	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	<b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>	<b>F-AC-DBL-007</b>	<b>10-04-2012</b>	<b>A</b>
Dependencia	Aprobado		Pág.	
<b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>	<b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>		<b>1(138)</b>	

## RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	<b>LUIS FERNANDO ORTEGA LOZANOCIRO LEIDON LEONARDO SEPÚLVEDA SEPÚLVEDA</b>		
FACULTAD	<b>INGENIERIAS</b>		
PLAN DE ESTUDIOS	<b>INGENIERIA CIVIL</b>		
DIRECTOR	<b>ROMEL JESÚS GALLARDO AMAYA</b>		
TÍTULO DE LA TESIS	<b>DETERMINACIÓN DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE EN LA ZONA SUR ORIENTAL DE LA CIUDAD DE OCAÑA, N.S MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO PASIVO: REMI</b>		
<b>RESUMEN</b> (70 palabras aproximadamente)			
<p>EL SIGUIENTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CONTIENE LOS PERFILES DE VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE EN SIETE SECTORES ESTRATÉGICOS DE LA CIUDAD DE OCAÑA, HALLADOS EN DOS FORMACIONES PREDOMINANTES DEL MUNICIPIO; LA FORMACIÓN ALGODONAL Y FORMACIÓN ÍGNEA DEL COMPLEJO INTRUSIVO EXTRUSIVO. MEDIANTE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS SÍSMICOS REMI Y MASW.</p> <p>OBTENIDOS LOS PERFILES DE VELOCIDAD SE REALIZÓ UN ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA DAR VALORES REPRESENTATIVOS DE LAS FORMACIONES Y RECOMENDACIONES PARA CIMENTACIONES DE ESTRUCTURAS.</p>			
<b>CARACTERÍSTICAS</b>			
PÁGINAS: 138	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM:1



DETERMINACIÓN DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE EN  
LA ZONA SUR ORIENTAL DE LA CIUDAD DE OCAÑA, N.S MEDIANTE EL  
MÉTODO GEOFÍSICO PASIVO: REMI

Autores

LUIS FERNANDO ORTEGA LOZANO  
LEIDON LEONARDO SEPÚLVEDA SEPÚLVEDA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

DIRECTOR

MSc. ROMEL JESÚS GALLARDO AMAYA  
INGENIERO CIVIL

CODIRECTOR

Esp. CIRO ANDREY MARTÍNEZ OVALLOS  
INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA CIVIL

Ocaña, Colombia

Abril de 2020

## **Dedicatoria**

Durante el transcurso de lo que ha sido mi existencia, en esta parte tan importante del recorrido, existe una persona que ha sido fundamental. Es inaceptable de mi parte no detenerme y hablar un poco de ti madre, de lo que expresas cada día por mí, del constante aprecio que nunca me falta con tu presencia. A pesar de las adversidades que vivimos, me reconforta escuchar una voz de aliento que nunca deja de esperar a que los tiempos cambien, un motivo de orgullo por tu perseverancia que me induce a querer recompensarte.

No puedo dejar sin mencionar en este logro a mis abuelos, a los únicos que conocí y no lo son biológicamente, pero debo mi agradecimiento. Siempre han esperado que esta meta se cumpla, siendo una motivación importante. A ellos les dedico este trabajo, a mi madre, a mi familia y a los que he conservado una amistad desde mucho antes.

Durante el desarrollo de este proyecto de grado, a mi compañero Leidon Leonardo Sepúlveda Sepúlveda por su compromiso y entrega, a los ingenieros Ciro Andrey Martínez y Stiven Sepulveda, por su confianza, aportes y experiencia compartidas durante este proceso.

**Luis Fernando Ortega Lozano**

## **Dedicatoria**

A Dios todo poderoso al cual le he ofrecido todos mis logros.

A mi madre Idelma Sepúlveda por todos sus esfuerzos en estos años, su apoyo y su amor incondicional.

A mi hermano Olger Neil Sepúlveda por ser mi guía, ilustrando mi mente a cosas tan grandes como el mismo universo e impulsándome para alcanzarlas.

A mi compañero Luis Ortega por emprender este viaje cuando le planté la idea y apoyarme en los momentos difíciles.

A los ingenieros Ciro Andrey Martínez y Jeison Stiven Sepúlveda, por ser los precursores de las investigaciones geofísicas aplicadas a la ingeniería civil, brindándonos aportes y experiencia durante este proceso.

**Leidon Leonardo Sepúlveda Sepúlveda.**

## **Agradecimientos**

Los autores de este proyecto expresan sus agradecimientos a su director, Msc. Romel Jesús Gallardo Amaya, a su Codirector, Esp. Ciro Andrey Martínez Ovallos, por todo el apoyo, acompañamiento y dedicación brindados. A los ingenieros, Jeison Stiven Sepúlveda Sánchez, Agustín Armando Mcgregor y Pedro Báez, por el tiempo dedicado en la elaboración de este trabajo. Así mismo, expresan su agradecimiento al grupo de Investigación PANGEA y al geofísico, Jairo Alberto Torres, por su carisma, apoyo y asesorías brindadas. De igual manera, agradecen a Melquisedec Martínez, Wilson Vacca y William Andrés Quintero, por el acompañamiento y apoyo durante el proceso de trabajo de campo.

## Contenido

Capítulo 1. Determinación de los perfiles de velocidad de onda cortante en la zona sur oriental de la ciudad de Ocaña, N.S mediante el método geofísico pasivo: ReMi .....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Formulación del problema .....	2
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
1.4 Justificación .....	3
1.5 Delimitaciones .....	4
1.5.1 Operativa .....	4
1.5.2 Conceptuales.....	4
1.5.3 Geográficas.....	5
1.5.4 Temporales .....	5
Capítulo 2. Marco referencial .....	6
2.1 Marco Histórico .....	6
2.3 Marco Conceptual.....	8
2.3.1 Campo de onda.....	8
2.3.2 Dominio de la frecuencia.....	8
2.3.3 Dominio del tiempo.....	8
2.3.4 Ruido .....	8
2.3.5 Ondas Rayleigh .....	9
2.3.6 Ondas Love.....	10
2.3.7 Suelos Estratificados .....	10

2.3.8 Formación Geológica .....	11
2.3.9 Refracción sísmica.....	11
2.3.10 Ensayo ReMi .....	11
2.3.11 Ensayo MASW .....	12
2.4 Marco Teórico.....	13
2.4.1 Dispersión Geométrica .....	13
2.4.2 Series y Transformada de Fourier .....	14
2.4.3 Principio Huygens .....	17
2.4.4 Ley de Snell .....	18
2.2 Marco Contextual.....	22
2.5 Marco Legal .....	23
Capítulo 3. Diseño metodológico .....	26
3.1 Diseño De Investigación .....	26
3.1.1 Población .....	27
3.1.2 Muestra .....	27
3.2 Instrumentos.....	27
3.2.1 Refracción de microtemores.....	28
3.2.2 Análisis de Ondas Superficiales .....	28
3.3 Proceso de intervención .....	28
Capítulo 4. Resultados .....	30
4.1 Establecer los perfiles de velocidad de onda cortante por el método geofísico pasivo: ReMi .....	30
4.1.1 Localización y formación geológica presentes en los sectores de ensayos .....	32
4.1.2 Adquisición de datos en campo .....	37
4.1.3 Procesamiento de datos obtenidos en campo .....	45

4.2 Establecer los perfiles de velocidad de onda cortante por el método geofísico activo: MASW .....	58
4.3 Comparar los resultados obtenidos de la velocidad de onda cortante por método pasivo ReMi y los valores de velocidad de onda cortante por método geofísico activo MASW. ....	71
4.3.1 Análisis estadístico .....	72
4.3.2 Descripción de perfil. ....	78
4.4 Limitantes .....	84
Capítulo 5. Conclusiones .....	85
Capítulo 6. Recomendaciones.....	87
Referencias.....	88
Apendice .....	91



## Lista de Figuras

Figura 1. Onda Rayleigh.....	9
Figura 2. Ondas Love.....	10
Figura 3. Dispersión geométrica de ondas Rayleigh en un medio estratificado.....	14
Figura 4. Representación de la transformación del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.....	15
Figura 5. Principio de Huygens. ....	18
Figura 6. Esquema de refracción de la Ley de Snell.....	19
Figura 7. Localización de sitios de estudio en la ciudad de Ocaña, N.S.. ....	32
Figura 8. Mapa Geológico del Municipio de Ocaña N.S.....	34
Figura 9. Leyenda ampliada del mapa Geológico del municipio de Ocaña.. ....	35
Figura 10. Talud en formación Algodonal (Tpa) sector de Sol y Sombra.....	36
Figura 11. Talud en la formación Ígnea Extrusiva Intrusiva sector Travesías. ....	37
Figura 12. Componentes del equipo de refracción sísmica. ....	39
Figura 13. Despliegue completo del equipo. ....	40
Figura 14. Localización de sectores en zona sur oriental de la ciudad de Ocaña.. ....	41
Figura 15. Sector Acolsure. ....	42
Figura 16. Sector Libardo Alonso.....	43
Figura 17. Sector vía acceso al corregimiento de Buenavista. ....	43
Figura 18. Sector Sol y Sombra. ....	44
Figura 19. Sector Libardo Alonso.....	44
Figura 20. Sector Travesías.....	45
Figura 21. Sector UFPSO sede algodonal.....	45
Figura 22. Gráfica de frecuencia para método ReMi en la línea número tres de Sol y Sombra..	48
Figura 23. Gráfica de Velocidad de fase vs Frecuencia para la línea número tres de Sol y Sombra por ReMi.....	49

Figura 24. Perfil de Velocidad de Onda cortante para la línea tres de Sol y Sombra.....	49
Figura 25. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 4 de Acolsure. ....	51
Figura 26. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 2 de Libardo Alonso.....	52
Figura 27. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 3 de la vía de acceso a Buenavista. ....	53
Figura 28. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 3 de Sol y Sombra. ....	54
Figura 29. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 2 de Cuesta Blanca. ....	55
Figura 30. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 14 de Travesías. ....	56
Figura 31. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 1 de la sede El Algodonal de UFPSO. ....	57
Figura 32. Gráfica de Tiempo vs Distancia para la línea número tres de Sol y Sombra.....	60
Figura 33. Gráfica de Velocidad de Fase vs Frecuencia para la línea tres de Sol y Sombra por MASW. ....	61
Figura 34. Curva de dispersión de máximas frecuencias.....	62
Figura 35. Perfil de Velocidad de Onda Cortante correspondiente a la línea tres de Sol y Sombra. ....	63
Figura 36. Gráfico de tendencia de valores de Vs30 para la formación Algodonal en m/s.....	73
Figura 37. Gráfica de dispersión de valores de Vs30 para la formación algodonal en m/s.....	74
Figura 38. Gráfico radial de tendencia de ReMi hacia MASW en valores de Vs30 para la formación Ígnea en m/s.....	75
Figura 39. Gráfica de dispersión de valores de Vs30 para MASW vs ReMi para la formación Ígnea en m/s. ....	75
Figura 40. Diagrama de caja y bigote de los rangos de velocidades de onda cortante de la formación algodonal. ....	77
Figura 41. Diagrama de caja y bigote de los rangos de velocidades de onda cortante de la formación ígnea. ....	78
Figura 42. Análisis de velocidad de onda cortante de un perfil en la formación Algodonal.....	79
Figura 43. Perfil de análisis de velocidad de onda cortante a 30 metros de profundidad correspondiente a línea 2 del sector de Cuesta Blanca. ....	80

Figura 44. Análisis de velocidad de onda cortante de un perfil en la formación Ígnea.....	81
Figura 45. Perfil de análisis de velocidad de onda cortante a 30 metros de profundidad correspondiente a línea 2 del sector Travesías.....	82

## Lista de Tablas

Tabla 1 Clasificación de los perfiles de suelo.....	30
Tabla 2 Parámetros de adquisición para ReMi. ....	46
Tabla 3 Parámetros de Adquisición para MASW 1D.....	58
Tabla 4 Resumen de Valores de Vs30.....	71
Tabla 5 Valores promedio de Vs30 para la formación algodonal e ígnea.....	76
Tabla 6 Valores de Vs30 representativos de la formación algodonal e ígnea y su desviación....	76
Tabla 7 Velocidades de onda cortante a diferentes profundidades en la línea 2 de Travesías .....	83

## Introducción

La energía producida durante un movimiento telúrico, es disipada en el subsuelo mediante ondas que viajan de forma perpendicular y paralela a la dirección en la que se propagan. Cuando estas ondas llegan al subsuelo, se convierten en ondas superficiales, que al entrar en contacto con las estructuras, producen daños dependiendo de la intensidad y profundidad del sismo. Esta interacción suelo-estructura, depende de las características mecánicas del terreno generando un riesgo de amenaza sísmica según el sitio. Colombia es considerada como un país con un alto riesgo sísmico debido a su ubicación en el cinturón de fuego del pacífico, la zona de mayor actividad sísmica en el mundo. El país yace sobre dos áreas de subducción importantes, la de la placa de Nazca con la placa Sudamericana y la de la placa Caribe con la placa Sudamericana. A lo largo de toda su historia, el país ha sido azotado por múltiples terremotos, fuente de una cantidad innumerable de víctimas mortales y edificaciones afectadas a causa de la poca relevancia que se le daba a la construcción anti-sísmica en el país. Se conoce al terremoto de Armenia de 1999 como el más mortífero y destructivo, donde la cifra de víctimas mortales se acerca a las dos mil personas, con una intensidad entre 6.1 y 6.5 grados en la escala de Richter. Estos eventos, conllevan a replantear la reglamentación de normas sismo resistente en el país, siendo necesario el conocimiento de los efectos de sitio para realizar diseños estructurales capaces de resistir eventos sísmicos.

Uno de los parámetros más usados para especificar las condiciones del sitio de interés, es la  $V_{s30}$ , siendo el promedio de velocidad de onda cortante en los primeros 30m de profundidad. Este valor de la profundidad se determina mediante métodos geofísicos, una herramienta diferente de exploración superficial. Estos métodos de tipo sísmico, utilizan fuentes de energía

controlada y móvil, que por medio de fenómenos físicos como la reflexión y refracción de ondas, permiten medir las velocidades de onda S, a medida que se propagan por las capas del subsuelo.

En el desarrollo de este trabajo, se pretendió conocer el comportamiento del parámetro de la velocidad de onda cortante ( $V_{s30}$ ) en la formación Algodonal e Ígnea de la ciudad de Ocaña, por los métodos geofísicos ReMi y MASW, con el fin de realizar un análisis en la variación de la onda S entre ambas formaciones y los diferentes métodos, de manera que se estableciera un rango de velocidades, obteniendo los valores representativos para cada formación.

# **Capítulo 1. Determinación de los perfiles de velocidad de onda cortante en la zona sur oriental de la ciudad de Ocaña, N.S mediante el método geofísico pasivo: ReMi**

## **1.1 Planteamiento del problema**

El departamento de Norte de Santander según la norma sismo resistente colombiana contempla que 31 municipios poseen una zona de amenaza sísmica Alta y 9 son catalogados como amenaza sísmica intermedia entre los cuales se encuentra Ocaña. Adicionalmente, la ciudad de Ocaña no cuenta con un estudio de microzonificación sísmica que permita hacer un análisis real de los parámetros de la respuesta de sitio, lo que genera que se realicen diseños estructurales sin considerar el verdadero comportamiento del terreno durante un evento sísmico (Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica, 2010).

Según lo contemplado en la norma NSR-10, Capítulo A.2 Figura A.2.3-1 y en el Apéndice A-4 titulados, “Zona de amenaza sísmica aplicable a edificios para la NSR-10 en función de  $A_a$  y  $A_v$ ” y “Valores de  $A_a$ ,  $A_v$ ,  $A_e$ ,  $A_d$  y definición de la zona de amenaza sísmica de los municipios colombianos” respectivamente, se presentan valores estadísticos de coeficientes de aceleración y velocidad; datos obtenidos probabilísticamente por las eventualidades sísmicas presentadas a lo largo de los años y no representan un valor puntual con el que se logren realizar diseños con las características propias del suelo.

Así mismo, el perfil del suelo se está clasificando por métodos empíricos o por correlación de ensayos de penetración estándar, debido a que no existe una medición por ensayos para la clasificación de perfiles de suelos según la velocidad de onda cortante medida.

Para el caso de los estudios de suelo que se desarrollan en la ciudad, se debe considerar que en el diseño de cimentaciones no toma en cuenta el comportamiento del suelo bajo la estructura como se establece en la NSR-10, capítulo A.2 numeral A.2.9.3.5 “Estudios Geotécnicos” y esto se debe principalmente a las características de los equipos con lo que se suele trabajar no se logra alcanzar la profundidad necesaria de sondeo que permite conocer las características del suelo, que permite posteriormente calcular la respuesta sísmica bajo cargas cíclicas (Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica, 2010).

## **1.2 Formulación del problema**

¿Cuáles son los valores característicos de  $V_{s30}$  que presenta la formación Algodonal y el Complejo Ígneo Intrusivo – Extrusivo en la zona Sur-Oriental de la ciudad de Ocaña?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Determinar los perfiles de velocidad de onda cortante en la zona sur oriental de la ciudad de Ocaña, N.S mediante el método geofísico pasivo: ReMi



### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Establecer los perfiles de velocidad de onda cortante por el método geofísico pasivo: ReMi
- Establecer los perfiles de velocidad de onda cortante por el método geofísico activo: MASW
- Comparar los resultados obtenidos de la velocidad de onda cortante por método pasivo ReMi y los valores de velocidad de onda cortante por método geofísico activo MASW

### 1.4 Justificación

La importancia de este estudio radica en conocer la respuesta de sitio ante un evento sísmico, para ello, uno de los factores es identificar el perfil del suelo y según la norma NSR-10, título A, numeral A.2.4.3 , “Parámetros empleados en la definición del tipo de perfil de suelo”, y según la tabla A.2.4-1, “Clasificación de los perfiles de suelo”, se referencian intervalos de velocidad de onda cortante para la estimación de un perfil con el  $V_s$ , limitando esta variable a un espesor de 30 metros, además conocer estos datos permitiría hacer diseños que corresponde a las características reales del terreno.

La ventaja de usar la técnica de refracción por micro tremores ReMi, es evitar inconvenientes de ruidos incoherentes presentes en los métodos activos creando interferencias o información irrelevante para la obtención de datos. En contraste, el ruido ambiental, es ideal para la determinación de la velocidad de la onda cortante en el método pasivo.

Con esta investigación se busca dar un primer paso a futuros estudios de microzonificación en la ciudad de Ocaña, y profundizar en la comprensión del comportamiento de la velocidad de onda que presenta las formaciones geológicas sobre las cuales se desarrolla gran parte del perímetro urbano, denominadas formación Algodonal y Complejo Ígneo Intrusivo-Extrusivo en el caso de ocurrir un evento sísmico.

## **1.5 Delimitaciones**

**1.5.1 Operativa:** La investigación es de carácter cuantitativo de tipo experimental con un alcance descriptivo, adicionalmente se va a trabajar con una muestra de estudio, que la conforman los diferentes materiales de la formación Algodonal y el complejo Ígneo Intrusivo Extrusivo, presentes en el perímetro urbano de la ciudad de Ocaña. En cuanto a las técnicas de recolección de información se hará uso de ensayos de campo. Adicionalmente se realizará una revisión bibliográfica para establecer los fundamentos teóricos del trabajo de grado, y finalmente en lo que concierne al análisis estadístico es de tipo descriptivo.

**1.5.2 Conceptuales:** Para realizar el procesamiento de datos y obtener los perfiles de velocidad de onda cortante es necesario conocer sobre: ondas Rayleigh, ondas Love, onda dispersiva, suelo estratificado, formación geológica, campo de onda, ruido, dominio del tiempo, dominio de la frecuencia y refracción sísmica.

**1.5.3 Geográficas:** La investigación se desarrollará en las zonas ya estudiadas previamente mediante ensayos geofísicos activos, en particular se desarrollaran los ensayos en la zona sur y sur-oriente de la ciudad de Ocaña.

**1.5.4 Temporales:** La investigación se realizará en un semestre académico.

## Capítulo 2. Marco referencial

### 2.1 Marco Histórico

A través del tiempo, la actividad sísmica interna de la corteza terrestre ha causado miles de pérdidas humanas, generando la necesidad de estudiar el comportamiento de los suelos sometidos a cargas cíclicas. Los daños ocasionados por un sismo, se deben a que el suelo va perdiendo resistencia a los esfuerzos de tipo cortante, formados por las ondas que viajan en la superficie. Eventos de este tipo, establecieron las bases fundamentales de lo que conocemos como “dinámica de suelos”. Consecuente a ello, la energía sísmica fue utilizada con fin de obtener una caracterización del subsuelo, usando el parámetro de la velocidad de onda cortante, para describir las características dinámicas de los materiales, permitiendo conocer los perfiles de variación de la velocidad de onda S.

En la década de los 70, con los avances de la electrónica, se empezó a implementar métodos geofísicos de refracción sísmica para la investigación de las propiedades de los suelos, como los ensayos de crosshole y downhole. Estas técnicas podían medir velocidades de onda S directamente en campo, sin embargo, debido a su elevado costo y ardua implementación, se encontraron métodos alternos, como los ensayos de análisis de ondas de superficie para medir ondas S y ondas P. De manera progresiva, con los estudios de Louie, se definió que el ruido incoherente para estos métodos, podía ser utilizado como una alternativa, aprovechando el ruido ambiental como fuente principal de ondas para generar perfiles de velocidad de onda cortante. Los resultados obtenidos fueron coherentes, de esta manera, la técnica de refracción por microtemores (ReMi), fue utilizada para el estudio y caracterización del subsuelo (Louie, 2001).

En Colombia, se han llevado a cabo estudios de refracción sísmica en alianza con países que poseen equipos especializados para la detección de ondas sísmicas, como lo fue en 1973, cuando se llevó a cabo el “Proyecto Nariño”, en el que se realizaron estudios de refracción sísmica, constituidos por el departamento de Magnetismo Terrestre de EEUU, junto con Colciencias, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y otras entidades nacionales e internacionales (Ramírez & Aldrich, 1977). Este proyecto utilizó detonaciones controladas para generar una fuente de ondas sísmicas, efectuadas en La Cocha corregimiento de Pasto y el Archipiélago de Gorgona a 35 km del oeste del pacífico colombiano, obteniendo más de mil registros sísmicos para medir la velocidad de la onda cortante en la corteza del pacifico y a través de los Andes.

En el 2013, el Servicio Geológico Colombiano, realizó 157 mediciones por microtemores como parte de un estudio de microzonificación de la ciudad de Pasto, estimando los perfiles de velocidad de onda cortante para la clasificación de la mayor parte de los suelos de la ciudad (Pulido & Rodriguez, 2015).

El uso de métodos geofísicos para la obtención de perfiles de velocidad de onda cortante en nuestro país, es una metodología nueva, y se ha direccionado en los últimos años debido a su fácil utilización e implantación. En la ciudad de Ocaña, ante la necesidad de estudios de microzonificación sísmica, se ha identificado un solo estudio en 2017, en el que se determinaron las características dinámicas de la formación algodonal, calculando las velocidades de onda S a 12 metros de profundidad, mediante el método de análisis multicanal de ondas de superficie

(MASW). Por tal motivo, se pretende adelantar el uso de estas alternativas, para desarrollar un análisis de los valores de la velocidad de onda cortante en las formaciones geológicas que predominan en la ciudad de Ocaña.

## **2.3 Marco Conceptual**

**2.3.1 Campo de onda:** Es una función continua de espacio y tiempo. Teniendo en cuenta una sola componente del movimiento de las partículas, a lo largo de una recta en la superficie libre, el campo de onda es una función continua 2D de distancia ( $x$ ) y tiempo ( $t$ ) (Foti, G., Rix, & Strobba, 2014).

**2.3.2 Dominio de la frecuencia:** Es un gráfico que nos muestra diferentes señales periódicas o señales cíclicas en un rango determinado de frecuencia, que consiste en la amplitud y fase de la onda (Foti, G., Rix, & Strobba, 2014).

**2.3.3 Dominio del tiempo:** Es la suma de señales cíclicas de diferentes frecuencias, amplitud y fases que forman una señal no periódica, representada en un gráfico que mide su amplitud con respecto al tiempo de la onda (Foti, G., Rix, & Strobba, 2014).

**2.3.4 Ruido:** En las pruebas sísmicas, el ruido se define como la parte que no lleva información útil que puede distorsionar, enmascarar e interferir con la señal. Según los objetivos de adquisición, el ruido se clasifica en ruido coherente e incoherente (Foti, G., Rix, & Strobba, 2014).

- **Ruido coherente:** Es aquel que se relaciona con la señal de la fuente que normalmente no están asociados a la información útil. Cualquier parte que no pueda ser explicada por el modelo asumido tiene que ser considerada como ruido coherente.
- **Ruido Incoherente:** Se refiere a las vibraciones en el lugar de fondo producido por fuentes naturales y actividad humana que rodea al sitio de ensayo. La comprensión de este tipo de ruido será fundamental en el estudio que llevaremos a cabo en esta investigación.

**2.3.5 Ondas Rayleigh:** Es una onda superficial que viaja en la dirección de la propagación de la señal original. Su movimiento se produce tanto en el plano vertical como en el plano horizontal, en un movimiento elíptico retrogrado cuya amplitud va disminuyendo con la profundidad. Tal movimiento elíptico se produce por la superposición de las componentes horizontales y verticales (Dal Moro, 2014). En la figura 1 muestra el movimiento de partículas que se producen por una onda Rayleigh.

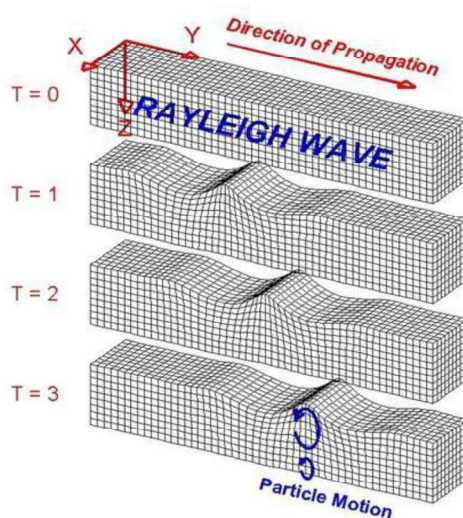


Figura 1. Onda Rayleigh. Braile, L. (2006). Obtenido de <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html>

**2.3.6 Ondas Love:** Las ondas de Love son ondas superficiales que producen un movimiento horizontal de corte en superficie. La velocidad de las ondas Love es un 90% de la velocidad de las ondas S y es ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh. Estos dos tipos de ondas son llamadas ondas superficiales, porque su amplitud disminuye exponencialmente con su profundidad, por lo tanto, su movimiento está limitado a una parte poco profunda (Zafra Ortero, 2017). El movimiento de estas ondas se observa en la figura 2.

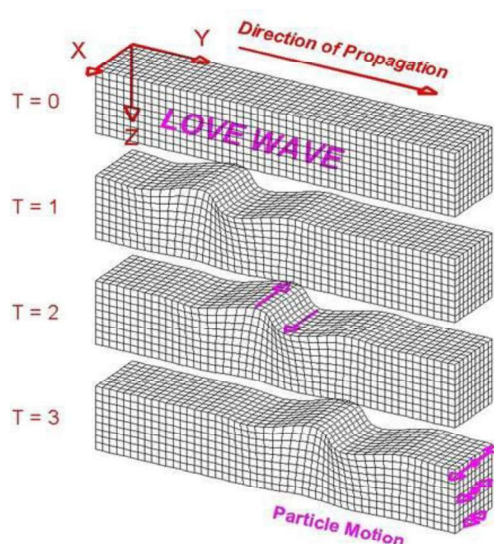


Figura 2. Ondas Love. Braile, L. (2006). Obtenido de <http://www.geo.mtu.edu/upseis/wave.html>

**2.3.7 Suelos Estratificados:** Son producto de la meteorización y estructuras heredadas bajo una secuencia de materiales con diferentes propiedades descrito por un perfil estratigráfico que resalta la secuencia de colocación y el espesor de sus estratos. Su formación se caracteriza por la descomposición química de la roca madre o por la superposición de suelos transportados por agentes geológicos (Juárez & Rico, 2005).



**2.3.8 Formación Geológica:** Una formación geológica es unidad que reúne un conjunto de características litológicas que permite diferenciarla de su entorno. En su mayoría se presentan en las rocas sedimentarias y puede consistir en un solo tipo textural (conglomerados, areniscas, o pleitas) o una alteración de areniscas y pelitas, o enteramente capas de caliza (Instituto Superior de Correlación Geológica., 2014).

**2.3.9 Refracción sísmica:** El método de refracción sísmica, consiste en medir el tiempo en que tardan en viajar las ondas elásticas entre el sitio donde se generan y los diferentes puntos de observación. Los sensores o geófonos que se disponen, están separados a intervalos regulares sobre la superficie del terreno. Las ondas que se detectan en cada receptor, provienen de fuentes naturales como la actividad humana que se genera alrededor del sitio de ensayo y se conoce como ruido ambiental. El instante en que se originan las ondas, es registrado dentro del expediente de pulsos de llegada. Cada expediente consta de un conjunto de registros individuales provenientes de cada geófono (López, Mejía, & Vega, 2008).

**2.3.10 Ensayo ReMi:** La técnica de refracción por microtremores (ReMi) es un método geofísico que nos permite obtener información general de grandes volúmenes del subsuelo. Este método es una alternativa para el estudio y caracterización del subsuelo desarrollado y difundido en los últimos años, por la técnica implementada de los microtremores (Louie, 2001). Está basado en la propagación de ondas superficiales, específicamente las Rayleigh, provenientes de la actividad humana o fenómenos naturales como el viento y el movimiento de las olas. Esto se conoce como ruido sísmico ambiental o incoherente (Foti, G., Rix, & Strobbia, 2014). La técnica se basa en grabar y procesar la propagación del tránsito de ondas superficiales en el suelo, y consta de dos ideas fundamentales. La primera es un arreglo lineal similar al ensayo de

refracción sísmica tradicional, incluso usando sensores de 4.5 Hz de frecuencia, se puede registrar efectivamente ondas superficiales tan bajas como 2 Hz, La segunda idea es una transformada de lentitudes-frecuencia (p-f) bidimensional obtenida de un registro de microtemores, separando las ondas Rayleigh de otras ondas. De esta manera, se reconoce la verdadera velocidad de fase de las velocidades aparentes (Louie, 2001).

**2.3.11 Ensayo MASW:** El ensayo de Análisis de Ondas Superficiales en Arreglos Multicanales (MASW), es un método de exploración geofísica que permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto de forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que la conforman. Este método consiste en la interpretación de las ondas superficiales (Ondas Rayleigh) de un registro en arreglo multicanal, generadas por una fuente de energía impulsiva en puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno, obteniéndose el perfil de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) para el punto central de dicha línea (Condori, 2016).

La interpretación de los registros consiste en obtener de ellos una curva de dispersión, filtrándose solamente las ondas superficiales ya que su velocidad de fase se aproxima entre un 90 a 93% del valor de  $V_s$ , y luego mediante un cálculo inverso iterativo se obtiene el perfil de  $V_s$  desde la curva de dispersión calculada para cada punto de estudio (Condori, 2016, pág. 19).

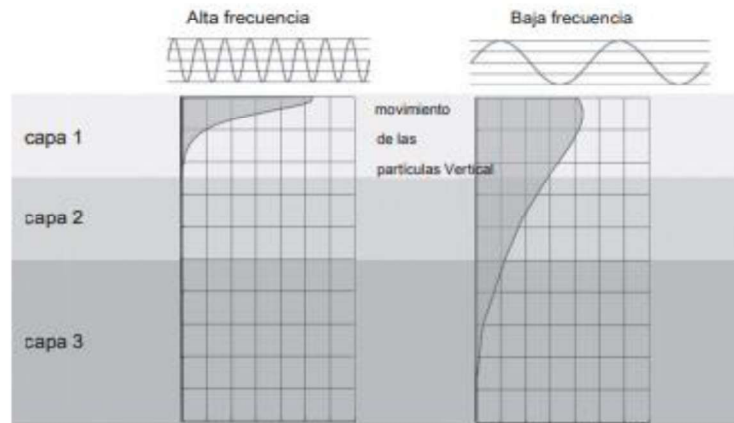
Para los registros se realiza con 12 o más geófonos distribuidos en distancias cortas y largas desde una fuente impulsiva o vibratoria, que proporcionan un patrón estadístico para medir las velocidades de fase. Los datos multicanal permiten la identificación y rechazo de la

información irrelevante de ondas Rayleigh, y un proceso más efectivo para la eliminación del ruido y recolección de datos más rápido (Loui, J. 2001).

## **2.4 Marco Teórico**

**2.4.1 Dispersión Geométrica:** El uso de dispersión geométrica para caracterización geotécnica de sitios en un medio estratificado, presentará una variación de la rigidez de los materiales entre las diferentes capas que lo conforman, de tal forma que el valor de la velocidad de onda de corte variará según los estratos. Normalmente, esta variación se produce a medida que aumenta la profundidad. De tal forma, para el suelo mostrado en la siguiente figura, la velocidad de corte de una onda de alta frecuencia en la primera capa, es menor que el de la segunda, cuyo valor a su vez es menor que la velocidad del semi-espacio considerado en la zona inferior. En esta condición, una onda Rayleigh que viaja en la capa superior, tendrá una velocidad de propagación ligeramente más baja que la velocidad de onda de corte de la primera capa. Por el contrario, una onda de baja frecuencia viajará a alta velocidad porque está influenciada por los materiales rígidos que subyacen (Foti, G., Rix, & Strobbia, 2014, p 7).

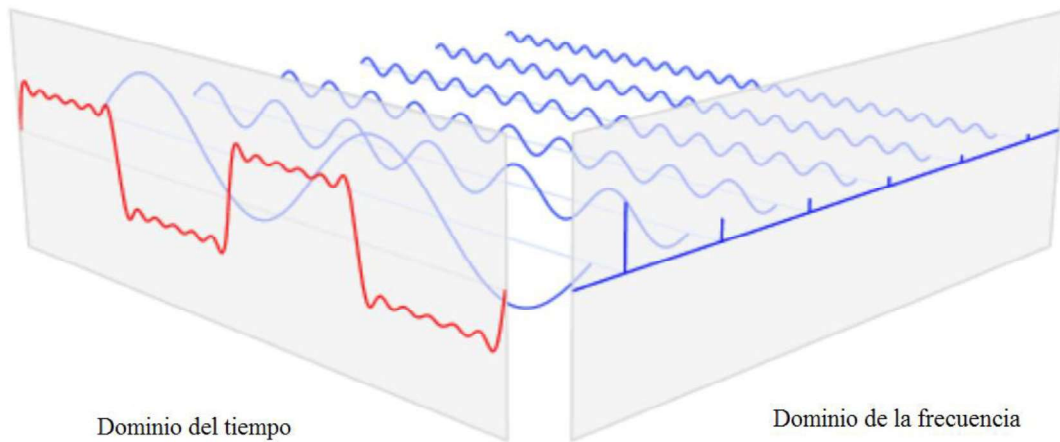
En la figura 3 se muestra cómo es la dispersión de una onda de alta y baja frecuencia en un medio estratificado.



*Figura 3.* Dispersión geométrica de ondas Rayleigh en un medio estratificado. Foti, G., Rix, & Strobbia, C. (2014). Geometric dispersion of Rayleigh waves.

**2.4.2 Series y Transformada de Fourier:** La transformada de Fourier es usada para cambiar el dominio de una función en otra sin perder información de la función original. En el estudio de ondas de superficie, se utiliza para cambiar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, fundamentándose en las series de Fourier que permiten descomponer una señal periódica en la suma de infinitos números de armónicos (senos y cosenos) (Foti, G., Rix, & Strobbia, 2014 p. 132).

