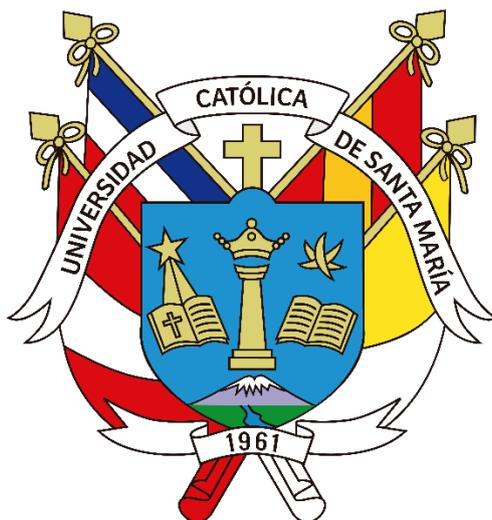


**Universidad Católica Santa María**  
**Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil y del**  
**Ambiente**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Civil**



**“CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA  
APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL PUEBLO  
TRADICIONAL EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA,  
PROVINCIA DE AREQUIPA”**

Tesis presentada por la Bachiller:  
**Viveros Agramonte, Sheyla Sofía**  
para optar el título profesional de  
**Ingeniero Civil**

**Asesor:**

Mg. Gamarra Tuco, Rubén Francisco

**Arequipa-Perú**

**2022**

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**

**INGENIERIA CIVIL**

**TITULACIÓN CON TESIS**

**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 27 de Agosto del 2022

**Dictamen: 000924-C-EPIC-2022**

Visto el borrador del expediente 000924, presentado por:

**2013601722 - VIVEROS AGRAMONTE SHEYLA SOFIA**

Titulado:

**CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS  
SÍSMICOS EN EL PUEBLO TRADICIONAL EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE  
AREQUIPA**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

**1888 - NEIRA ARENAS JULY LILIAM  
DICTAMINADOR**



**3044 - GAMARRA TUCO RUBEN FRANCISCO  
DICTAMINADOR**



**3327 - GARCIA GODOS PEÑALOZA LUZ MATILDE  
DICTAMINADOR**



*Dedicatoria*

*A mis padres María y Antonio por brindarme todo su apoyo incondicional a lo largo de mi  
vida.*



## *Agradecimientos*



*A Dios por haberme dado paciencia y sabiduría.  
A mis padres, por sus enseñanza, apoyo y cariño siempre luchando  
por darme lo mejor.  
A mis hermanos por motivarme a seguir adelante y no rendirme.  
A mis amigos por brindarme su apoyo sin esperar nada a cambio.  
A los docentes de la Universidad que me acompañaron durante mi  
formación profesional, por su enseñanza, dedicación y  
esfuerzo.*

## RESUMEN

En este estudio se considera el análisis e interpretación de las características dinámicas del suelo utilizando métodos geofísicos, a fin de complementar los resultados obtenidos por métodos geotécnicos de estudios anteriores, y obtener una mejor tipificación del tipo de suelo según la norma sismoresistente E-030. La zona de estudio corresponde al área del Pueblo Tradicional El Pasto, distrito de Socabaya, de la región Arequipa.

Los métodos geofísicos utilizados para la caracterización dinámica de los suelos, se lleva a cabo mediante ensayos de Refracción sísmica que permite estimar las velocidades de ondas primarias ( $V_p$ ) y el uso del método sísmico MASW para obtener valores de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ).

Los resultados obtenidos con los métodos geofísicos, permitirán un mayor detalle y resolución de la composición y caracterizadas dinámicas del suelo a una mayor profundidad de investigación. Por consiguiente, estos estudios serán de gran ayuda para ingenieros civiles y autoridades locales para la construcción de futuras edificaciones y para la población en general del Pueblo Tradicional El Pasto sobre el conocimiento de las condiciones locales del suelo.

### **Palabras claves:**

Parámetros dinámicos, refracción, velocidad de ondas.

## ABSTRACT

This study considers the analysis and interpretation of the dynamic characteristics of the soil using geophysical methods, in order to complement the results obtained by geotechnical methods from previous studies, and obtain a better typification of the soil type according to the E-030 earthquake resistant standard. The study area corresponds to the area of the Traditional Town El Pasto, district of Socabaya, of the Arequipa region.

The geophysical methods used for the dynamic characterization of the soils, are carried out through seismic refraction tests that allow estimating the primary wave velocities ( $V_p$ ) and the use of the MASW seismic method to obtain values of shear wave velocities ( $V_s$ ).

The results obtained with geophysical methods will allow greater detail and resolution of the composition and characterized dynamics of the soil at a greater depth of investigation. Therefore, these studies will be of great help to civil engineers and local authorities for the construction of future buildings and to the general population of the traditional town El Pasto on the knowledge of local soil conditions.

**Key words:**

Dynamic parameters, refraction, wave speed

## ÍNDICE

DICTAMEN APROBATORIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I .....	2
1.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
1.1    Diagnóstico situacional .....	3
1.2    Formulación del problema .....	3
1.2.1    Problema General.....	3
1.2.2    Problemas Específicos .....	3
1.3    Justificación e importancia de la investigación.....	4
1.4    Objetivos de la Investigación .....	4
1.4.1    Objetivo General.....	4
1.4.2    Objetivos específicos .....	4
1.5    Hipótesis.....	5
1.6    Variables.....	5
1.7    Estructura de la tesis.....	6
CAPÍTULO II.....	7
2.    FUNDAMENTO TEÓRICO.....	8
2.1    Antecedentes y/o estado del arte .....	8
2.2    Marco teórico .....	9
2.2.1    Método sísmico.....	9
2.2.2    Método de refracción sísmica .....	9
2.2.3    Análisis Multicanal De Ondas Superficiales (MASW) .....	18
2.2.4    Constantes elásticas .....	28
2.2.5    Velocidad de propagación.....	30
2.3    Marco legal.....	30
CAPÍTULO III.....	33
3.    DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	34

3.1	Ubicación del área de estudio.....	34
3.1.1	Ubicación Política:.....	34
3.1.2	Ubicación Geográfica: .....	34
3.2	Geología .....	35
3.2.1	Geología local .....	35
3.3	Geomorfología .....	38
3.3.1	Geomorfología local .....	38
3.4	Topografía.....	40
3.5	Clima.....	40
3.6	Caracterización geotécnica.....	41
3.7	Sismología.....	43
CAPÍTULO IV.....		44
4.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	45
4.1	Diseño metodológico.....	45
4.2	Adquisición de datos .....	45
4.2.1	Instrumentación.....	45
4.2.2	Diseño y parámetros de adquisición .....	46
4.2.3	Procedimientos de campo para la Refracción Sísmica y MASW .....	48
4.3	Procesamiento de datos .....	50
4.3.1	Procesamiento de datos de refracción sísmica.....	50
4.3.2	Procesamiento de datos MASW .....	54
CAPÍTULO V.....		57
5.	ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS .....	58
5.1	Perfiles de velocidad $V_p$ .....	58
5.1.1	Perfil sísmico RS – 01.....	58
5.1.2	Perfil sísmico RS – 02.....	59
5.1.3	Perfil sísmico RS – 03.....	60
5.1.4	Perfil sísmico RS – 04.....	61
5.1.5	Perfil sísmico RS – 05.....	63
5.1.6	Perfil sísmico RS – 06.....	64
5.2	Perfiles de velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ) .....	65
5.2.1	Perfil unidimensional MASW – 01.....	66
5.2.2	Perfil unidimensional MASW – 02.....	68

5.2.3	Perfil unidimensional MASW – 03.....	69
5.2.4	Perfil unidimensional MASW – 04.....	71
5.2.5	Perfil unidimensional MASW – 05.....	72
5.2.6	Perfil unidimensional MASW – 06.....	74
5.3	Obtención de parámetros geotécnicos a partir de Vs y Vp .....	75
5.4	Correlación de resultados obtenidos .....	77
5.4.1	Correlación Geológica-Geomorfológica.....	77
5.4.2	Correlación Geofísica .....	77
5.4.3	Correlación con investigaciones anteriores .....	85
5.5	Potencial de licuefacción en función de velocidades de ondas de corte (Vs).....	93
5.5.1	Análisis e Interpretación del potencial de licuefacción .....	95
5.5.2	Resultados .....	101
5.5.3	Propagación de ondas de corte Vs en suelos potencialmente licuables.....	105
5.6	Clasificación Vs 30 .....	106
5.7	Sismología.....	108
5.7.1	Factor Z.....	108
5.7.2	Condiciones geotécnicas .....	108
5.7.3	Parámetros de sitio.....	108
5.7.4	Factor de seguridad frente a una falla por corte.....	108
5.8	Estimación de la capacidad de carga.....	108
5.8.1	Factor de seguridad frente a una falla por corte.....	108
5.8.2	Capacidad de carga del suelo .....	109
5.8.3	Capacidad de carga admisible del suelo .....	110
5.8.4	Determinación de la capacidad de carga admisible del suelo.....	110
5.9	Zonificación Sísmica.....	111
CAPÍTULO VI.....		113
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	114
6.1	Conclusiones .....	114
6.2	Recomendaciones.....	119
REFERENCIAS.....		119
ANEXOS .....		125

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables .....	5
Tabla 2. Clasificación de los perfiles de suelo.....	30
Tabla 3. Velocidades para las ondas de compresión en el suelo .....	31
Tabla 4. Rango de velocidades para las velocidades de ondas P.....	31
Tabla 5. Clasificación del sitio IBC.....	32
Tabla 6. Características geotécnicas del suelo paludial reciente (G12-SPR) .....	41
Tabla 7. Parámetros de adquisición de refracción sísmica .....	48
Tabla 8. Parámetros de adquisición de MASW.....	48
Tabla 9. Resultados obtenidos en LS-RS-01 .....	59
Tabla 10. Resultados obtenidos en LS-RS-02 .....	60
Tabla 11. Resultados obtenidos en LS-RS-03 .....	61
Tabla 12. Resultados obtenidos en LS-RS-04 .....	62
Tabla 13. Resultados obtenidos en LS-RS-05 .....	63
Tabla 14. Resultados obtenidos en LS-RS-06 .....	65
Tabla 15. Resumen de estudios MASW (profundidad de alcance es 30.0m).....	65
Tabla 16. Resumen de velocidades de onda de corte del ensayo MASW-01.....	67
Tabla 17. Resumen de velocidades de onda de corte del ensayo MASW-02.....	69
Tabla 18. Resumen de velocidades de onda de corte del ensayo MASW-03.....	70
Tabla 19. Resumen de velocidades de onda de corte del ensayo MASW-04.....	72
Tabla 20. Resumen de velocidades de onda de corte del ensayo MASW-05.....	73
Tabla 21. Resumen de velocidades de onda de corte del ensayo MASW-06.....	75
Tabla 22. Parámetros dinámicos .....	75
Tabla 23. Líneas sísmicas distribuidas en base a las calicatas y ensayos SPT.....	87
Tabla 24. Velocidad vs obtenidos por ensayo SPT y MASW .....	87
Tabla 25. Velocidad de ondas de corte Vs de calicatas y método MASW .....	89
Tabla 26. Valores de nivel freático asociados a cada línea sísmica.....	94
Tabla 27. Potencial de licuefacción según el valore de $i_l$ .....	95
Tabla 28. Parámetros sísmicos - evaluación de potencial de licuefacción .....	95
Tabla 29. Resultados del índice de potencial de licuefacción .....	102
Tabla 30. Velocidad de onda de corte vs 30 y periodos fundamentales Ts.....	107
Tabla 31. Estimación de carga admisible del suelo para $b=0.4$ m $d_f =0.7$ .....	110
Tabla 32. Estimación de carga admisible del suelo para $b=1.0$ m $d_f =0.7$ .....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del principio básico del método de refracción (IGC 2011). .....	10
Figura 2. Refracción de ondas planas a través de una interfaz horizontal .....	11
Figura 3. Principio de fermat .....	12
Figura 4. Dos capas separadas por una interfaz horizontal.....	13
Figura 5. Rayos refractadas para un modelo simple .....	14
Figura 6. Adquisición de datos por el método de refracción sísmica .....	15
Figura 7. Representación de ondas sísmicas en el sismograma.....	16
Figura 8. Representación gráfica de la curva dromocrónica.....	16
Figura 9. Rayos reflejados y refractados.....	17
Figura 10. Frente de ondas entre dos medios diferentes .....	18
Figura 11. Distribución del método MASW .....	19
Figura 12. Velocidad de fase para distintas longitudes de ondas .....	21
Figura 13. Esquema de propagación de ondas sísmicas .....	22
Figura 14. Configuración del arreglo sísmico lineal.....	24
Figura 15. A) Adquisición de datos b) Curvas de dispersión .....	27
Figura 16. A) Curva de dispersión b) Modelo de velocidad .....	28
Figura 17. Ubicación del área de estudio .....	35
Figura 18. Mapa geológico del distrito de socabaya.....	37
Figura 19. Mapa geomorfológico del distrito de socabaya.....	39
Figura 20. Mapa topográfico del distrito de socabaya.....	40
Figura 21. Mapa geotécnico.....	43
Figura 22. Equipo sísmico utilizado para la adquisición de datos sísmicos .....	46
Figura 23. Distribución de las líneas sísmicas en la zona de estudio .....	47
Figura 24. Equipo y tendido sísmico lineal de refracción sísmica .....	49
Figura 25. Esquema de la disposición del equipo y tendido sísmico lineal.....	49
Figura 26. Procesamiento refracción sísmica .....	50
Figura 27. Registros obtenidos de los tendidos sísmicos en el P.T. El pasto .....	51
Figura 28. Domocromas de los tendidos sísmicos en el P.T. El pasto .....	52
Figura 29. Perfiles de los tendidos sísmicos en el P.T. El pasto.....	53
Figura 30. Procesamiento MASW .....	54
Figura 31. Registros masw de los tendidos sísmicos en el P.T.El pasto.....	55
Figura 32. Curvas de dispersión de los tendidos sísmicos en el P.T. El pasto .....	56

