las ondas que provienen de fuentes de ubicación desconocida, invade el registro y dificulta la obtención de una curva de dispersión de buena calidad, que permita claramente obtener un perfil de velocidad de onda de corte. Es por esto que resulta interesante analizar el comportamiento de esta relación.
- Estudio de la contribución de los modos de las ondas registradas con el método de análisis multicanal de ondas superficiales, en la determinación de los perfiles de velocidad de propagación de ondas superficiales.
  En algunas situaciones, es posible identificar modos superiores de la curva de dispersión, los cuales pueden ser incluidos en el proceso de inversión. Esto puede favorecer a una estimación más precisa de los perfiles de Vs.
- Estudio comparativo entre las metodologías convencionales (invasivas) para la determinación perfiles de velocidad de onda de corte y las metodologías de análisis de ondas superficiales.
  Resulta interesante establecer que metodología determina perfiles con la mayor calidad posible. Por otro lado, al encontrar una correlación entre los métodos, significaría una gran contribución, ya que con esto se podría complementar estos métodos fácilmente, obteniéndose perfiles de velocidad de onda de corte aún más completos.
- Optimización de parámetros internos de procesamiento de los datos sísmicos en la metodología de análisis multicanal de ondas superficiales.
  La metodología MASW se ve influenciada por parámetros internos y externos: los externos, son aquellos que son modificables en el proceso del ensayo, fuera del programa de medición. Los parámetros internos son los modificables en el procesamiento de los datos obtenidos.

.

REFERENCIAS.

ASTM International. Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing. D4428/ D4428M – 00. Pennsylvania, USA, 2000. 13 p.

ASTM International. Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing. D7400 – 08. Pennsylvania, USA, 2008. 11p.

BESSASON, B and Erlingsson, S. Shear wave velocity in surface sediments. Faculty of civil and environmental engineering, university of Iceland. 53-55. 2011

GEOMETRICS [en línea] <http://www.geometrics.com/geometrics-products/seismographs/seismograph-information-and-case-studies/> [consulta: 18 octubre 2016]

KRAMER, Steven L. Geotechnical Earthquake Engineering. 1ra ed. New Jersey, USA, Prentice Hall, 1996. 653 p.

LUNA, R. and H. Jadi, "Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods," Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, St. Louis, MO. 2-3. 2000.

MASW, Multichannel Analysis of Surface Waves [en línea] <www.masw.com> [consulta 20 abril 2017]

PARK, Choon B., MILLER, Richard D., XIA, Jianghai, and IVANOV, Julian. Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. Kansas geological survey, lawrence, usa. 1-3. 2007.

PARK, Choon B. y MILLER, Richard D. Roadside passive multichannel analysis of surface waves (MASW). Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 13(1): 1-11. 2008.

PARK, Choon B., MILLER, Richard D. y XIA, Jianghai. Imaging dispersion curves of surface waves on multichannel record. En: 68th Annual International Meeting Society of Exploration Geophysicists (68°, 1998, USA), Expanded Abstracts, New Orleans, SEG, 1998. pp. 1377–1380.

PARK, Choon B., MILLER, Richard D. y XIA, Jianghai. Multi-channel analysis of surface waves. Geophysics, 64(3): 800–808. 1999.

PARK, Choon B., MILLER, Richard D., LAFLEN, David, NEB, Cabrilo, IVANOV, Julian y BENNETT, Brett. Imaging dispersion curves of passive surface waves. *Society* of *Exploration* Geophysicists Expanden Abstract, 23: 1357-1360. 2004.

PARK, Choon B., MILLER, Richard D., RYDEN, Nils, XIA, Jianghai y IVANOV, Julian. Combined use of active and passive sur-face waves. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 10(3): 323-334. 2005.

PARK, Choon B. and Carnevale, M. Optimun MASW survey – Revisit after a Decade of use. 1-10. 2010

SAUTER, Franz. Fundamentos de ingenieria sismica. Introduccion a la sismologia, 53-57, 1989.

WOODS, Richard D. Screening of Surface Waves in Soils. The university of Michigan industry program of the college of engineering: 6-5. 1968.

XIA, Jianghai, MILLER, Richard D. y PARK, Choon B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. Geophysics, 64(3): 691–700. 1999.