Fourier generalizó dicha solución de la siguiente manera, varias ondas sumadas entre sí pueden ser utilizadas para representar cualquier señal periódica. La figura 4 muestra una representación del cambio del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia en una señal periódica.



*Figura 4.* Representación de la transformación del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Transformada de Fourier y la librería de FFT de LIBROW. Obtenido de <http://golem.iimas.unam.mx/~caleb/AR/Topic4/04.3-Fourier.pdf>

A continuación se muestra el proceso para llegar a la ecuación de la transformada de Fourier desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Partiendo de que una onda puede ser representada mediante una función coseno, seno, o exponencial como lo demuestra la identidad de Euler en la ecuación 1.

$$e^{ix} = \cos(x) + i\text{sen}(x) \quad (1)$$

Dónde:

$e$ : Valor del número Euler (2,71828)

Al representar una onda con una función exponencial brinda la posibilidad de simplificar la ecuación, por ejemplo, la ecuación 2 muestra una onda  $S_{f_1}$  que oscila a una frecuencia  $\omega_1$  y con una magnitud  $C_{f_1}$ .

$$S_{f_1}(t) = C_{f_1} e^{i\omega_1 t} \quad (2)$$

Dónde:

$\omega$ : Es la frecuencia angular y es equivalente a  $\omega = 2\pi\zeta$

$\zeta$ : Frecuencia en Hertz

Una señal se puede considerar como un arreglo de muestras de energía, por lo tanto, según Fourier, se puede representar cualquier momento en el tiempo de una señal como una sumatoria de las energías de otras señales periódicas, como se muestra en la ecuación 3.

$$f(t) = \sum_{n=1}^N F(\omega_n) e^{i\omega_n t} \quad (3)$$

Dónde:

$t$ : es un momento en el tiempo en segundos

$f(t)$ : es la energía de la señal en el momento  $t$

$N$  es el número de señales periódicas con las cuales se quiere representar a  $f(t)$

$\omega_n$ : es la frecuencia de la señal  $n$ .

El valor de un momento en el tiempo  $f(t)$  es calculado con todos los valores del dominio de la frecuencia  $F(\omega_n)$ . Esto significa dos cosas: el tamaño de la señal en el dominio de la frecuencia es la misma que en el dominio del tiempo. Y como toda función se puede hacer en dirección inversa, calculando un  $F(\omega_n)$  con todos los valores del dominio del tiempo  $f(t)$ , como lo muestra la ecuación 4.

$$F(\omega_n) = \sum_{t=0}^T f(t)e^{-i\omega_n t} \quad (4)$$

Dónde:

$t$ : es un momento en el tiempo en segundos

$f(t)$ : es la energía de la señal en el momento  $t$

$T$ : es el tiempo final de  $f(t)$

$\omega_n$ : es la frecuencia de la señal  $n$ .

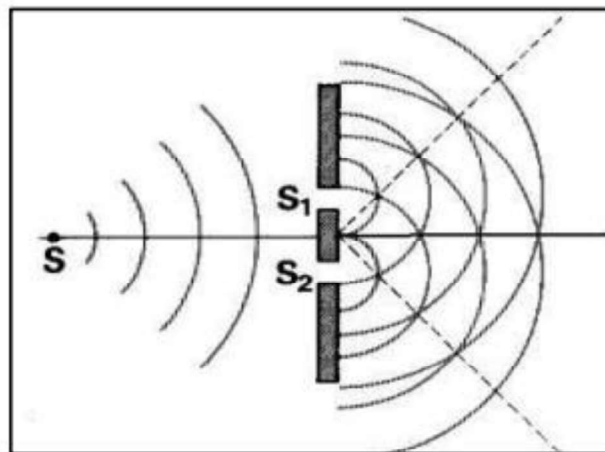
Dado que una sumatoria de los valores de una señal es equivalente a una integral (área bajo la curva) la versión continua de esta transformada se puede obtener substituyendo las sumatorias por integrales, obteniendo las ecuaciones 5 y 6.

$$f(t) = \int F(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (5)$$

$$F(\omega) = \int f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

**2.4.3 Principio Huygens:** “El principio de Huygens es una construcción geométrica para usar el conocimiento de un frente de onda anterior, para determinar la posición de un frente de onda nuevo en algún instante (Martinez & Sepúlveda, 2017). Cada punto de un frente de onda en propagación sirve como fuente de trenes de ondas esféricas secundarias de tal modo que, al cabo de cierto tiempo, el frente de onda será la envolvente de estos trenes de ondas. Si la onda que se propaga tiene una frecuencia  $f$ , y se trasmite por el medio a una velocidad  $v$ , entonces los trenes de ondas secundarios tendrán la misma velocidad y frecuencia.

Al estudiar la dispersión de estas ondas, se ha de considerar que toda partícula de materia por la cual avanza una onda, no solamente comunica su movimiento a la partícula siguiente, la cual está en línea recta trazada desde la fuente, sino que también confiere necesariamente movimiento a todas las otras que la tocan y que oponen a su movimiento. El resultado es que, alrededor de la partícula, aparece una onda en cuyo centro de dispersión está la partícula. La figura 5 muestra gráficamente el principio de Huygens.



*Figura 5.* Principio de Huygens. Osso. (2001). Obtenido de <https://www.osso.org.co/docu/tesis/2001/comportamiento/Tesis-Cris-DocumentoFinal-13septiembre2001.pdf>

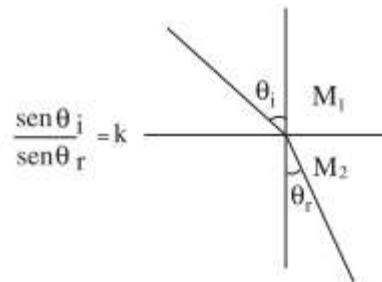
**2.4.4 Ley de Snell:** Cuando una onda incide sobre la superficie que separa dos medios de distintas propiedades mecánicas, una parte se refleja y otra parte se transmite al segundo medio, formando un ángulo de refracción que depende de la rapidez de la luz en los medios y del ángulo de incidencia. Willebord Snell en 1621, determinó experimentalmente una relación analítica entre  $\theta_1$  y  $\theta_2$ . Se le conoce como la ley de Snell y se escribe como se observa en la ecuación 7.



$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (7)$$

Dónde,  $\theta_1$  es el ángulo de incidencia y  $\theta_2$  es el ángulo de refracción;  $n_1$  y  $n_2$  son los respectivos índices de refracción en los materiales.

A partir de la ley de Snell es claro que, si  $n_2 > n_1$ , entonces  $\theta_2 < \theta_1$ . Es decir, si la luz entra a un medio donde  $n$  es mas grande (y su rapidez menor), entonces el rayo se dobla hacia la normal. Y si  $n_2 < n_1$ , entonces  $\theta_2 > \theta_1$ , así que el rayo se dobla alejándose de la normal (Giancoli, 2006).



*Figura 6.* Esquema de refracción de la Ley de Snell. Bromberg, S., & Rivaud, J. J. (2001). Fermat y el Cálculo Diferencial e Integral. Obtenido de <http://www.misclaneamatematica.org/Misc34/bromberg.pdf>

En cuanto a investigaciones con ondas de superficie, se han realizado una serie de trabajos desde los ámbitos internacionales, nacionales y locales, entre los que se encuentran:

En la Universidad de Almería, España, en el año 2010, se realizó una tesis titulada: “DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE MÉTODOS AVANZADOS DE EXPLORACIÓN SÍSMICA PASIVA”. En este estudio se realizaron métodos de auto-correlación espacial (tipo SPAC) para obtener un perfil de onda cortante S y el método DR que considera la velocidad de fase de ondas Rayleigh y Love, arrojando información creíble entre los 2.6Hz y 11Hz. Siendo el método DR más eficiente en baja frecuencia y el método SPAC en altas frecuencias. De esta

manera se logró concluir que se obtiene un mejor contraste entre los 15 y 20 metros de profundidad; y confirmando que estos métodos de exploración sísmica pasiva, son una buena opción con excelente correlación efectividad-costos.

En la Universidad de Concepción, Chile, en el año 2018, se efectuó una investigación titulada: “EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE MEDICIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE SPT-SÍSMICO”. En esta investigación, se pretende evaluar la efectividad del método de evaluación del perfil Vs. De esta manera, se extiende una línea de geófonos adyacente a una perforación geotécnica, con el fin de registrar las ondas de corte generadas. Al usar como materia prima el ensayo de prospección geotécnica más popular del país, se presenta como una alternativa más en las mediciones del perfil de onda cortante Vs. Con la similitud de los resultados a la estratigrafía del sitio, se demuestra la validez del ensayo, su factibilidad y efectividad.

En el año 2015 en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá, Colombia; se realizó una investigación titulada: “CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO UTILIZANDO EL MÉTODO GEOFÍSICO DE REFRACCIÓN POR MICROTREMORES ReMi PARA SEGMENTO DE LA AVENIDA CIRCUNVALAR Y PARQUE CENTRAL SIMÓN BOLIVAR”. El propósito de este trabajo fue identificar las características del subsuelo en dos lugares diferentes de la ciudad de Bogotá aplicando el método implementado por Louie 2001 y el método ReMi. Esta investigación arrojó como resultado, que el método de refracción por microtemores, es adecuado a las necesidades de investigación en ambientes urbanos como

Bogotá y además, presenta una facilidad en la adquisición de datos, siendo óptimo para realizar estudios a gran escala.

En el año 2017 en la Universidad Nacional de Colombia de Medellín, se llevó a cabo una investigación titulada: “IDENTIFICACIÓN DE ESTRATOS CON VELOCIDADES INVERSAS MEDIANTE GEOFISICA DE ONDAS SUPERFICIALES”. En este trabajo, se realizaron ensayos ReMi y MASW sobre la corona de una presa de tierra para determinar las metodologías y configuraciones de campo necesarias para identificar zonas con velocidades inversas, utilizando perfiles 2D generados por modelos de velocidades 1D. Según los resultados, se concluye que el método MASW, permite obtener resultados con mayor precisión en profundidad y valores de velocidades. Con los resultados de los perfiles bidimensionales de este método, se definió la zona de velocidades inversa principalmente a profundidades entre los 16 y 23 metros a partir de la corona de la presa.

En la Universidad Francisco de Paula Santander de Ocaña, Colombia, en el año 2017, se realizó una investigación titulada: “DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS EN LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA FORMACIÓN ALGODONAL EN OCAÑA NORTE DE SANTANDER MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS”. En este estudio y mediante los métodos de refracción sísmica y MASW, se pretendía conocer las propiedades dinámicas de los materiales que componen la formación algodonal. Situándose en diferentes puntos del casco urbano de la ciudad de Ocaña, se establecieron las velocidades de ondas P y ondas S para el posterior cálculo de estos parámetros. Con un análisis estadístico de

los datos y considerando la dispersión de estos valores, se establecieron los rangos típicos que se presentaban en la formación.

## **2.2 Marco Contextual**

El desconocimiento de la respuesta de sitio en la mayor parte de las construcciones de la ciudad, hace necesario realizar un estudio de microzonificación sísmica, aportando mediante la determinación de los perfiles de velocidad de onda cortante en la zona sur oriental de la ciudad de Ocaña, siendo un factor determinante para hallar las propiedades dinámicas del terreno, como el periodo fundamental de vibración o la clasificación de un perfil de suelo. Además, conociendo los valores de velocidad de onda S, se pueden determinar las propiedades dinámicas como la rigidez y el amortiguamiento del suelo, indicadores que sirven para evaluar la respuesta de sitio. (Martínez & Sepúlveda, 2017, p 18). En base a estos resultados, es posible determinar zonas con comportamiento sísmico homogéneo, en las que se pueda establecer recomendaciones específicas para el diseño y construcción de edificaciones.

El perfil de velocidad de onda cortante, pretende visualizar la disipación de la energía sísmica producida por los movimientos telúricos, considerando dos tipos de ondas; las ondas de cuerpo, que viajan por el interior de la tierra y poseen una trayectoria curva por refracción con el cambio de densidad de la corteza, y las ondas superficiales que se producen por la interacción de ondas de cuerpo con la superficie (Núñez, 2018, p 2).

Para determinar la velocidad de onda cortante, la geofísica ha sido un excelente instrumento mediante ensayos de ondas de superficie, entre lo que encontramos el método de

refracción por microtemores ReMi o MAM y el método de análisis multicanal de ondas superficiales MASW. Ambos se diferencian en que el primero es un método pasivo que toma el ruido ambiental como su principal fuente de energía, como el tráfico, ruido de maquinarias, el viento, los movimientos de aguas superficiales etc., para investigar los estratos del subsuelo. Estas vibraciones son conocidas como microsismos o microtemores, que debido a su baja frecuencia y su gran longitud de onda, son ideales para exploraciones a mayor profundidad. El segundo es un método activo que necesita producir ondas superficiales, mediante un disparo, una explosión, o cualquier actividad donde se controle la energía producida y se conozca la ubicación de la fuente. El ensayo MASW siendo uno de los métodos activos, cuenta con una mayor resolución de estratos de subsuelo en los primeros metros, ya que las ondas en este método al ser de mayor frecuencia pierden energía con la profundidad.

Para conocer la velocidad de onda cortante en la zona sur-oriental de la ciudad de Ocaña, se realizarán 15 líneas en la formación Algodonal y 15 líneas en la formación Ígnea por ambos métodos. Debido a que no se tiene información de ensayos geofísicos previos de todos los sitios, se considera obtener los perfiles de velocidad de onda cortante mediante métodos activos y pasivos, de manera que se obtenga un análisis del comportamiento de la velocidad entre ambos ensayos.

## **2.5 Marco Legal**

Para aspectos operativos del desarrollo de los trabajos de campo no fue necesario realizar ningún tipo de permiso, no obstante para el para el uso de software de procesamiento si fue necesario contar con las licencias. Entre la normatividad que rige la investigación se encuentran:

Ley 400 de 1997 (Modificada Ley 1229 de 2008): Por el cual se adoptan normas sobre construcciones sismo-resistentes. Estableciendo criterios y requisitos mínimos para el diseño, construcción y supervisión técnica de edificaciones nuevas, así como de aquellas indispensables para la recuperación de la comunidad con posterioridad a la ocurrencia de un sismo. Con esta norma, se establece entre otras cosas las zonas de amenazas sísmicas, además de los conceptos adoptados para el territorio Colombiano en cuanto a sismos y la clasificación de suelos con base a la velocidad de ondas S.

Numeral H.7.1.1 de la Norma Sismo Resistente 2010 (efecto de la litología y tipos de suelos) donde especifica la velocidad de onda cortante como medio para la caracterización básica del perfil litológico en términos de los valores de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) con la profundidad y su variación horizontal mediante ensayos geofísicos en el terreno.

Numeral H.7.2 de la Norma Sismo Resistente 2010 (análisis de respuesta dinámica) donde hace referencia a los tipos de fuentes y eventos representativos de la amenaza sísmica, incluyendo acelerogramas y espectros de aceleración, velocidad y desplazamientos para la respuesta dinámica del suelo.

ASTM D5777 00(2011) e1 (Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation), Normativa internacional, para la ejecución del método de Refracción sísmica. Esta contiene las indicaciones, procedimientos y equipos para la realización de los ensayos de refracción sísmica.

Licencia de Software. Ley 603 del 2000 sobre legalización del software.

## Capítulo 3. Diseño metodológico

Con base al problema planteado, la metodología seleccionada para dar cumplimiento con los objetivos de esta investigación es cuantitativo, donde se utiliza la recolección de datos con base en la medición numérica y el análisis estadístico, adicional a ello, se utilizará el diseño de investigación de tipo experimental con un alcance descriptivo, con este se pretende determinar los perfiles de velocidad de onda cortante en la zona sur oriental de la ciudad de Ocaña, N.S mediante el método geofísico pasivo: REMI y el método geofísico activo MASW. Este proceso permite a su vez realizar un análisis de los datos, donde se espera obtener resultados que permitan dar respuesta a la investigación.

### 3.1 Diseño De Investigación

El presente estudio se planteó desde un enfoque cuantitativo de tipo experimental con un alcance descriptivo, para Sampieri, Fernández y Baptista, (2014), el alcance de este tipo de investigación busca especificar las propiedades, grupos, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren, esto es, su objetivo no es indicar cómo se relacionan éstas.

En cuanto al diseño de tipo experimental, autores como Fleiss, O'Brien, y Green, citado por Sampieri, et al, (2014), lo definen como un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes, para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes, dentro de una situación de control para el investigador.



**3.1.1 Población:** Todos aquellos materiales pertenecientes a la formación Algodonal y el Complejo Ígneo Intrusivo – Extrusivo que compone la geología del municipio del Ocaña norte de Santander.

**3.1.2 Muestra:** El tipo de muestreo seleccionado desde el enfoque cuantitativo es no probabilístico, de carácter intencional u opinático, con base a lo expuesto por Ñauñay, (2010), refiere que este tipo de muestreo se caracteriza por un esfuerzo deliberado de obtener muestras “representativas” mediante la inclusión en la muestra de grupos supuestamente típicos. Seleccionando para esta investigación los materiales que pertenecen a la formación algodonal e Ígnea localizados en el sector sur-oriental de la ciudad de Ocaña, sobre los cuales se tiene información previa, y a juicio de los investigadores son aptos para el desarrollo de los ensayos de campo.

### **3.2 Instrumentos**

Este apartado constituye la definición de los métodos con los cual se llevará a cabo la recolección de datos para resolver los objetivos planteados en la investigación y lograr identificar correctamente las dimensiones que se requieren evaluar; lo anterior se realizara mediante el método de refracción de microtemores y el ensayo de análisis de ondas superficiales con el fin de determinar los perfiles de velocidad de onda cortante en la zona sur oriental de la ciudad de Ocaña, N.S.

**3.2.1 Refracción de microtemores:** El método sísmico de refracción de microtemores, o por sus siglas en inglés *ReMi* propuesto por Louie, citado por Morales, Schmitz y Pullammanappalli, (2015), constituye uno de los más recientes avances entre los métodos sísmicos geofísicos aplicados a la caracterización de sitios y a la evaluación de terrenos para la ingeniería civil. Consiste en determinar la distribución de los valores de la velocidad de las ondas de corte o cizalla ( $V_s$ ) a través del terreno, a partir del análisis espectral del ruido sísmico ambiental.

**3.2.2 Análisis de Ondas Superficiales:** El ensayo de Análisis de Ondas Superficiales en Arreglos Multicanales (MASW), es un método de exploración geofísica que permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto de forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que la conforman (Condori, 2016).

### **3.3 Proceso de intervención**

El objetivo principal de este proyecto está enfocado en determinar los perfiles de velocidad de onda cortante en la zona sur oriental de la ciudad de Ocaña, N.S mediante el método geofísico pasivo: REMI. Para lograrlo se plantean las siguientes etapas:

Una primera etapa consiste en la recolección y posterior revisión bibliográfica de los trabajos e investigaciones realizadas, a fin de establecer los fundamentos teóricos en torno a los métodos geofísicos que permitan la medición de las ondas de velocidad del terreno para posteriormente definir un perfil de velocidad de onda cortante.

En la segunda etapa se seleccionarán los terrenos donde es posible la adquisición de datos sísmicos, con un área suficiente que permita la extensión de las líneas de adquisición y posteriormente se realizaran los ensayos de campo, con los dos métodos planteados, MASW y Refracción sísmica por microtemores.

En la tercera etapa se realizará el procesamiento de datos, una vez adquiridos y almacenados los datos de campo y posteriormente a sus clasificaciones se procederá al cálculo de los perfiles de velocidad de onda S haciendo uso del software SeisImager/SW.

En la cuarta y última etapa se realizará un análisis de los resultados obtenidos a fin de aplicar métodos estadísticos sobre el análisis experimental para establecer valores predominantes de velocidad de onda cortante.

## Capítulo 4. Resultados

### 4.1 Establecer los perfiles de velocidad de onda cortante por el método geofísico pasivo:

#### ReMi

Las ondas elásticas generadas por un sismo se desplazan por las rocas, hasta que se encuentran con el suelo que se superpone por encima de ellas, al ser este de una rigidez considerablemente menor y viajando de forma casi vertical, este desplazamiento pasa a ser gobernado por las ondas superficiales o de corte, mostrando una variación de velocidad según el tipo de suelo (Lazcano, 2012). De esta manera, la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), es importante para la clasificación de los suelos y rocas, debido que muestra de manera precisa las características dinámicas y elásticas de los materiales, permitiendo una caracterización del tipo de suelo basado en la velocidad que presenta a la onda cortante. Con una medición que muestre la resistencia a la onda cortante, se puede definir el tipo de material y la profundidad a la que se detecta, mostrando que perfil de suelo constituye a esta velocidad.

En Colombia, el procedimiento que se emplea para definir el tipo de perfil del suelo, se basa en los valores de la velocidad de onda cortante ( $V_s$ ) del suelo, a los 30 metros de profundidad medidos en el sitio. La clasificación está dada en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente.

Tabla 1

#### *Clasificación de los perfiles de suelo*

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500$ m/s $> V_s \geq 760$ m/s

Tabla 1 “Continuación”

C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	760 m/s > $V_s \geq 360$ m/s $N \geq 50$ , o $S_u \geq 100$ kPa ( $\approx 1$ kgf/cm <sup>2</sup> )
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	360 m/s > $v \geq 180$ m/s $50 > N \geq 15$ , o 100 kPa ( $\approx 1$ kgf/cm <sup>2</sup> ) > $S_u \geq 50$ kPa ( $\approx 0.5$ kgf/cm <sup>2</sup> )
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	180 m/s > $V_s$ $IP > 20$ w t 40% 50 kPa ( $\approx 0.50$ kgf/cm <sup>2</sup> ) > $S_u$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F1 — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F2 — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F3 — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75) F4 — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

Fuente: Reglamento colombiano de construcción sismo resistente nsr-10, p. A-22 (2010) Obtenido de [https://www.culturarecreacionydeporte.gov.co/sites/default/files/reglamento\\_construccion\\_sismo\\_resistente.pdf](https://www.culturarecreacionydeporte.gov.co/sites/default/files/reglamento_construccion_sismo_resistente.pdf)

La velocidad de onda cortante ( $V_s$ ), es obtenida por medio de la ecuación 8 propuesta en el numeral A.2.4.3.1 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente.

$$V_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} \quad (8)$$

Dónde:

**$v_{si}$** : Es la velocidad de la onda de corte del suelo del estrato  **$i$** , medida en campo en m/s.

**$d_i$** : espesor del estrato  **$i$** , localizado dentro de los 30 metros superiores del perfil.

#### 4.1.1 Localización y formación geológica presentes en los sectores de ensayos.

**4.1.1.1 Localización:** La localización de los sectores incluidos en la investigación se encuentra en la zona sur-oriental de la ciudad de Ocaña N, S. En la figura 7 se observa la localización de los sitios de ensayos, dentro de la ciudad con un código para su identificación.

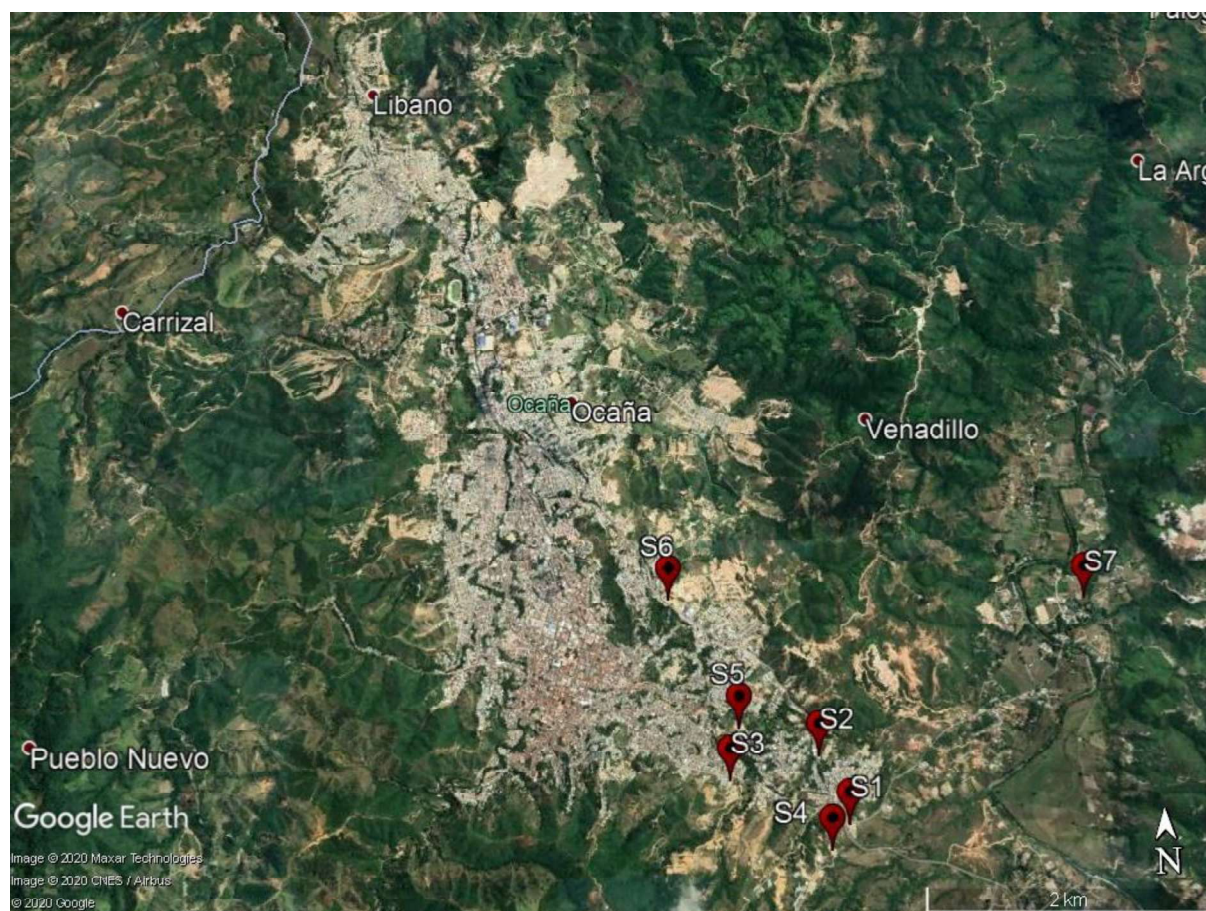


Figura 7. Localización de sitios de estudio en la ciudad de Ocaña, N.S. Adaptado de Google Earth (2020).

**4.1.1.2 Geología en los sectores de los ensayos:** Según el mapa geológico de la ciudad de Ocaña, en el plan básico de ordenamiento territorial (2002) en el municipio afloran las siguientes unidades geológicas: terrazas aluviales, llanuras de inundación, depósitos cuaternarios de origen aluvial, rocas sedimentarias poco consolidados de la formación algodonal altamente

meteorizadas, rocas ígneas del complejo intrusivo extrusivo. Así mismo la empresa Hidrosan LTDA (1993) en los estudios previos del plan maestro de acueducto y alcantarillado, presentan el informe estudio geotécnico en el que menciona de forma generalizada y en un “orden cronológico la unidad más antigua la constituyen neises de migmatíticos, luego se emplazaron granitos e ignimbritas, posteriormente se depositaron vulcanitas recientes que comprenden tobas, lapilli, brechas, aglomerados y, por último, terrazas aluviales” (p.2).

A continuación; se muestra el mapa geológico en la figura 8, donde se evidencia la formación Algodonal en color amarillo, la formación Ígnea es el color rosado, las terrazas aluviales y la llanura de inundación aparecen de acuerdo al recorrido del río y por último se pueden ver los depósitos cuaternarios de color gris oscuro en la parte nororiental del municipio, como también algunas pequeñas franjas en la parte occidental. Para mayor detalle de las formaciones se amplifica la leyenda del mapa en la figura 9. También dentro del mapa geológico se encuentra los límites del perímetro urbano, y la localización de los sectores mediante un código que los identifica. Los códigos que aparecen con el doble asterisco (S3 y S7) son lugares que quedan por fuera de mapa ya que no pertenecen al perímetro urbano.

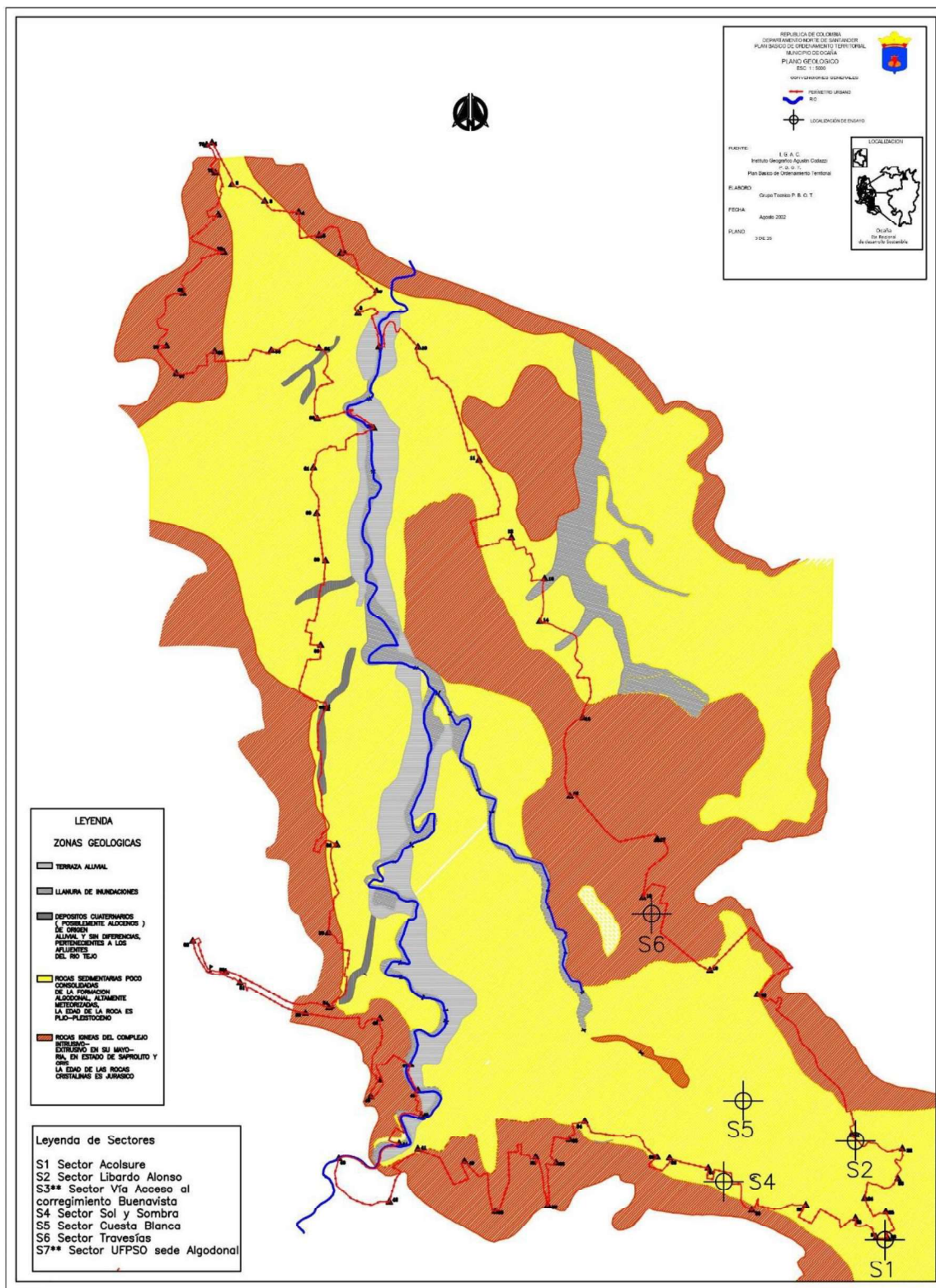
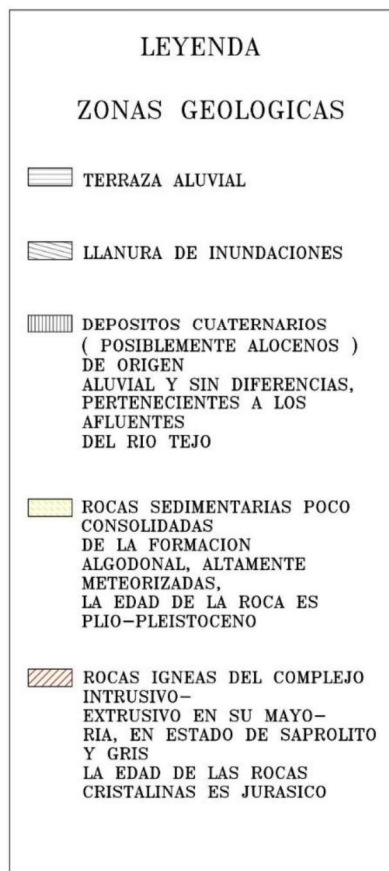


Figura 8. Mapa Geológico del Municipio de Ocaña N.S. Adaptado de Plan de Básico de Ordenamiento Territorial municipio de Ocaña. (2002).





*Figura 9.* Leyenda ampliada del mapa Geológico del municipio de Ocaña. Adaptado del Plan de Básico de Ordenamiento Territorial municipio de Ocaña (2002).

De forma generalizada en la zona urbana de este municipio, se identifican dos formaciones geológicas que afloran en esta región, la primera y más representativa; es de carácter sedimentario, conocida como la formación Algodonal (Tpa), “constituida por conglomerados con fragmentos de roca y cuarzo de color amarillo y gris, con intercalaciones de areniscas arcillosas de color verde y gris y arcillolitas gris verdosa y amarillenta” (Decorte & Salinas, 1980, p 65). La segunda formación geológica predominante es el Complejo Ígneo Intrusivo-Extrusivo que se puede ver como roca ígnea meteorizada, que presenta dos fases mineralógicas y texturales; una ácida muy meteorizada representada por colores ocre, naranja o varias tonalidades de pardo amarillento y oscuro, localmente crema y rosado pálido, hasta negro

por pátina superficial; no se observan rasgos textuales, presenta un aspecto terroso o arcilloso al tacto donde no se reconocen minerales a simple vista, lo que sugiere una textura afanítica y una composición rica en minerales de tipo feldespatos que originan arcillas. A nivel de afloramiento, se encuentra muy fracturada. La fase más básica también se encuentra meteorizada, pero conserva su textura fanerítica original de grano fino, color negro y localmente brillante. Para una mejor contextualización de lo descrito de cada una de las unidades geológicas, las figuras 10 y 11 muestran un corte representativo de cada formación, identificando los aspectos físicos más notables en cada una de ellas.

La figura 10 muestra un corte representativo de la formación Algodonal mediante un conglomerado de grano grueso, la orientación de las capas 1 y 2 es muy común hallarla cercana a la formación Ígnea. La división de las capas es generalmente causada por la sedimentación de materiales en distintos periodos.



*Figura 10.* Talud en formación Algodonal (Tpa) sector de Sol y Sombra. Autores (2020).

Del mismo modo en la figura 11 corresponde a un corte representativo de la formación Ígnea donde se observa el macizo rocoso meteorizado en la parte superior izquierda, además se percibe una mayor meteorización en la parte derecha visto en la capa de materia orgánica.



*Figura 11.* Talud en la formación Ígnea Extrusiva Intrusiva sector Travesías. Autores (2020).

**4.1.2 Adquisición de datos en campo:** El procedimiento para la adquisición de datos, se inició con la ubicación de los barrios que comprendían la zona sur-oriental de la ciudad de Ocaña, después se seleccionaron los sitios adecuados para realizar los ensayos; teniendo en cuenta sus dimensiones en planta, que permitieran instalar los arreglos con la longitud requerida para alcanzar la profundidad vertical de por lo menos 30 m.

De acuerdo al manual de adquisición de datos de ondas superficiales de Geometrics SeisImager/SW v3.0 (manual de adquisición y procesamiento de datos para ensayos geofísicos sísmicos) el tamaño del arreglo debe ser dos veces la profundidad vertical de exploración.