Figura 33. Perfil sísmico RS-01 .....	59
Figura 34. Perfil sísmico RS-02.....	60
Figura 35. Perfil sísmico RS-03.....	61
Figura 36. Perfil sísmico RS-04.....	62
Figura 37. Perfil sísmico RS-05.....	63
Figura 38. Perfil sísmico RS-05.....	65
Figura 39. Modelo unidimensional de ondas de corte MASW-01 .....	67
Figura 40. Modelo unidimensional de ondas de corte MASW-02 .....	68
Figura 41. Modelo unidimensional de ondas de corte MASW-03 .....	70
Figura 42. Modelo unidimensional de ondas de corte MASW-04 .....	71
Figura 43. Modelo unidimensional de ondas de corte MASW-05 .....	73
Figura 44. Modelo unidimensional de ondas de corte MASW-06 .....	74
Figura 45. Perfil de velocidades $V_p$ y $V_s$ para la línea sísmica LS-01.....	79
Figura 46. Perfil de velocidades $V_p$ y $v_s$ para la línea sísmica LS-02.....	80
Figura 47. Perfil de velocidades $V_p$ y $v_s$ para la línea sísmica LS-03 .....	82
Figura 48. Perfil de velocidades $V_p$ y $v_s$ para la línea sísmica LS-04.....	83
Figura 49. Perfil de velocidades $v_p$ y $v_s$ para la línea sísmica LS-05 .....	84
Figura 50. Perfil de velocidades $v_p$ y $v_s$ para la línea sísmica LS-06 .....	85
Figura 51. Ubicación de líneas sísmicas y estudios anteriores .....	86
Figura 52. Mapa tipo de suelo según calicatas prof. 0.5 m a 1.0 m.....	91
Figura 53. Mapa tipo de suelo según el método de refracción sísmica .....	92
Figura 54. Escenario 1 de potencial de licuefacción.....	96
Figura 55. Escenario 2 de potencial de licuefacción.....	98
Figura 56. Escenario 3 de potencial de licuefacción.....	99
Figura 57. Escenario 4 de potencial de licuefacción.....	101
Figura 58. Mapa del potencial de licuefacción en el C.P el pasto .....	104
Figura 59. Suelos potencialmente licuables para $V_s < 200$ m/s .....	105
Figura 60. Mapa de isovelocidades de ondas de corte $V_{s30}$ .....	107
Figura 61. Mapa de zonificación sísmica.del C.P. “el pasto” .....	112

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Mapa de ubicación .....	126
Anexo 2: Mapa geológico .....	128
Anexo 3: Mapa geomorfológico .....	130
Anexo 4: Mapa topográfico .....	132
Anexo 5: Ubicación de las líneas sísmicas .....	134
Anexo 6: Ubicación de las calicatas y SPT .....	136
Anexo 7: Columnas estratigráficas de calicatas.....	138
Anexo 8: Perfiles de refracción sísmica.....	140
Anexo 9: Secuencia de procesamiento MASW .....	147
Anexo 10: Perfiles MASW .....	154
Anexo 11: Correlación de velocidades $V_p$ y $V_s$ .....	161
Anexo 12: Mapas de potencial de licuefacción .....	168
Anexo 13: Mapa de isovelocidades de onda de corte $v_{s30}$ .....	173
Anexo 14: Clasificación del suelo según calicatas y métodos sísmicos.....	175
Anexo 15: Zonificación sísmica .....	178

## INTRODUCCIÓN

Cuando ocurre un terremoto, la energía que se encuentra almacenada por deformación, se libera y propaga en forma de ondas sísmicas transmitiéndose por el interior de la tierra hasta llegar a la superficie atravesando diferentes capas del subsuelo. Durante el viaje de estas ondas por las capas más superficiales de la tierra, se producen diferentes fenómenos físicos que modifican la señal sísmica debido a las condiciones locales de sitio atribuidas a la topografía, las propiedades geológicas y la composición interna del subsuelo.

El comportamiento del suelo ante sismos de gran intensidad, han ocasionado pérdidas humanas y económicas, y es considerado como un parámetro sismológico relacionado a estudios de riesgo sísmico. Con esta premisa, muchos investigadores han realizado estudios para identificar la respuesta de las variaciones locales del suelo frente a eventos de carga cíclica, como los terremotos, que influyen sobre las características dinámicas del suelo y las estructuras.

En la actualidad, existen diferentes métodos de exploración del subsuelo que permiten identificar zonas de diferente grado de riesgo sísmico sobre un área de estudio, entre los cuales se encuentran los métodos geofísicos como alternativa para determinar las características dinámicas del suelo.

Por tal motivo, los reglamentos de diseño sismoresistente deben considerar la influencia de las condiciones locales del suelo como un factor que cause daño a estructuras y edificaciones en diferentes áreas locales, permitiendo seleccionar la mejor ubicación para una estructura o el mejor tipo de estructura para un lugar dado.



**CAPÍTULO I**  
**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 Diagnóstico situacional**

En la actualidad se conoce que las condiciones locales de sitio constituyen uno de los principales factores responsables de los daños que se producen en cualquier tipo de edificación ante eventos sísmicos de gran intensidad.

El Pueblo Tradicional el Pasto se ubica en una zona considerada de riesgo por el tipo de suelo blando que lo compone y por ser susceptible a experimentar fenómenos de licuefacción debido a la presencia de un nivel freático muy superficial. Estos estudios fueron realizados a través de métodos convencionales como los ensayos de penetración estándar SPT (ejecutado en campo) y ensayos triaxiales (ejecutados en laboratorio) que se caracterizan por estudiar la parte más somera del subsuelo y de forma puntual, es decir que no se extienden por toda la superficie de la zona de estudio. Los resultados de estos métodos, no alcanzan la profundidad de investigación ni el detalle de la composición del terreno que métodos modernos no destructivos pueden realizar.

Con esta premisa, es necesario complementar los resultados de investigaciones que aplicaron métodos directos (calicatas) con métodos indirectos (geofísicos).

### **1.2 Formulación del problema**

#### **1.2.1 Problema General**

- ¿Cuáles son las características dinámicas del suelo evaluadas mediante métodos sísmicos, en el P.T. El Pasto, distrito de Socabaya, Provincia de Arequipa – Arequipa?

#### **1.2.2 Problemas Específicos**

- ¿Cuáles son los espesores de las capas del subsuelo evaluadas mediante el análisis de ondas superficiales en arreglo multicanal MASW?
- ¿Cuál es el perfil sísmico unidimensional evaluado mediante el método de refracción

sísmica?

- ¿Cuáles son los parámetros geotécnicos obtenidos mediante la aplicación de métodos sísmicos?
- ¿De qué manera los métodos de refracción sísmica, análisis de ondas superficiales en arreglo multicanal MASW, se correlacionan la caracterización del suelo?

### **1.3 Justificación e importancia de la investigación**

El suelo es un material heterogéneo que varía dependiendo de las características geológicas, geomorfológicas y de actividades generadas por la intervención humana. En estudios anteriores que se realizaron sobre la zona del P.T. El Pasto, se usaron técnicas de medición directa como son las calicatas y ensayos SPT (métodos Geotécnicos), que se basan en el análisis del suelo en ubicaciones puntuales del terreno de manera superficial. Para mejorar y maximizar la exploración del terreno, nos debemos apoyar en otras técnicas de medición que permiten complementar la información obtenida en estudios anteriores. Por lo cual, la aplicación de métodos de exploración geofísica, contribuyen significativamente a entender la naturaleza y composición del subsuelo en profundidad. Son métodos no invasivos que, a través del estudio de las propiedades físicas del terreno, permiten conocer con mayor detalle la composición del suelo sobre el cual yace el P.T. El Pasto.

### **1.4 Objetivos de la Investigación**

#### **1.4.1 Objetivo General**

- Caracterización dinámica de suelos aplicando métodos sísmicos en el P.T. El Pasto, distrito de Socabaya, Provincia de Arequipa – Arequipa.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Estimar los espesores de las capas del subsuelo a partir de las velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) utilizando el método MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave).
- Elaborar perfiles sísmicos en función de las velocidades de onda primarias ( $V_p$ ) del

ensayo de refracción sísmica.

- Cálculo de parámetros geotécnicos a partir de los resultados obtenidos con los métodos sísmicos.
- Evaluar de qué manera se correlaciona el análisis de ondas superficiales en arreglo multicanal MASW, refracción sísmica y estudios anteriores.

### 1.5 Hipótesis

- Se acepta que al aplicar métodos sísmicos se puede determinar las características dinámicas del suelo a mayor profundidad de investigación, obteniendo una mayor resolución de los estratos que lo componen y una mejor interpretación de la zona de estudio, haciendo posible una mejor correlación con los datos obtenidos de estudios anteriores.

### 1.6 Variables

- *Variable Independiente:* Métodos sísmicos.
- *Variable dependiente:* Parámetros dinámicos del suelo.

**Tabla 1. Operacionalización de Variables**

Variables	Definición	Dimensión	Escala de medición
<b>VARIABLE INDEPENDIENTE:</b> "Métodos de refracción sísmica y MASW"	"Se define conceptualmente como un método sísmico donde se mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de estas a diferentes puntos de observación"	Velocidad de propagación $V_p$ $V_s$	m/s
<b>VARIABLE DEPENDIENTE:</b> "Parámetros dinámicos"	"Se define como módulos elásticos, que actúan como un conjunto de parámetros que definen las propiedades y comportamientos de un material que se somete a esfuerzos, sufre deformaciones, y luego recupera su forma original después de que los esfuerzos cesan" (Zevallos, 2017)	Módulo de Corte G Razón de Poisson $\nu$ Módulo de Young E Módulo Bulk K	kg/m <sup>2</sup> [ ] kg/m <sup>2</sup> kg/m <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración Propia.

## 1.7 Estructura de la tesis

El presente estudio está dividido en 6 partes, siendo la primera este capítulo introductorio o primer capítulo:

El **Capítulo I.** Llamado planteamiento del problema, contiene la formulación del problema, objetivos de investigación justificación e hipótesis.

El **Capítulo II.** Entrega una breve reseña teórica y antecedentes de investigación, describe los métodos y fundamentos en que se basará la caracterización dinámica del suelo mediante la aplicación de métodos sísmicos.

El **Capítulo III.** Presenta la descripción del área de estudio.

El **Capítulo IV.** Muestra la metodología, las técnicas de recolección de datos y el procesamiento para el cálculo de los parámetros dinámicos.

El **Capítulo V.** Muestra un análisis e interpretación los resultados de la investigación, presentando información sistematizada.

El **Capítulo VI.** Corresponde a las conclusiones generales que resumen los resultados obtenidos en cada capítulo, entregando una visión general respecto a la aplicación de métodos sísmicos para la caracterización dinámica del suelo en el Pueblo Tradicional “El Pasto”.



## **CAPÍTULO II**

# **FUNDAMENTO TEÓRICO**

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes y/o estado del arte

En el distrito de Socabaya, en el cual se encuentra asentado el P.T. El Pasto, se realizaron diferentes estudios relacionados a identificar el tipo de suelo. El *Plan Urbano Distrital de Socabaya* (2019), en el Capítulo IV “Diagnostico distrital: Aspecto medio ambiental”, consideran que el P.T. El Pasto se encuentra entre las zonas de alto riesgo del Distrito de Socabaya, zona crítica con presencia de un nivel freático que corta la superficie, hacen de esta zona un sector inestable; a mayor profundidad mejora la calidad del suelo (aumento de materiales granulares gravo- arenosos) y por lo tanto las condiciones para la cimentación.