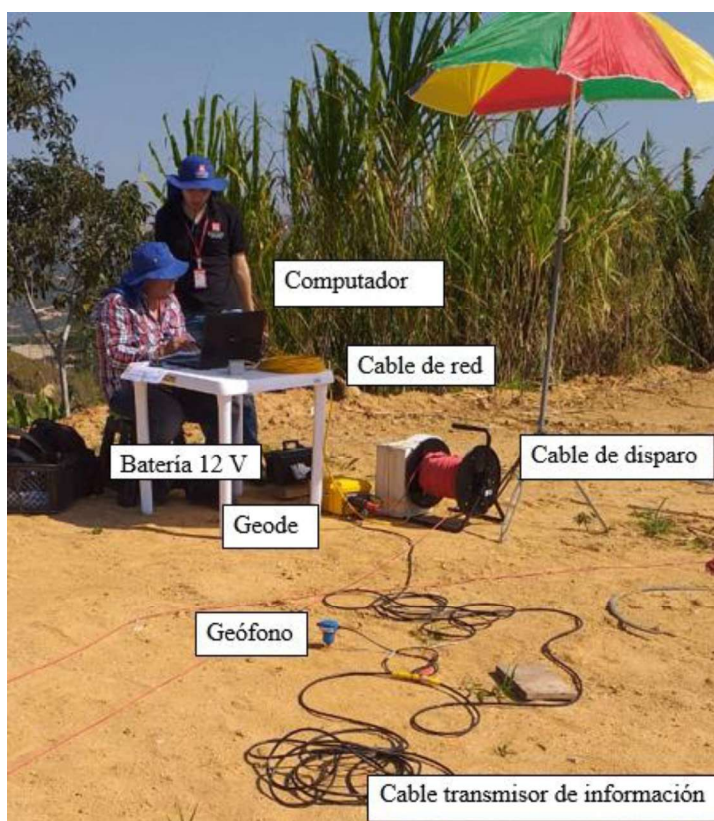
Conforme a esto se decidió que la longitud que más se ajustaba a los sitios era 60 metros, por lo tanto; se decidió tomar ese valor para calcular el tamaño de la línea, dividiéndolo entre 23 espacios que proporcionan la utilización de los 24 geófonos, dando como resultado una separación de 2,61 metros, pero para mejorar las condiciones de trabajo en campo se redujo la separación a 2,5 metros, obteniendo un arreglo de 57,5 metros en todos los ensayos, garantizando el mismo tamaño de arreglo y buscando la homogeneidad de los datos.

Ya conocidos los lugares donde se iba a ensayar y el espacio requerido para la longitud de las líneas a utilizar, se tomaba la cinta métrica y se extendía de forma que permitiera realizar los mayores desplazamientos paralelos, con el fin de que el traslado de los geófonos y su cableado fuera lo más simple y rápido posible, logrando la longitud requerida, hasta que se optaba por una nueva extensión perpendicular o diagonal como consecuencia a las características del terreno, que no permitía hacer más líneas paralelas.

Una vez tensada y puesta en campo la cinta, se disponía a colocar los geófonos cada 2.5 metros, enterrándolos en el suelo o abriendo un pequeño orificio con herramientas como una porra y cincel, este procedimiento más que todo, se realizaba cuando se presentaban capas superficiales de material de cierto grado de dureza, tratando de no forzar los geófonos. Luego se procedía a extender los cables en los carretes que conectaban los geófonos y el cable de disparo. Además, se hacía un chequeo de las conexiones en cada geófono, verificando que hayan sido conectados correctamente, para luego hacer un test al Geode, que regulaba la energía de la batería.

Finalmente se procedía a abrir el programa de adquisición de datos, configurando los parámetros para cada ensayo, fuera MASW o ReMi. De esta manera, se debía configurar cada vez que se decidía cambiar de ensayo, o en el caso de MASW, cada vez que se ubicaba el punto de disparo.

En la figura 12 se puede ver cada componente del equipo para la realización de los ensayos.



*Figura 12.* Componentes del equipo de refracción sísmica. Autores (2020).

En la adquisición de datos de ReMi se tomaban 20 registros de 32 segundos y para el MASW, se realizaban 2 registros en cada extremo de la línea. En la figura 13 se aprecia el

despliegue del equipo en un arreglo lineal tomando datos de ruido ambiental, en el sector de Travesías correspondiente a la formación complejo Ígneo Intrusivo-Extrusivo.



*Figura 13. Despliegue completo del equipo. Autores (2020).*

A continuación en la figura 14 se muestran los sectores de estudio localizados en la zona sur oriental de la ciudad.

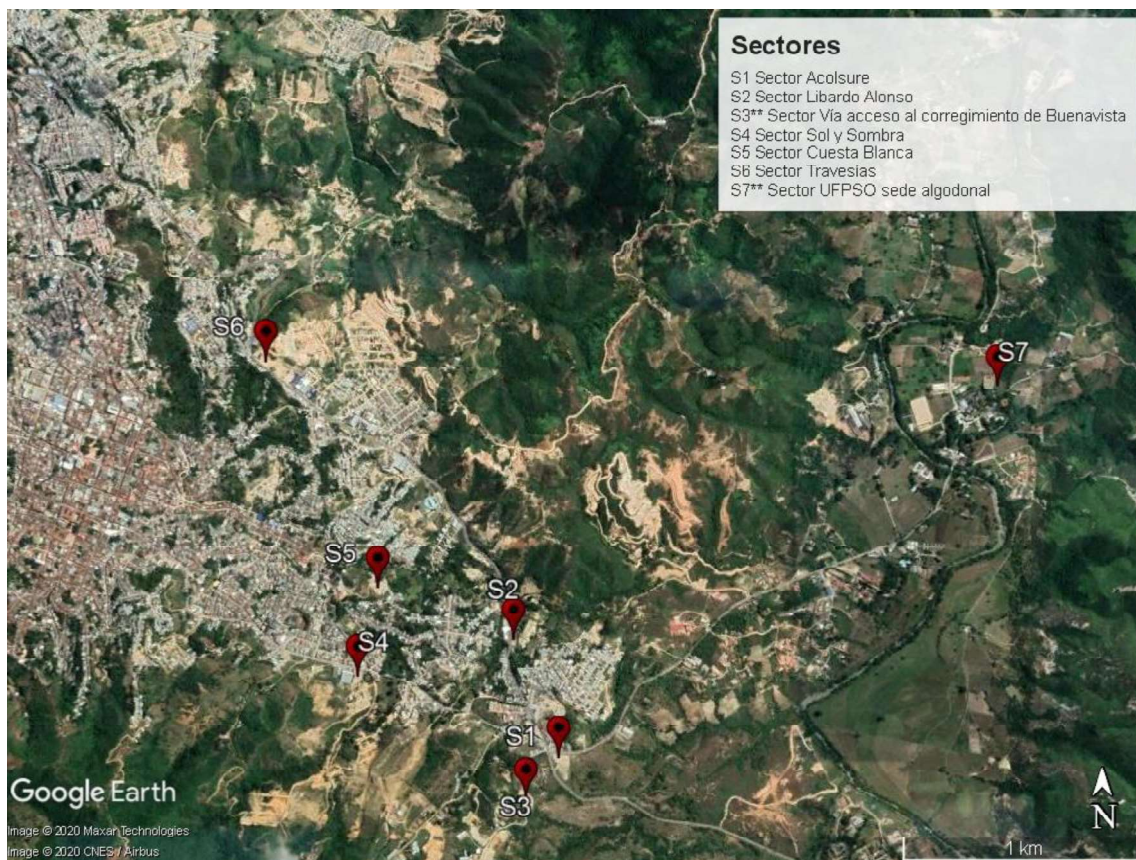


Figura 14. Localización de sectores en zona sur oriental de la ciudad de Ocaña. Adaptado de Google Earth (2020).

Los ensayos se realizaron en las formaciones geológicas principales de la ciudad (Algodonal e Ígnea) de acuerdo al mapa geológico. Sin embargo según la figura 8 (localización de sectores en la zona sur oriental en la ciudad de Ocaña y Mapa geológico del municipio de Ocaña, N.S.) y conjunto a la figura 14 se aprecia que de los siete sectores sólo el S6 corresponde a suelos de formación Ígnea y los demás pertenecen a la formación Algodonal, esto se debe a dos factores, el primero fue el poco espacio que se tenía para extender un nuevo arreglo, y el segundo es que la formación Algodonal es variable de un sitio a otro. Por el contrario, para la formación ígnea se escogió un solo sitio, en el que se realizaron quince líneas de forma paralelas ya que el terreno lo permitía, en cuanto a la variabilidad de los datos en la formación ígnea no es tan considerable como sucede en la formación Algodonal. De acuerdo con esto entre las figura 15 a

21, se muestran los lugares donde se realizaron los ensayos y así mismo mencionan la formación a la que pertenece y la cantidad de líneas hechas.

El sector S1 (figura 15) corresponde al barrio Acolsure, en que se realizaron cuatro líneas, tres de ellas paralelas a la vía ruta 70 y una en sentido diagonal. La formación en este sitio es la Algodonal (Tpa).



*Figura 15.* Sector Acolsure. Autores (2020).

El sector S2 (figura 16) corresponde al barrio Libardo Alonso, en que se realizaron dos líneas de forma paralela al talud. La formación en este sitio es la Algodonal (Tpa).





*Figura 16.* Sector Libardo Alonso. Autores (2020).

El sector S3 (figura 17) corresponde a un lote en la vía de acceso al corregimiento de Buenavista, en que se realizaron cuatro líneas, tres de ellas paralelas y una en sentido diagonal. La formación en este sitio es la Algodonal (Tpa).



*Figura 17.* Sector vía acceso al corregimiento de Buenavista. Autores (2020).

El sector S4 (figura 18) corresponde al barrio Sol y Sombra, en que se realizaron tres líneas, dos de ellas paralelas y una en sentido diagonal. La formación en este sitio es la Algodonal (Tpa).



*Figura 18.* Sector Sol y Sombra. Autores (2020).

El sector S5 (figura 19) corresponde al barrio Cuesta Blanca, en que se realizaron dos líneas paralelas. La formación en este sitio es la Algodonal (Tpa).



*Figura 19.* Sector Libardo Alonso. Autores (2020).

El sector S6 (figura 20) corresponde al barrio Travesías, en que se realizaron 15 líneas paralelas. La formación en este sitio es Ígneo del Complejo Intrusivo Extrusivo.



*Figura 20.* Sector Travesías. Autores (2020).

El sector S7 (figura 21) corresponde al Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, en el que se realizó una línea. La formación en este sitio es Algodonal (Tpa).



*Figura 21.* Sector UFPSO sede algodonal. Autores (2020).

**4.1.3 Procesamiento de datos obtenidos en campo:** El método de exploración del subsuelo ReMi, es una técnica *in situ* propuesta por Louie (2001) que ha venido utilizándose como herramienta para apoyar la proyección de los estudios con perforaciones, permitiendo obtener la distribución de la velocidad de propagación de la onda S ( $V_s$ ) en campo. Se

caracteriza por utilizar los registros de ruido ambiental, haciéndola una técnica de adquisición sísmica ideal para las ciudades donde el nivel de ruido es alto (Santisteban, Pérez, & Marín, 2013).

Este método resulta muy eficaz, por utilizar la misma implementación de la línea de geófonos para ensayos de refracción sísmica, de manera que se obtiene el perfil de distribución de velocidad de onda cortante ( $V_s$ ) en el mismo emplazamiento (Santisteban, Pérez, & Marín, 2013).

El manual que suministra la empresa Geometrics, indica los parámetros básicos que deben ser conocidos antes de realizar un ensayo por el método ReMi, definidos en la siguiente tabla.

Tabla 2

*Parámetros de adquisición para ReMi*

Parameter	Setting
Spread/array configuration	L-shape, Triangle, Circle, Linear, or custom
Array size	Minimum of 1 times depth of interest
Geophone interval	Up to 15m or 45 ft, adjust to suit array configuration and size
Total number of geophones	Various based on spread configuration
Geophone type	4.5 Hz vertical geophones, with base plates for surveys on paved ground; alternatively, if available, 1 or 2 Hz seismometers can be used, especially if depth of interest is greater than 30 m (100 ft)
Trigger	Manual keyboard trigger

Tabla 2 “Continuación”

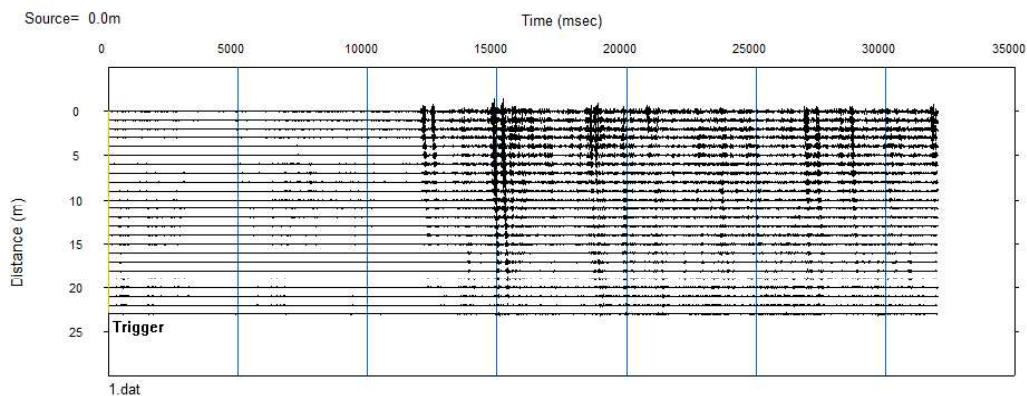
Sample interval	2 miliseconds (ms)
Record length	32 seconds (s) each record, total of at least 20 records

Fuente: SeisImager/SWTM Manual Windows Software for Analysis of Surface Waves PickwinTM v. 4.0.1.5 WaveEqTM v. 2.3.0.8 GeoPlot TM v. 8.4.1.3. Manual v. 3.0. Obtenido de [ftp://geom.geometrics.com/SISW\\_Documents/](ftp://geom.geometrics.com/SISW_Documents/)

Para la ejecución del ensayo, se realiza una línea de 12 o más geófonos, usando un sismógrafo digital para el registro de vibración ambiental (micro temores) y vibración inducida (impactos o tránsito de un vehículo). A diferencia de la técnica de refracción sísmica MASW, esta puede registrar información en ambientes urbanos o cercanos a la vía, sin afectar los resultados de las curvas de dispersión (Lazcano S, 2012).

Las vibraciones producidas en el terreno, posteriormente; son detectadas por los sensores ubicados a una distancia estratégica. Estos registros contienen las frecuencias de las ondas que van llegando en función del tiempo, permitiendo analizar la velocidad de propagación de las ondas reflejadas en las diferentes interfaces del suelo. De esta manera, se puede interpretar diferentes niveles del suelo que contienen una velocidad sísmica moderada o de corte, generando un perfil estratigráfico del mismo (Sanchez & Tovar, 2016).

Una vez generado el registro de campo, se visualiza la información en el programa “Surface Wave Analysis Wizard” de la empresa Geometrics, como se muestra en la figura 22.



*Figura 22.* Gráfica de frecuencia para método ReMi en la línea número tres de Sol y Sombra. Autores (2020).

Para el método de microtemores (ReMi) se toman 20 registros de 32 segundos cada uno, según lo establecido en la Tabla 2. Deben seleccionarse todos los datos y abrirse en conjunto. El siguiente paso consiste en generar un espectro de la velocidad de las frecuencias con respecto al tiempo, en una compilación de los veinte archivos. Luego se realiza el proceso y configuración del tipo de geometría utilizada en la línea de estudio, en este caso; se realizaron arreglos lineales para el desarrollo de la investigación y espaciamento de entre geófonos cada 2.5 metros. El espectro generado posteriormente, se detecta con facilidad el modo en que vibran las ondas generadas, en un trozo de color azul llamado “Módulo fundamental”, como se muestra en la figura 23, después de compilar los archivos en uno solo.

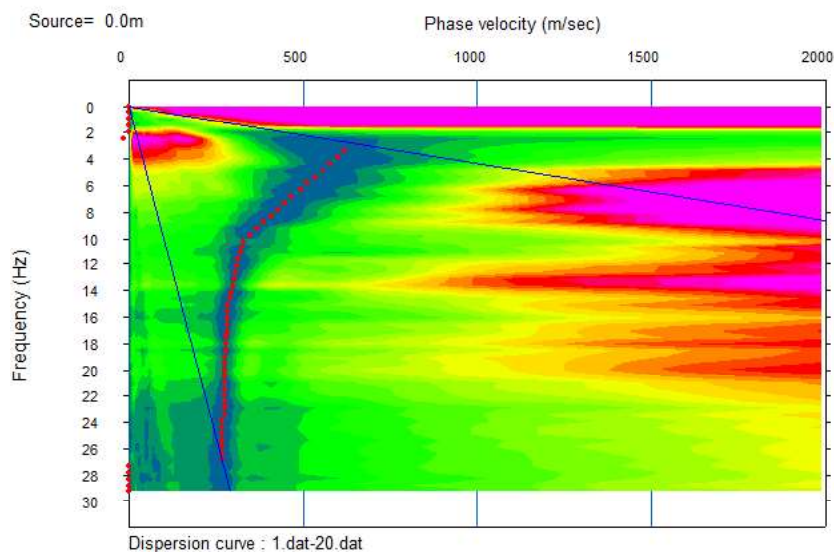


Figura 23. Gráfica de Velocidad de fase vs Frecuencia para la línea número tres de Sol y Sombra por ReMi. Autores (2020).

Después se determinan los periodos donde se muestra la velocidad de la onda en una curva de dispersión, modificando las frecuencias máximas y mínimas. Luego se obtiene un perfil, que muestra los diferentes espesores de estratos y su respectiva velocidad de onda cortante ( $V_s$ ), ver figura 24.

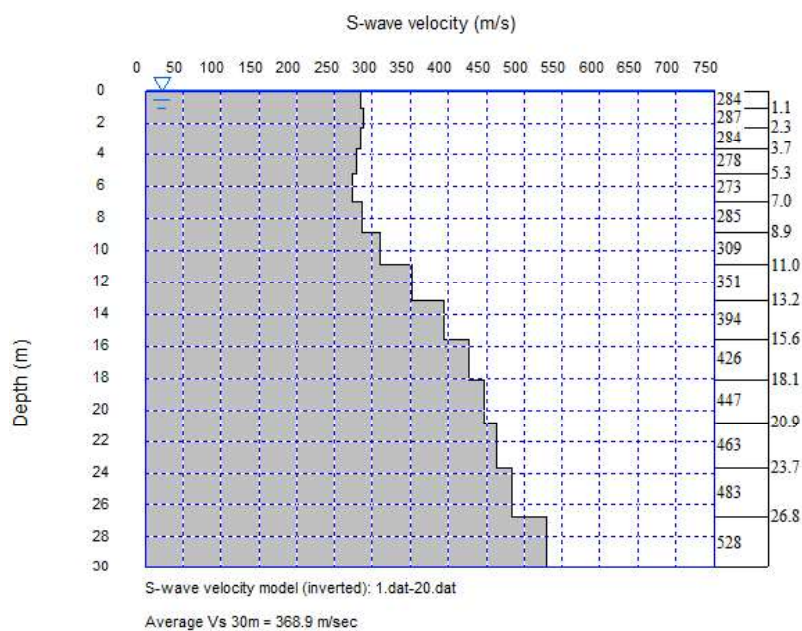


Figura 24. Perfil de Velocidad de Onda cortante para la línea tres de Sol y Sombra. Autores (2020).

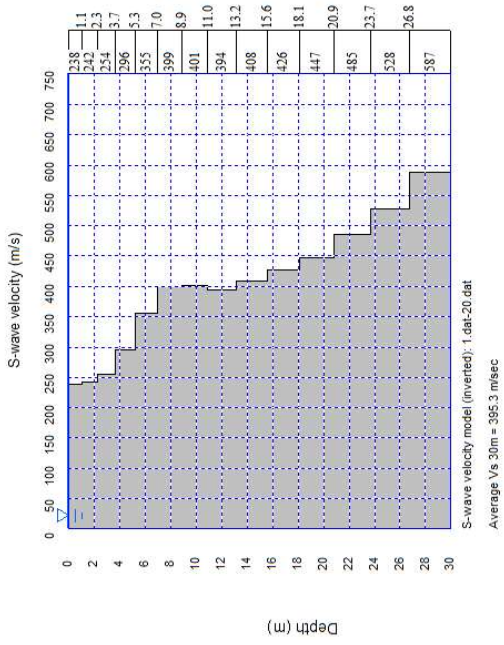
A partir de este perfil generado, se puede realizar una inversión de datos para corregir errores que pueden generarse, ingresando el número de iteraciones necesarias para que el modelo se acerque al correcto lo más que pueda. Así el resultado final nos muestra la velocidad promedio entre los primeros 30 metros de profundidad del suelo.

A continuación se muestran unos perfiles de velocidad de onda cortante representativos por cada sector de estudio, debajo del perfil se encuentra el módulo fundamental de frecuencias dando una percepción de qué tan bueno fue el ensayo. Además se puede observar la localización del ensayo en la zona sur oriental, resaltando en rojo la línea que genera el perfil mostrado. Así mismo, las coordenadas y elevaciones que se ve, fueron tomadas con un GPS para cada sitio de ensayo.

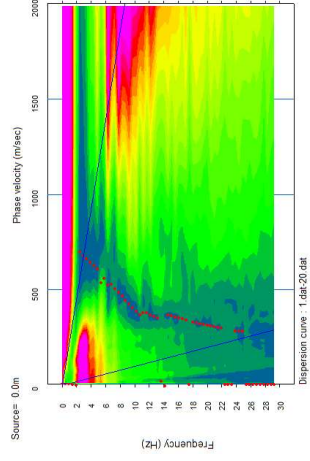
En las figuras 25 a la 31, se ilustran algunos de los resultados obtenidos de las diferentes líneas realizadas por ReMi en los sitios de ensayo. En el Anexo A se muestran en extenso un comparativo de los resultados de ReMi y MASW de las demás líneas.



### Perfil de Velocidad de Onda Cortante REMI



**Vs30 = 395,3 m/s**



### Modo Fundamental

### Localización



**Lugar: Acolsure  
Línea # 4**

**Observación: Topografía plana**

**Altitud: 1250 m.s.n.m**

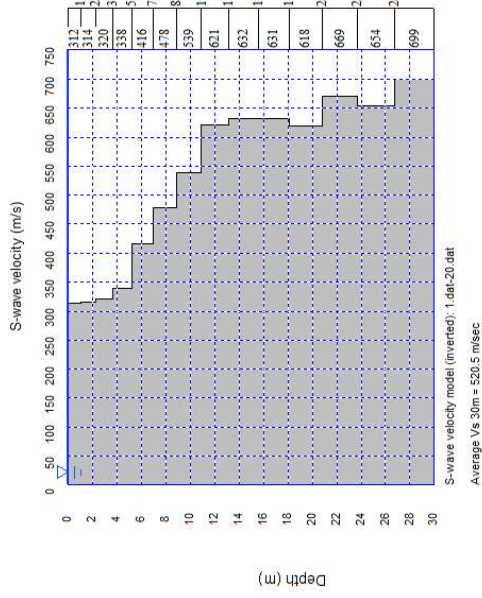
**Coordenadas: E1081638,  
N1401251**

**Formación: Algodonal (Tpa)**

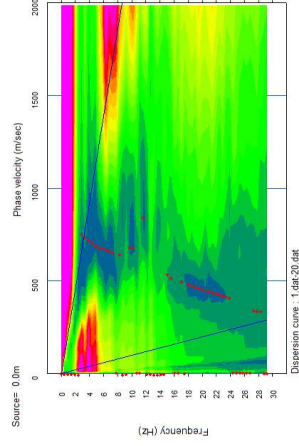


Figura 25. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 4 de Acolsure. Autores. (2020).

### Perfil de Velocidad de Onda Cortante REMI

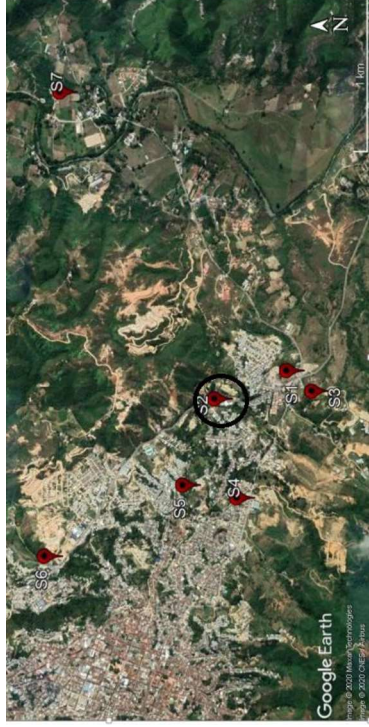


$V_{s30} = 520,5 \text{ m/s}$



### Modo Fundamental

### Localización



Lugar: Libardo Alonso

Línea # 2

Observación: Topografía plana

Altitud: 1217 m.s.n.m

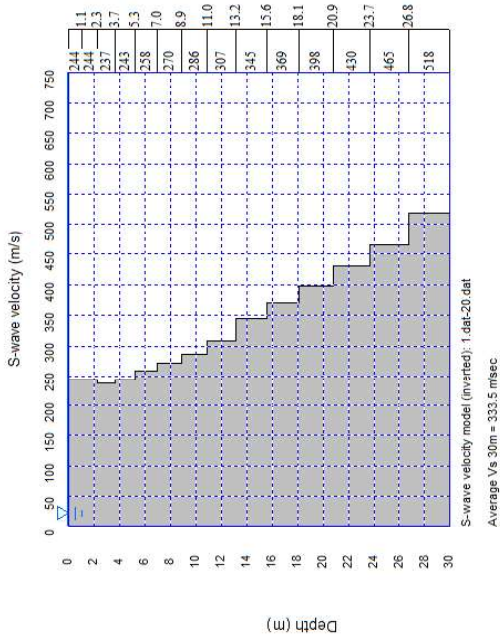
Coordenadas: E1081488,  
N1401757

Formación: Algodonal (Tpa)

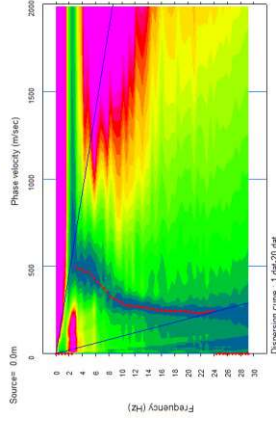


Figura 26. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 2 de Libardo Alonso. Autores. (2020).

### Perfil de Velocidad de Onda Cortante REMI

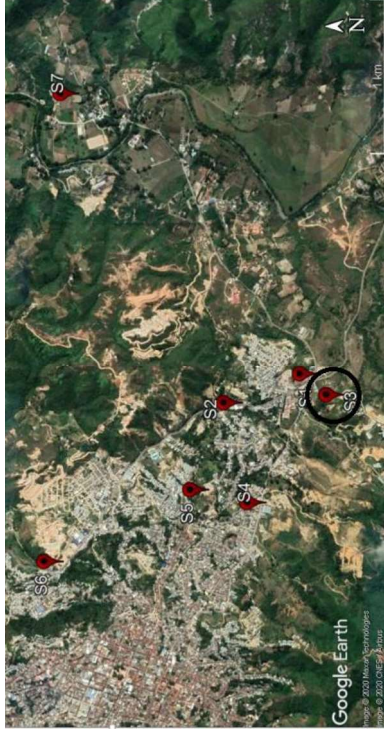


$V_{s30} = 333,5 \text{ m/s}$



### Modo Fundamental

### Localización



Lugar: Vía de acceso a Buenavista

Línea # 3

Observación Topografía plana

Altitud: 1268 m.s.n.m

Coordenadas: E1081638,

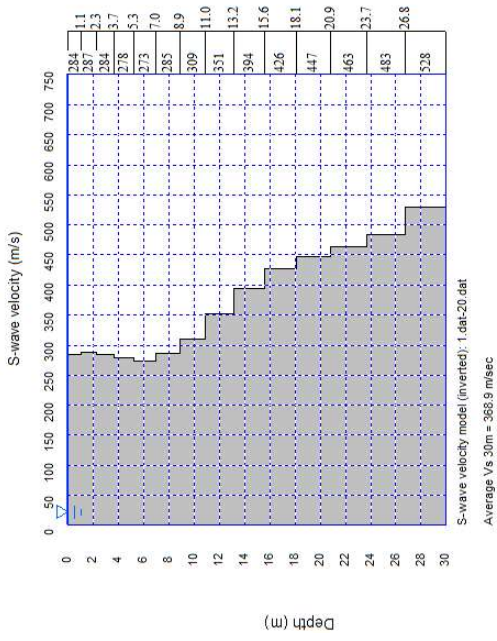
N1401251

Formación: Algodonal (Tpa)

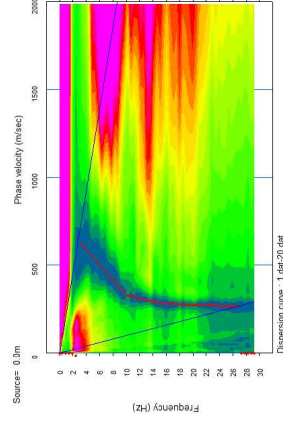


Figura 27. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 3 de la vía de acceso a Buenavista Autores. (2020).

### Perfil de Velocidad de Onda Cortante REMI

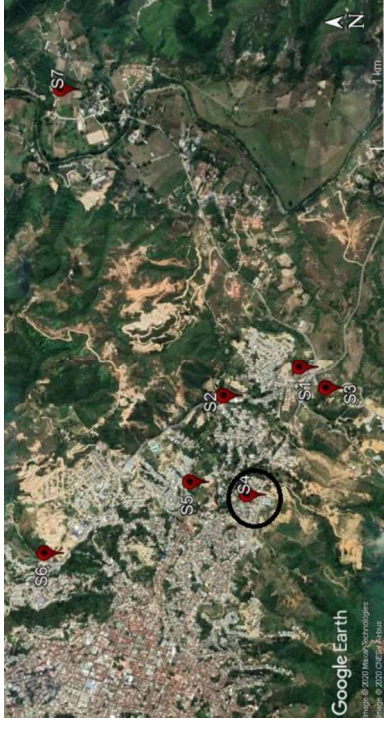


$V_{s30} = 368,9 \text{ m/s}$



### Modo Fundamental

### Localización



Lugar: Sol y Sombra  
Línea # 3

Observación Topografía plana

Altitud: 1237 m.s.n.m

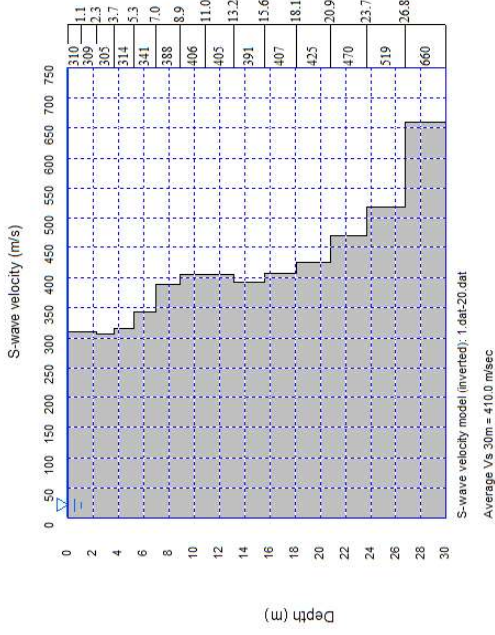
Coordenadas: E1080815,  
N1401548

Formación: Algodonal (Tpa)

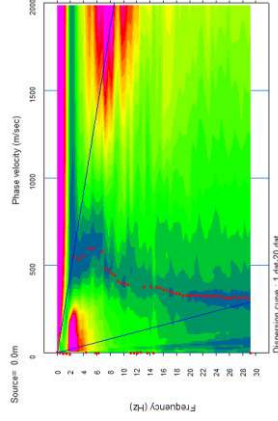


Figura 28. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 3 de Sol y Sombra. Autores. (2020).

Perfil de Velocidad de Onda Cortante REMI



Vs30 = 410,0 m/s



Modo Fundamental

Localización



Lugar: Cuesta Blanca  
Línea # 2

Observación Topografía plana

Altitud: 1235 m.s.n.m

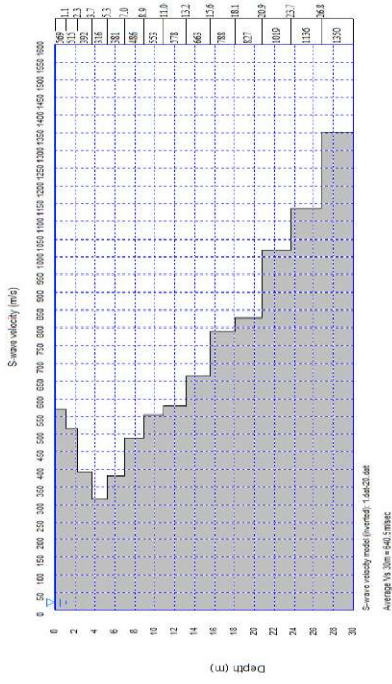
Coordenadas: E1080915,  
N1401961

Formación: Algodonal (Tpa)



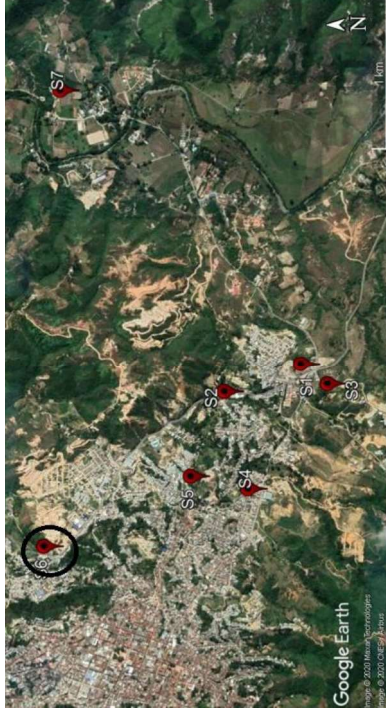
Figura 29. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 2 de Cuesta Blanca. Autores. (2020).

Perfil de Velocidad de Onda Cortante REMI



$V_{s30} = 640,5 \text{ m/s}$

Localización



Lugar: Travesías  
Línea # 14

Observación Topografía plana

Altitud: 1259 m.s.n.m

Coordenadas: E1080447,  
N01402916

Formación: Ígnea



Modo Fundamental

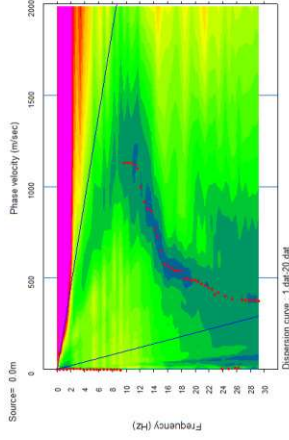
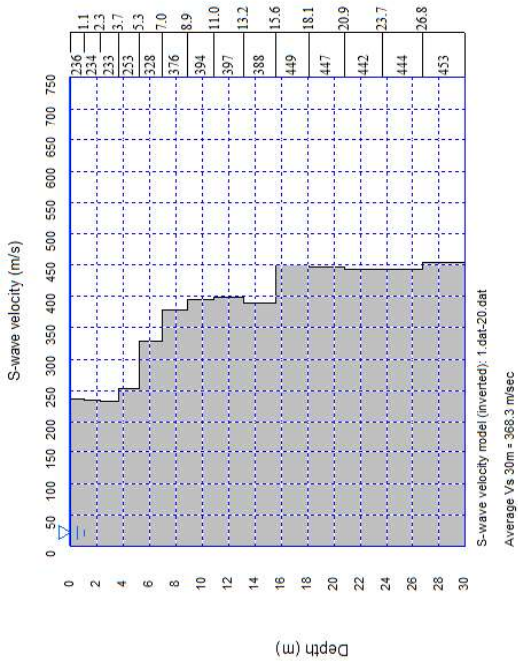
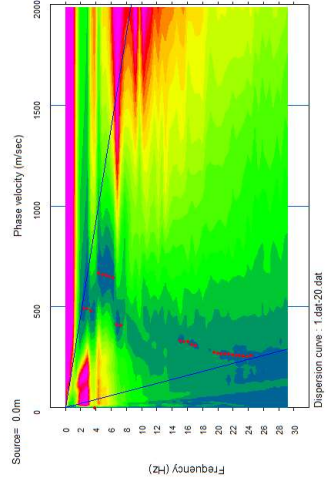


Figura 30. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 14 de Travesías. Autores. (2020).