Posteriormente el Instituto Municipal de Planeamiento de Arequipa, ejecuta el “*Plan de Desarrollo Metropolitano de Arequipa PDM*” (2016-2025), estableciendo que la zona del P. T. El Pasto es apta para su uso residencial (Residencial Densidad Baja – RDB).

En la investigación titulada: “*Evaluación de potencial de licuefacción de suelos en el centro poblado el Pasto, Distrito de Socabaya, Arequipa*” realizada por Seminario & Pinto (2018), se plantean el objetivo de evaluar el potencial de licuefacción de suelos en el centro poblado El Pasto perteneciente al distrito de Socabaya en la ciudad de Arequipa. Para evaluar el potencial de licuefacción realizan calicatas y el ensayo de penetración estándar SPT (Standard Penetration Test), analizaron la susceptibilidad en varios grados (Grado 1 a grado 3), respecto al grado 3 utilizan la metodología probabilística propuesta por Cetin, et al., (2004). Concluyen que: Los suelos de dicho centro poblado son susceptibles a experimentar licuefacción, la probabilidad de licuefacción es alta en la zona cercana al rio Socabaya. Mencionan que son suelos altamente licuables a sismos de magnitudes 8.3 y 8.4 Mw.

## 2.2 Marco teórico

### 2.2.1 Método sísmico

Según Carlos Figuerola, (1974): *“Consiste en generar ondas sísmicas en superficie y registrar las que experimentan la refracción total a lo largo de los contactos de velocidades distintas en los diferentes medios del subsuelo”*.

Las ondas generadas por una fuente impulsiva, viajan a través del subsuelo hasta la superficie y son captados por instrumentos de medición llamados geófonos. La primera llegada de la energía sísmica a un geófono, representa una refracción sobre los diferentes contactos en el cual se propagan las ondas sísmicas. El análisis de estos primeros arribos (o primeras llegadas), permiten obtener información sobre la profundidad de las diferentes interfaces del subsuelo.

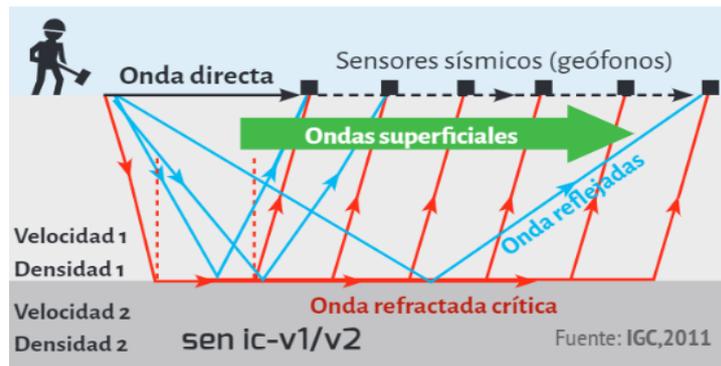
El método sísmico de refracción es adecuado para trabajos de ingeniería donde la profundidad de investigación del subsuelo es menor (en el que se registran las primeras llegadas a través del contacto con la roca firme) a comparación del método de reflexión usado principalmente para ubicar yacimientos petrolíferos a gran profundidad.

### 2.2.2 Método de refracción sísmica

Es un método geofísico no destructivo que permite determinar la estratigrafía y el espesor de las capas del subsuelo más próximos a la superficie del terreno por medio del fenómeno de refracción de las ondas que viajan a través de las discontinuidades del subsuelo provocadas por alguna fuente artificial. (Bello Orta, 1961)

#### 2.2.2.1 Fundamento del método de refracción

El principio del método, se basa en la medición de los tiempos de viaje de las ondas P, provocadas por una fuente artificial (golpe de martillo o explosiones) a diferentes puntos de control que se encuentran sobre la superficie del terreno (geófonos). La figura 1 muestra el principio básico del método de refracción.



**Figura 1.** Esquema del principio básico del método de refracción.

Fuente: IGC (2011)

La energía generada, se propaga como un frente de ondas a través de las diferentes capas del subsuelo hasta encontrar interfaces en las cuales es refractada de forma crítica. Estas ondas refractadas regresan a la superficie y son detectadas por geófonos colocados a lo largo de la superficie del terreno con la finalidad de registrar el tiempo de llegada o arribo en cada punto. En el momento en que se produce el impacto o explosión, se activa el sistema de adquisición de datos por medio de un dispositivo de arranque o “trigger” que genera el tiempo cero o inicio de grabación. La diferencia entre el tiempo de llegada y el tiempo cero, permite la evaluación del tiempo de propagación de la onda desde la fuente hasta los receptores (geófonos).

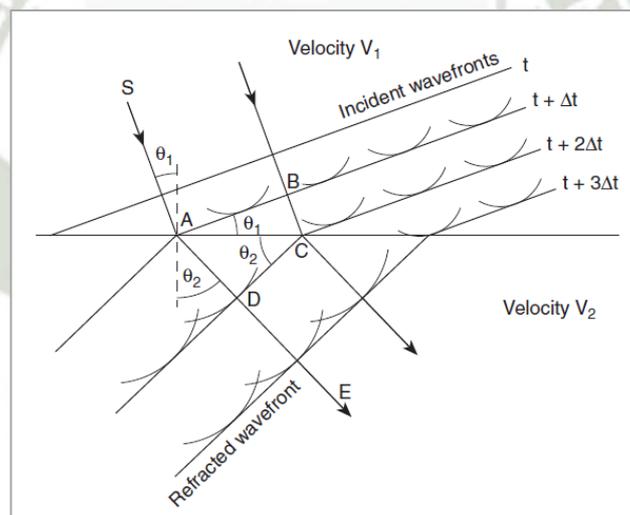
### 2.2.2.2 Principios básicos del método de refracción

Las leyes que rigen la propagación y la trayectoria de las ondas sísmicas en la refracción son: Principio de Huygens y Principio de Fermat.

**El principio de Huygens** establece que cada punto alcanzado por un frente de ondas actúa como una nueva frente de ondas que se extiende en todas las direcciones. Si el medio es homogéneo el frente de ondas es esférico en un momento cualquiera  $t$ ; un poco más tarde en el tiempo  $t+\Delta t$ , cada uno de los puntos del frente de onda habrá dado lugar a pequeños frentes de ondas esféricas de radio  $V \Delta t$ , si  $V$  es la velocidad del medio. El nuevo frente de ondas, en el instante  $t+\Delta t$ , será la envolvente de todos los pequeños frentes de onda y, por tanto, será una superficie esférica concéntrica con la primitiva. Si el medio no es homogéneo, cada elemento

del frente de ondas se traslada paralelamente a si mismo durante el tiempo  $\Delta t$ , pero con velocidades distintas a lo largo del frente, por lo que el nuevo frente de ondas no será paralelo al primero. (Cantos Figuerola J. , 1987)

La Figura 2, muestra una serie de frentes de onda incidentes que chocan con una interfaz horizontal entre dos medios. Se muestra la construcción de varios frentes de onda dentro de la capa superior, comenzando desde el tiempo  $t$  con un incremento de  $\Delta t$ . La distancia entre estos frentes de onda es  $V_1\Delta t$ , donde  $V_1$  es la velocidad en el medio superior. Para simplificar, los frentes de onda incidentes se muestran como planos; esta es una aproximación razonable en un segmento corto del frente de onda si la ubicación de la fuente original está a una distancia considerable de los frentes de onda. (Cox, 1999)



**Figura 2.** Refracción de ondas planas a través de una interfaz horizontal ( $V_2 = 2V_1$ ). Variables:  $\theta_1$  es el ángulo de incidencia,  $\theta_2$  es el ángulo refractado y  $\Delta t$  es la separación del frente de onda.

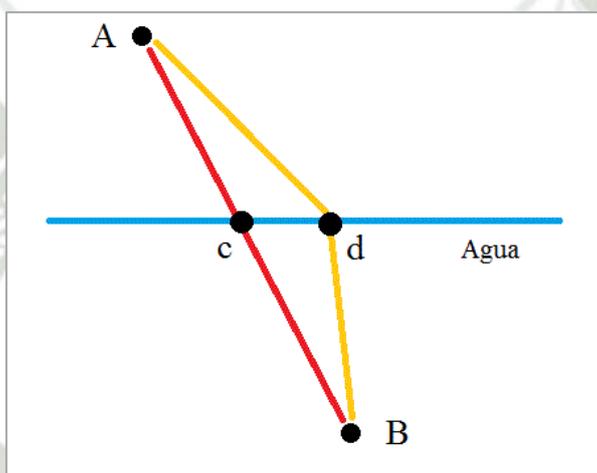
Fuente: Cox (1999)

**El principio de Fermat** sostiene que un rayo sísmico sigue de un punto a otro aquel camino que produce el menor tiempo de recorrido como se muestra en la figura 3.

Se llaman rayos sísmicos a las líneas normales de los frentes de ondas sucesivos. Es decir, la trayectoria de las posiciones ocupadas por un punto dado del frente de onda a lo largo de todo su curso. En sismología el rayo sísmico no tiene realidad física (como en óptica) Sin

embargo, para el estudio de los métodos sísmicos se utiliza el término frente de onda. (Cantos Figuerola J. , 1987)

En un medio homogéneo, los rayos sísmicos serán líneas rectas (ACB). Si los medios que atraviesan las ondas sísmicas no son homogéneos (como ocurre en medios estratigráficos), tendrán velocidades distintas, por consiguiente, los rayos sísmicos no serán líneas rectas, sino curvas de tiempo mínimo (ADB). (Cantos Figuerola J. , 1987)



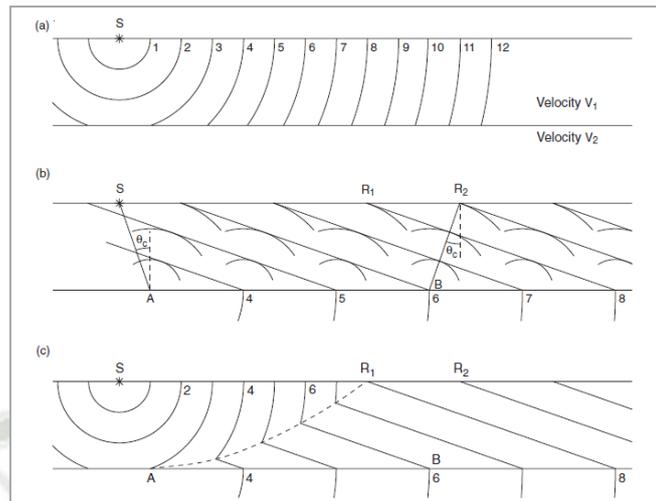
*Figura 3. Principio de Fermat.*

*Fuente: Praetor (2016)*

### **2.2.2.3 Transmisión de ondas refractadas**

“Las ondas que viajan hacia y a lo largo de la interfaz entre los dos medios (el refractor) y regresan a través del medio superior se denominan ondas de refracción, ondas de cabeza, ondas precursoras u ondas de arco” (Cox, 1999).

La Figura 4, ilustra frentes de onda en incrementos de tiempo iguales desde una posición de fuente en S hasta las posiciones de receptor R1 y R2 para el caso simple de dos capas separadas por una interfaz horizontal, donde la velocidad del medio inferior ( $V_2$ ) es tres veces la del medio superior ( $V_1$ ).



**Figura 4.** Dos capas separadas por una interfaz horizontal; posiciones de frente de onda numeradas desde la fuente en  $S$  para (a) onda directa; (b) onda refractada para  $V_2 = 3V_1$ ; (c) frentes de onda combinados.

Variables:  $\theta_c$  es el ángulo crítico y  $R_1$  está a la distancia de cruce.

Fuente: Cox (1999)

La figura 4a, muestra los frentes de onda numerados del 1 al 12, asociados con la onda directa, que viaja en el medio superior. La figura 4b, muestra los frentes de onda emergentes (ondas de cabeza) en el medio superior y los frentes de onda asociados en el medio inferior. El punto A en la interfaz entre los dos medios es donde el frente de onda incidente golpea la interfaz en el ángulo crítico. En este ejemplo, el grosor de la capa se eligió de modo que el punto A corresponda a la intersección del tercer frente de onda con la interfaz. La figura muestra que la ubicación del receptor  $R_1$  corresponde al punto donde el número de frente de onda 8 llega a la superficie.