### Perfil de Velocidad de Onda Cortante REMI



$V_{s30} = 368.3 \text{ m/s}$



### Modo Fundamental

### Localización



Lugar: UFPSO  
Línea # 1

Observación Topografía plana

Altitud: 1250 m.s.n.m

Coordenadas: E1083491,  
N01402767

Formación: Algodonal (Tpa)



Figura 31. Perfil de velocidad de onda cortante por ReMi de la línea 1 de la sede El Algodonal de UFPSO. Autores. (2020).

## 4.2 Establecer los perfiles de velocidad de onda cortante por el método geofísico activo:

### MASW

Para establecer los perfiles de velocidad de onda cortante por el método MASW, se utilizó los mismos arreglos en los cuales se hicieron los ensayos pasivos, en cuanto al tamaño y el tipo de arreglo. Sin embargo, este método implica generar ondas sísmicas superficiales conociendo su ubicación para el análisis de los datos. Estas se produjeron por el impacto de una porra a una platina y se realizaba dos tomas de datos por cada línea, uno al inicio (directo) y otro al final (reverso), ya que los datos pueden ser contaminados por el ruido ambiental, lo que implica distorsión en el frente de onda. En el procesamiento se escoge el mejor dato de acuerdo a la distribución de frecuencias, modo fundamental y al perfil generado.

Tabla 3

#### *Parámetros de Adquisición para MASW 1D*

Parameter	Setting
Spread configuration	Linear
Spread length	About equal to depth of interest when supplementing with passive source data; about equal to two times depth of interest if no passive source data available*
Geophone interval	1.5 to 3 m or 5 to 10 ft*
Total number of geophones	12 or more, minimum of 16 preferred
Geophone type	4.5 Hz vertical geophones, with base plates for surveys on paved ground
Shot locations	Minimum of one shot, located in-line and off-end (either end) of spread; reverse shots suggested
Shot near offset	About 10 to 20% of spread length; an additional shot located at about 40% of spread length is suggested



Tabla 3 “continuación”

Source equipment	Sledgehammer (most common), 8 lbs (3.6 kgs), 16 lbs (7.2 kg), 20 lbs (9 kg), scale hammer weight up with increase in spread length*, and striker plate
Trigger	Hammer switch taped to sledgehammer handle and connected to seismograph trigger port
Sample interval	0.5 milliseconds (ms)
Record length	1 to 2 seconds (s), long enough to enclose the surface wave train
Stacking	As needed to improve data quality, wait for quiet times to shoot

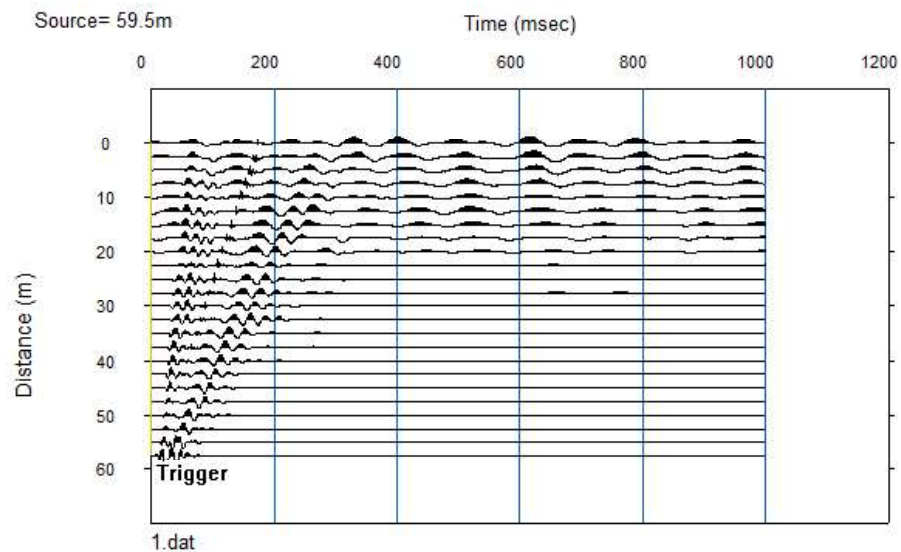
Fuente: SeisImager/SWTM Manual Windows Software for Analysis of Surface Waves PickwinTM v. 4.0.1.5 WaveEqTM v. 2.3.0.8 GeoPlot TM v. 8.4.1.3. Manual v. 3.0. Obtenido de [ftp://geom.geometrics.com/SISW\\_Documents/](ftp://geom.geometrics.com/SISW_Documents/)

En cuanto al procesamiento de datos obtenidos en campo para determinar el perfil de velocidad de onda cortante consiste de tres, pasos los cuales son:

1. Obtener la gráfica de Tiempo vs Distancia
2. Obtener la gráfica de Velocidad de Fase vs Frecuencia
3. Generación de un perfil de velocidad de onda cortante.

Para adquirir la gráfica de Tiempo vs Distancia se inicia el software: Surface Wave Analysis Wizard con la opción de adquisición de fuente activa 1D MASW. Luego se dispone abrir el archivo a procesar.

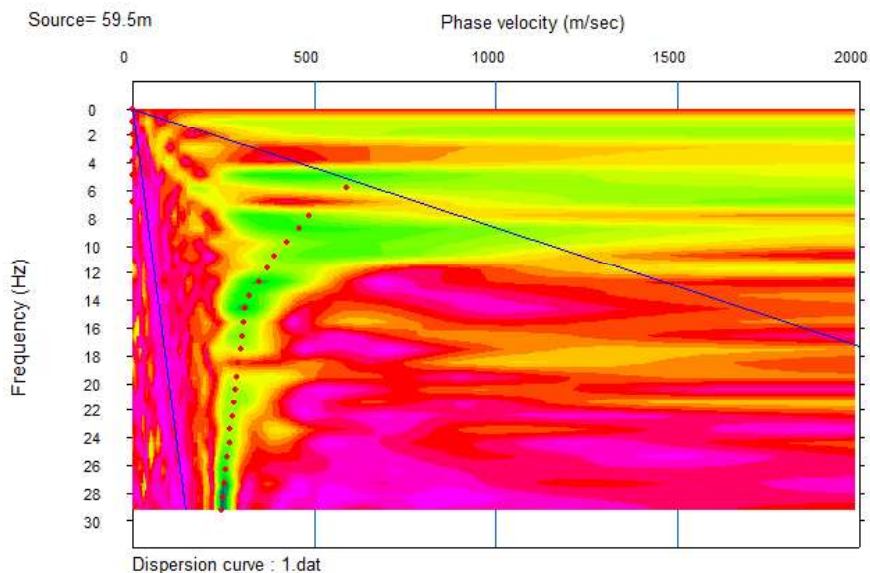
Al abrir el archivo se muestra la gráfica de Tiempo vs Distancia como lo podemos apreciar en la figura 32.



*Figura 32.* Gráfica de Tiempo vs Distancia para la línea número tres de Sol y Sombra. Autores. (2020).

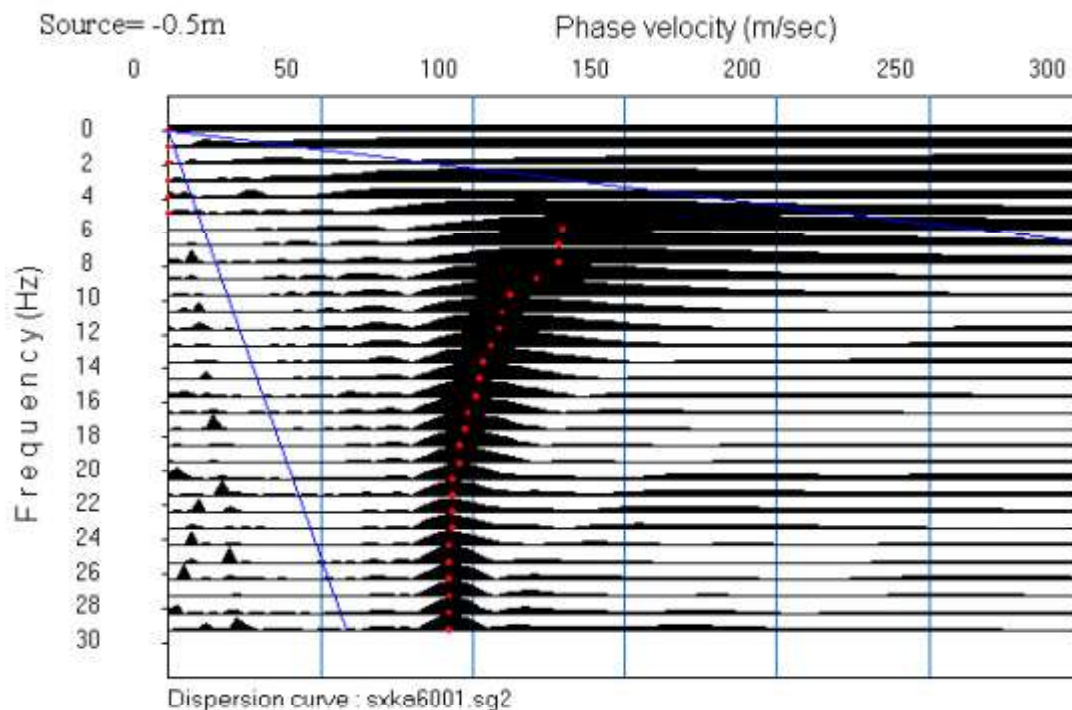
El segundo paso es obtener la transformación de Velocidad de Fase-Frecuencia, la ventana pedirá un parámetro máximo para realizar el análisis de acuerdo a las condiciones de cada sitio, bien sea la máxima velocidad de fase que podría encontrarse o la mayor frecuencia para esta investigación. Se utilizó la velocidad de fase con un máximo de 2000 m/s y un rango de frecuencia de 4.5 Hz a 30 Hz para ambas formaciones.

Una vez realizados los cálculos de acuerdo a los parámetros dados al software, mostrará la gráfica de Velocidad de Fase vs Frecuencia como lo muestra la figura 33, donde se aprecia lo que se llama el “modo fundamental de frecuencias”.



*Figura 33.* Gráfica de Velocidad de Fase vs Frecuencia para la línea tres de Sol y Sombra por MASW. Autores. (2020).

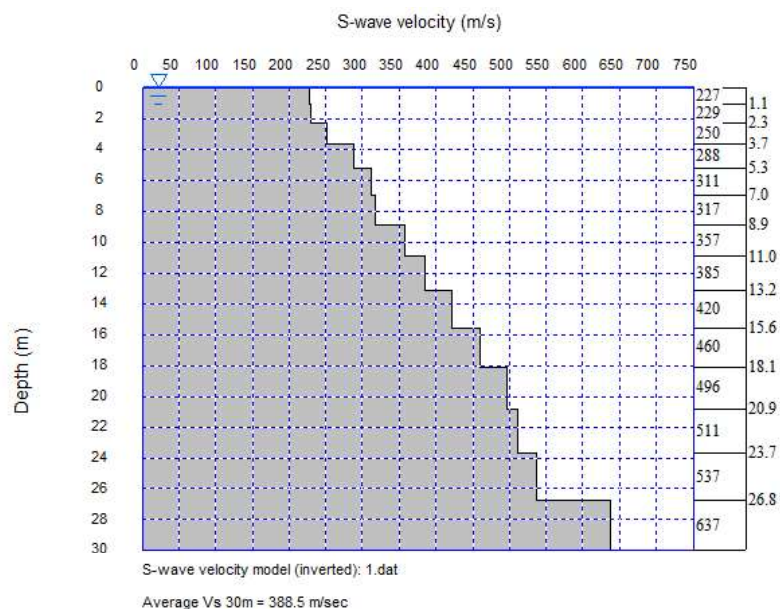
Cuando el programa muestra la gráfica, este realiza un picado automático de frecuencias, como se observa en la figura 33 la tendencia de los puntos rojos, sin embargo, cuando el modo fundamental no es muy claro por las condiciones ambientales como ruidos, no se identifica bien el frente de onda, esto puede ser modificado por el usuario, presionando por la dirección que se desee o la dirección del frente de onda que se muestre. Para estimar cuándo es un buen picado o cuando el modo fundamental es bueno o malo, se percibe de dos maneras: es claro por la tendencia de los puntos y visualmente los colores son claros como se puede ver en la figura anterior, la franja de color verdoso muestra la distribución de frecuencias, el tramo amarillo desvanecido que se aprecia en la parte derecha inferior de la línea azul, es ruido ambiental que el equipo captó cuando se tomaba el ensayo. La segunda manera, es mirar el modo fundamental con su distribución de frecuencia en la transformada de Fourier, donde se hace el picado siguiendo los puntos máximos en el diagrama como se muestra en la figura 34.



*Figura 34.* Curva de dispersión de máximas frecuencias. SeisImager/SWTM Manual Windows Software for Analysis of Surface Waves PickwinTM v. 4.0.1.5 WaveEqTM v. 2.3.0.8 GeoPlot TM v. 8.4.1.3. Manual v. 3.0. (2009). Obtenido de [ftp://geom.geom.etric.com/SISW\\_Documents/](ftp://geom.geom.etric.com/SISW_Documents/)

Por último, se generará un perfil de velocidad de Onda Cortante, controlando el rango de frecuencia que se quiere analizar para generar el perfil. El software realiza un modelo inicial pidiendo un estimativo de profundidad de investigación y número de capas. Luego se realiza una inversión, este procedimiento consiste en la iteración por el método de mínimos cuadrados que permite ajustar el modelo obtenido.

Una vez el software realiza el procesamiento de la información, genera el perfil de velocidad de onda cortante que se muestra en la figura 35.

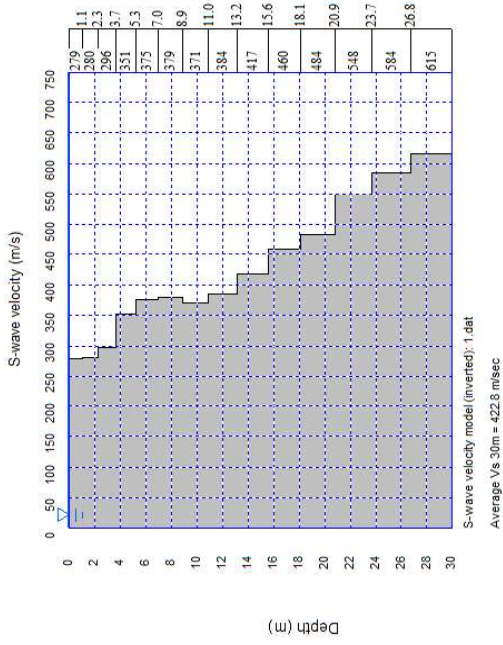


*Figura 35.* Perfil de Velocidad de Onda Cortante correspondiente a la línea tres de Sol y Sombra. Autores (2020).

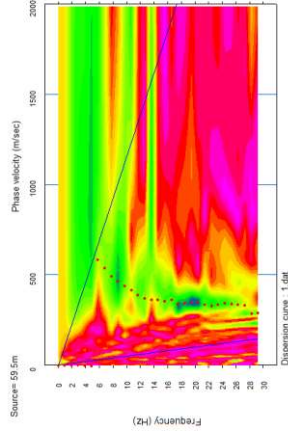
En el perfil se puede observar que la velocidad de onda cortante en los 30 metros requeridos del perfil de geo materiales presentes, el cual corresponde a 388.5 m/s, que de acuerdo a lo establecido en la Tabla A.2.4-1 del título H de la NSR 10, corresponde a un perfil de suelo tipo C.

En las figuras 36 a la 42, se muestran algunos de los resultados obtenidos de las diferentes líneas realizadas por MASW en los sitios de ensayo. En el Anexo A se muestran en extenso un comparativo de los resultados de ReMi y MASW de las demás líneas.

Perfil de Velocidad de Onda Cortante MASW

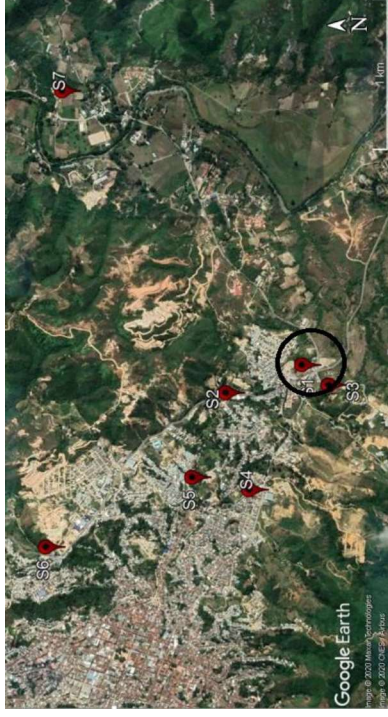


Vs30 = 422,8 m/s



Modo Fundamental

Localización



Lugar: Acolsure  
Línea # 4

Observación Topografía plana

Altitud: 1250 m.s.n.m

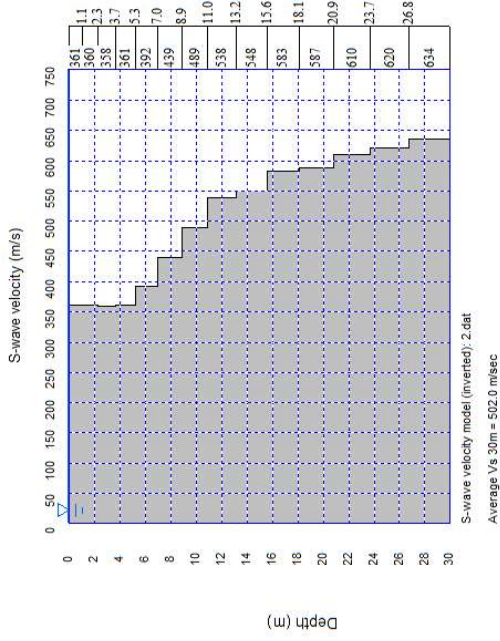
Coordenadas: E1081638,  
N1401251

Formación: Algodonal (Tpa)

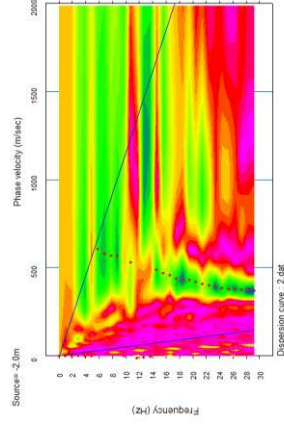


Figura 36. Perfil de velocidad de onda cortante por MASW de la línea 4 de Acolsure. Autores. (2020).

Perfil de Velocidad de Onda Cortante MASW

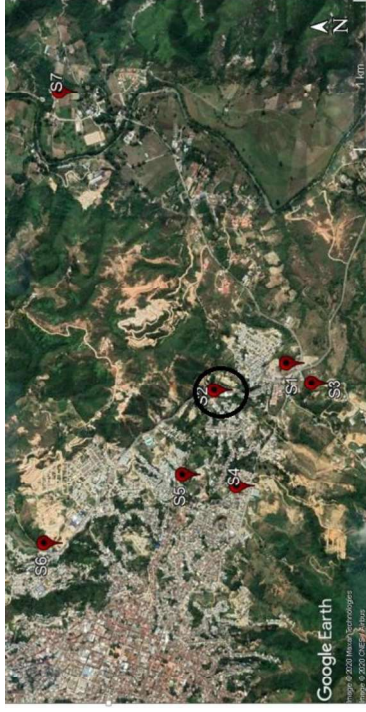


$Vs_{30} = 502,0 \text{ m/s}$



Modo Fundamental

Localización



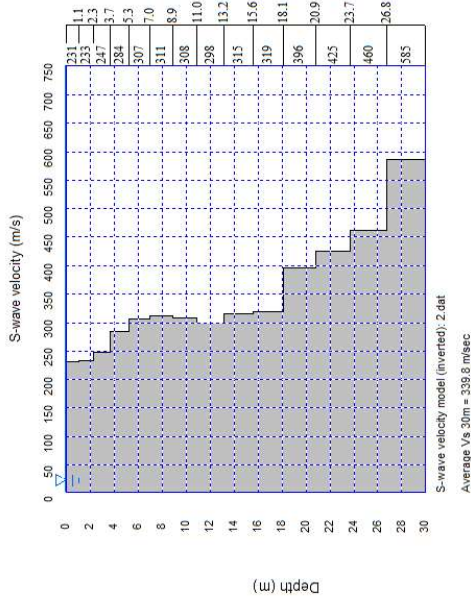
Lugar: Libardo Alonso  
Línea # 2

Observación	Topografía plana
Altitud:	1217 m.s.n.m
Coordenadas:	E1081488, N1401757
Formación:	Algodonal (Tpa)



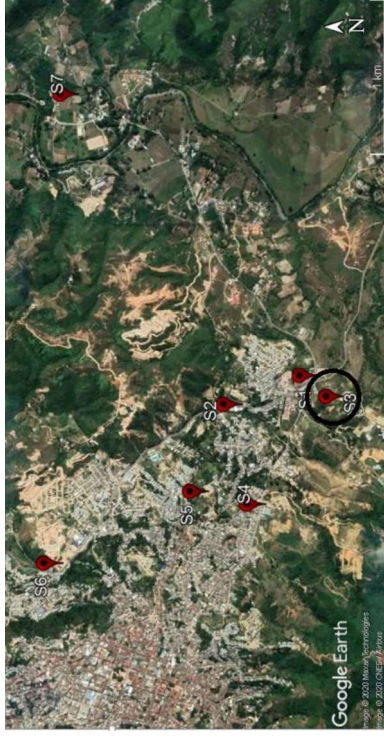
Figura 37. Perfil de velocidad de onda cortante por MASW de la línea 2 de Libardo Alonso. Autores. (2020).

Perfil de Velocidad de Onda Cortante MASW



$V_{s30} = 339,8 \text{ m/s}$

Localización



Lugar: Vía de acceso a Buenavista

Línea # 3

Observación	Topografía
Altitud:	plana
Coordenadas:	1268 m.s.n.m
Formación:	E1081638, N1401251
	Algodonal (Tpa)



Modo Fundamental

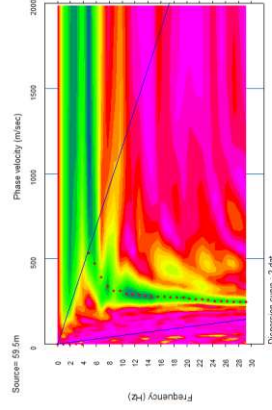
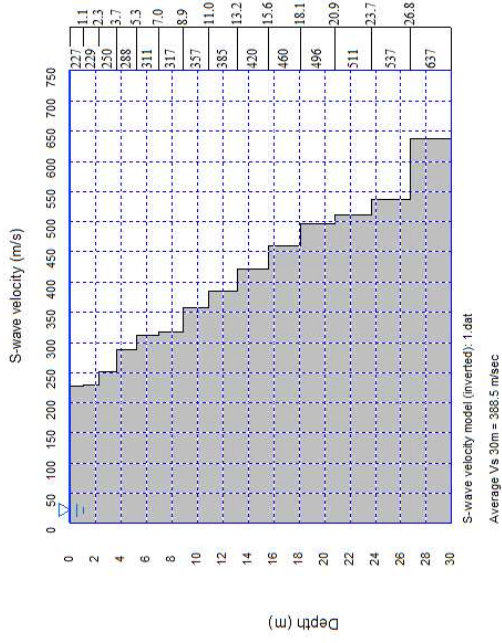


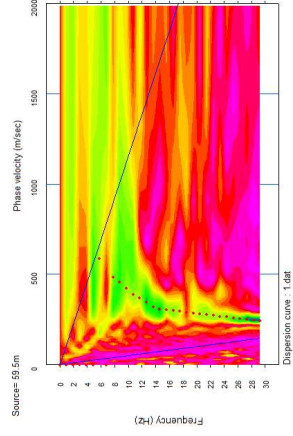
Figura 38. Perfil de velocidad de onda cortante por MASW de la línea 3 de la vía de acceso a Buenavista. Autores. (2020).



Perfil de Velocidad de Onda Cortante MASW

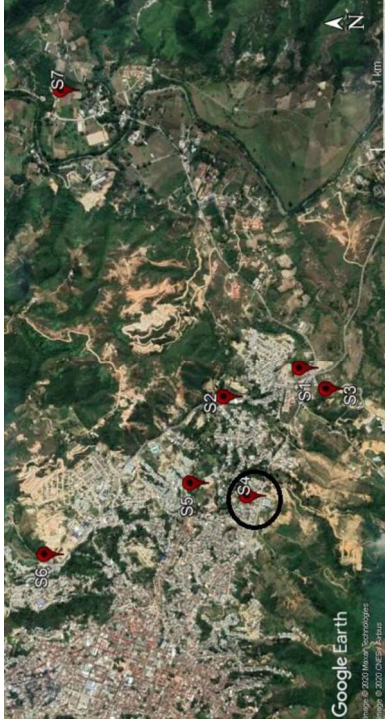


Vs30 = 388,5 m/s



Modo Fundamental

Localización



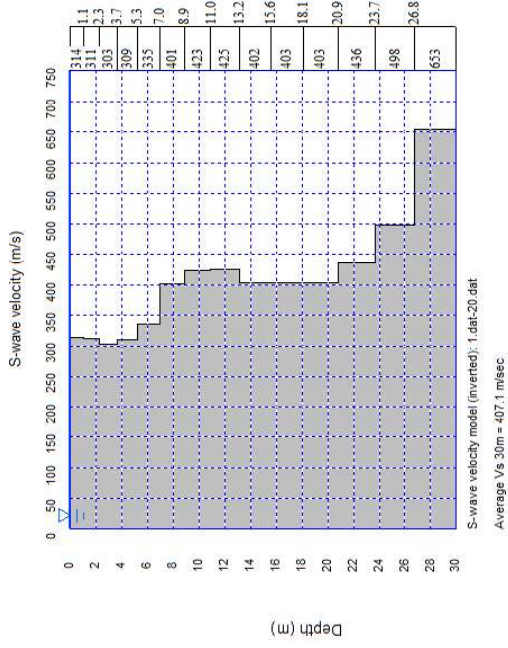
Lugar: Sol y Sombra  
Línea # 3

Observación Topografía plana  
Altitud: 1237 m.s.n.m  
Coordenadas: E1080815, N1401548  
Formación: Algodonal (Tpa)

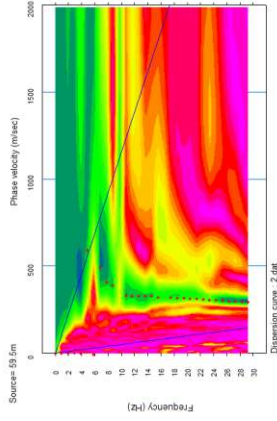


Figura 39. Perfil de velocidad de onda cortante por MASW en la línea 3 de Sol y Sombra. Autores. (2020).

### Perfil de Velocidad de Onda Cortante MASW

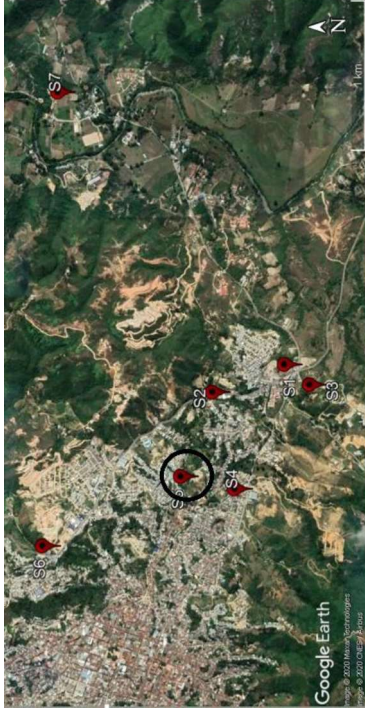


$V_{s30} = 407,1 \text{ m/s}$



### Modo Fundamental

### Localización



Lugar: Cuesta Blanca  
Línea # 2

Observación Topografía plana

Altitud: 1235 m.s.n.m

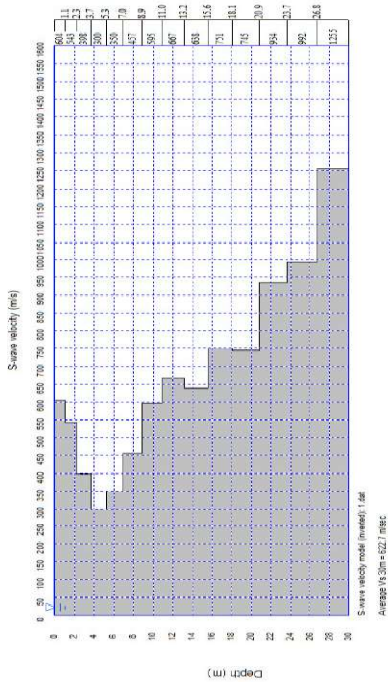
Coordenadas: E1080915,  
N1401961

Formación: Algodonal (Tpa)

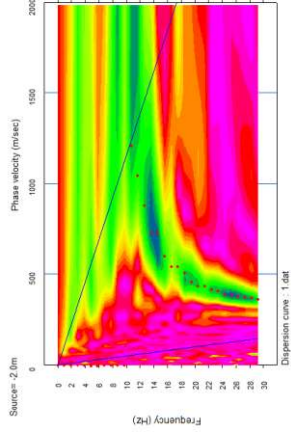


Figura 40. Perfil de velocidad de onda cortante por MASW de la línea 2 de Cuesta Blanca. Autores. (2020).

### Perfil de Velocidad de Onda Cortante MASW

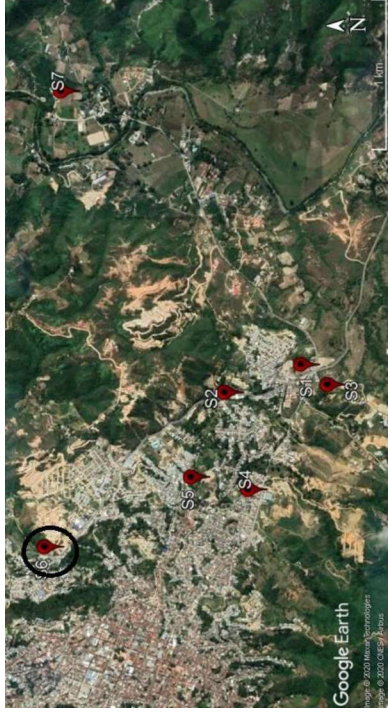


$V_{s30} = 622,7 \text{ m/s}$



### Modo Fundamental

### Localización



Lugar: Travesías

Línea # 14

Observación Topografía plana

Altitud: 1259 m.s.n.m

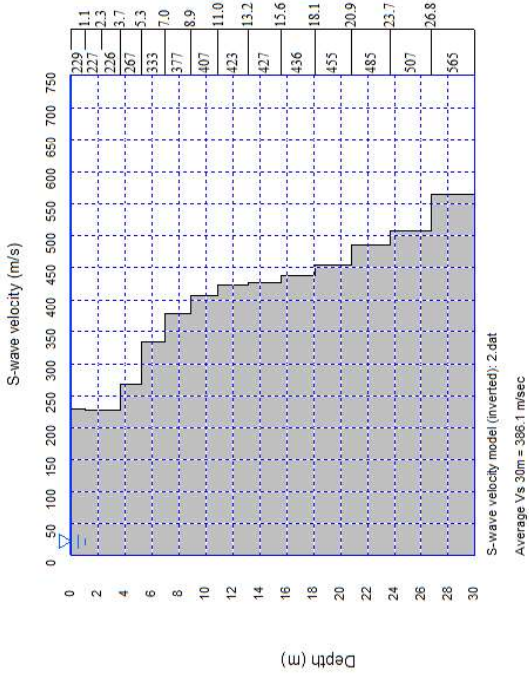
Coordenadas: E1080447,  
N01402916

Formación: Ígnea



Figura 41. Perfil de velocidad de onda cortante por MASW de la línea 14 de Travesías. Autores. (2020).

### Perfil de Velocidad de Onda Cortante MASW



**Vs30 = 386.1 m/s**

### Localización



Lugar: UFPPO

Línea # 1

Observación Topografía plana

Altitud: 1250 m.s.n.m

Coordenadas: E1083491,

N01402767

Formación: Algodonal (Tpa)

### Modo Fundamental

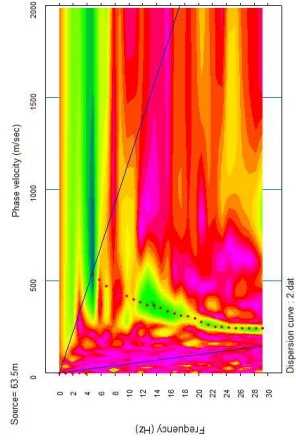


Figura 42. Perfil de velocidad de onda cortante por MASW de la línea de la sede El Algodonal de la UFPPO. Autores. (2020).

### 4.3 Comparar los resultados obtenidos de la velocidad de onda cortante por método pasivo ReMi y los valores de velocidad de onda cortante por método geofísico activo MASW.

En la Tabla 4, se muestran los valores de Vs30 de las líneas de estudios realizadas en los diferentes sitios separados por la formación geológica correspondiente. Para cada una de ellas, se cuenta con 15 datos por cada método, obteniendo un valor de 30 registros por formación, de manera que fuera igual para ambas. Sin embargo, durante el procesamiento de los datos tomados en campo, se observó que la línea número dos del sitio correspondiente a Acolsure, arrojaba velocidades atípicas con picos muy altos en las gráficas de dispersión de puntos, entonces se decidió reemplazar este dato por una línea de estudio, que fue realizada en la sede El algodonal de la universidad, de manera que se mantuviera la misma cantidad de datos para cada formación geológica.

Es importante resaltar que el valor de Vs30 que se muestra en la tabla 4, es un valor **ponderado** de las velocidades de las diferentes capas en los primeros 30 metros del subsuelo.

Tabla 4

*Resumen de Valores de Vs30*

Formación	Zona	Línea	Valores de Vs (m/s)	
			ReMi	MASW
Algodonal	Sector Acolsure	1	390,2	408
		2*	395,7	578,5
		3	422,6	502,2
		4	395,3	422,8
Algodonal	Sector Libardo Alonso	1	519,4	556,8
		2	520,5	502

Tabla 4 “Continuación”

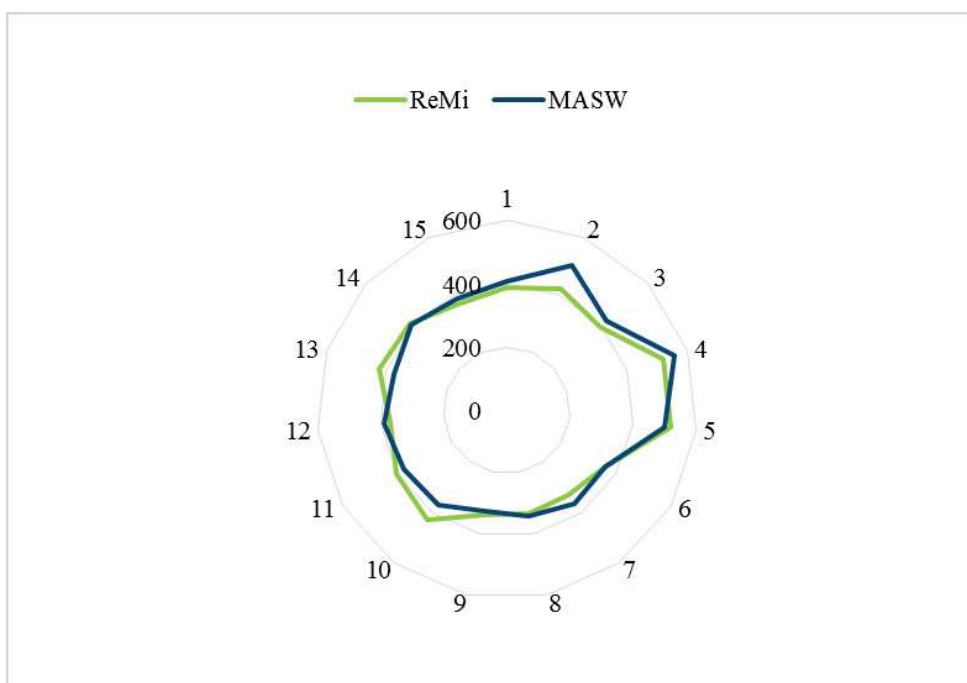
Formación	Zona	Línea	Valores de Vs (m/s)		
			ReMi	MASW	
Algodonal	Sector Vía Acceso Corregimiento Buena Vista	1	358,9	357,9	
		2	333	364	
		3	333,5	339,8	
		4	336,3	327,3	
	Sector Sol y Sombra	1	427,6	369,4	
		2	403,3	373,5	
		3	368,9	388,5	
	Sector Cuesta Blanca	1	424,3	376,5	
		2	410	407,2	
	Sector UFPSO Sede Algodonal	1	368,3	386,1	
	Ígnea	Sector Travesías	1	658,6	679,9
			2	673,1	673,5
			3	643,2	689,3
			4	660,8	615,1
			5	670,4	656,0
6			704,9	723,1	
7			764,8	747,7	
8			796,8	757,0	
9			743,5	713,1	
10			742,7	703,5	
11			695,7	700,2	
12			658,3	652,7	
13			613,8	600,1	
14			640,5	622,7	
15			659,5	610,0	

Fuente: Autores, 2020.

Nota:\*línea que se omite y se reemplaza por la línea 1 del sector UFPSO sede algodonal.

**4.3.1 Análisis estadístico:** Como parte del desarrollo del tercer objetivo, se plantea la comparación de los resultados obtenidos en campo para los métodos ReMi y MASW en los sitios ubicados en las dos formaciones geológicas de la región, que son objeto de este estudio; la formación algodonal y el Complejo Ígneo Intrusivo - Extrusivo.

Con el fin de realizar un análisis estadístico, en las figuras 43 y 44 se puede ilustrar la tendencia que tienen los valores de Vs30 del ensayo ReMi respecto al ensayo MASW en la formación algodonol, corroborando los valores de velocidad de onda cortante mostrados en los ensayos. El gráfico de tendencia mostrado en la figura 43, sobrepone los resultados obtenidos por el método ReMi y MASW, observando que existen unos picos anormales en los valores de Vs30, que podrían considerarse como datos atípicos, pero observando la tendencia en los dos métodos podemos decir que la formación Algodonal tiene variaciones entre un sitio a otro.



*Figura 43.* Gráfico de tendencia de valores de Vs30 para la formación Algodonal en m/s. Autores. (2020).

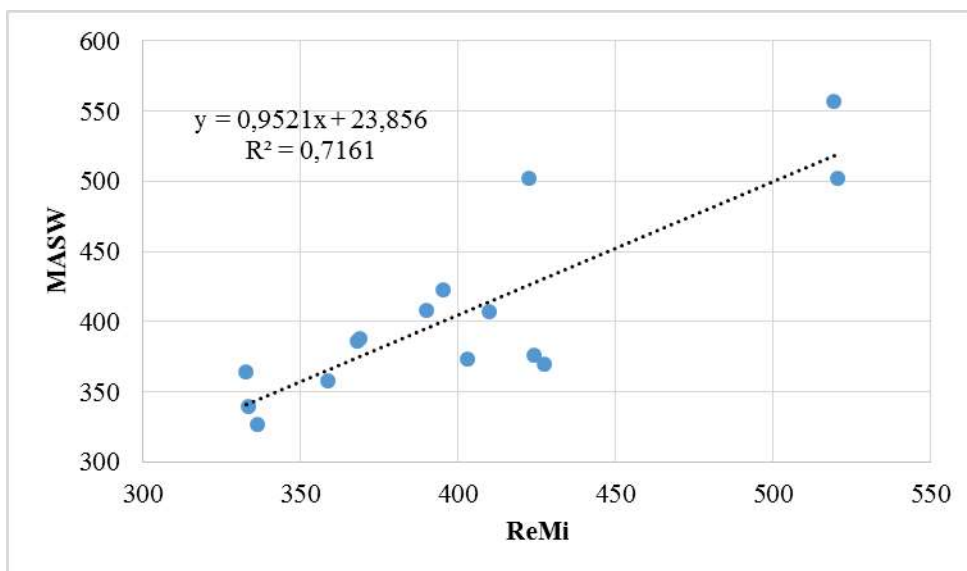


Figura 44. Gráfica de dispersión de valores de Vs30 para la formación algodonada en m/s. Autores. (2020).

Como se puede observar en la figura 44, la distribución de los valores que correlacionan los ensayos de MASW y ReMi en la formación algodonada, se encuentran descritos con la ecuación 9, la cual posee un factor de correlación de 0.7161.

$$MASW \text{ Vs30} = 0.9521(ReMi \text{ Vs30}) + 23.856 \quad (9)$$

Para la formación Ígnea, se ilustra en las figuras 45 y 46, la tendencia que tienen los valores de Vs30 del ensayo ReMi respecto al ensayo MASW, observando que siguieron la misma tendencia y no se presentan picos pronunciados como se vio en la formación Algodonal.



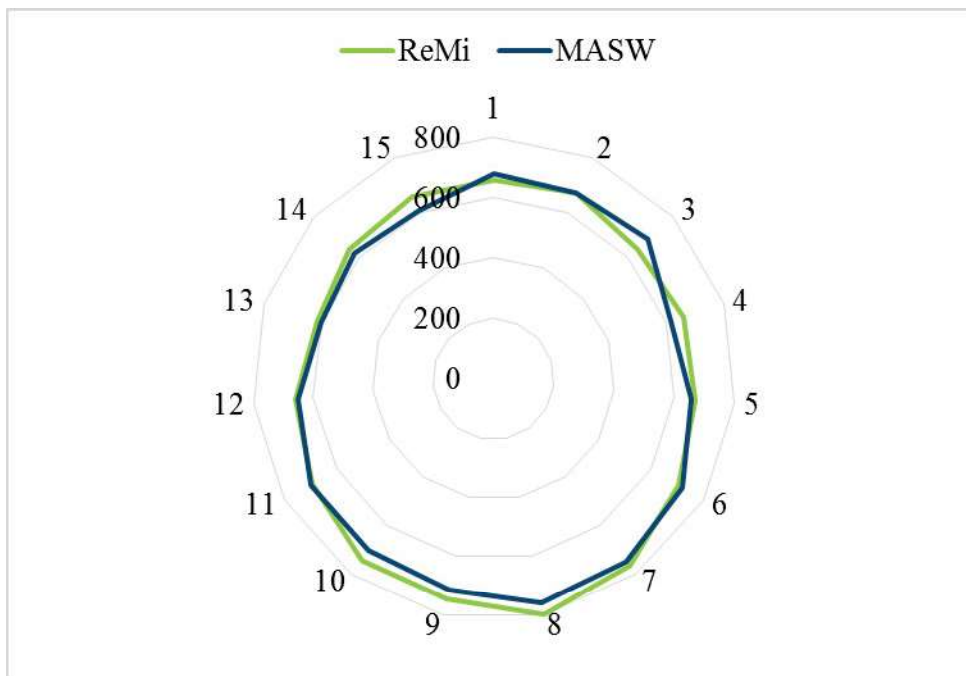


Figura 45. Gráfico radial de tendencia de ReMi hacia MASW en valores de Vs30 para la formación Ígnea en m/s. Autores. (2020).

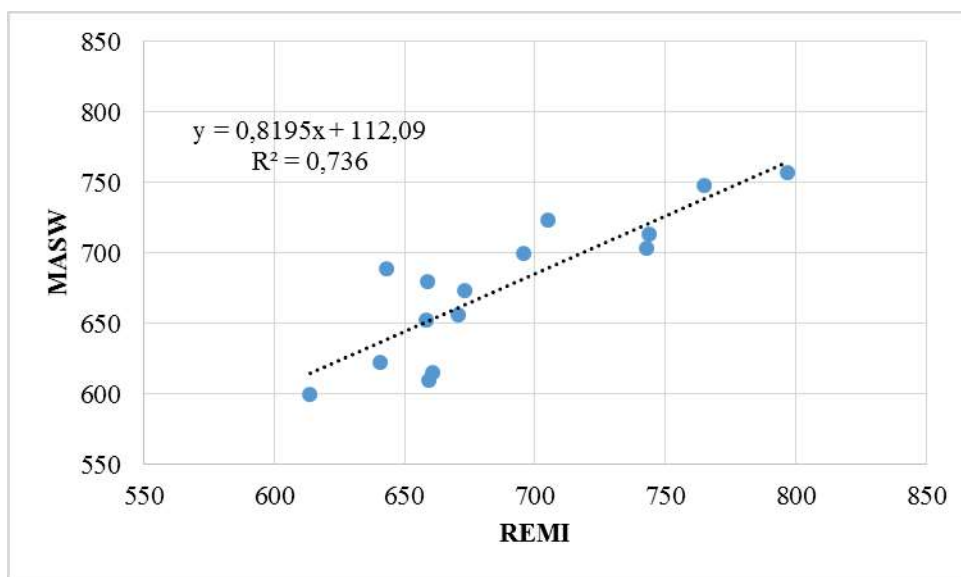


Figura 46. Gráfica de dispersión de valores de Vs30 para MASW vs ReMi para la formación Ígnea en m/s. Autores. (2020).

Como se puede observar en la figura 46, la distribución de los valores que correlacionan los ensayos de MASW y ReMi en la formación ígnea, se encuentran descritos con la ecuación 10, la cual posee un factor de correlación de 0.736

$$MASW Vs30 = 0.8195(ReMi Vs30) + 112.09 \quad (10)$$

Posteriormente, se procedió a calcular la desviación entre los métodos ReMi y MASW en ambas formaciones, observando la dispersión de los datos con respecto a la media. Debido a que los valores de ambas desviaciones no son considerablemente altos, se realizó el promedio de los valores de Vs30 para cada formación, mostrados en la tabla 5.

Tabla 5

*Valores promedio de Vs30 para la formación algodonada e ígnea*

Formación	Valores de Vs30(m/s)		Desviación (m/s)	
	ReMi	MASW	ReMi	MASW
Algodonal	401,99	404,28	57,71	66,06
Ígnea	688,44	676,26	51,93	49,60

Fuente: Autores (2020).

Con base a la Tabla 5 se realizó el promedio de las velocidades de onda cortante entre los dos métodos, obteniendo un valor representativo por cada formación, como lo muestra en la

Tabla 6.

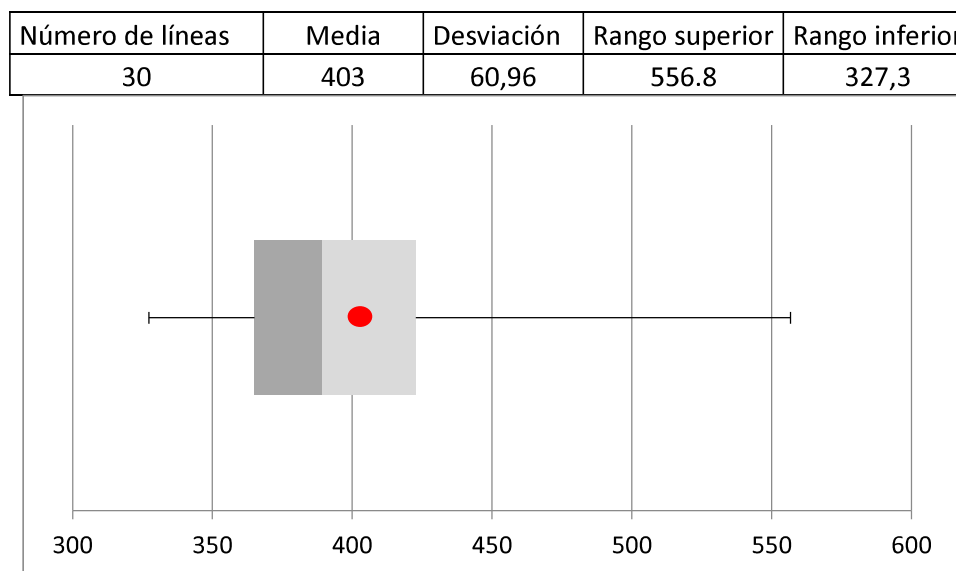
Tabla 6

*Valores de Vs30 representativos de la formación algodonada e ígnea y su desviación*

Formación	Valores de Vs30 (m/s)	Desviación (m/s)
Algodonal	403	60,96
Ígnea	682	50,28

Fuente: Autores (2020).

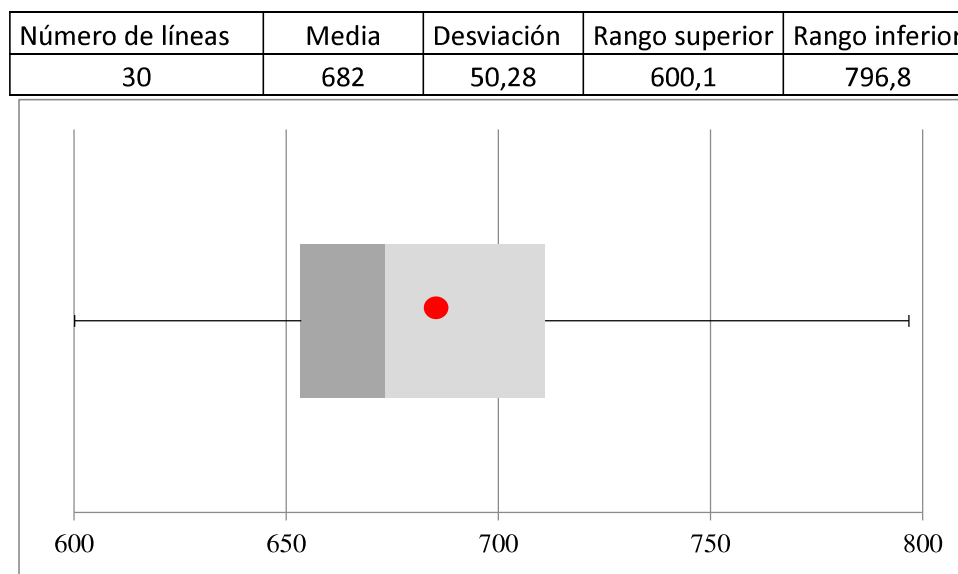
La información de ambos métodos de estudio, se representó en un diagrama de caja para observar los rangos en que la formación algodonol presenta sus velocidades y la dispersión de los valores de velocidad de onda cortante, ilustrado en la figura 47.



*Figura 47.* Diagrama de caja y bigote de los rangos de velocidades de onda cortante de la formación algodonol. Autores. (2020).

Como se observa en la gráfica el rango en la formación algodonol es igual a 229,5 m/s de lo cual se puede describir que dicho resultado representa un rango de velocidad amplio. Así mismo, la gráfica permite demostrar que la mitad de las velocidades que se encuentran por debajo de la media, correspondiente al 403 m/s indica que en la formación Algodonol se concentra una mayor velocidad de onda en el corte comprendido entre el rango 327,3 m/s - 403 m/s que entre 403 m/s - 556,8 m/s, lo que permite inferir que estos valores tienden a presentarse con mayor frecuencia en la formación Algodonol. En cuanto al tamaño de los bigotes, se aprecia que entre más grandes sean los valores de velocidad de onda cortante mayor es su dispersión.

En el caso de la formación ígnea, se ilustró el diagrama de caja en la figura 48.



*Figura 48.* Diagrama de caja y bigote de los rangos de velocidades de onda cortante de la formación ígnea. Autores. (2020).

Como se observa en la gráfica el rango en la formación Ígnea es igual a 196,7 m/s. Así mismo, la gráfica permite demostrar que la mitad de las velocidades que se encuentran por debajo de la media, correspondiente al 682 m/s indica que en la formación Ígnea concentra mayores velocidades de onda cortante en el rango 600,1 m/s - 682 m/s que los encontrados entre 600,1 m/s – 796,8 m/s, lo que permite inferir que estos valores tienden a presentarse con mayor frecuencia en la formación Ígnea. En cuanto al tamaño de los bigotes, se aprecia que el rango de velocidades es más compacto que los presentes en la formación Algodonal.

### **4.3.2 Descripción de perfil.**

#### ***4.3.2.1 Perfil de velocidad de onda cortante para la formación Algodonal: A***

continuación, a partir de la figura 49 se describen los resultados obtenidos en una de las líneas

realizadas sobre la formación Algodonal (Línea 2 del Sector de Cuesta Blanca). Ésta línea se tomó como referencia, considerando que posee el perfil con valores más cercanos a la media del Vs30 para esta formación.

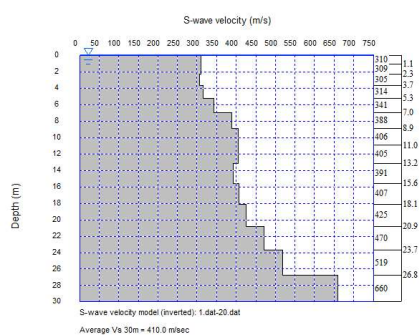
---

Línea # 2

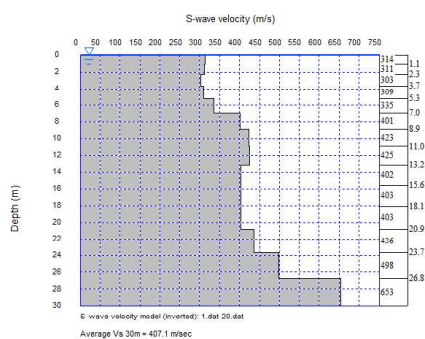
Lugar: Sector Cuesta Blanca

---

ReMi



MASW

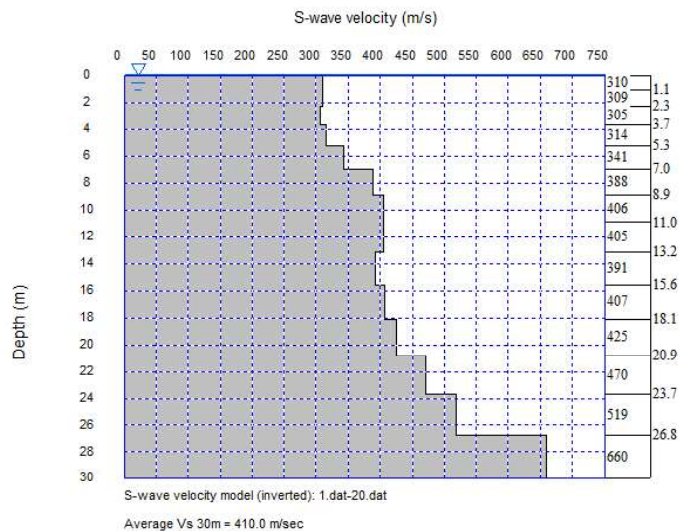


$V_{s30} = 410,0 \text{ m/s}$

$V_{s30} = 407,1 \text{ m/s}$

*Figura 49.* Análisis de velocidad de onda cortante de un perfil en la formación Algodonal. Autores. (2020).

Dada la calidad de los resultados de los perfiles mostrados anteriormente se procede a realizar la descripción de dicho perfil a partir del ensayo ReMi, puesto que con este ensayo se logró el registro de una mayor variación de velocidades a profundidades entre los 13,2 m a 20,9 m. Dicho esto en la figura 50, se aprecia el perfil de velocidad seleccionado.



*Figura 50.* Perfil de análisis de velocidad de onda cortante a 30 metros de profundidad correspondiente a línea 2 del sector de Cuesta Blanca. Autores. (2020).

Según el perfil, los primeros 4 metros es el mismo estrato, tiene una velocidad de 310 m/s, después hay un incremento de velocidad hasta la profundidad de 13,2 metros, donde hay una leve disminución de velocidad, y finalmente en los 15,6 metros, hay un aumento progresivo en los valores de velocidad, hasta alcanzar un valor de 660 m/s a los 30 metros de profundidad.

A partir de la figura 50 y la clasificación del tipo de suelo que establece la NSR-10 con respecto al valor de la onda cortante, vemos que, el perfil corresponde a un tipo C.

**4.3.3.2 Perfil de velocidad de onda cortante para la formación Ígnea:** Para el caso de la formación ígnea, se ha escogido el perfil de velocidad obtenido por el método MASW (Línea 2 del sitio Travesías, ver figura 51). Se seleccionó este método debido que las microtrepidaciones en el ensayo ReMi, no son amplificadas en suelos duros, como sucedería en la formación Algodonal, donde el módulo fundamental es claro y los frentes de onda Rayleigh son

perceptibles. Contrario a esto, con el método de MASW, se puede generar ondas superficiales a partir de fuentes activas, lo que facilita la identificación del módulo fundamental.

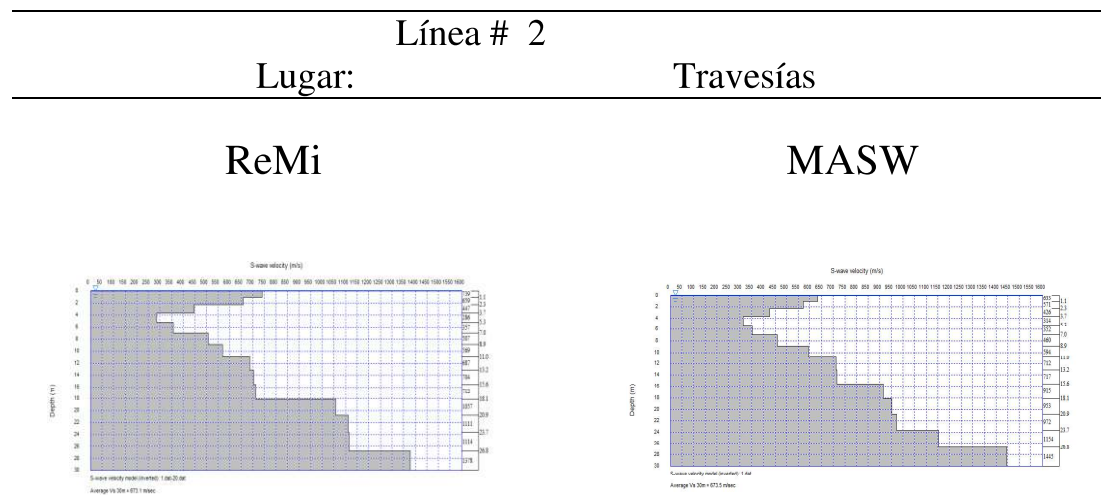
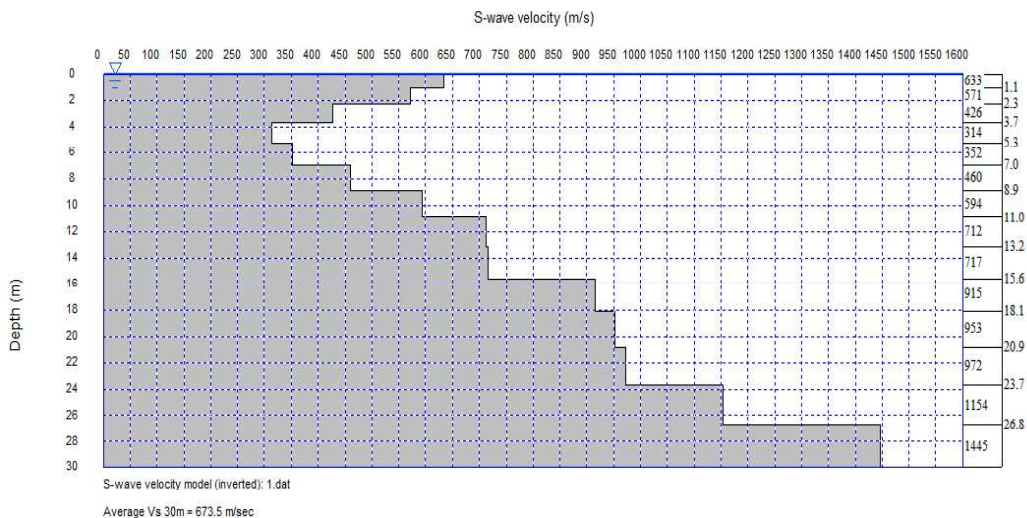


Figura 51. Análisis de velocidad de onda cortante de un perfil en la formación Ígnea. Autores. (2020).

Dada la calidad de los resultados de los perfiles mostrados anteriormente, se procede a realizar la descripción de dicho perfil a partir del ensayo MASW, puesto que con este ensayo, se logró el registro de una mayor variación de velocidades a profundidades entre los 15,6 m a 23,7 m. Dicho esto en la figura 52 se aprecia el perfil de velocidad escogido.



*Figura 52.* Perfil de análisis de velocidad de onda cortante a 30 metros de profundidad correspondiente a línea 2 del sector Travesías. Autores. (2020).

En la figura se puede apreciar una tendencia que se presentó en los diferentes perfiles de la formación ígnea, tanto en los ensayos de ReMi como MASW, la cual consiste en una disminución de la velocidad en los primeros metros de profundidad, esta inversión que se muestra en el perfil de Vs entre 0.0 m y 4.0 m puede estar atribuido a la compactación de los materiales que se tiene en superficie, debido a la maquinaria que se transitó sobre estos materiales durante el proceso de realización del movimiento de tierra que se efectuó en la zona de realización de los ensayos, además; de otras cargas transitorias que se han tenido sobre estos materiales.

Además, se nota la diferencia entre las dos formaciones debido a que en la roca ígnea muestra aumentos progresivos en la velocidad después de los 4 metros y no hay variaciones de capas más débiles, a medida que se profundiza, como en ocasiones sucede en la formación Algodonal. En este sentido, Alvarez, Garnica, & Pérez S (2003), afirman que “algunos materiales geológicos debido a la presión litostática, se compactan a mayores profundidades, lo



cual se traduce en un aumento progresivo de la rigidez y, por ende, un aumento de la velocidad de propagación de las ondas elásticas” (p. 8).

Respecto al Vs30 correspondiente a la formación ígnea en la línea analizada, este tiene un valor de 673,5 m/s, el cual permite clasificar el perfil de suelo como un tipo C, que corresponde a un suelo muy denso o roca blanda según la descripción que plantea la NSR-10. Se puede apreciar que hasta los 18,1 metros se encuentra la roca competente, lo que indica la presencia de roca meteorizada en los primeros 11,9 metros de profundidad.

En la Tabla 7 se realiza el análisis de la variación de la velocidad (Vs) aumentando cada 5 metros la profundidad.

Tabla 7

*Velocidades de onda cortante a diferentes profundidades en la línea 2 de Travesías*

Vs 5	Vs 10	Vs 15	Vs 20	Vs 25	Vs 30
412	406	482	544	590	673

Fuente: Autores (2020).

Respecto a la variación de la velocidad de onda cortante con respecto a la profundidad, se puede apreciar que los rangos de variación sitúan al perfil del suelo como un tipo C desde la superficie, lo cual indica que el diseño de cimentaciones de estructuras que se proyecten sobre esta formación, pueden realizarse a menores profundidades que las que se requerirían en el caso de la formación algodonada.

#### 4.4 Limitantes

Dentro de los aspectos limitantes que se tuvieron en el desarrollo del proyecto, se encuentra principalmente la falta de lugares que tuvieran una extensión longitudinal mayor a 60 metros que es la longitud recomendada para obtener los 30 metros de profundidad de acuerdo al método MASW, esto hizo que los ensayos quedaran condicionados a una extensión de 57,5 metros, ya que los 60 metros distribuidos uniformemente en los 24 geófonos dan separaciones de 2,61 metros, la cual se redujo a 2,5 metros por comodidad en campo y por no ingresar decimales al software en el procesamiento.

Para la verificación de los perfiles de velocidad fue un limitante, ya que en la ciudad no se cuenta con estudios que incluyan resultados de perforaciones de hasta 30 m de profundidad en los sectores donde se desarrollaron los ensayos ReMi y MASW, para que se pueda corroborar la tipología de materiales definidos en los perfiles de velocidad de onda cortante.

A partir de los resultados obtenidos, se observó que la variación de los valores de la velocidad de onda cortante calculados con el método de MASW y ReMi en su mayoría corresponden a valores similares, no obstante, en sectores como Acolsure, se apreció una variación en el valor de la velocidad de onda de hasta 80 m/s para determinadas líneas de estudio, esto se debe a las condiciones con las cuales se desarrollaron los ensayos, pues el ruido ambiental percibido en la zona era representativo, lo cual es un aspecto desfavorable para el ensayo de MASW y pudo interferir con el cálculo del perfil de velocidad.

## Capítulo 5. Conclusiones

Como resultado de la recopilación de los fundamentos teóricos, se logró establecer los procedimientos y recomendaciones para la ejecución de los ensayos geofísicos de Refracción por micro tremores (ReMi) y MASW 1D, determinando los valores de la velocidad de onda cortante para la formación algodonal y la formación ígnea, en siete sitios diferentes escogidos previamente por su condición geométrica y su capacidad para desarrollar los ensayos de campo.

Con la información obtenida de los diferentes ensayos realizados en la ciudad de Ocaña, mediante los métodos geofísicos planteados, se lograron establecer los perfiles de velocidad de onda cortante que se encuentran en diferentes zonas de la ciudad. Basados en los datos recopilados en el análisis estadístico, se logró determinar el valor predominante de velocidad de onda cortante a 30 metros de profundidad en la formación Algodonal, percibiendo que los valores del método ReMi están entre los 333 m/s a 520,5 m/s. Para el caso del método de MASW, encontramos valores entre los 327,3 m/s a 556,8 m/s en dicha formación geológica. Respecto al valor promedio a nivel general de toda la formación algodonal, su media está en 403,13 m/s.

Así mismo, mediante los perfiles establecidos de velocidad de onda cortante sobre el Complejo Ígneo Intrusivo Extrusivo, los valores obtenidos en los 30 metros de profundidad para el método geofísico ReMi, posee velocidades comprendidas entre los 613 m/s a 796,8 m/s. Para el método de MASW, los datos obtenidos varían de 600,1 m/s a 757 m/s. Respecto al valor promedio que describe dicha formación geológica, su media está en 682,35 m/s.

Para los futuros diseños sismo resistente en la ciudad de Ocaña, la clasificación de perfiles de suelo debe considerarse como tipo C debido a que se encuentra entre los rangos de 360m/s y 760m/s establecidos en dicho reglamento técnico, sin embargo, haciendo un análisis detallado, encontramos que la formación algodonal después de los 21 metros de profundidad, es considerada como tipo C, puesto que en los primeros metros, las velocidades no alcanzan el rango mínimo requerido para que sea considerado como perfil tipo C. Esta afirmación es válida para los sitios que se encuentren sobre el Complejo Ígneo Intrusivo Extrusivo, donde presenta velocidades en el rango de la clasificación requerida por la NSR-10, en los treinta metros de profundidad. En el caso de la formación algodonal, no es válida para los primeros veinte metros, donde se considera que el perfil de suelo es tipo D. Por tal caso, debido a que Ocaña se encuentra en gran parte sobre esta formación, la ciudad en general posee suelos tipo D, que según la Norma Sismo-resistente, pertenecen a suelos rígidos.

De igual forma, según lo establecido en la NSR-10, para el valor obtenido sobre el Complejo Ígneo Intrusivo Extrusivo de 682.35 m/s, se considera como un perfil tipo C en la zona Sur Oriental de la ciudad de Ocaña, debido a que se encuentra entre los rangos de 360m/s y 760m/s, establecidos en dicho reglamento técnico, siendo esta descripción predominante para los 30 metros de profundidad, a diferencia de lo ocurrido en la formación algodonal.

## Capítulo 6. Recomendaciones

En el proceso de adquisición en campo mediante el ensayo ReMi es conveniente que las fuentes de ruido estén posicionadas diagonalmente a la línea en caso de considerar una geometría lineal para el desarrollo en campo, debido a que el frente de onda será captado en distintos tiempos en cada geófono, en el caso de un frente de onda que llega en sentido paralelo, no se alcanza a identificar la fuente y los módulos fundamentales se distorsionan.

En la práctica de campo, para el tendido de las diferentes líneas, ya sea para un ensayo activo o pasivo, es conveniente contar con una porra y un cincel, con el cual se podrá realizar perforaciones previas que permitan enterrar los geófonos, cuando el terreno se encuentre rígido, evitando sobreesfuerzos que puedan afectar la integridad del geófono.

Se recomienda que en la preparación previa para la disposición del equipo a ensayar, se tenga en cuenta una batería de reposición para salidas de campo que requieran doble jornada, o si hay la disposición, es recomendable usar una batería de automóvil de 12 V.

Los métodos geofísicos ReMi y MASW generan perfiles unidimensionales, obteniendo resultados más claros, cuando se realizan líneas de estudio en terrenos con pendientes bajas, siendo recomendable extender las líneas de estudios en sitios planos.

## Referencias

- Alvarez, A., Garnica, & Pérez S, A. (2003). Evaluación indirecta de los Módulos elásticos de rigidez “in situ” y la relación entre VP/Vs y el ángulo de fricción interna. *Sanfandila, Publicación Técnica*, 225. Retrieved from <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt225.pdf>
- Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica. (2010). *Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente* (Vol. Título A). Bogota, D. C.: Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica.
- Braile, L. (2006). *UP Seis an educational site for budding seismologists*. Retrieved from <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html>
- Condori, M. A. (2016). *Caracterización Estratigráfica y Microzonificación Sísmica del Distrito de Chimbote Mediante el Ensayo MASW*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA, Arequipa.
- Dal Moro, G. (2014). *Surface Wave Analysis for Near Surface Applications*. Czech Republic: Elsevier.
- Decorte, R., & Salinas, R. (1980). *GEOLOGÍA DE LAS PLANCHAS 66 MIRAFLORES Y 76 OCAÑA*. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES GEOLÓGICO-MINERAS. Bucaramanga: INGEOMINAS.
- Foti, s., G., L. C., Rix, G. J., & Strobbia, C. (2014). *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*. London: CRC Press .
- Geometrics . (2009). *SeisImager/SWTM Manual*. Windows Software for Analysis of Surface Waves.
- Giancoli, D. (2006). *Física. Principios con aplicaciones*. México D.F.: Prentice Hall, Inc. Retrieved from [http://www.fica.unsl.edu.ar/~fisica/Fisica\\_TUMI/Fisica\\_Vol.\\_01\\_-\\_6ta\\_Edicion\\_-\\_Giancoli.pdf](http://www.fica.unsl.edu.ar/~fisica/Fisica_TUMI/Fisica_Vol._01_-_6ta_Edicion_-_Giancoli.pdf)
- Hidrosan LTDA. (1993). *Estudio y Diseño del Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado de Ocaña*. Santafé de Bogotá.