La figura 4c, ilustra las posiciones de los frentes de onda en el medio inferior y los frentes de onda directo y refractado en el medio superior. La línea punteada que une A y  $R_1$  representa las posiciones donde estos dos últimos frentes de onda se cruzan y, a veces, se denomina curva de tiempo coincidente. La onda directa llega primero a un desplazamiento definido por la distancia  $SR_1$ , llamado distancia de cruce. En desplazamientos mayores que esto, las ondas refractadas llegan primero porque el tiempo que se ahorra al viajar a través del medio de alta velocidad compensa con creces la trayectoria de viaje más larga. La trayectoria del rayo de

refracción para el receptor  $R_2$  es  $SABR_2$ , donde el rayo emergente  $BR_2$  sale de la interfaz en el ángulo crítico ( $\theta_c$ ). Los datos de la figura 4c muestran que la velocidad aparente de las ondas emergentes está dada por:

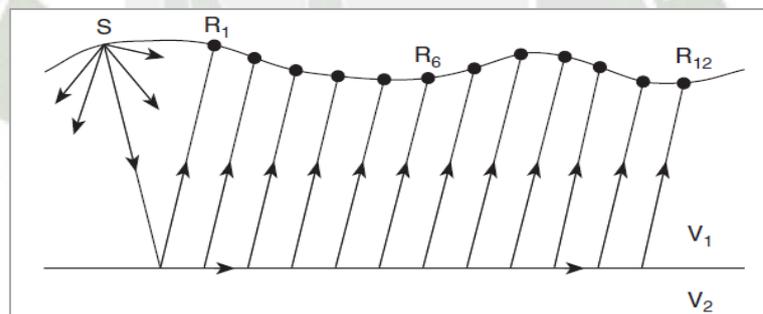
$$V_{app} = \frac{V_1}{\sin\theta_c} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Usando la ley de Snell, definida por la ecuación (2), podemos transformar la ecuación anterior en:

$$V_{app} = V_2 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Por tanto, la velocidad de las ondas refractadas medidas en la superficie es la velocidad del medio inferior.

La mayoría de las técnicas de interpretación de la refracción se basan en el análisis de la ruta de rayos de los datos, como se muestra en la Figura 5, que ilustra un diagrama de ruta de rayos simplificado para un modelo de dos capas cerca de la superficie. (Cox, 1999)



**Figura 5.** Rutas de rayos refractadas para un modelo simple cercano a la superficie Variables:  $V_1$  es la velocidad de la capa cercana a la superficie o erosionada y  $V_2$  es la velocidad del refractor.

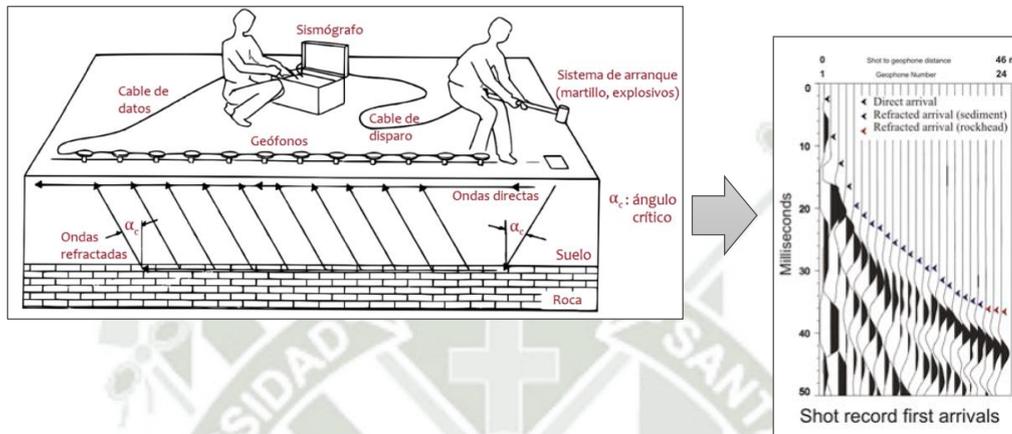
Fuente: Cox (1999)

#### 2.2.2.4 Metodología del método de refracción sísmica

##### a. Adquisición de datos

La adquisición de los datos en campo, consiste en generar ondas sísmicas por medio de la fuente de generación de ondas sísmicas (como explosivos o martillos), que viajan por el interior de la tierra hasta la superficie y que son captadas por sensores de movimiento o receptores llamados geófonos. Los registros obtenidos por los receptores, son recolectados visualizados y

almacenados por un equipo de adquisición de datos llamado sismógrafo. Las ondas sísmicas que se generan por el impacto artificial, son registradas dentro de un expediente de varios pulsos de llegadas y a cada uno de esos registros se les denomina “traza” y al conjunto de trazas se le denomina “Sismograma” (ver figura 6).

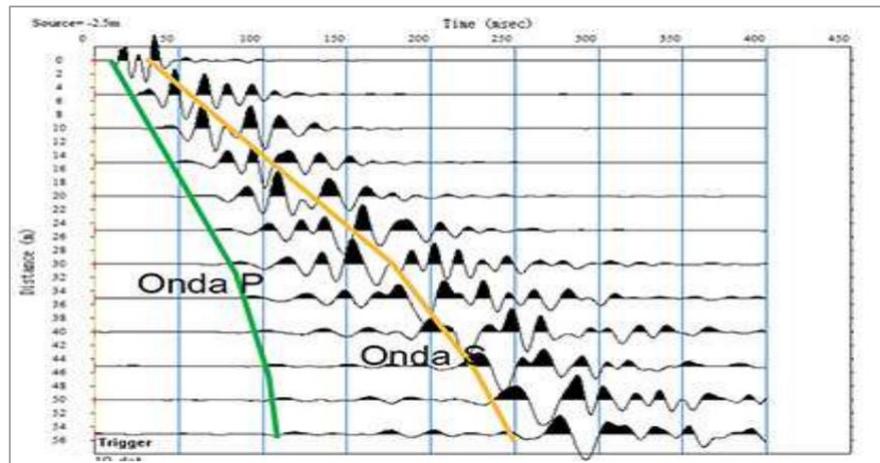


**Figura 6.** Adquisición de datos por el método de refracción sísmica. Izquierda: esquema del tendido sísmico y adquisición de datos. Derecha: imagen correspondiente a un sismograma.

Fuente: Robles (2018)

### b. Curvas tiempo-distancia

Los datos arrojados por la refracción en campo se representan mediante el trazado de una curva dromocrónica (ver figura 8) de tiempo vs distancia. En las curvas dromocrónicas se registran las primeras llegadas de las ondas P a los geófonos (ver figura 7), la pendiente de cada recta indica el inverso de la velocidad en cada medio atravesado por la onda. La base para este método es la ley de Snell que trabaja con los primeros registros de frente de onda sísmica los cuales incluyen tres tipos de ondas P: Ondas directas, Ondas reflejadas y Ondas refractadas con el ángulo crítico. (Patiño, 2015)



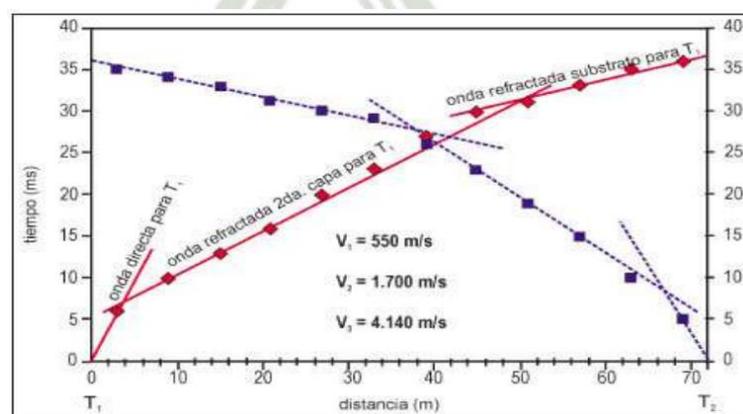
**Figura 7.** Representación de Ondas sísmicas en el sismograma: color verde ondas P, color naranja ondas S.

Fuente: Patiño (2015)

Según Patiño (2015), de la curva dromocrónica, se obtienen velocidades correspondientes a cada medio y el espeso de cada uno de estos:

La primera recta que parte del origen de coordenadas, representa la onda directa que viaja por la capa más superficial desde el origen de la fuente de energía hacia los geófonos. Su ecuación es  $t = X/V_1$ ; donde  $V_1$  es la velocidad de la primera capa.

La segunda recta representa la onda refractada es la interface entre la primera y segunda capa. Su ecuación es  $t = T_1 + X/V_2$ , donde  $V_2$  es la velocidad de la segunda capa y  $T_1$  es el tiempo en el origen de la primera capa. Así mismo, según la ley de Snell, se verifica que  $\sin i_c = V_1/V_2$ , donde  $i_c$  es el ángulo de incidencia.



**Figura 8.** Representación gráfica de la curva dromocrónica.

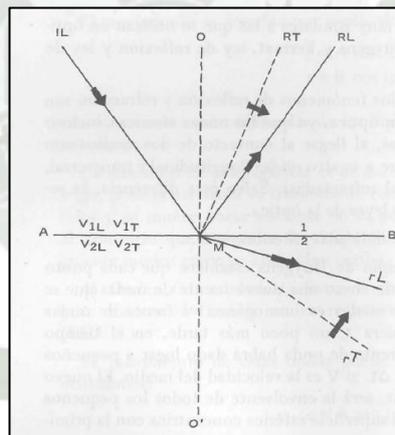
Fuente: Patiño (2015)

### 2.2.2.5 Principios de interpretación del método de refracción

Según Cantos Figuerola (1987), existen 5 principios generales para la interpretación en refracción, a continuación, se explica la Ley de Snell aplicado para este estudio.

#### a. Ley de Snell (Refracción y Reflexión)

Sea la figura 9, un rayo incidente longitudinal  $IL$  se propaga de un medio 1 a otro medio 2. Al llegar al contacto  $AB$  de los dos medios, da lugar a cuatro rayos, dos reflejados y dos refractados. La distribución de la energía inicial entre las ondas resultantes viene determinada por el ángulo con el que la onda llegue a la discontinuidad y por el contraste entre las propiedades elásticas de dichos medios. Según las leyes de la reflexión y refracción se verificará que el rayo incidente, la normal y los rayos reflejados y refractados estén en un mismo plano (plano de incidencia). (Cantos Figuerola J. , 1987)



**Figura 9.** Rayos reflejados y refractados.  $IL$ = Rayo incidente longitudinal,  $RL$ = Rayo reflejado longitudinal,  $RT$ =Rayo reflejado transversal,  $rl$ = Rayo refractado longitudinal,  $rT$ = Rayo refractado transversal,  $MO$ =Punto de origen.

Fuente: Cantos Figuerola J. (1987)

Por consiguiente, para los rayos reflejados se demuestra la siguiente igualdad:

$$IL MO = RL MO \quad (\text{Ecuación 3})$$

Es decir, que el ángulo incidente es igual al ángulo reflejado para el rayo longitudinal.

Para los rayos incidente y refractado longitudinales se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{sen } i_{LMO}}{\text{sen } r_{LMO}} = \frac{V_1}{V_2} \quad (\text{Ecuación 4, Ley de Snell})$$

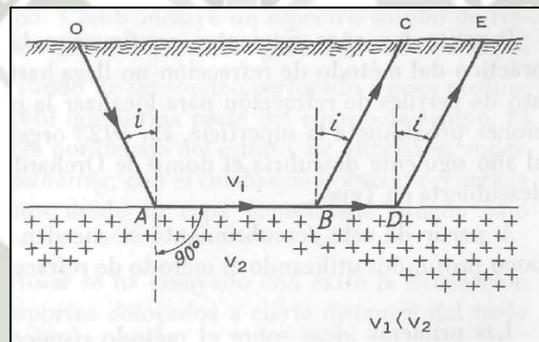
Tal ecuación, es la expresión matemática de la ley de Snell, que también se conoce como ley de Descartes.

Cuando el ángulo de refracción  $\theta$  es igual a  $90^\circ$ , el rayo refractado AB viaja a lo largo de la interfaz entre los dos medios. En la figura 10, Sea OA un rayo incidente se tiene que:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } 90} = \frac{V_1}{V_2} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Es decir;

$$\text{sen } i = \frac{V_1}{V_2} \quad (\text{Ecuación 6})$$



**Figura 10.** Diagrama del recorrido del frente de ondas entre dos medios diferentes.

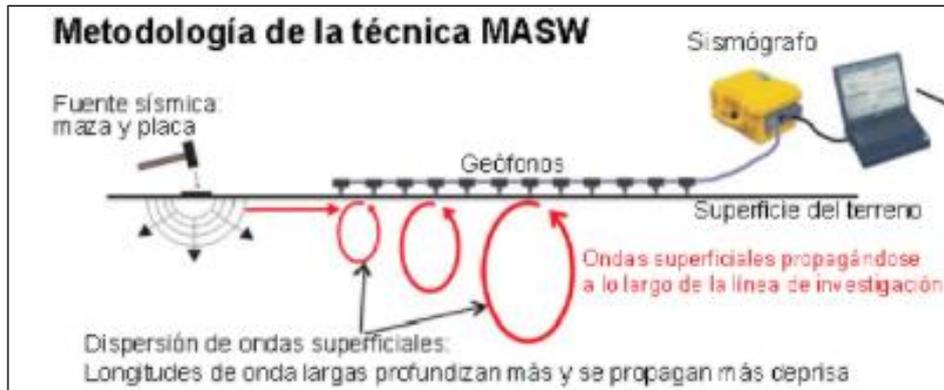
Fuente: Cantos Figuerola J. (1987)

En la figura 10, el rayo AB, viajará por el contacto de los medios 1 y 2. Según el principio de Huygens, cada uno de los puntos alcanzados por el frente de ondas es una nueva fuente de ondas. Cada uno de los puntos del contacto ABD, generara frentes de ondas que alcanzaran la superficie, pudiendo ser detectados por instrumentos adecuados.