- Lazcano S, S. (2012). Perfiles de velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico del suelo en el poniente de Guadalajara, Jal. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica*, AC, 3.
- López, J. M., Mejía, J. A., & Vega, N. (2008). *Aplicación del Metodos de Refracción Sísmica para la Determinación de Velocidades de Ondas P*. El Salvador.
- Louie, J. N. (2001). Faster Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth From Refraction Microtremor Arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America.*, 91(2), 347-364.
- Martinez, C. A., & Sepúlveda, J. S. (2017). Determinación de los Perfiles Parámetros Dinámicos en los Materiales que Componen la Formación Algodonal E. (*Tesis de pregrado*). Universidad Francisco de Paula Santander., Ocaña.
- Morales, C., Schmitz M., y Pullammanappalli, S. (2015). Calibración del modelo geológico - geofísico del subsuelo de Barquisimeto y Cabudare a través de métodos sísmicos y la respuesta espectral en superficie. *Rev. Boletín de Geología*. 37 (1). Obtenido de: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-02832015000100005](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-02832015000100005)
- Ñauñay, J. (2010). Dotacion real de agua potable en edificios de instituciones públicas de la ciudad de Quito, sector centro-norte, la Marriscal. Escuela Politecnica Nacional. Obtenido de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4588/1/CD-4209.pdf>
- Núñez, C. A. (2018). Caracterización de suelo mediante método de refracción de microtremores (ReMi) en Curacautín Región de la Araucanía. (*Tesis de pregrado*). Universidad de Concepción, Concepción.
- Pulido, J., & Rodriguez, M. (2015). *Caracterización del Subsuelo Utilizando el Método Geofísico de Refracción por Microtremores Remi para Segmento de la Avenida Circunvalar y Parque Central Simón Bolívar*.
- Ramirez, J., & Aldrich, L. (1977). *La Transición océano-continente en el suroeste de Colombia*. Bogotá: Editora Guadalupe Ltda.
- Sampieri, Fernández y Baptista, (2014, abril). Metodología de la investigación. Sexta edición. Obtenido de: <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Sanchez, E., & Tovar, C. (2016). Aplicación de la técnica de sísmica de refracción (Vp) y ReMi (Vs) en la ingeniería de cimentaciones. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás.

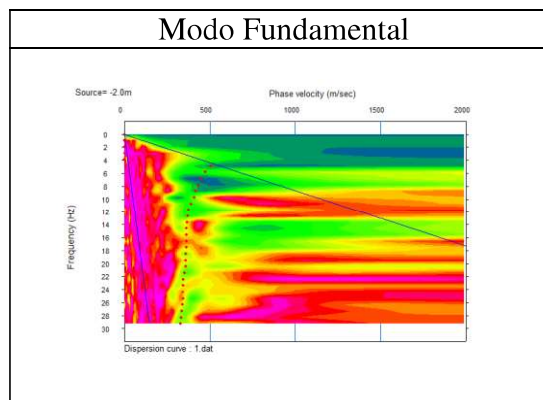
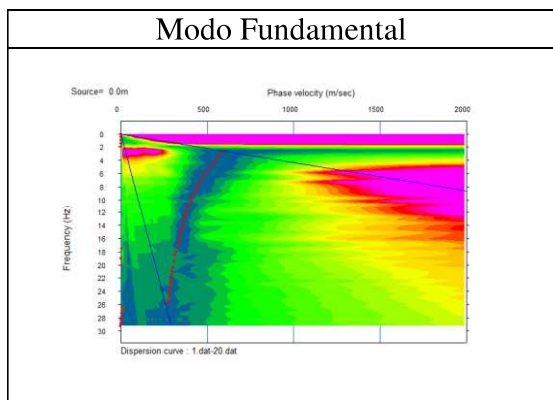
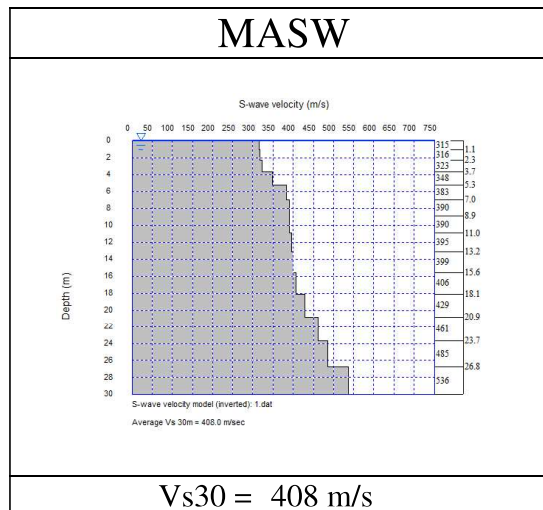
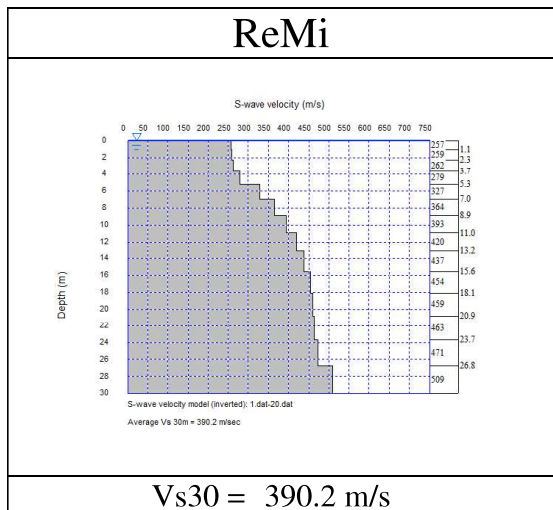
- Santisteban, I., Pérez, J., & Marín, F. (2013). Caracterización geotécnica en ciudades mediante Sísmica Pasiva (Remi). *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, (224), 60-62.
- Sheare, P. M. (2019). *Introduction To Seismology* (Tercera ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Varela, R. (2014). *MANUAL DE GEOLOGÍA*. La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina: Dr. Florencio Gilberto Aceñolaza. Obtenido de [http://www.insugeo.org.ar/libros/misc\\_21/pdf/varela\\_misclanea\\_21\\_manual\\_de\\_geologia.pdf](http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_21/pdf/varela_misclanea_21_manual_de_geologia.pdf)
- Zafra Ortero, D. (2017). *Ondas Sísmicas, su importancia para la geofísica y la humanidad*.



## **Apendice**

**Apéndice.** Figuras comparativas de velocidades de onda cortante por ReMi y MASW de las 30 líneas realizadas en la zona sur oriental.

<b>Línea # 1</b>	
<b>Lugar:</b>	<b>Acolsure</b>

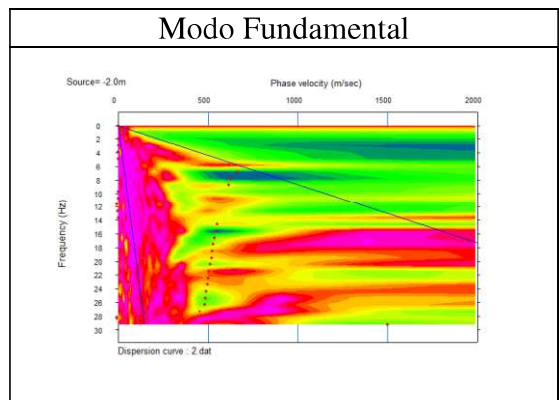
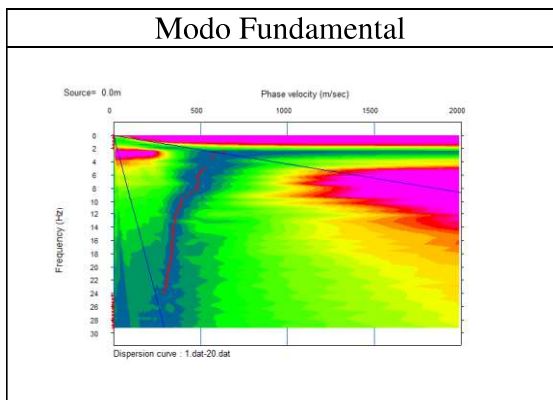
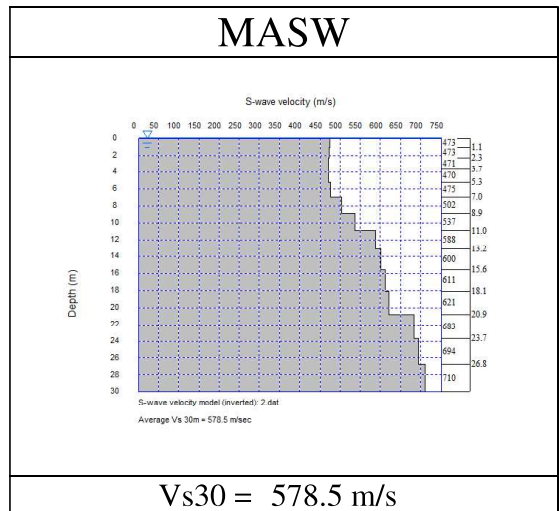
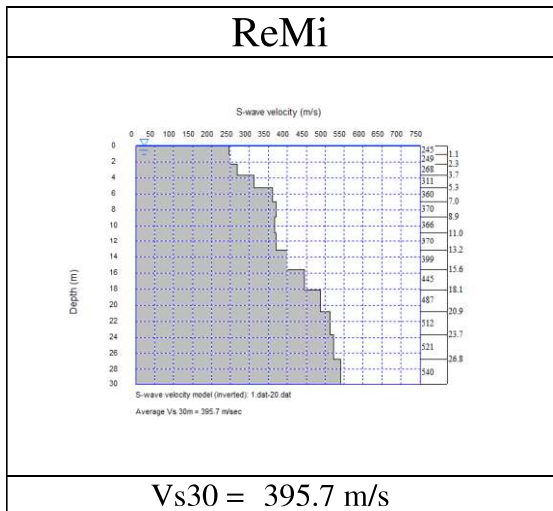


**Observación** Topografía plana  
 Altitud: 1250 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal

**Observación** Topografía plana  
 Altitud: 1250 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal

**Línea # 2**

**Lugar: Acolsure**



**Observación**      Topografía plana  
 Altitud: 1250 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal

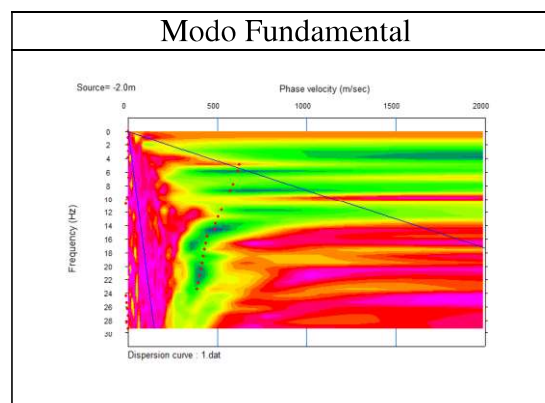
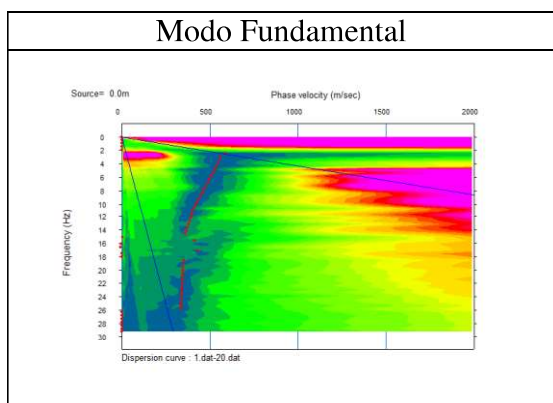
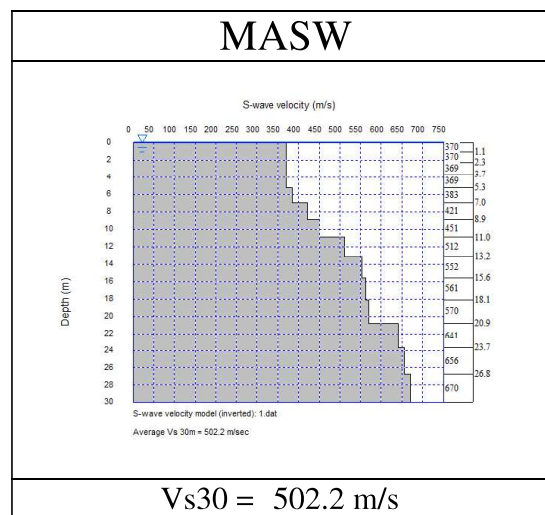
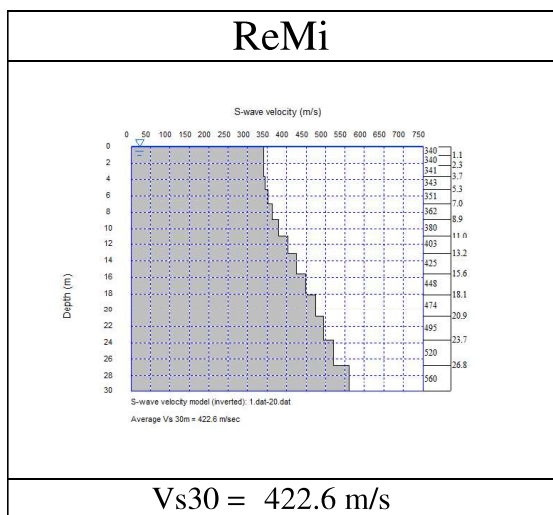
**Observación**      Topografía plana  
 Altitud: 1250 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 3**

---

**Lugar:** **Acolsure**



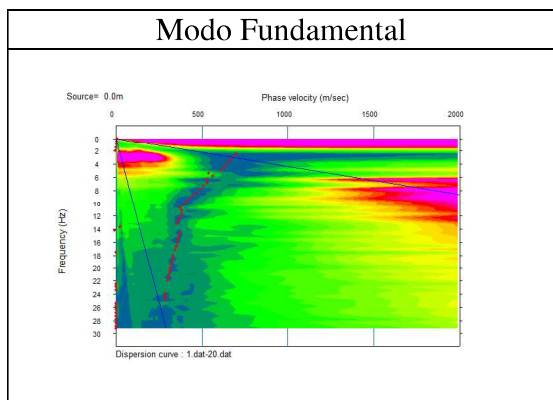
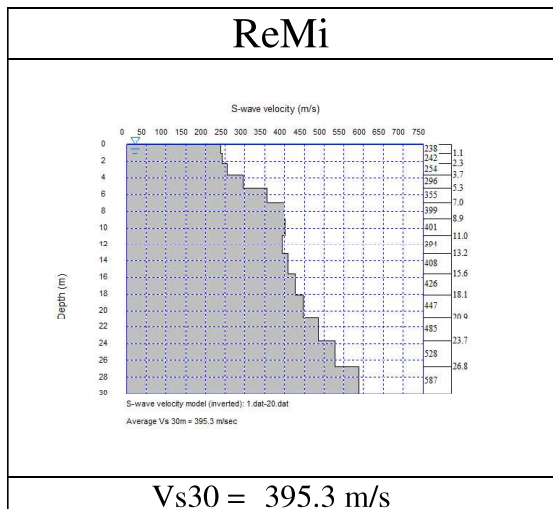
**Observación**      **Topografía plana**  
 Altitud: 1250 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal

**Observación**      **Topografía plana**  
 Altitud: 1250 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal

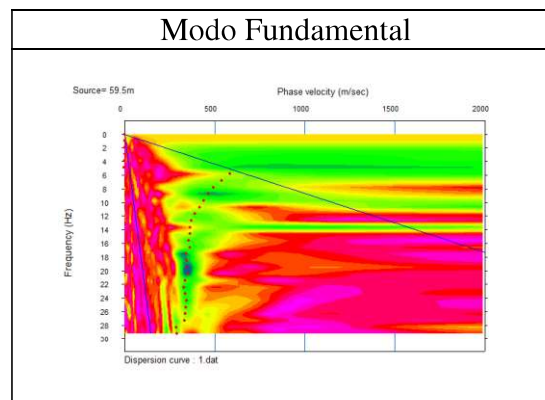
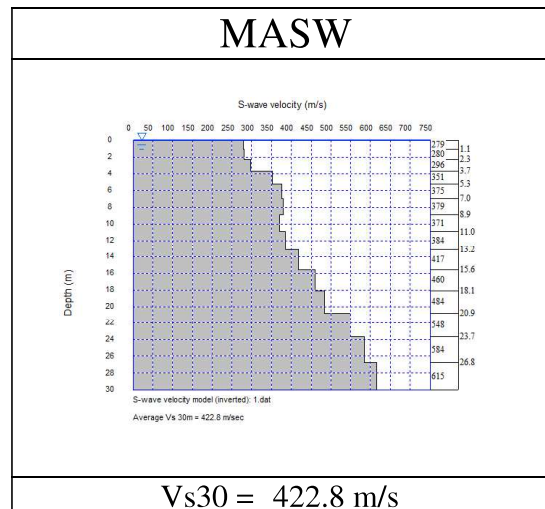
Fuete: Autores (2020).

**Línea # 4**

**Lugar: Acolsure**



Observación Topografía plana  
 Altitud: 1250 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal

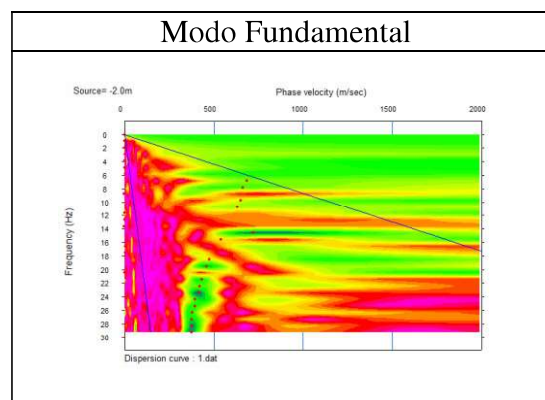
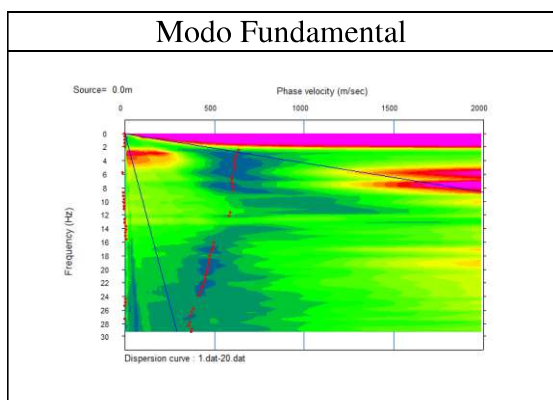
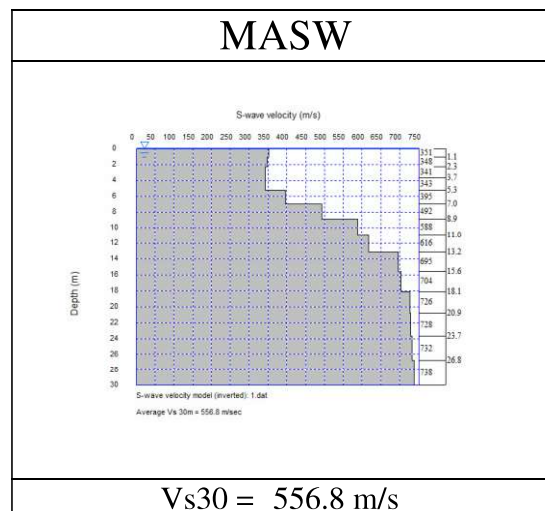
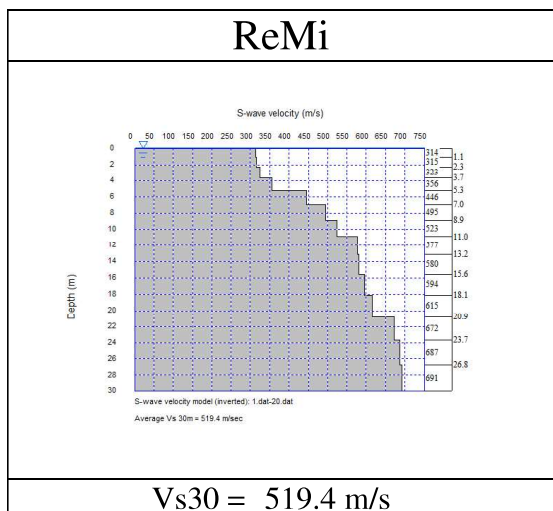


Observación Topografía plana  
 Altitud: 1250 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 1**

**Lugar:** **Libardo Alonso**



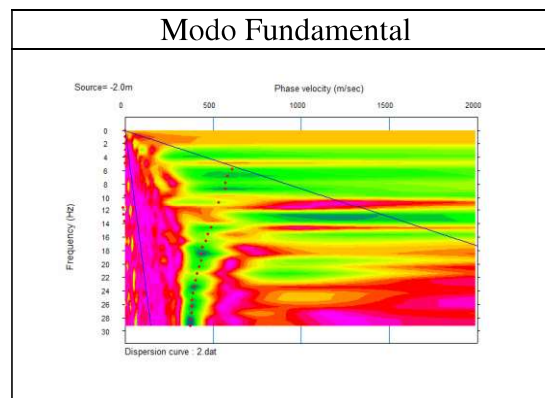
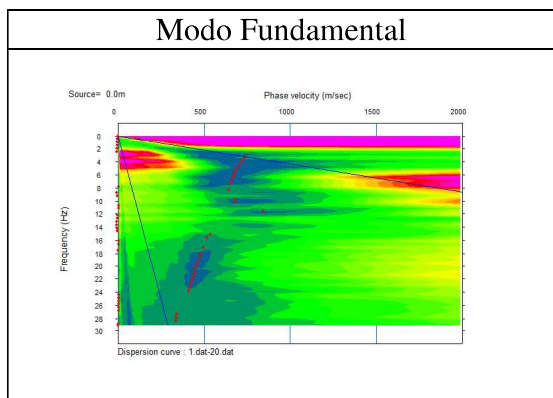
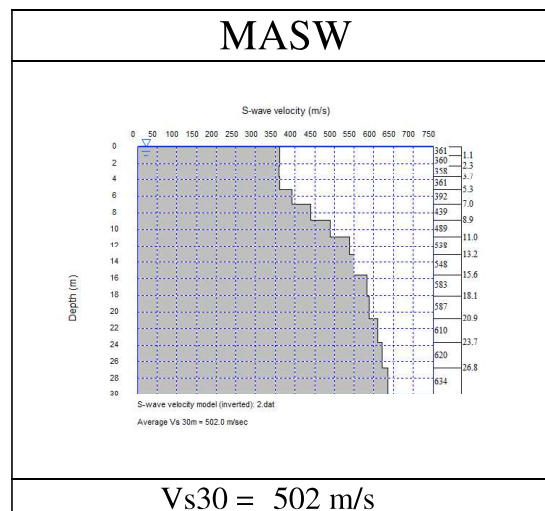
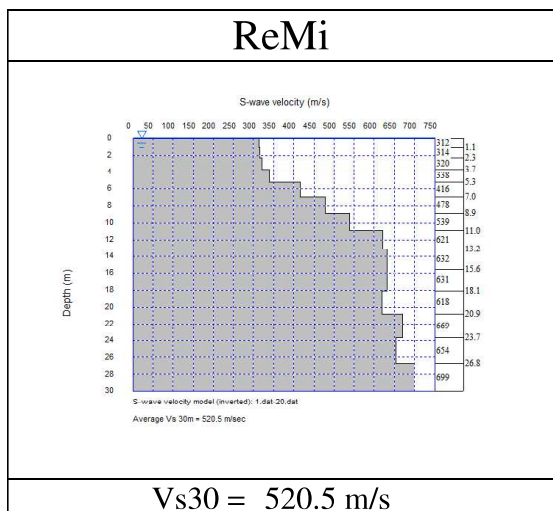
**Observación**      **Topografía plana**  
 Altitud: 1217 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081488, N1401757  
 Formación: Algodonal

**Observación**      **Topografía plana**  
 Altitud: 1217 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081488, N1401757  
 Formación: Algodonal

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 2**

**Lugar: Libardo Alonso**



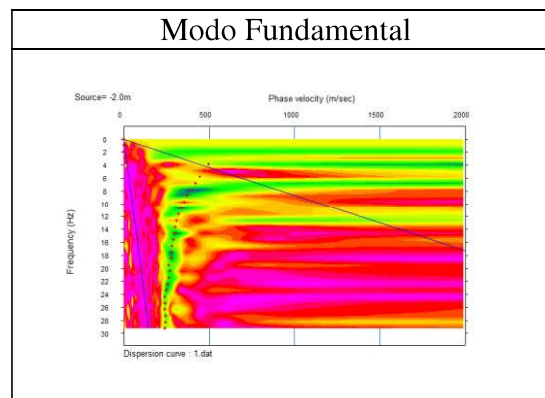
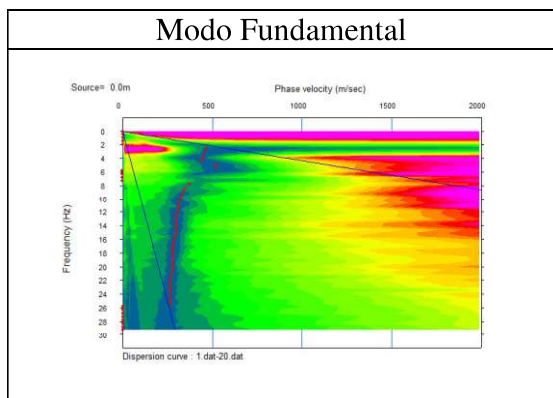
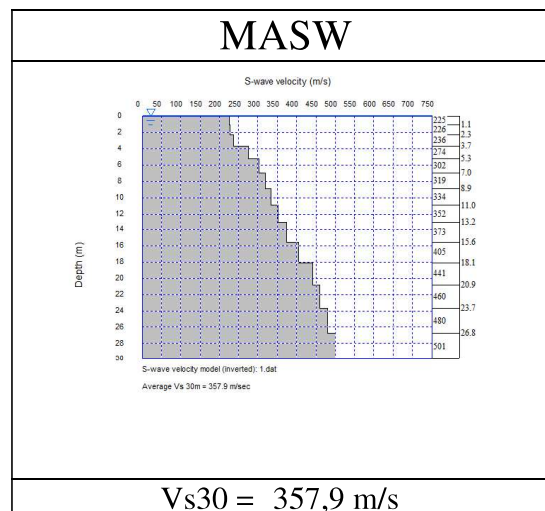
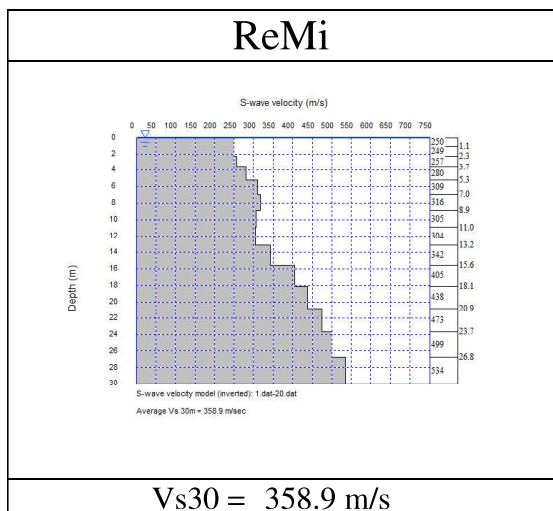
**Observación Topografía plana**  
 Altitud: 1217 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081488, N1401757  
 Formación: Algodonal

**Observación Topografía plana**  
 Altitud: 1217 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081488, N1401757  
 Formación: Algodonal

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 1**

**Lugar: Buena Vista**



**Observación Topografía plana**  
 Altitud: 1268 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal (Tpa)

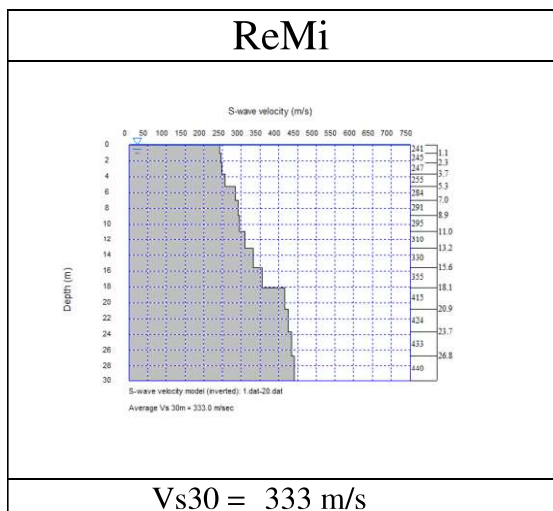
**Observación Topografía plana**  
 Altitud: 1268 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal (Tpa)

Fuete: Autores (2020).

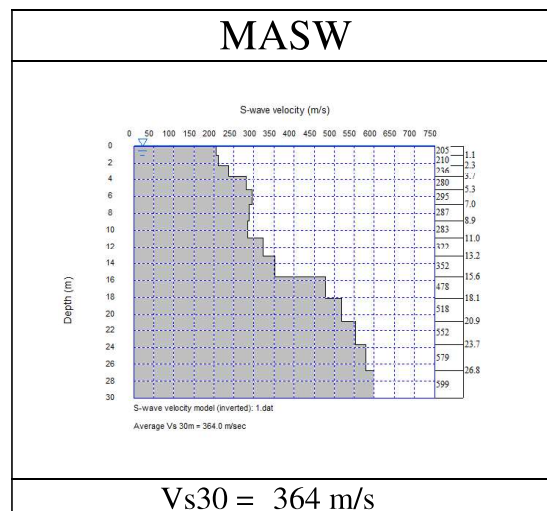


**Línea # 2**

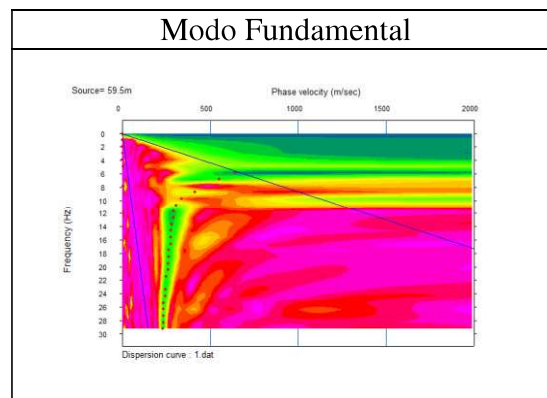
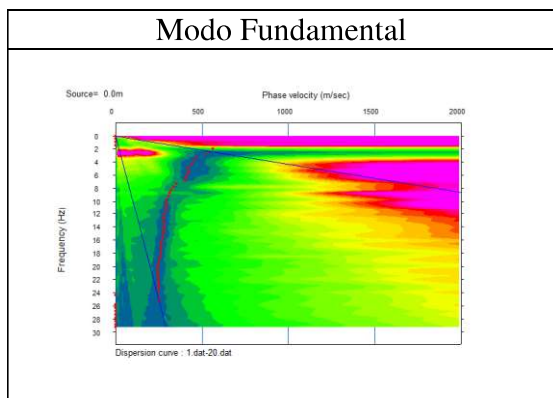
**Lugar: Buena Vista**



**$V_{s30} = 333$  m/s**



**$V_{s30} = 364$  m/s**



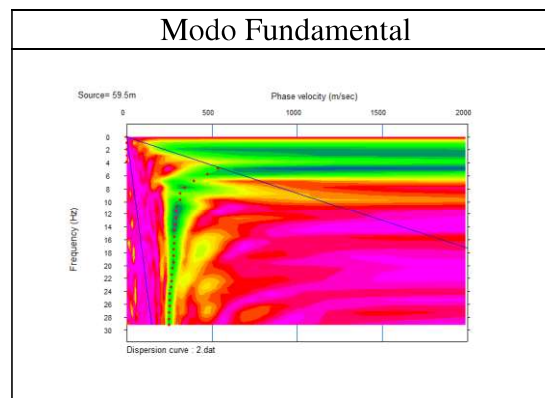
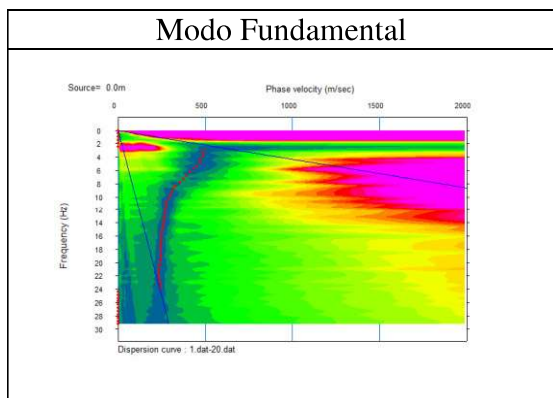
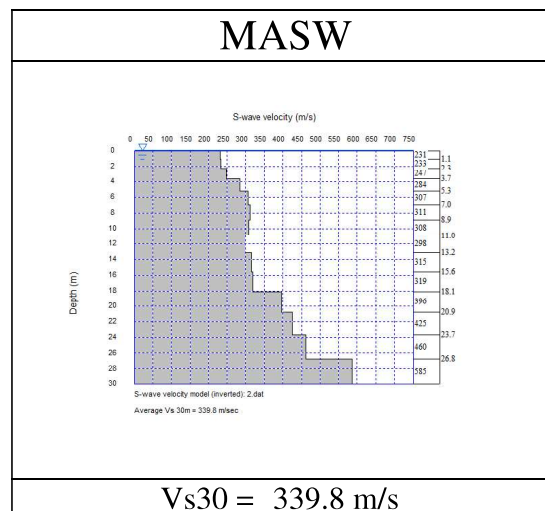
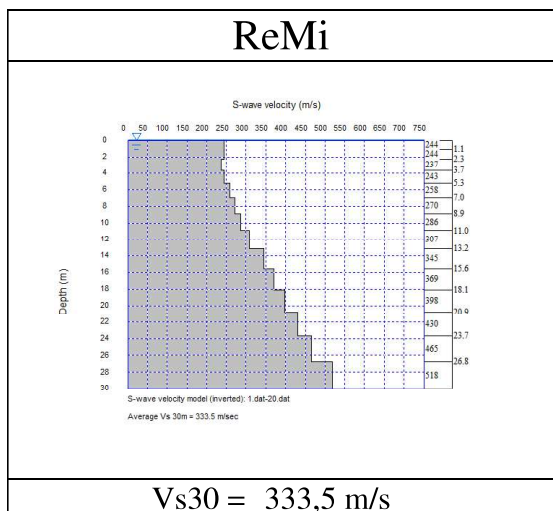
Observación      Topografía plana  
 Altitud: 1268 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal (Tpa)

Observación      Topografía plana  
 Altitud: 1268 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal (Tpa)

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 3**

**Lugar:** Buena Vista



**Observación** Topografía plana  
 Altitud: 1268 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal (Tpa)

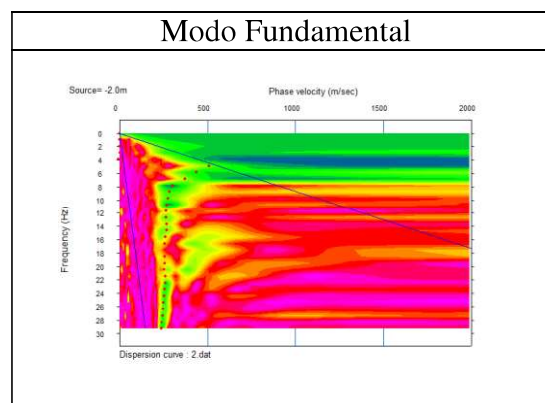
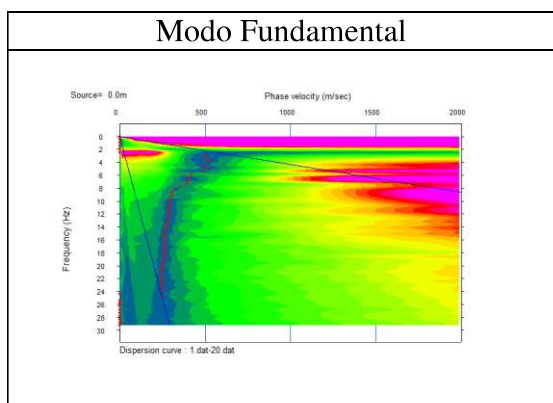
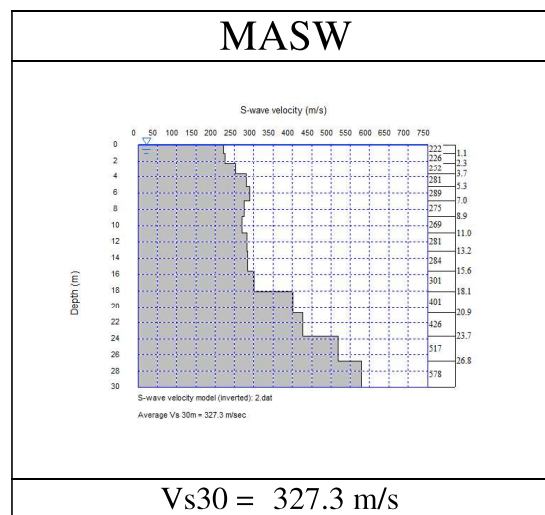
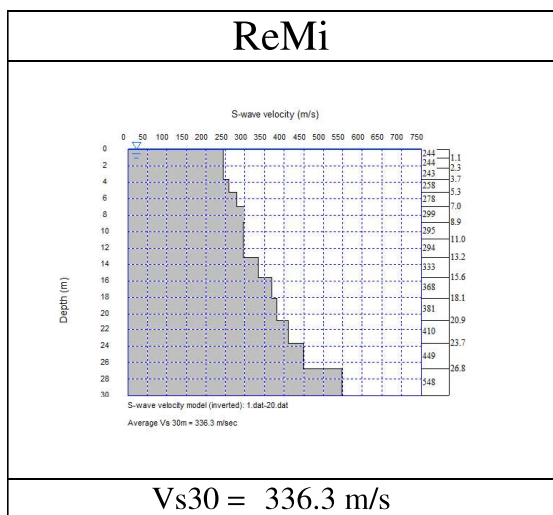
**Observación** Topografía plana  
 Altitud: 1268 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal (Tpa)