### 2.2.3 Análisis Multicanal De Ondas Superficiales (MASW)

Según Park, Miller, & Xia, (1999), “el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), es un método indirecto no destructivo, cuya finalidad es estimar las velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) a partir del análisis de las propiedades de dispersión de los modos

fundamentales de las ondas Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie desde el punto de impacto (fuente sísmica) a los receptores (geófonos)”, como se muestra en la figura 11.



**Figura 11.** Distribución del Método MASW.

Fuente: TerraDat (2017)

La propiedad dispersiva de las ondas de Rayleigh (es decir, la dependencia de la velocidad con la frecuencia) proporciona información extremadamente útil sobre las propiedades de los materiales cercanos a la superficie. La energía de longitud de onda más larga se propaga a mayores profundidades, mientras que la energía de frecuencia más alta se atenúa en la superficie cercana. Esta dependencia de la frecuencia se puede utilizar para derivar modelos de velocidad de onda de corte en función de la profundidad, que a su vez se puede utilizar para caracterizar la geología del subsuelo.

Las principales ventajas reportadas del método MASW son las siguientes (Ólafsdóttir, 2014):

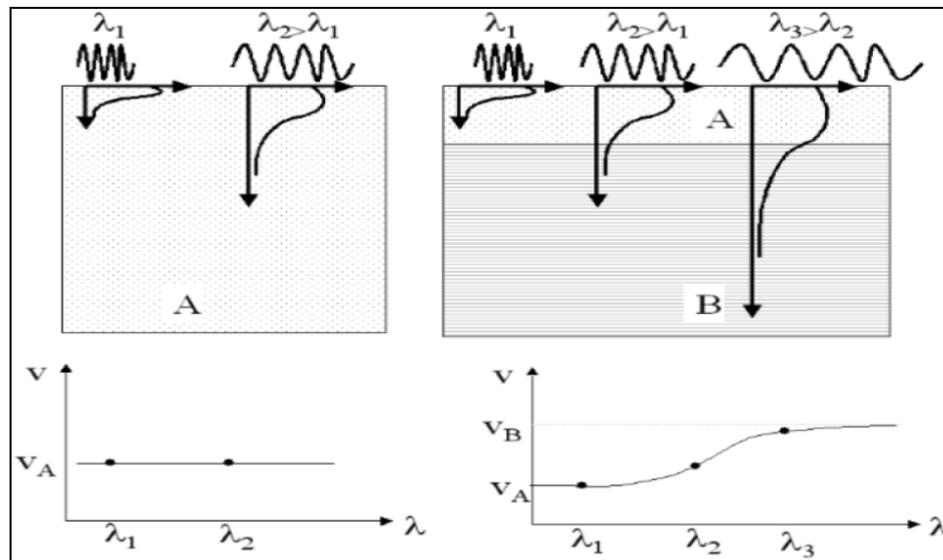
- Menor tiempo de adquisición de datos en campo. El método MASW requiere solo una recopilación de un solo disparo para una configuración de receptor de fuente. Sin embargo, en otros métodos sísmicos, es necesario registrar disparos repetidos para diferentes implementaciones de campo para muestrear el rango de frecuencia deseado. (Park, Miller, & Xia, 1999)

- Rapidez y facilidad para automatizar el análisis de dispersión de las ondas superficiales (Xia, y otros, 2002).
- Mayor facilidad para identificar y eliminar las fuentes de ruido (Park, Miller, & Xia, 1999), (Xia, y otros, 2002). La reducción del ruido conduce a una mayor precisión en el análisis de dispersión y, en última instancia, a un perfil de velocidad de onda de corte más preciso.
- Mayor profundidad de investigación. La profundidad máxima de investigación que se puede lograr utilizando el método MASW (activo) es generalmente de alrededor de 30 m, asumiendo que las ondas superficiales son generadas por una fuente sísmica razonablemente pesada (Park, Miller, Xia, & Ivanov, 2007).
- Permite observar características de dispersión multimodal a partir de los datos registrados de ondas superficiales (Park, Miller, & Xia, 1998), (Xia, Miller, Park, & Tian, 2003).
- Mayor rentabilidad en la evaluación de las velocidades de ondas de corte en dos y / o tres dimensiones (Park, Miller, Xia, & Ivanov, 2007); (Xia, Miller, Park, & Ivanov, 2000).
- Permite el análisis de ondas superficiales generadas pasivamente. Las ondas superficiales que son generadas por fuentes pasivas tienen frecuencias más bajas (longitudes de onda más largas) que las ondas generadas por cargas de impacto (activas). Por lo tanto, el uso de ondas superficiales generadas pasivamente puede aumentar sustancialmente la profundidad de la investigación (Park, Miller, Xia, & Ivanov, 2007).

### **2.2.3.1 Fundamento teórico**

Cuando se golpea en la superficie de un terreno, se generan ondas elásticas tanto de cuerpo (compresión y corte) como de superficie (principalmente tipo Rayleigh). La velocidad de propagación de las ondas Rayleigh, en un medio homogéneo e isótropo, es independiente de su longitud de onda. Sin embargo, si en un medio (por ejemplo depósitos de suelo) hay estratos con rigideces, densidades o relaciones de Poisson variables, entonces la velocidad de la onda

de Rayleigh dependerá de su longitud de onda o frecuencia como se observa en la Figura 12. Cuando la velocidad y la frecuencia (o longitud de onda) de una onda son dependientes entre sí, se dice que la onda es **dispersiva**. (Tokimatsu, 1997)

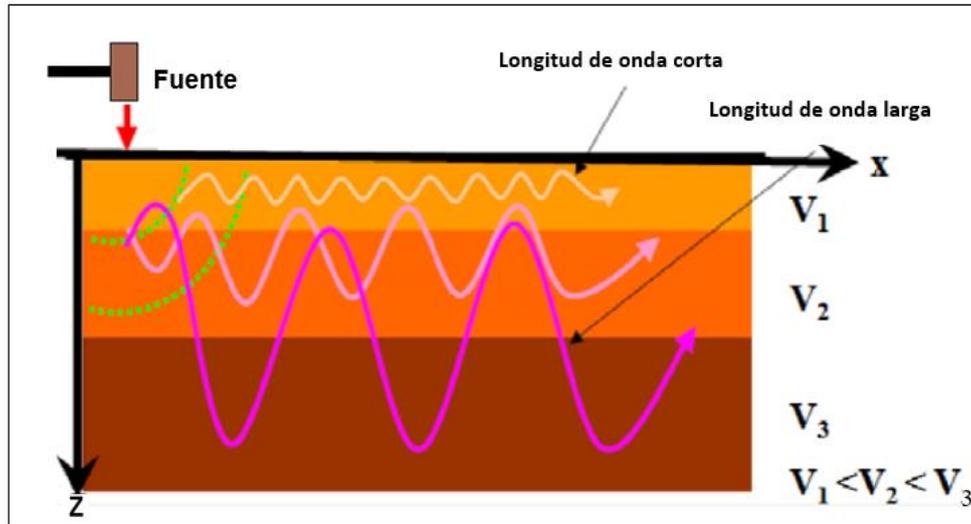


**Figura 12.** Velocidad de fase para distintas longitudes de ondas ( $\lambda_i$ ) en un semiespacio homogéneo (izquierda) y en un medio estratificado (derecha).

Fuente: Strobbia (2003)

El concepto de **dispersión** se define, como el cambio de velocidad de la propagación de ondas superficiales en función de la longitud de onda y la frecuencia. Las ondas superficiales al penetrar una superficie con distintas capas de diferente velocidad, se dispersan, dando lugar a una velocidad de propagación particular para cada longitud de onda. (Park, Miller, & Xia, 1999)

En la Figura 13 se observa que la velocidad del subsuelo aumenta con la profundidad. Cuando la longitud de onda es corta, menor velocidad de propagación y por lo tanto menor penetración en profundidad (son más sensibles a las propiedades físicas de las capas superficiales); mientras que, para longitudes de ondas largas, mayor velocidad de propagación por lo tanto la penetración es mayor en profundidad (son más sensibles a las propiedades elásticas de las capas más profundas).



**Figura 13.** Esquema de propagación de ondas sísmicas a través de diferentes capas del subsuelo generadas por una fuente activa.

Fuente: Soto (2015)

Es importante mencionar que para una frecuencia determinada, existirán un número de modos, cada uno con distintas velocidades aparentes. Su existencia se fundamenta físicamente por la presencia de interferencias constructivas entre las curvas de los rayos que pasan a través de medios heterogéneos y entre las ondas reflejadas y transmitidas en una capa. La aparición de diferentes modos de propagación, ofrecen un caso muy complejo, dado que la energía producida por la fuente impulsiva, es propagada a grandes distancias con una superposición de los diferentes modos. Es decir, encontrar el modo fundamental, es complejo; sin embargo, para un perfil normalmente dispersivo, el modo dominante o fundamental predomina en el campo de ondas, ya que representa el modo con mayor energía. (Shearer, 1999)

### 2.2.3.2 Metodología del método MASW

La aplicación del método MASW se divide en tres pasos (Park, Miller, & Xia, 1999).

#### a. Medidas de campo

Los geófonos están alineados en una línea recta, igualmente espaciada en la superficie del sitio de prueba. Se genera una onda con una carga de impacto en un extremo de la alineación

y los geófonos registran el movimiento de onda resultante en función del tiempo. Una recolección de un solo disparo es suficiente (Park, Miller, & Xia, 1999).

**b. *Procesamiento de datos***

Se extrae una curva de dispersión de los datos de ondas superficiales medidos. Se describen dos métodos de análisis diferentes. Un enfoque de frecuencia de barrido (Park, Miller, & Xia, 1999) y el método de cambio de fase (Park, Miller, & Xia, 1998).

**c. *Análisis de inversión***

Se obtiene una curva de dispersión teórica para el sitio de prueba, con iteración, basada en un número y espesor asumidos de capas de suelo y propiedades del material asumidas, como la velocidad de la onda de corte, para cada capa. La curva de dispersión experimental se utiliza como referencia (Park, Miller, & Xia, 1999). El perfil de velocidad de la onda de corte y la estructura de capas que resultan en una curva de dispersión teórica que se ajusta a la experimental se toman como resultado del levantamiento.

**2.2.3.3 *Adquisición de datos de ondas de superficie***

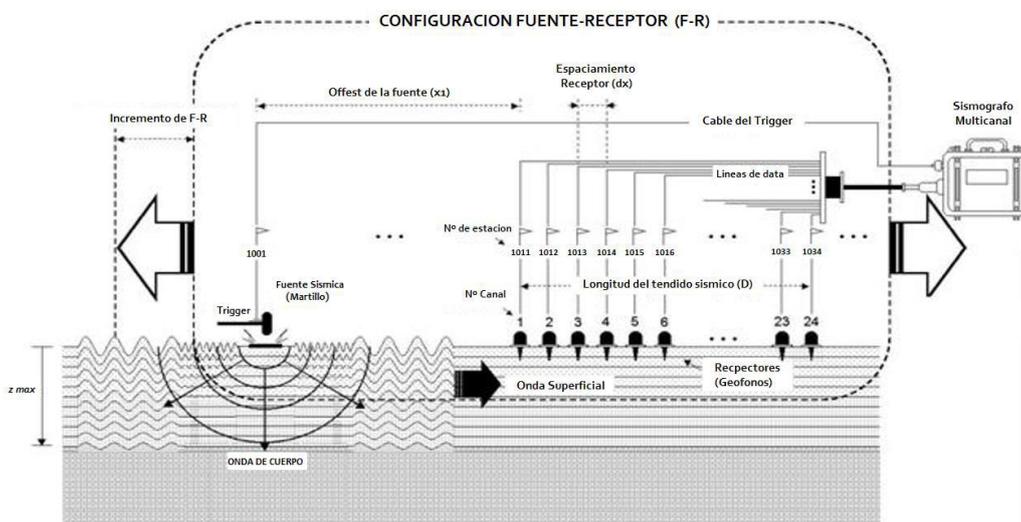
Para la adquisición de datos MASW activos, geófonos polarizados verticalmente de baja frecuencia (por ejemplo, 4.5 Hz) se alinean en la superficie del sitio de prueba en los intervalos iguales apropiados. La cantidad de geófonos utilizados es típicamente 24 o más con un espaciado intergeófono constante que está optimizado para las condiciones geológicas específicas del sitio. (Alsulaimani, 2017)

Cada geófono está conectado a un canal de grabación separado (Park, Miller, & Xia, 1998) y toda la matriz está conectada a un sismógrafo de ingeniería y una computadora portátil de campo equipada con el software necesario para la grabación de datos. Se genera una onda de superficie con una carga de impacto en un extremo de la alineación y los geófonos registran el movimiento de onda resultante en función del tiempo.

La fuente sísmica puede ser un mazo de 20 libras, un dispositivo de impacto mecánico, una escopeta o explosivos, según la profundidad de la investigación y las condiciones específicas del lugar. La llegada de la onda de superficie se detecta a lo largo de un conjunto de geófonos y se registra en un sismógrafo, y la salida de cada geófono se muestra como un solo trazo (Alsulaimani, 2017).

La configuración adecuada de los parámetros de adquisición de datos es esencial para el éxito del levantamiento de ondas superficiales. Los parámetros de campo importantes son la longitud total de la extensión del receptor, el desplazamiento de la fuente (la distancia entre la fuente y el geófono más cercano) y el espaciado del receptor (Alsulaimani, 2017).

Como los geófonos solo registran el movimiento vertical, es importante que se coloquen verticalmente en el subsuelo. Cada geófono está conectado a través de un canal de grabación separado a una tarjeta de adquisición de datos y una computadora equipada con el software de adquisición de datos necesario (Alsulaimani, 2017) (Figura 14.).



**Figura 14.** Configuración del arreglo sísmico lineal y sus parámetros para la adquisición de datos sísmicos.

*Fuente: Taipodia, Baglari, & Dey (2015)*

Como se ilustra en la Figura 14, los geófonos se perfilan en la superficie del sitio de prueba. Se genera una onda y se registra su propagación. La profundidad máxima de la investigación ( $Z_{max}$ ) varía con el sitio, la frecuencia natural ( $f_e$ ) de los geófonos y el tipo de fuente sísmica

que se utiliza. La profundidad máxima de investigación está determinada por la longitud de onda de Rayleigh más larga que se obtiene durante la adquisición de datos ( $\lambda_{\max}$ ). La siguiente ecuación es un criterio empírico comúnmente adoptado por (Park & Carnevale, Optimum MASW Survey — Revisit after a Decade of Use, 2010):

$$Z_{\max} \approx 0.5\lambda_{\max} \quad (\text{Ecuación 7})$$

#### 2.2.3.4 *Procesamiento de datos*

Después de la adquisición de datos, los registros de campo se analizan utilizando el software de procesamiento de MASW. Para convertir el registro sísmico en una estimación de la velocidad de la onda de corte, se deben realizar dos pasos cruciales: la generación de la imagen de dispersión y la extracción de la curva de dispersión del modo fundamental.

El software calcula las velocidades de fase para cada componente de frecuencia de los datos MASW registrados para generar la imagen de dispersión resultante para extraer la curva de dispersión. Luego, la curva se invierte usando un enfoque de mínimos cuadrados para generar un perfil de velocidad de onda de corte vertical. (Alsulaimani, 2017)

Básicamente, el software realiza la transformación de campo de ondas desde el dominio de desplazamiento a tiempo en el dominio de velocidad de fase al dominio de frecuencia (registro multicanal, dominio de tiempo-espacio, a imagen de dispersión, dominio de velocidad de fase de frecuencia) posteriormente, los datos MASW se invierten para generar un perfil de velocidad de onda de corte 1-D en función de la profundidad (ver figura 16) (Alsulaimani, 2017).

##### *a. Análisis de dispersión.*

La intención del análisis de dispersión es estimar una o más curvas de dispersión que a su vez pasan al siguiente paso del proceso de inversión. Los siguientes son los factores más influyentes que afectan el análisis de dispersión:

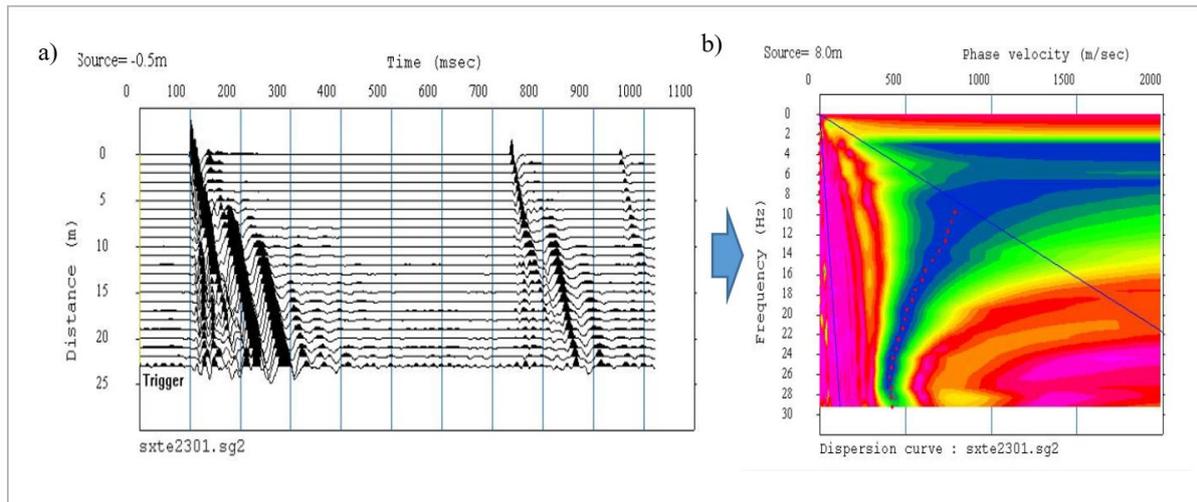
1. Rango de frecuencia para la profundidad de la investigación,

2. Rango de velocidad de fase aproximada,
3. Caracterización sencilla de modos superiores y
4. Identificación y reducción de eventos de ruido.

La influencia de estos factores en el análisis depende en gran medida de la calidad de los datos (relación señal / ruido,  $S / N$ ). Un conjunto de datos de "buena" calidad sugiere que la onda de superficie es el evento sísmico más prominente (con la relación  $S / N$  más alta), mientras que un conjunto de datos de "mala" calidad suele estar contaminado por ruido. En el análisis de la curva de dispersión, las ondas superficiales del modo fundamental son la señal y todo lo demás es ruido. El ruido incluye todas las ondas superficiales de modo superior, así como todos los eventos de ondas corporales. (Alsulaimani, 2017)

El software también realiza la evaluación de un rango de velocidad de fase aproximado para las ondas superficiales. Por lo general, varía desde tan solo 650 pies / seg (o 200 m / seg) hasta tan alto como 2,500 pies / seg (760 m / seg) dependiendo del tipo de material. El programa utiliza esta información para iniciar el análisis mediante la búsqueda dentro de este rango de velocidad de fase correspondiente a una determinada frecuencia de onda de superficie con la mayor coherencia en todo el rango de compensación y la relación señal-ruido más alta que es indicativa de una alta confianza en la velocidad de fase adquirida.

El software calcula las velocidades de fase dentro del rango de frecuencia especificado (Figura 15). Este cálculo se puede ejecutar varias veces utilizando diferentes valores y variedades de parámetros, examinando las curvas de salida hasta que se identifica una solución óptima. En general, la curva con la relación señal / ruido más alta ( $S / N$ ) representa la mejor opción. La calidad de una curva de dispersión se juzga de acuerdo con dos criterios: la relación señal / ruido ( $S / N$ ) y la dirección de la curva de dispersión general. (Alsulaimani, 2017)



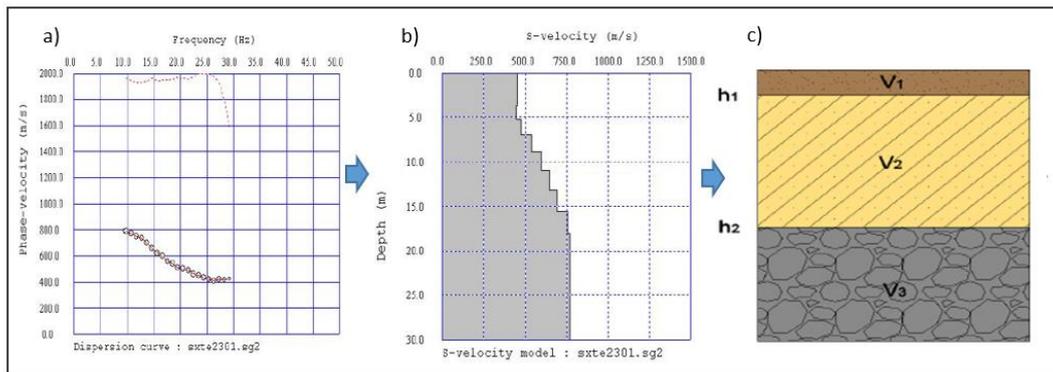
**Figura 15.** a) Adquisición de datos de series de tiempo sísmicas; b) Frecuencia de extracción de curvas de dispersión y velocidad de fase.

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso de procesamiento es una extracción de una curva de dispersión de modo fundamental de la imagen de dispersión. Esta curva extraída se denomina curva de dispersión "medida" y es un dato de entrada para el siguiente paso de análisis de datos (inversión). La calidad de los registros de ondas superficiales adquiridos se puede evaluar en términos de la resolución del espectro de velocidad de fase, es decir, la nitidez de los picos de amplitud observados en cada frecuencia, el rango de frecuencia extraíble y la continuidad de la banda de alta amplitud del modo fundamental. La calidad de una curva de dispersión se juzga de acuerdo con dos criterios: la relación señal / ruido ( $S / N$ ) y la dirección de la curva de dispersión general. La calidad de la "coincidencia" entre las dos curvas se evalúa sobre la base del error cuadrático medio. (Xia, Miller, & Park, 1999)

### **b. Inversión**

La idea general de la inversión, es generar un modelo de la velocidad de ondas de corte de los estratos horizontales de suelo en función de la profundidad a través de la inversión de los datos de dispersión de la velocidad de fase de las ondas superficiales (específicamente las ondas Rayleigh) de altas frecuencias (Xia, Miller, & Park, 1999) (Ver Figura 16).



**Figura 16.** a) Curva de Dispersión. b) Modelo de Velocidad Vs vs Profundidad. c) Estimación de la profundidad del subsuelo a partir del estudio MASW.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.3.5 Interpretación

La interpretación de datos de MASW implica el análisis de las variaciones de las velocidades de las ondas de corte con la profundidad con el objetivo de transformar el modelo de velocidad de salida en un modelo geológico del subsuelo. (Alsulaimani, 2017)

La confiabilidad de los datos de velocidad de la onda de corte de salida disminuye a medida que aumenta la heterogeneidad lateral y vertical del suelo / roca. Por lo tanto, se deben considerar las condiciones del sitio; el hundimiento inmoderado de la capa subsuperficial a lo largo de la línea de levantamiento (más de aproximadamente el 10 por ciento), la topografía desventajosa o la alta variabilidad lateral conocida en las propiedades del suelo o la roca pueden ser razones para rechazar los datos de campo como inconvenientes para la interpretación en términos de variación vertical simple de subsuperficie. (Alsulaimani, 2017)

Finalmente, con los resultados obtenidos se puede determinar el tipo de suelo según el rango de velocidades calculados a partir del análisis y procesamiento de los datos.

### 2.2.4 Constantes elásticas

**Esfuerzo y deformación.** - Si tenemos una fuerza  $F$  actuando uniformemente sobre un área  $S$ , definimos el esfuerzo por la relación  $f = F/S$ . Este esfuerzo puede ser de tensión o de compresión, según que esté dirigido hacia fuera del área o hacia el área. Si la fuerza se dirige

paralelamente al área, se llama esfuerzo cortante. El coeficiente de alargamiento  $\varepsilon_1$  es la relación entre el alargamiento (o acortamiento)  $\Delta l$  producido por un esfuerzo y la longitud inicial  $l$ . Análogamente, el coeficiente de deformación transversal  $\varepsilon_d$  es:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{Ecuación 8}) \quad ; \quad \varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Se define como deformación de cizallamiento el ángulo de deformación producido por un esfuerzo cortante.

**Módulo de Young (E).** - Si actuamos sobre una barra con una fuerza F paralela al eje de la barra sobre una superficie S, variamos su longitud. El módulo E es:

$$E = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} = \frac{\text{Fuerza por unidad área}}{\text{Cambio en longitud por unidad de longitud}} = \frac{F/S}{\Delta l/l} \quad (\text{Ecuación 10})$$

**Coefficiente de Poisson ( $\sigma$ ).** - Es la relación entre las dos deformaciones unitarias:

$$\sigma = \frac{\text{Deformación transversal unitaria}}{\text{Deformación longitudinal unitaria}} = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \quad (\text{Ecuación 11})$$

**Módulo de rigidez o de cizallamiento ( $\mu$ ).** - Es la relación entre las dos deformaciones unitarias:

$$\mu = \frac{\text{Fuerza por unidad área}}{\text{Deformación por cizallamiento}} = \frac{F/S}{\Phi} \quad (\text{Ecuación 12})$$

La deformación de cizallamiento se define como el desplazamiento relativo de planos paralelos o por el ángulo  $\Phi$ , que giraría un plano normal a la fuerza.