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 4**

---

**Lugar:** Buena Vista



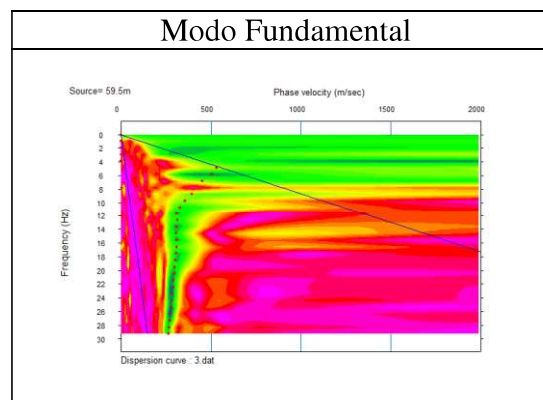
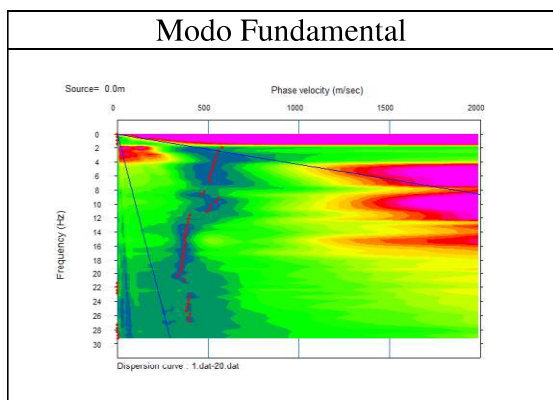
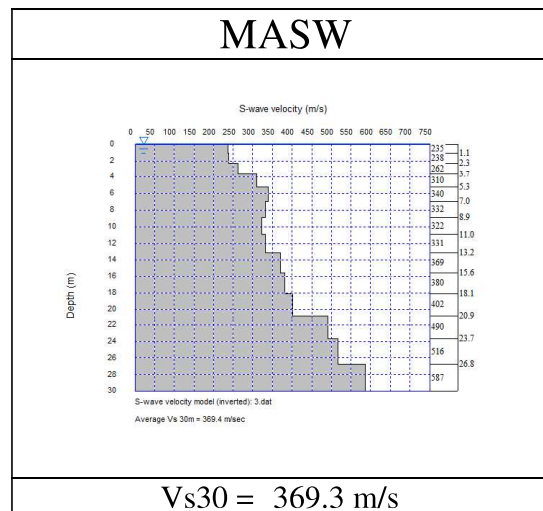
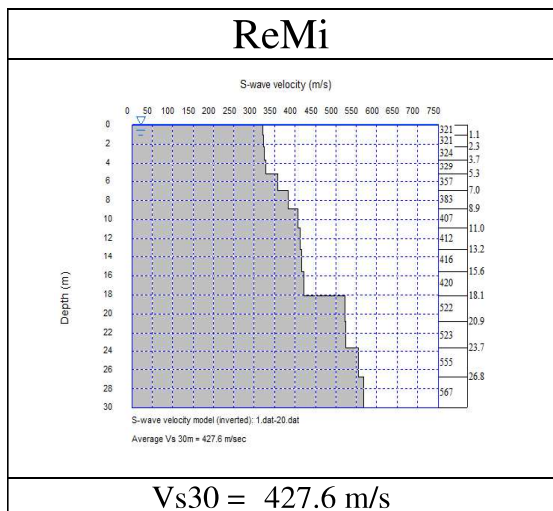
Observación Topografía plana  
 Altitud: 1268 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal (Tpa)

Observación Topografía plana  
 Altitud: 1268 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1081638, N1401251  
 Formación: Algodonal (Tpa)

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 1**

**Lugar: Sol y Sombra**



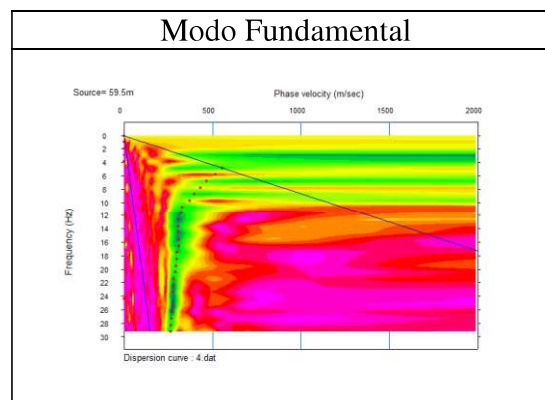
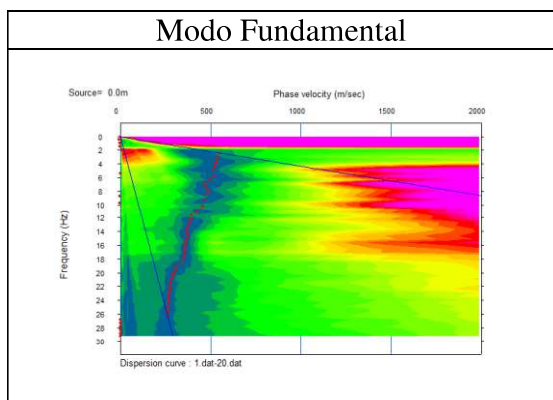
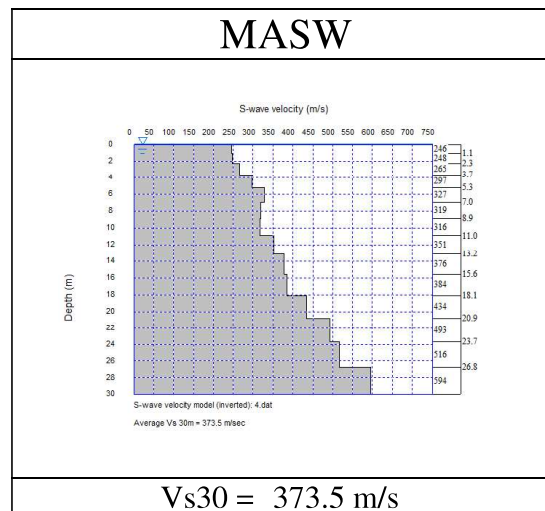
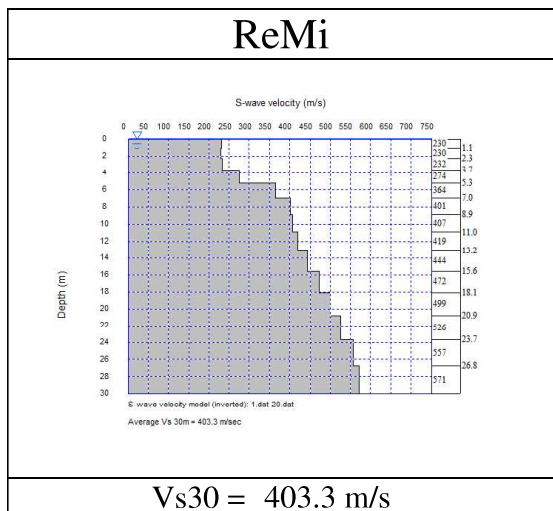
Observación Topografía plana  
 Altitud: 1237 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080815, N1401548  
 Formación: Algodonal (Tpa)

Observación Topografía plana  
 Altitud: 1237 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080815, N1401548  
 Formación: Algodonal (Tpa)

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 2**

**Lugar: Sol y Sombra**



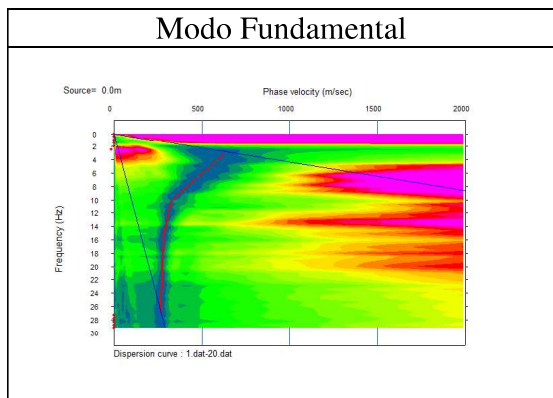
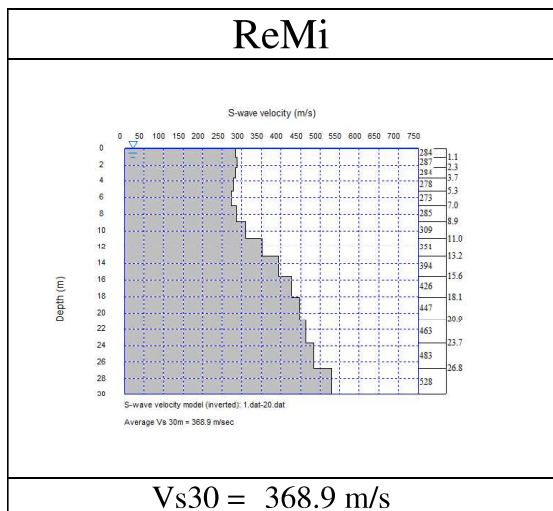
Observación Topografía plana  
 Altitud: 1237 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080815, N1401548  
 Formación: Algodonal (Tpa)

Observación Topografía plana  
 Altitud: 1237 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080815, N1401548  
 Formación: Algodonal (Tpa)

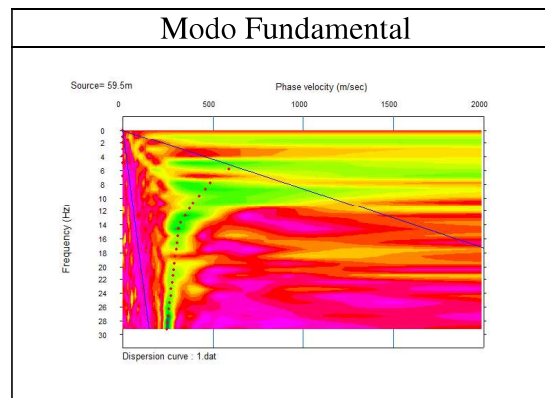
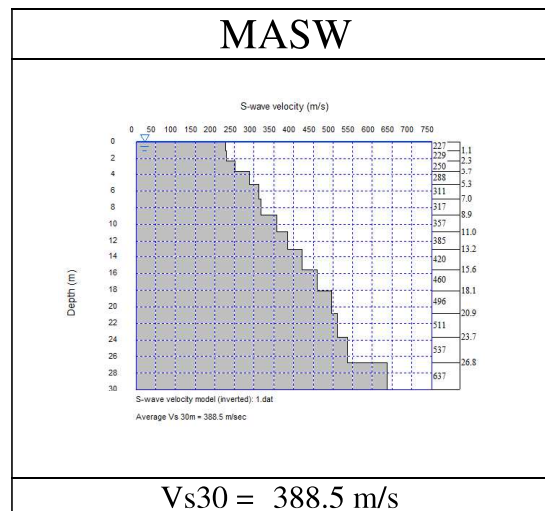
Fuete: Autores (2020).

**Línea # 3**

**Lugar: Sol y Sombra**



Observación Topografía plana  
 Altitud: 1237 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080815, N1401548  
 Formación: Algodonal (Tpa)



Observación Topografía plana  
 Altitud: 1237 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080815, N1401548  
 Formación: Algodonal (Tpa)

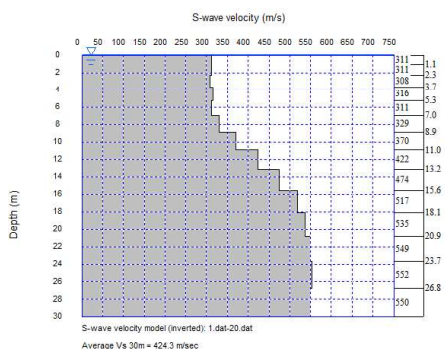
Fuete: Autores (2020).

## Línea # 1

Lugar:

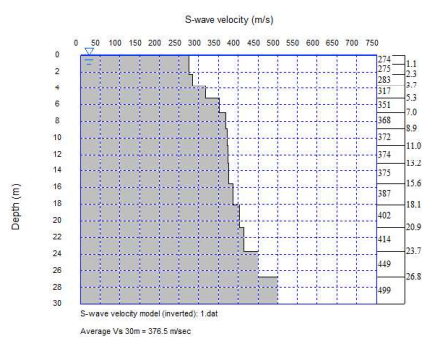
Recuerdos de Anasca

## ReMi



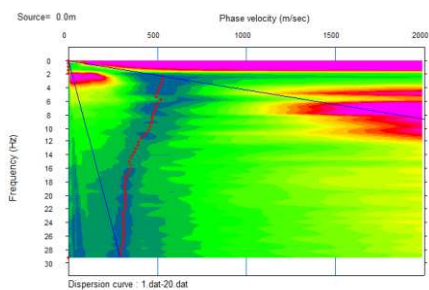
Vs30 = 424.3 m/s

## MASW

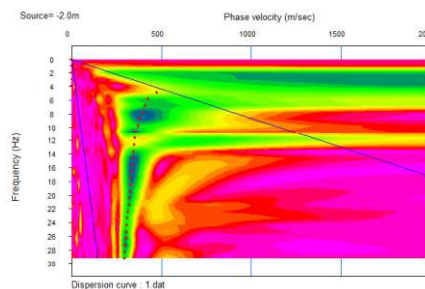


Vs30 = 376.5 m/s

## Modo Fundamental



## Modo Fundamental



## Localización



## Localización



Observación Topografía plana  
Altitud: 1235 m.s.n.m  
Coordenadas: E1080915, N1401961  
Formación: Algodonal (Tpa)

Observación Topografía plana  
Altitud: 1235 m.s.n.m  
Coordenadas: E1080915, N1401961  
Formación: Algodonal (Tpa)

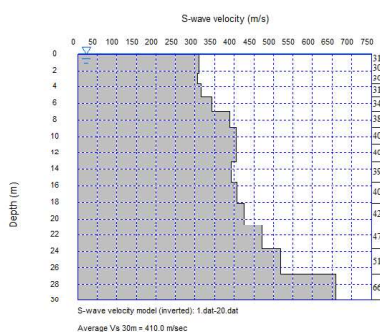
Fuete: Autores (2020).

## Línea # 2

Lugar:

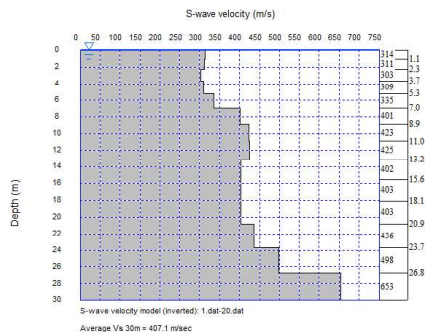
Recuerdos de Anasca

### ReMi



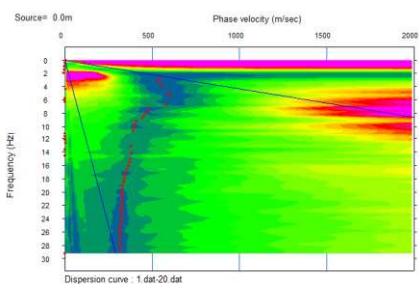
Vs30 = 410 m/s

### MASW

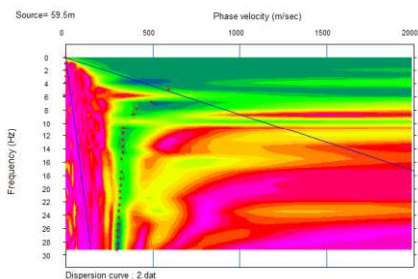


Vs30 = 407.2 m/s

### Modo Fundamental



### Modo Fundamental



### Localización



### Localización



Observación Topografía plana  
Altitud: 1235 m.s.n.m  
Coordenadas: E1080915, N1401961  
Formación: Algodonal (Tpa)

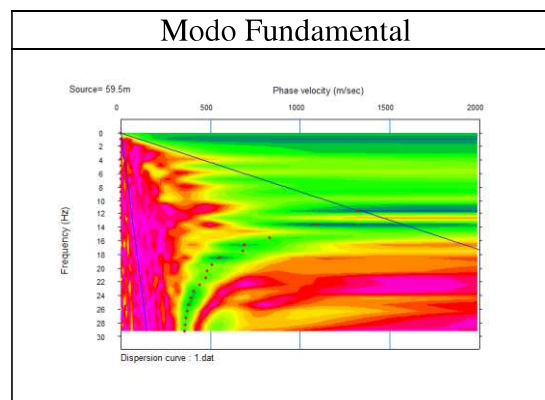
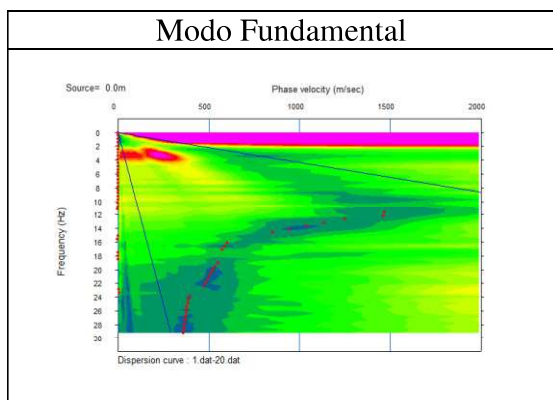
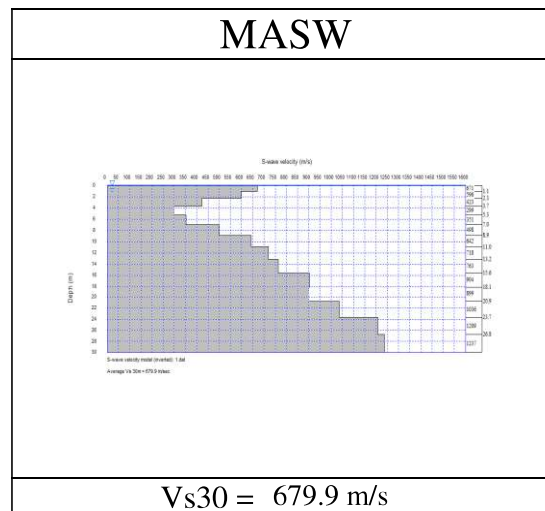
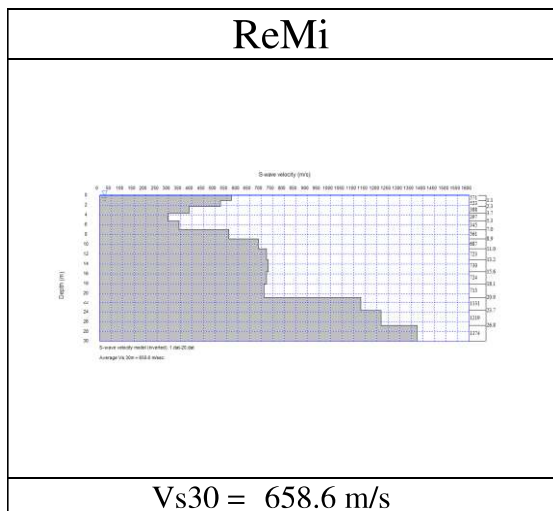
Observación Topografía plana  
Altitud: 1235 m.s.n.m  
Coordenadas: E1080915, N1401961  
Formación: Algodonal (Tpa)

Fuete: Autores (2020).



**Línea # 1**

**Lugar:** **Travesías**



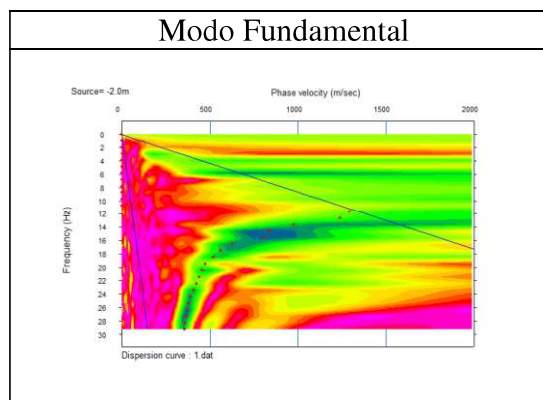
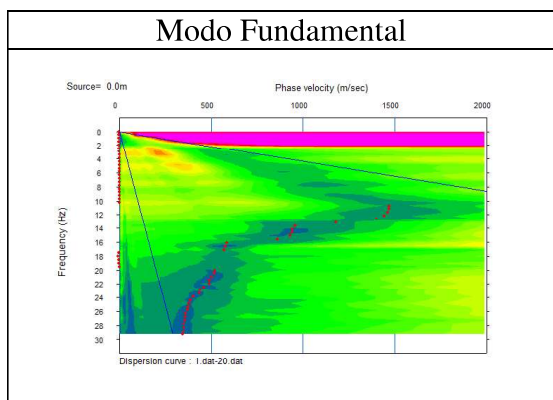
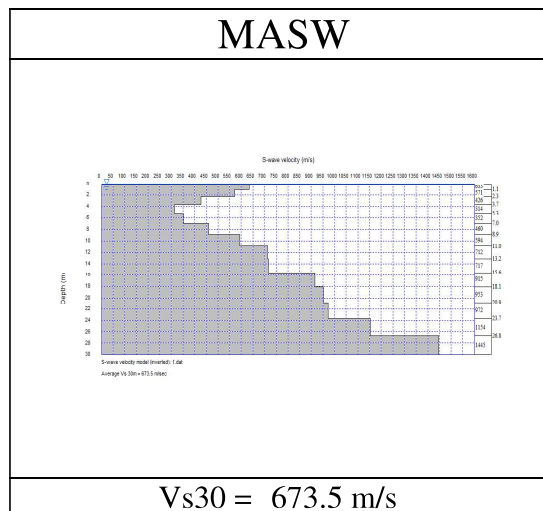
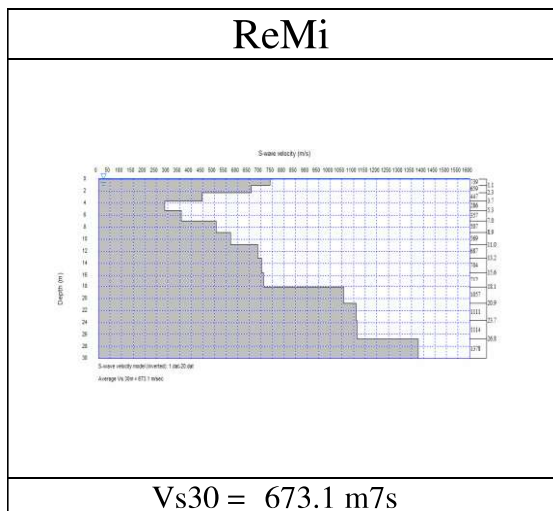
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 2**

**Lugar:** **Travesías**



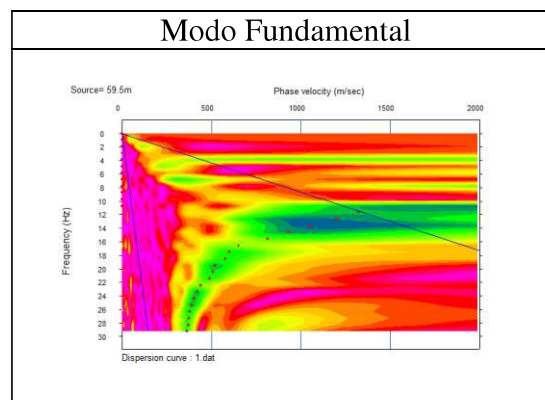
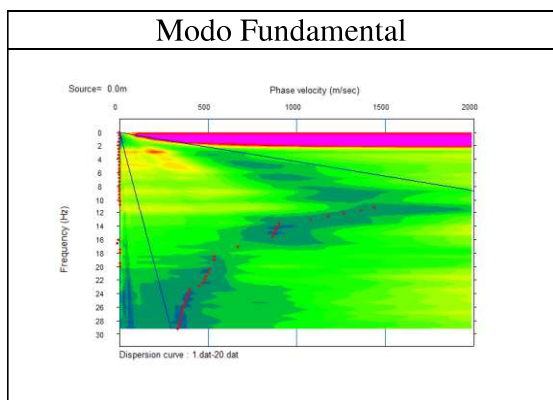
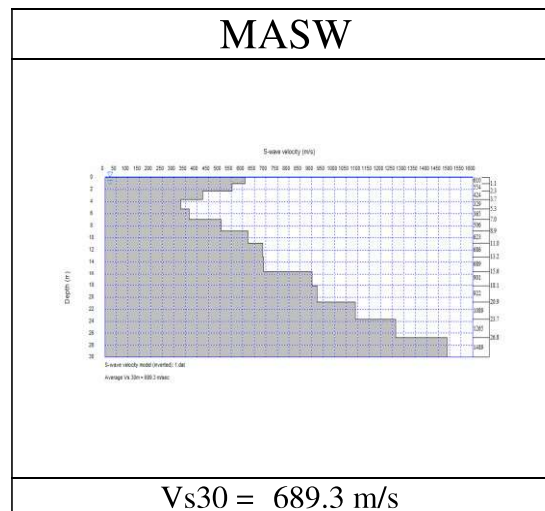
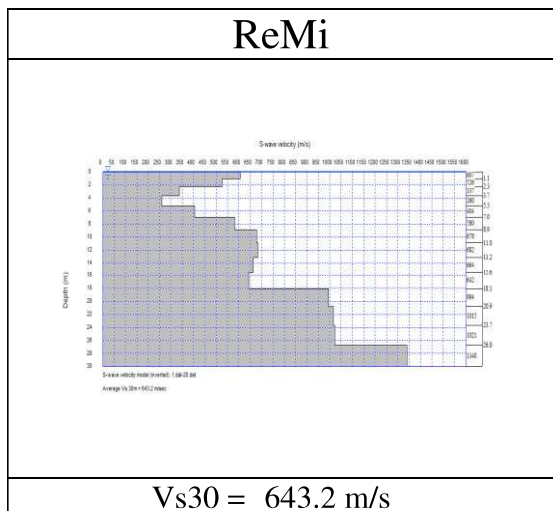
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 3**

**Lugar:** **Travesías**



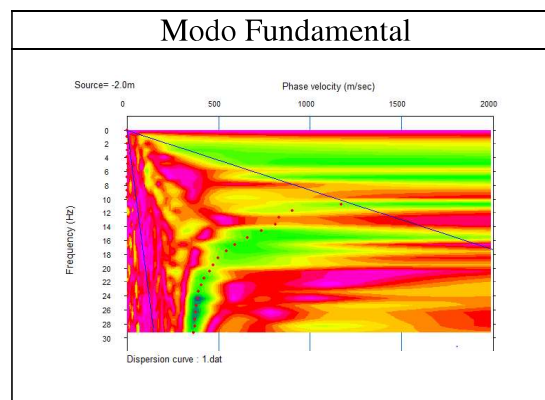
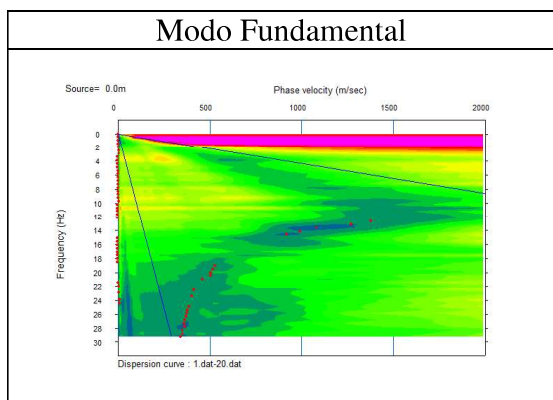
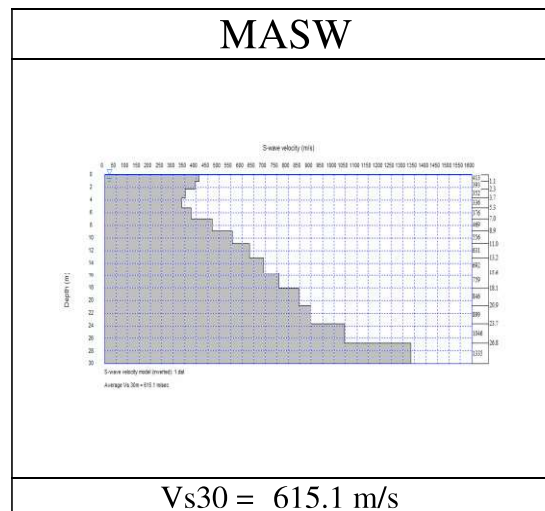
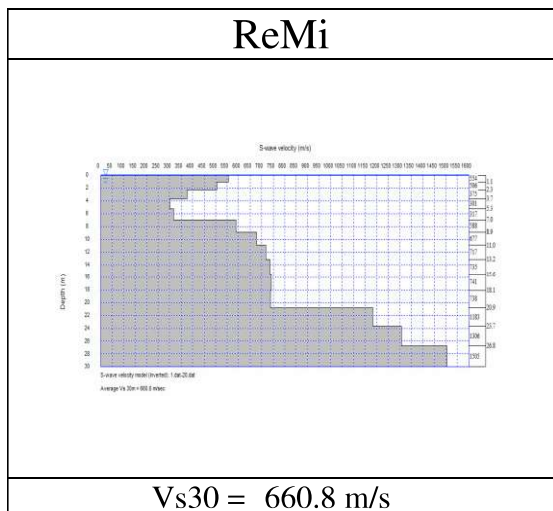
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 4**

**Lugar:** **Travesías**



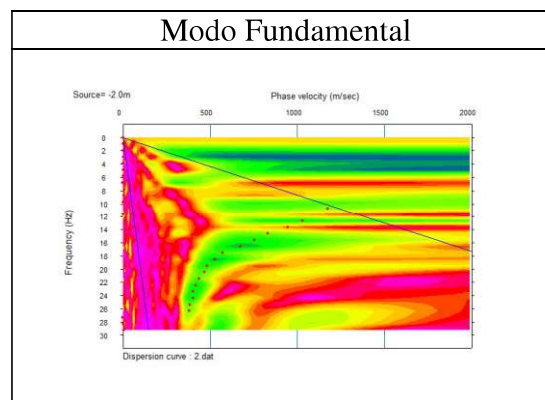
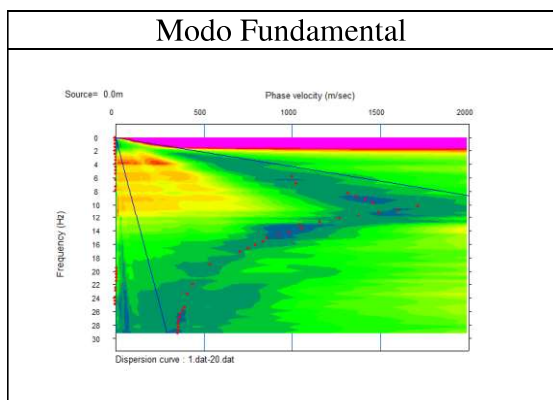
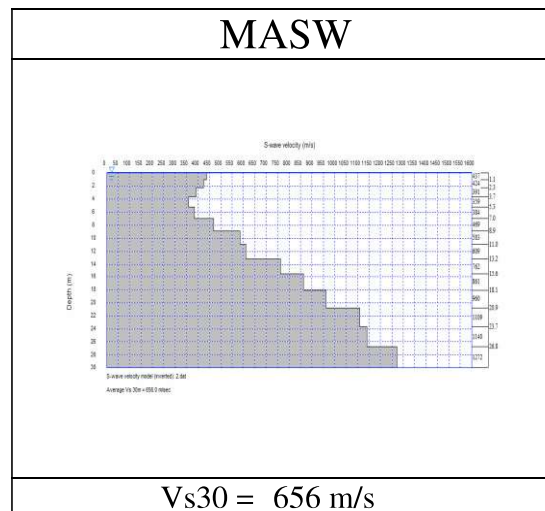
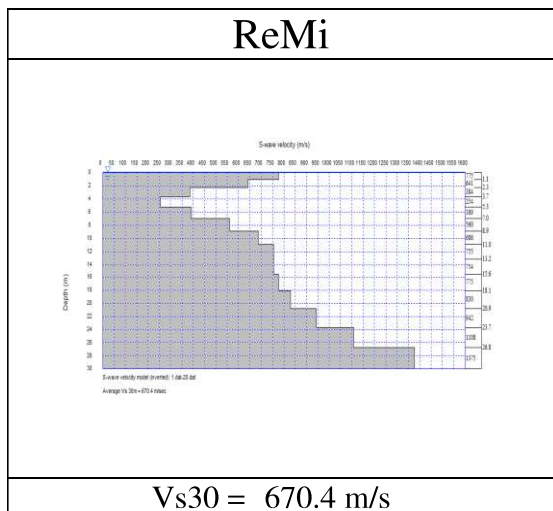
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 5**