**Módulo de Bulk o de incomprensibilidad (k).** - Propiedad importante de los materiales en su resistencia al cambio de volumen sin que varíe su forma.

$$k = \frac{\text{Presión}}{\text{Cambio volumen por unidad de volumen}} = \frac{P}{\Delta V/V} \quad (\text{Ecuación 13})$$

**La densidad ( $\rho$ ).** - No es una constante elástica, pero es una propiedad importante en la transmisión de las ondas elásticas en las rocas.

### 2.2.5 Velocidad de propagación

La velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales es en función de las constantes elásticas de los medios en que se propagan:

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}; V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

*E*: Módulo de Young

*σ*: Coeficiente de Poisson

*ρ*: Densidad

*V<sub>L</sub>*: Velocidad de las ondas longitudinales

*V<sub>T</sub>*: Velocidad de ondas transversales

### 2.3 Marco legal

Los criterios de análisis para la interpretación de los ensayos de exploración geofísica, se determinaron en base a la experiencia de estudios realizados por diferentes autores a los estándares internacionales de la ingeniería geotécnica y a tablas de velocidades de los diferentes materiales que componen el subsuelo.

En las siguientes tablas presentamos normas que nos permiten calcular la velocidad promedio de ondas de corte Vs30, con la finalidad de caracterizar sísmicamente el tipo de suelo en función de los perfiles de ondas de corte y sus respectivos valores de velocidad promedio.

- La Norma Peruana NTE E.030, (2016). “*Diseño Sismo resistente*”. clasifica los suelos según 5 tipos, como puede verse en la tabla:

**Tabla 2. Clasificación de los perfiles de suelo**

Tipo de suelo	$\bar{V}_s$	$\bar{N}_{60}$	$\bar{S}_u$	Clasificación de los Suelos	Descripción General
S0	>1500 m/s	-	-	Roca Dura	Zona de roca dura y compacta
S1	500 m/s a 1500 m/s	>50	>100 kPa	Roca o suelos muy rígidos	Zona conformada por estrato de grava coluvial - aluvial a nivel superficial, o cubiertos por estrato de material fino de poco espesor

S2	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa	Suelos Intermedios	Estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos
S3	<180 m/s	<15	25 kPa a 50 kPa	Suelos Blandos	Depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor en estado suelto
S4	Clasificación basada en el EMS			Condiciones Excepcionales	Conformado por depósitos de arenas eólicas, depósitos marinos y suelos pantanosos

Fuente: Norma Peruana NTE E.030, (2016).

- La Norma internacional “*Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*” (ASTM. Designation - D5777, 1995), menciona que cada tipo de sedimento tiene un amplio rango de velocidades sísmicas, y muchos de estos rangos se superponen. Si bien la técnica de refracción sísmica mide la velocidad sísmica de las ondas sísmicas en los materiales terrestres, es el intérprete quien, basado en el conocimiento de las condiciones locales y otros datos, o ambos, debe interpretar los datos de refracción sísmica y llegar a una viabilidad geológicamente razonable solución.

**Tabla 3. Rango de velocidades para las ondas de compresión en el suelo**

Materiales	Velocidad	
	ft/s	m/s
<i>Natural Soil and Rock</i>		
<i>Weathered Surface material</i>	800 to 2 000	240 to 610
<i>Gravel or dry sand</i>	1 500 to 3 000	460 to 915
<i>Sand (saturated)</i>	4 000 to 6 000	1220 to 1830
<i>Clay(saturated)</i>	3 000 to 9 000	915 to 2750
<i>Water<sup>A</sup></i>	4 700 to 5 500	1430 to 1665
<i>Sea wáter<sup>A</sup></i>	4 800 to 5 000	1460 to 1525
<i>Sandstone</i>	6 000 to 13 000	1830 to 3960

<sup>A</sup>Depending on temperatura and salt content.

Fuente: ASTM. Designation – D5777, (1995)

**Tabla 4. Rango de velocidades para las velocidades de ondas P**

Materiales	Velocidad (m/s)
<i>Suelo intemperizado</i>	240 – 610

<i>Grava o arena seca</i>	460 – 915
<i>Arena saturada</i>	1830 – 1220
<i>Arcilla saturada</i>	910 – 2750
<i>Arenisca</i>	1830 – 3960
<i>Esquisto, arcilla esquitosa</i>	2750 – 4270

Fuente: ASTM. Designation – D5777, (1995)

- De acuerdo al código IBC 2012, se clasifica los suelos en 6 clases en función a la velocidad de ondas de corte promedio de un estrato de 30 m de profundidad.

**Tabla 5. Clasificación Del Sitio IBC.**

Perfil	Nombre del suelo	Propiedades promedio en los 30 primeros metros		
		Velocidad de onda de corte, $\bar{V}_s$ (m/s)	Resistencia a la penetración estándar, $\bar{N}$	Resistencia al corte no drenada, $\bar{S}_u$ (psf)
<i>A</i>	<i>Roca muy dura</i>	$\bar{V}_s > 1500$ m/s	N/A	N/A
<i>B</i>	<i>Roca</i>	$760 < \bar{V}_s < 1500$	N/A	N/A
<i>C</i>	<i>Suelo muy denso o roca blanda</i>	$360 < \bar{V}_s < 760$	$\bar{N} > 50$	$\bar{S}_u \geq 2000$
<i>D</i>	<i>Suelo rígido</i>	$180 < \bar{V}_s < 360$	$15 \leq \bar{N} \leq 50$	$1000 \leq \bar{S}_u \leq 2000$
<i>E</i>	<i>Suelo blando</i>	$\bar{V}_s < 180$	$\bar{N} < 15$	$\bar{S}_u \leq 1000$
<i>F</i>	<i>Suelos especiales (Suelos licuables, colapsables, arcillas de muy alta plasticidad, suelos orgánicos de más de 3m de espesor)</i>			

Fuente: The International Building Code®, (2012)

- “La Norma Peruana NTP E.050, *Suelos y cimentaciones*, establece los requisitos para la ejecución de Estudios de Mecánica de Suelos (EMS), con fines de cimentación, de edificaciones y otras obras indicadas en la misma” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018).



**CAPÍTULO III**  
**DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

### 3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio comprende el P.T. El Pasto del distrito de Socabaya, provincia y departamento de Arequipa. En la figura 17 podemos observar la delimitación del área de estudio. El plano de ubicación se adjunta en Anexos.

##### 3.1.1 Ubicación Política:

El P.T. El Pasto está ubicado en la margen inferior del río Socabaya, al este de la zona conocida como La Mansión. Este sector está asentado en el cruce de la Av. Las Peñas y Av. Sucre.

Departamento: Arequipa

Provincia: Arequipa

Distrito: Socabaya

##### 3.1.2 Ubicación Geográfica:

El P.T. El Pasto en coordenadas geográficas: Se ubica entre  $16^{\circ} 44' 40.20''$  de Latitud Sur y  $71^{\circ} 13' 2.19''$  de Longitud Oeste con respecto al Meridiano de Greenwich y a una altitud de 2450 metros sobre el nivel del mar.

Las coordenadas geográficas UTM sobre las que se extiende el centro poblado El Pasto son las siguientes:

En coordenadas UTM, DATUM o modelo es el elipsoide WGS84 se ubica entre:

Coordenada Norte: 8177794.77 m

Coordenada Este: 228693.80 m

Altitud: 2222 msnm



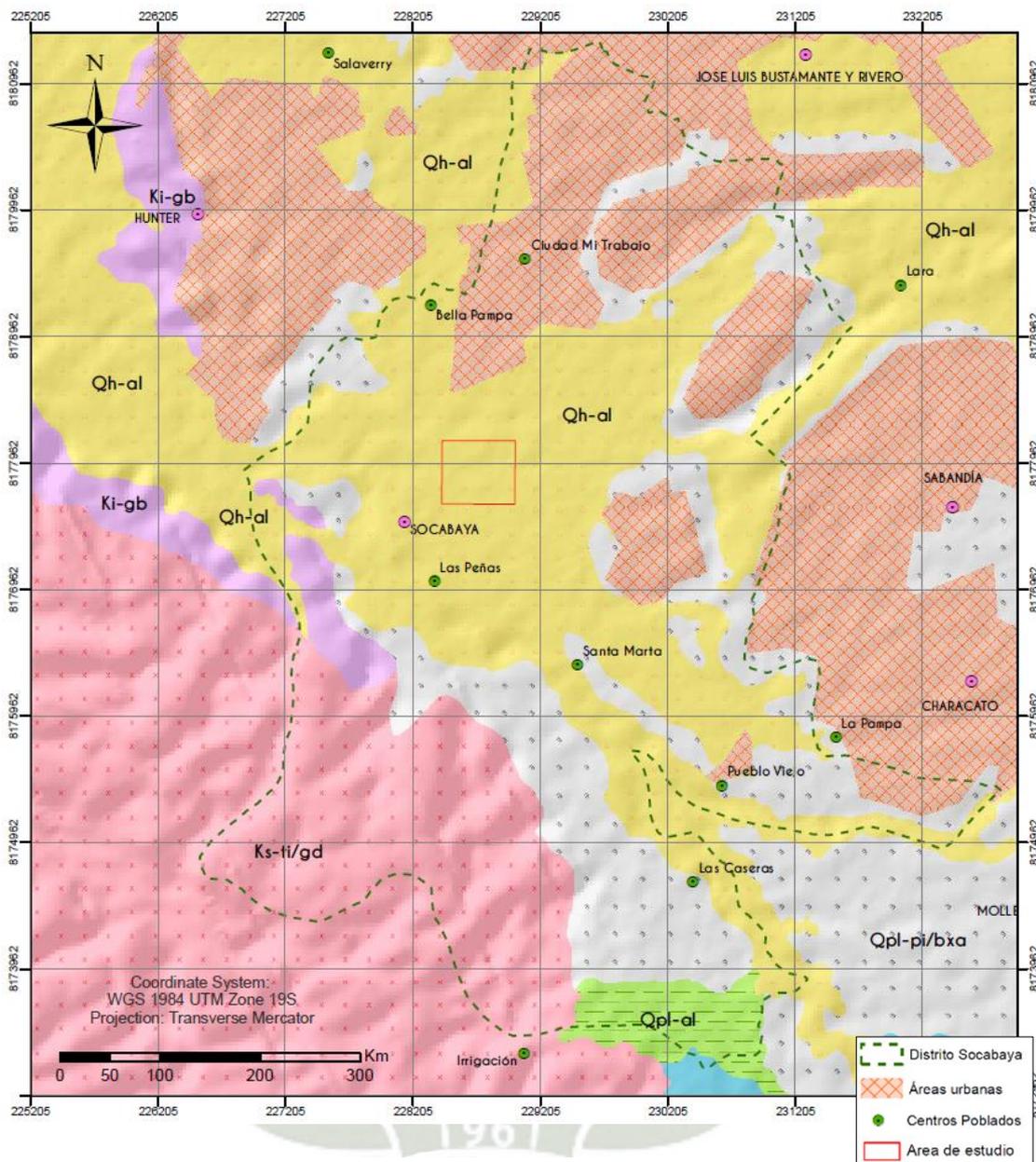
**FLUJO DE BARRO:** Compuesto por bloques andesíticos angulosos y un material cementante limo-arcilloso, con moderadas cantidades de carbonato de calcio. De la geología regional se deduce que esta unidad sobrepasa los 30 m de potencia. Este material ha sido considerado por la mayoría de los autores como de edad cuaternaria pleistocénica.

**MATERIAL ALUVIAL:** Sobre una capa de meteorización yace una arena limosa mal gradada de color café claro de fragmentos andesíticos de forma sub-redondeada y sub-angulosa, con una ligera plasticidad, embebidos en una matriz arenosa no cementada. El diámetro máximo de los fragmentos es de 6 cm.

**MATERIAL PALUDIAL 1:** A través de una discordancia erosional, sobre la unidad anterior, descansa una secuencia ínter estratificada de arenas, arenas finas y limos de color gris rosáceo, beige y beige rosáceo. La estratificación se presenta casi horizontal y las capas de limo varían entre 5 y 10 cm de espesor.

**MATERIAL PALUDIAL 2:** Esta unidad que rellena una antigua depresión del terreno, con una variedad de facies paludiales que van desde la arena gruesa de origen eólico hasta la ceniza blanca de origen volcánico, con un buen contenido orgánico. La arena de origen eólico es de color blanco grisáceo y contiene fragmentos pomáceos, sub-esféricos y sub-redondeados junto con la presencia de raicillas. La ceniza volcánica aparece esporádicamente. Estos materiales, en conjunto, están asociados en una zona pantanosa de vegetación y olor característico.