**Lugar:** **Travesías**



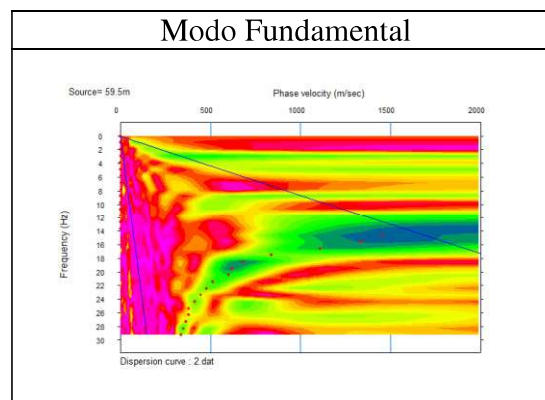
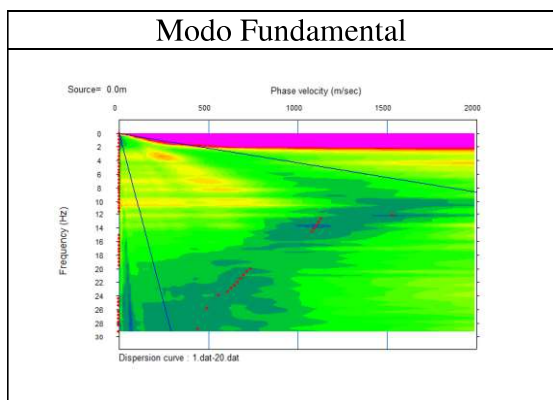
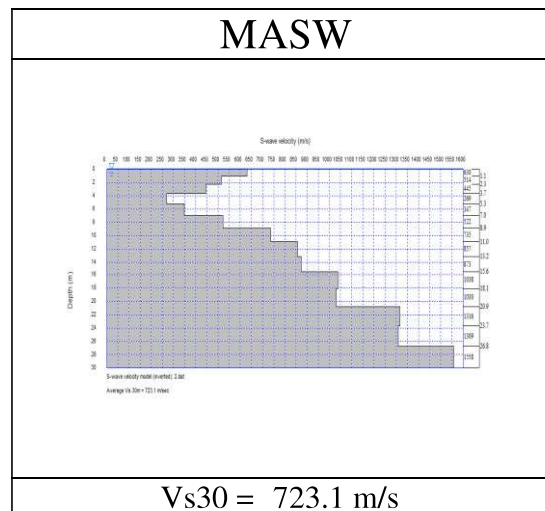
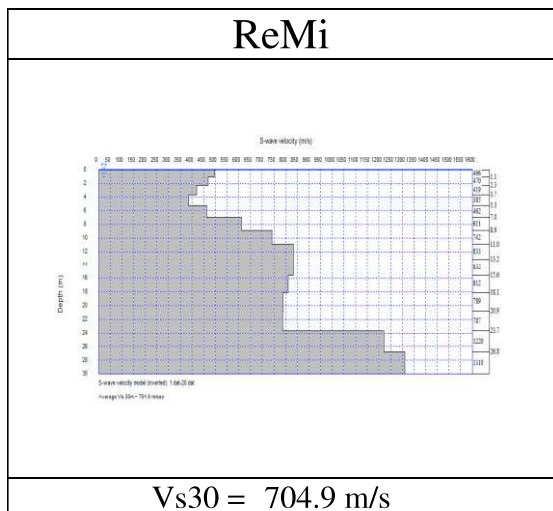
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 6**

**Lugar:** **Travesías**



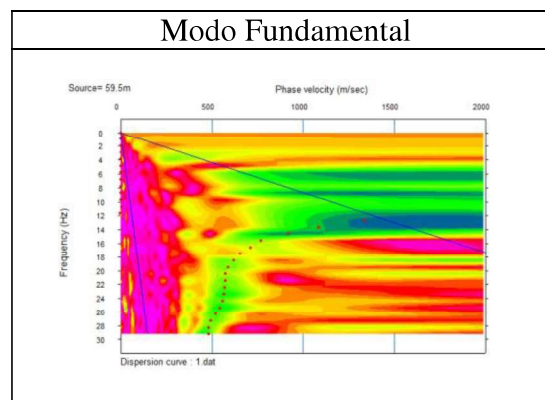
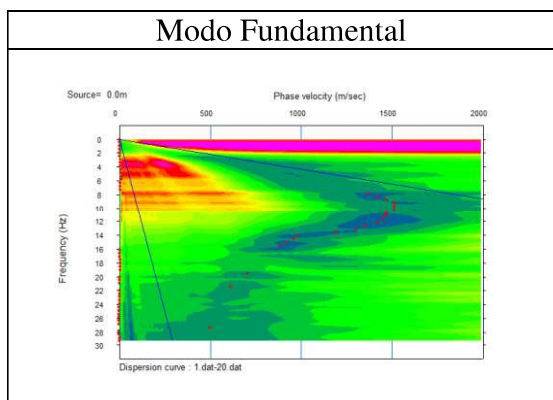
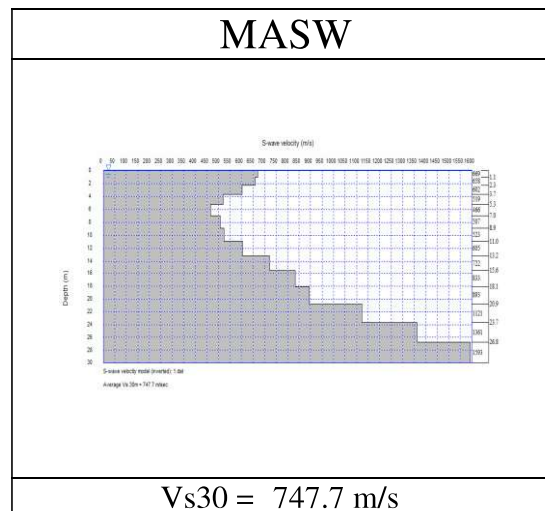
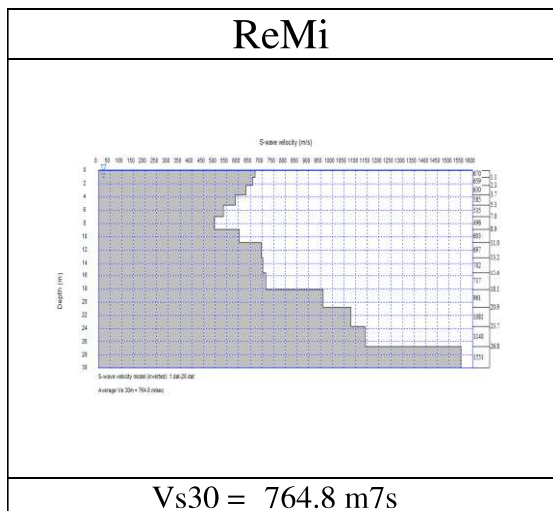
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 7**

**Lugar:** **Travesías**



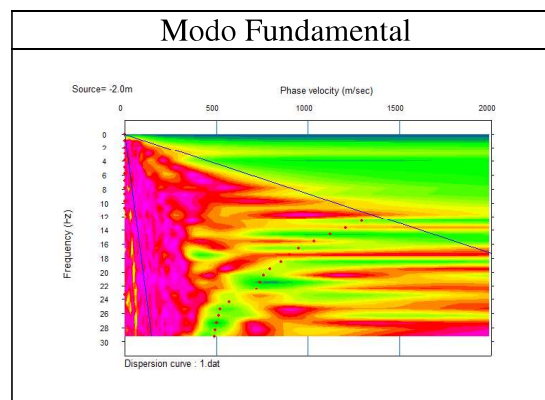
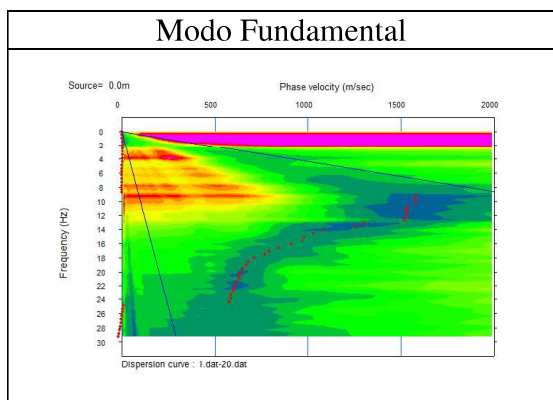
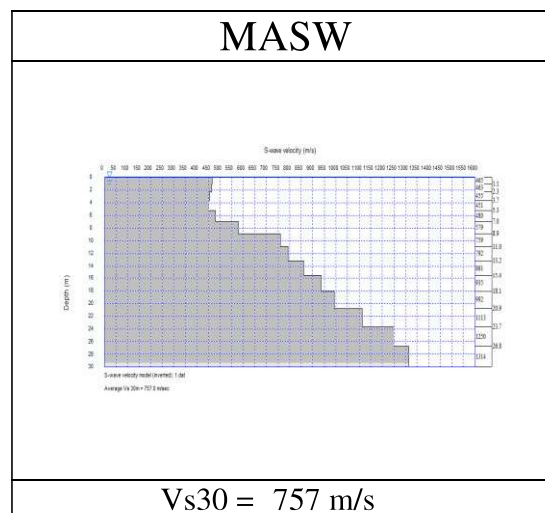
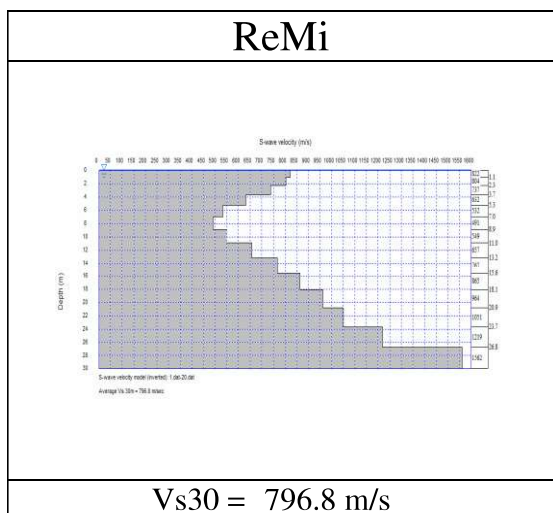
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 8**

**Lugar:** **Travesías**



**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

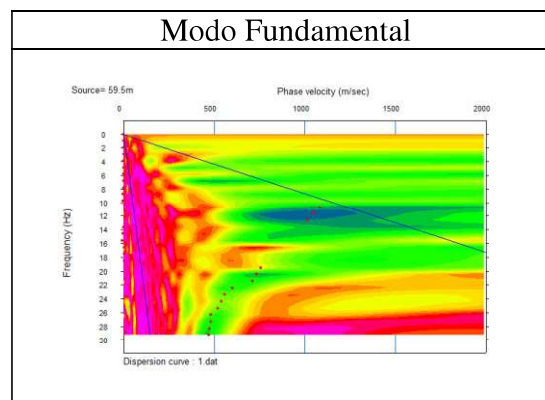
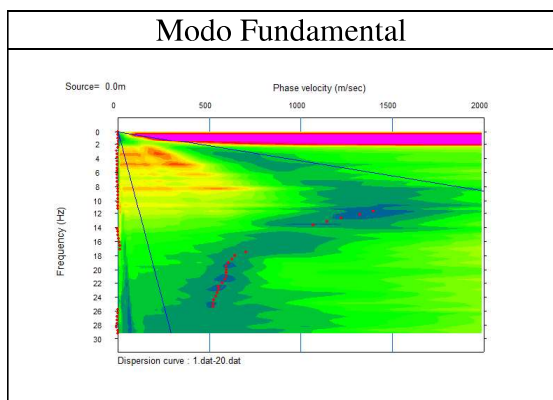
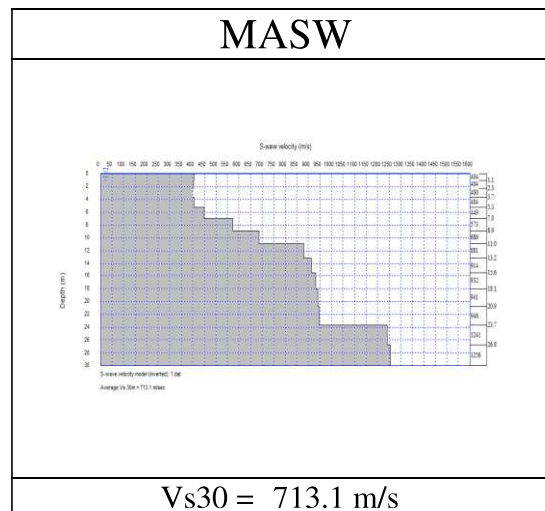
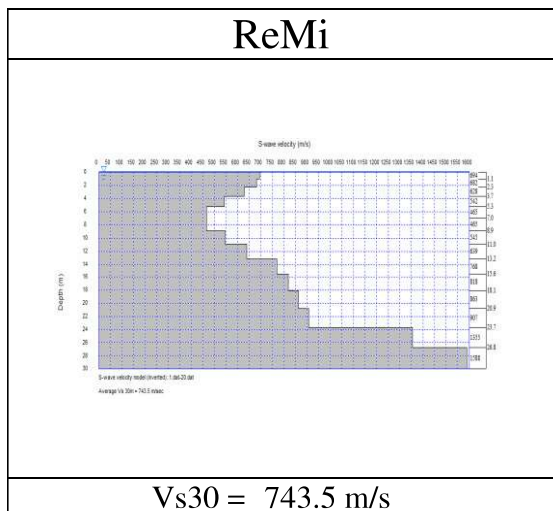
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).



**Línea # 9**

**Lugar:** **Travesías**



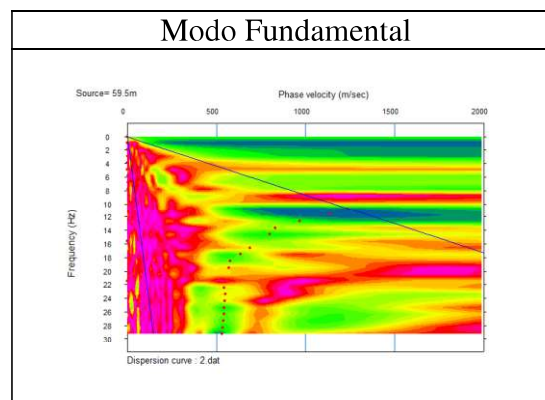
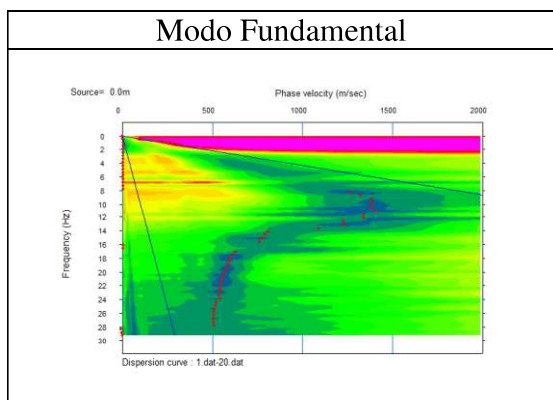
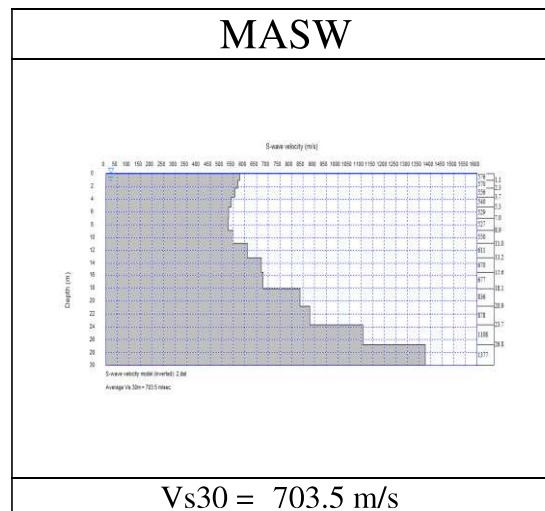
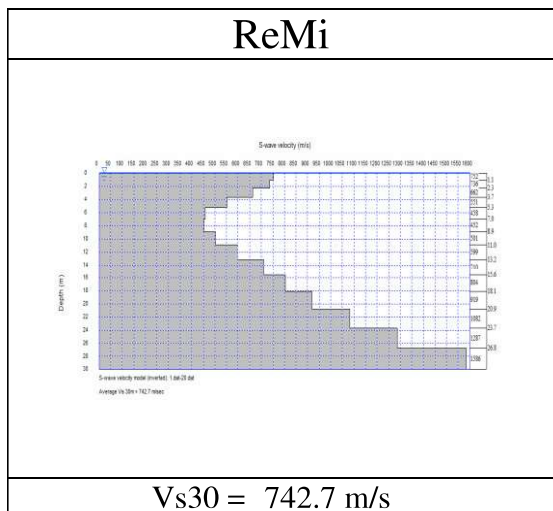
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 10**

**Lugar:** **Travesías**



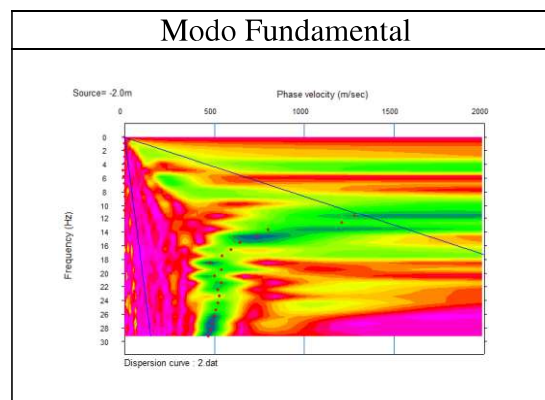
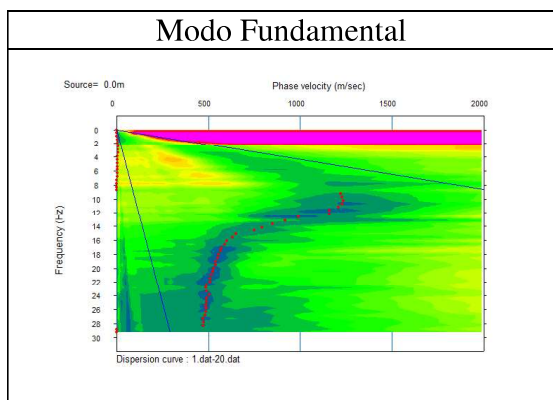
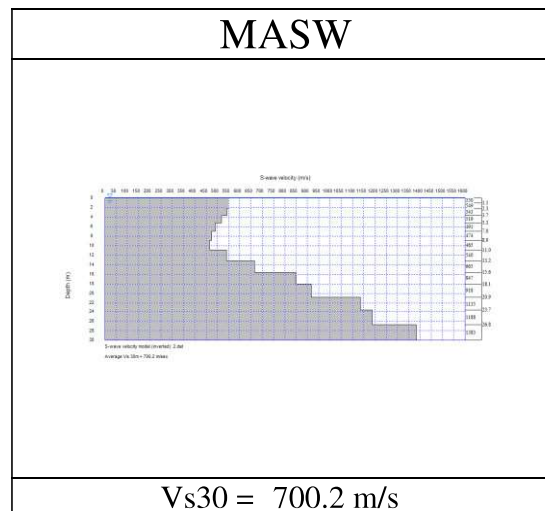
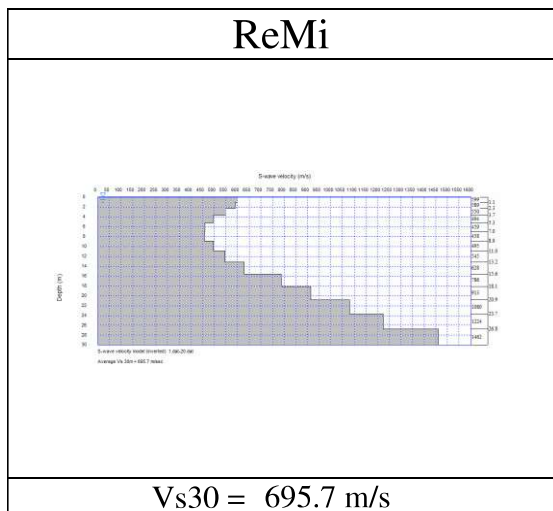
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 11**

**Lugar:** **Travesías**



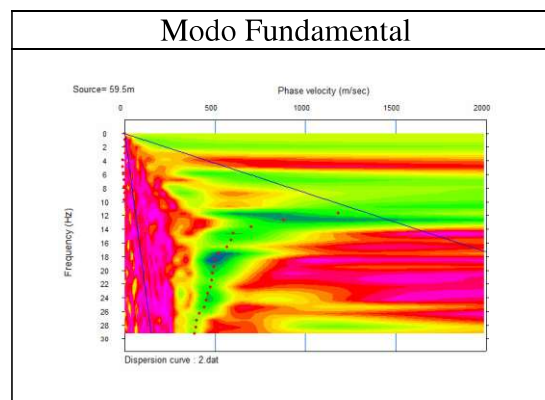
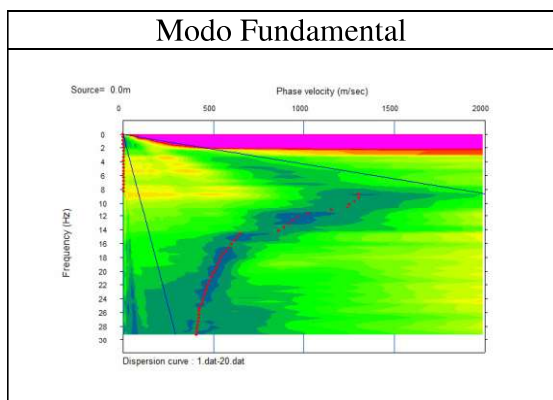
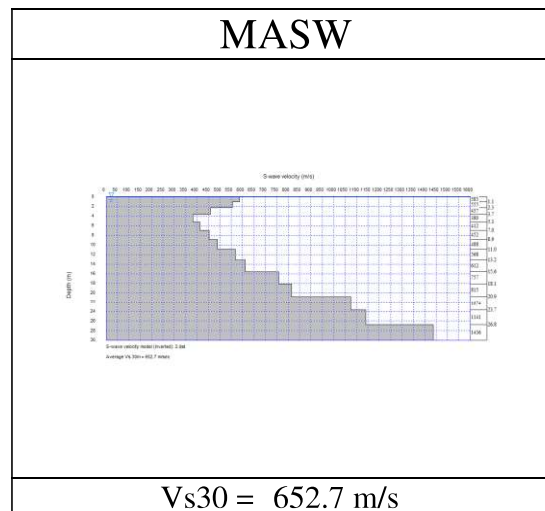
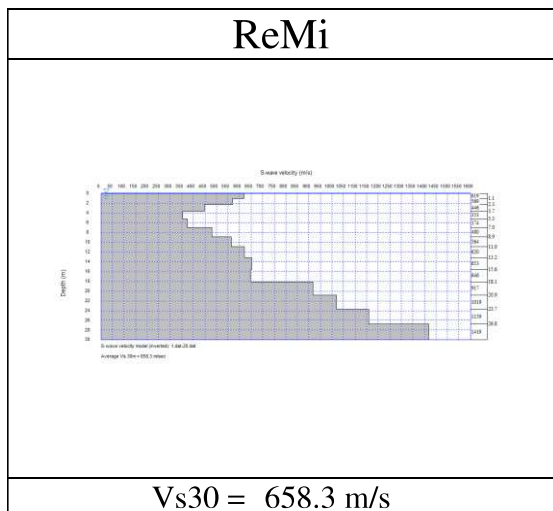
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 12**

**Lugar:** **Travesías**



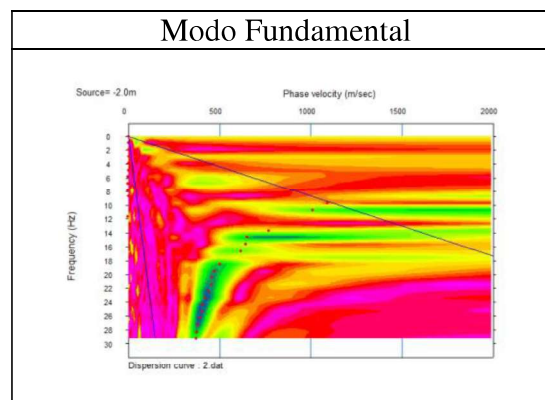
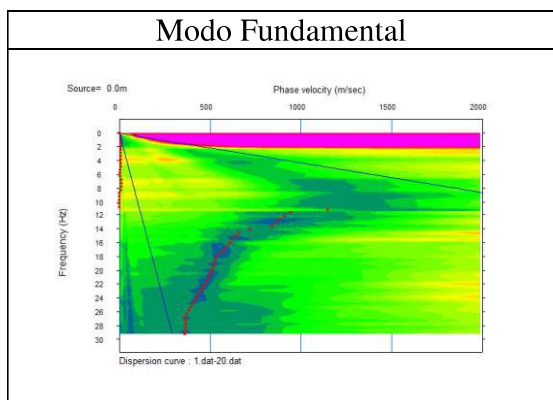
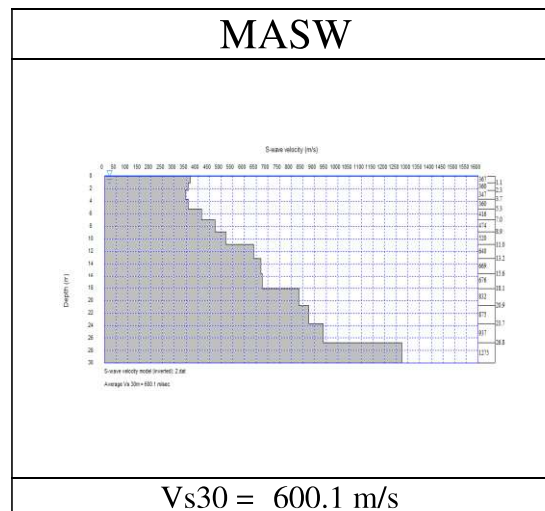
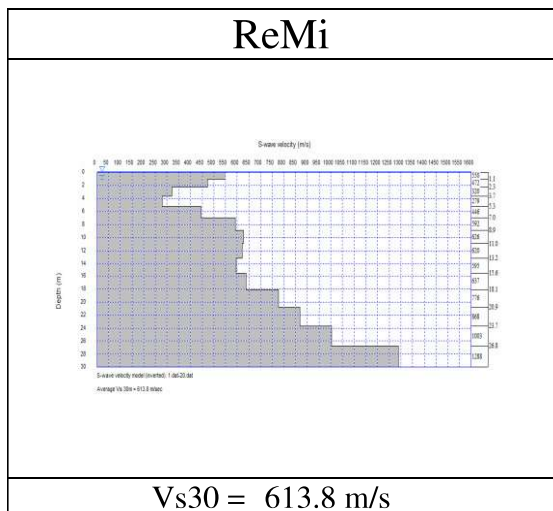
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 13**

**Lugar:** **Travesías**



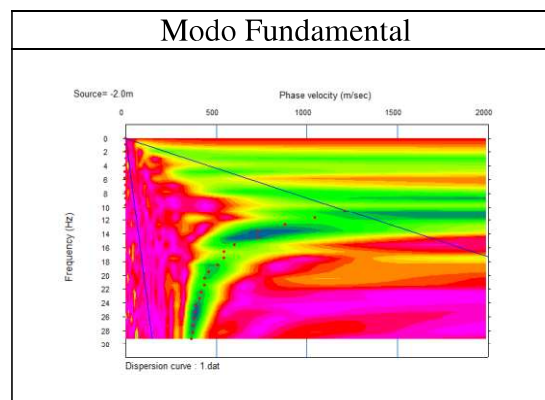
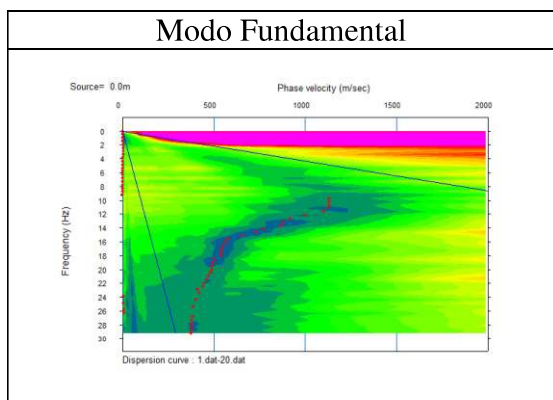
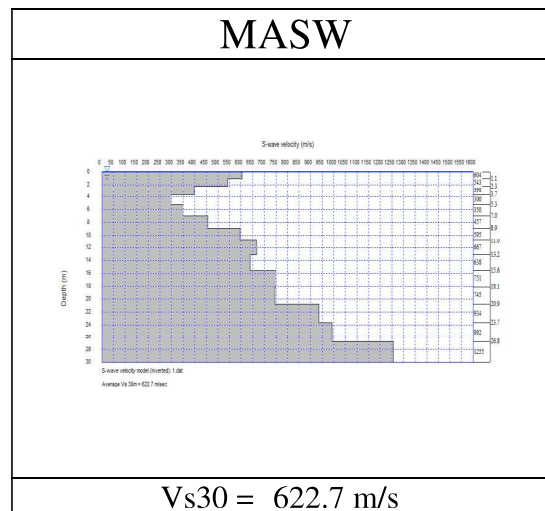
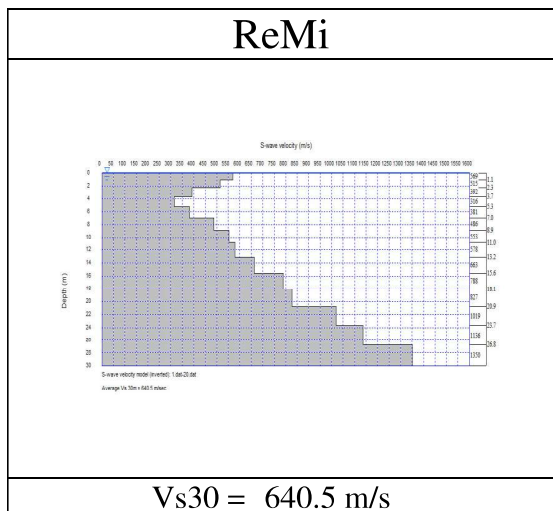
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 14**

**Lugar:** **Travesías**



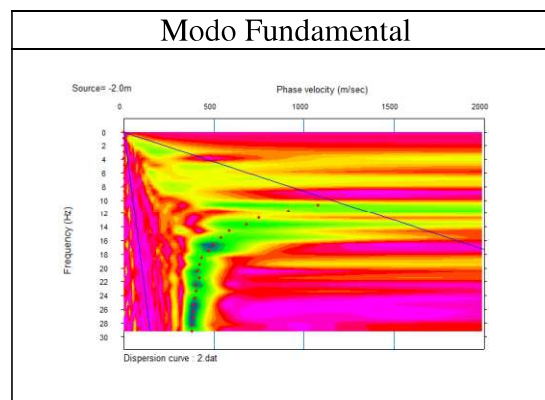
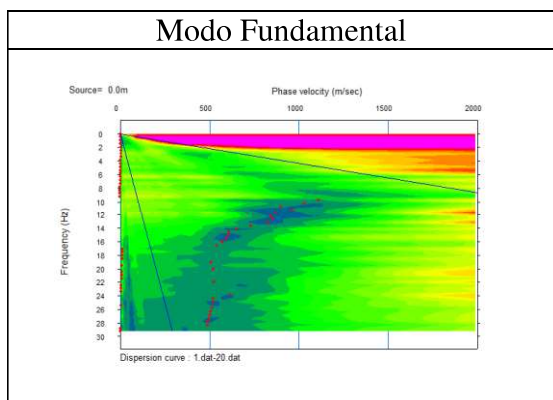
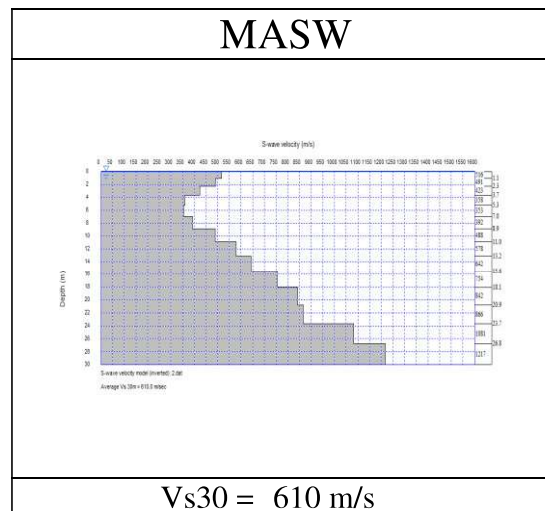
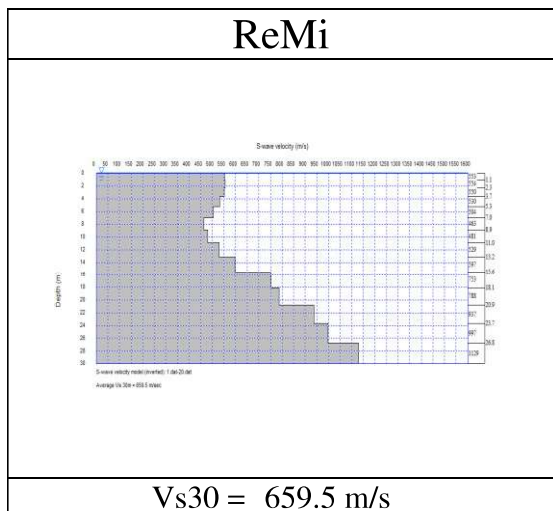
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 15**

**Lugar:** **Travesías**



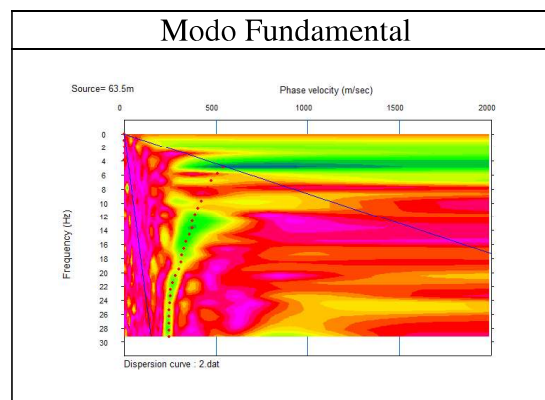
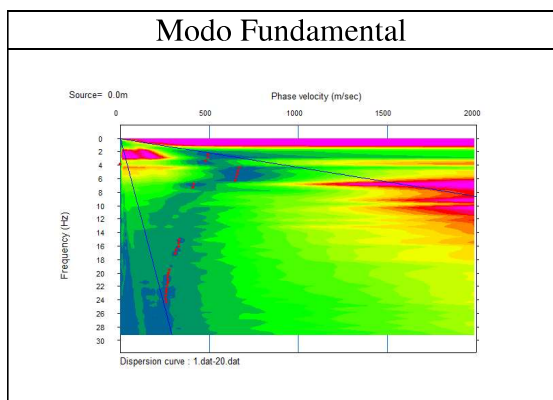
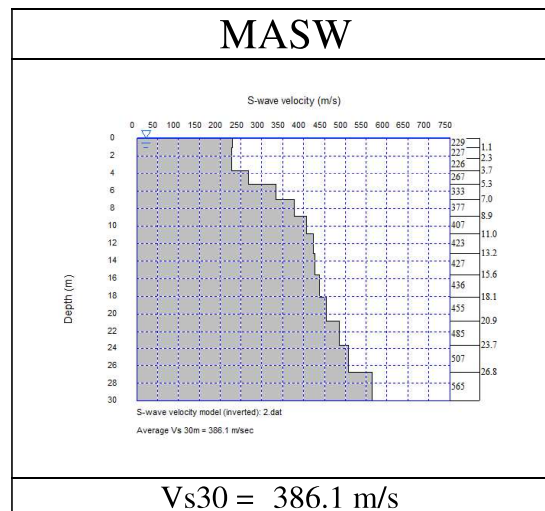
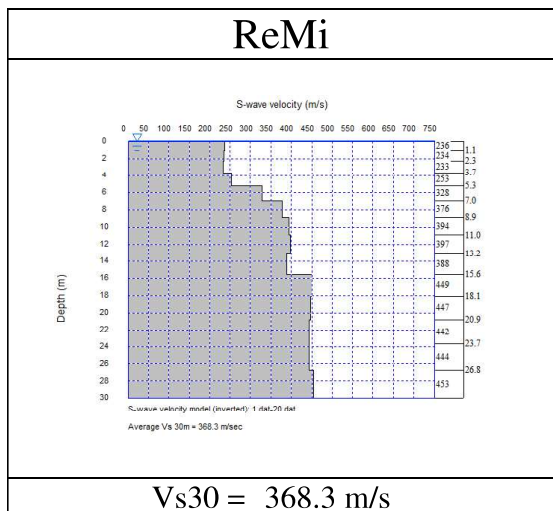
**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

**Observación**      **Topografía Plana**  
 Altitud: 1259 m.s.n.m  
 Coordenadas: E1080447, N1402916  
 Formación: Ígnea

Fuete: Autores (2020).

**Línea # 1**

**Lugar: UFPSO**



**Observación**      **Topografía plana**  
 Altitud: 1250 m.s.n.m  
 Coordenadas: E 1083491, N 1402767  
 Formación: Algodonal (Tpa)

**Observación**      **Topografía plana**  
 Altitud: 1250 m.s.n.m  
 Coordenadas: E 1083491, N 1402767  
 Formación: Algodonal (Tpa)

Fuete: Autores (2020).