**MATERIAL ELUVIAL.** - Bajo esta denominación se describe la superficie reolítica que proviene de la meteorización de los suelos anteriores, principalmente del material aluvial que exhibe una edad mayor. La meteorización es fundamentalmente bioclimática, asociada a una coloración oscura que aparece en el dominio de la superficie del terreno. (p. 6-7)



LEYENDA

ERATERMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	DESCRIPCION
CENOZOICA	CUATERNARIO	HOLOCENA	Depósitos aluviales <span style="background-color: yellow;"> </span> Qh-al	Bloques, gravas y arenas
		PLEISTOCENA	Depósito de avalancha del Pichu-Pichu <span style="background-color: lightgrey;"> </span> Qpl-pi/bxa	Bloques, arenas y cenizas
	NEÓGENO	PLIOCENA	Conglomerado aluvial pleistoceno <span style="background-color: lightgreen;"> </span> Qpl-al	Arenas, gravas
			Fm . Añashuayco <span style="background-color: lightblue;"> </span> Np-añ	Tobas soldadas y no soldadas
MESOZOICA	CRETÁCEO	SUPERIOR	Rocas Intrusiva: Superunidad Tiabaya <span style="background-color: pink;"> </span> Ks-ti/gd	Grandiorita. Segmento Toquepala
			Rocas Intrusivas: Rocas básicas tempranas <span style="background-color: purple;"> </span> Ki-gb	Gabrodiorita. Segmento Arequipa

Figura 18 Mapa Geológico del distrito de Socabaya.

Fuente: Elaboración propia en base al Mapa geológico del cuadrángulo de Arequipa 33s4 de INGEMMET.

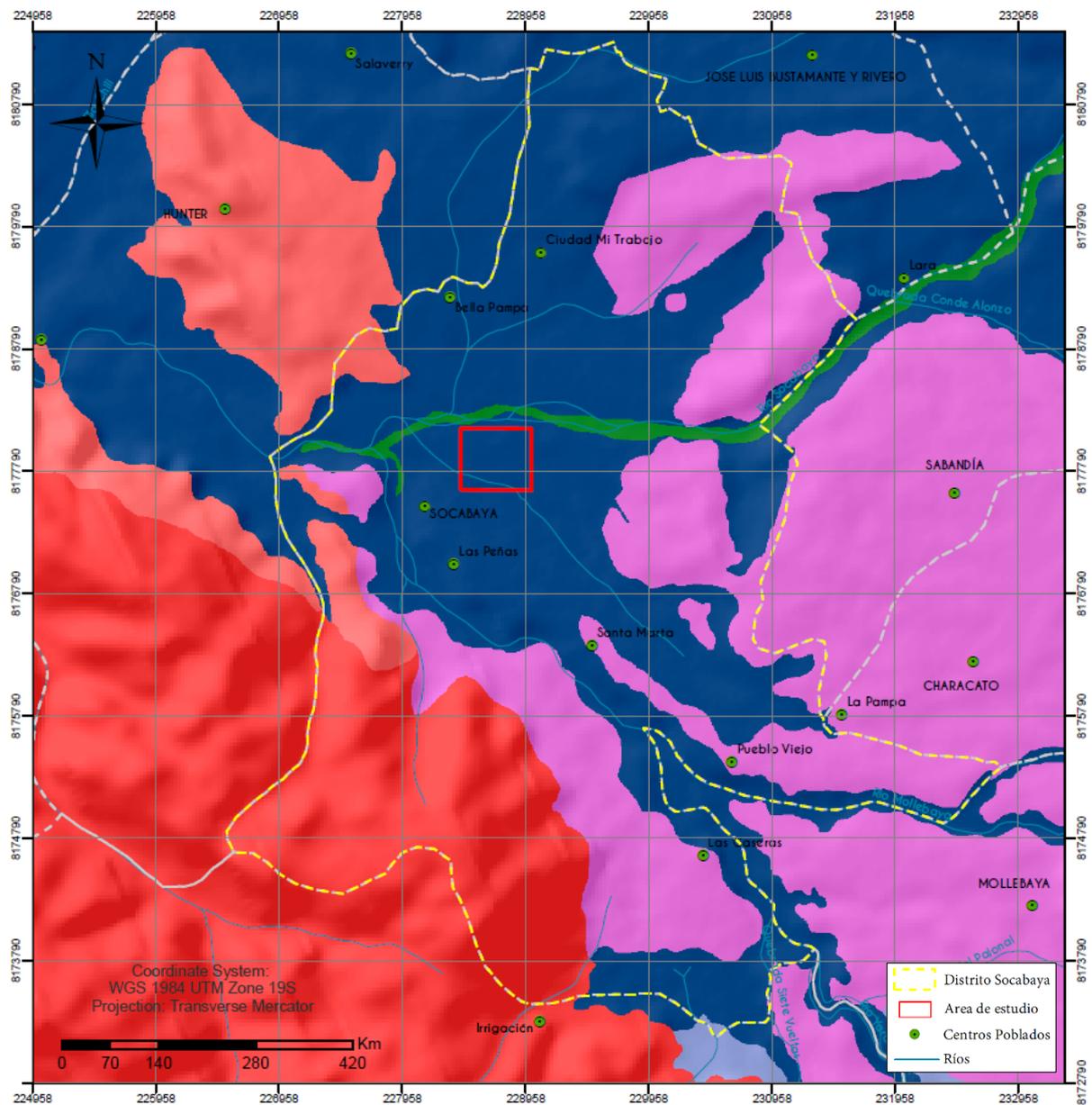
### 3.3 Geomorfología

Según Yanqui (1990), en la ciudad de Arequipa se han distinguido principalmente 3 unidades geomorfológicas: Cordillera de Laderas (GM-cL), Cadena del Barroso (GM-cB) y la Penillanura de Arequipa (GM-pA).

La penillanura de Arequipa (GM-pA) presenta una superficie ligeramente plana, conformada por materiales tufáceos hacia el oeste y materiales detríticos hacia el este, tiene como sub-unidad a la superficie de Socabaya (GM-pA-sS) (Aguilar, 1991).

#### 3.3.1 Geomorfología local

En el distrito de Socabaya, según INGEMMET se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas: Montañas y colinas en roca intrusiva (RMC-ri), Colina y lomada en roca intrusiva (RCL-ri), Superficie de flujo piroclástico (Sfp), Vertiente glacio-fluvial (V-gfl), Terraza Fluvial (T-fl), como se muestra en la figura 19. Específicamente nuestra área de estudio corresponde a la unidad geomorfológica Vertiente glacio-fluvial (V-gfl) que posee un relieve suavemente ondulado, compuesto por acumulación de sedimentos de arrastre glacio-fluvial del Cuaternario. Esta unidad se halla modificada por la erosión fluvial que ha labrado quebradas poco profundas de fondo plano en las partes bajas. El plano geomorfológico se adjunta en Anexos.

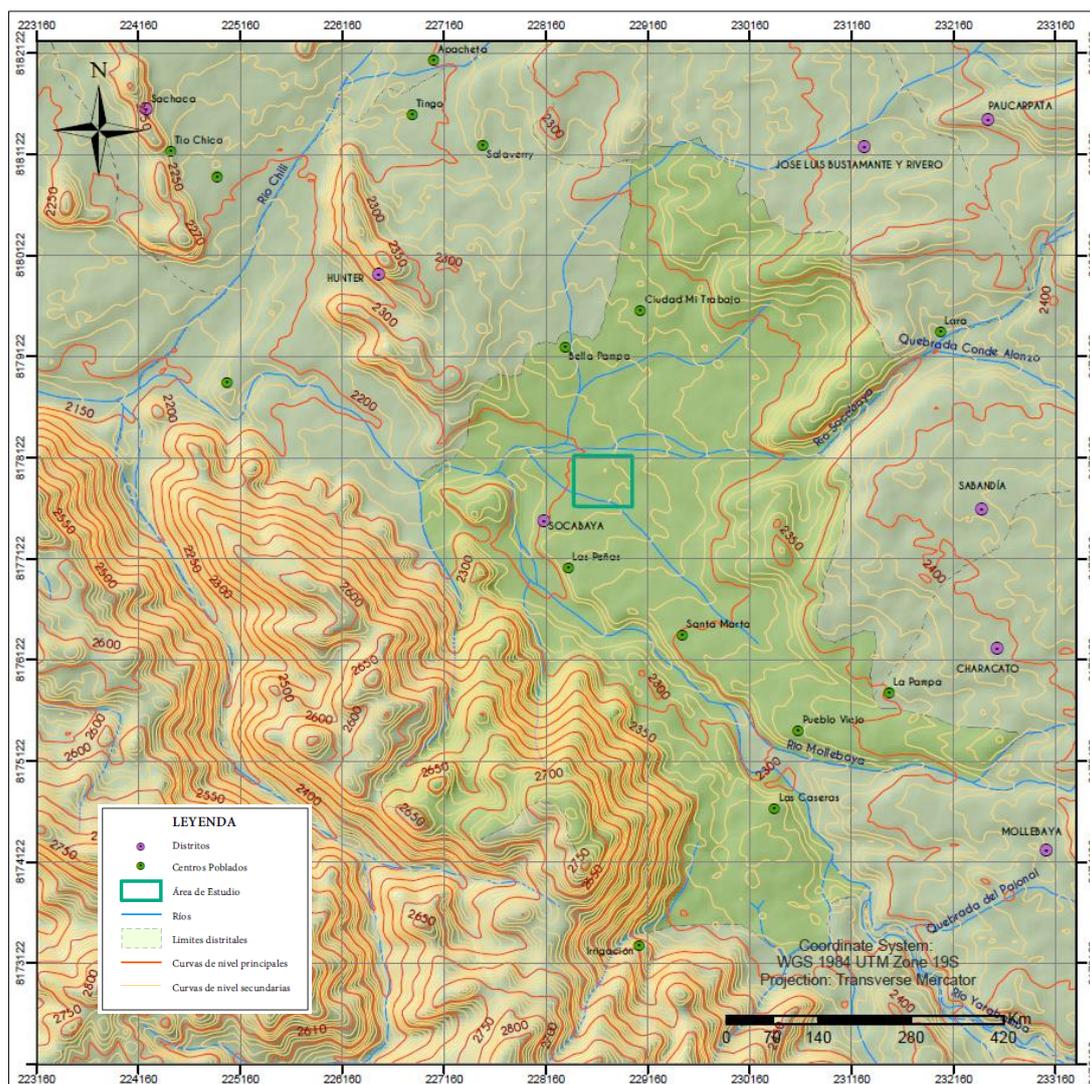


*Figura 19* Mapa geomorfológico del distrito de Socabaya.

*Fuente:* Elaboración propia en base al mapa geomorfológico de INGEMMET.

### 3.4 Topografía.

Según el Plan Anual de Evaluación y Fiscalización Ambiental PLANEFA (2018), Socabaya presenta “una topografía heterogénea y accidentada existiendo sectores planos y otros con pendiente pronunciada, situados al sureste del Distrito y hacia el sur oeste los suelos se caracterizan por ser irregulares y llanos” (Ver Figura 20).



**Figura 20** Mapa topográfico del distrito de Socabaya.

Fuente: Elaboración propia en base a la información cartográfica y de mapas del software “Global Mapper”.

### 3.5 Clima

Según el Plan Urbano Distrital (2019) “la temperatura media anual del distrito de Socabaya es de 15,8 °C, la máxima es de 22,6 °C y la mínima de 8,2 °C; la temperatura máxima extrema

llega a 25,6 °C en el mes de Mayo y la mínima extrema llega a 3,0 °C en el mes de Julio. La precipitación es de 44 mm al año”.

### 3.6 Caracterización geotécnica

Según Nuñez de Prado et al. (2001), el distrito de Socabaya se extiende principalmente sobre las unidades geotécnicas: Rocas Pre-Terciarias (G1-rpt), Flujos de Barro Meridionales (G6-fbm), Suelo Aluvial de Umacollo (G9-sau) y Suelo Paludial Reciente (G12-spr), como se puede apreciar en la figura 21 del mapa geotécnico de Arequipa.

La unidad geotécnica Suelo Paludial Reciente (G12-spr) se extiende en las zonas pantanosas de Lara, Bellapampa, El Pasto, a ambas márgenes del río Socabaya, donde la napa freática llega a la superficie. El material es areno-limoso, color beige, y arenas finas de origen eólico, peligrosas en estado suelto, presentando las condiciones más desfavorables para la cimentación. Presentan las siguientes características geotécnicas:

**Tabla 6. Características geotécnicas del Suelo Paludial Reciente (G12-spr)**

Características Geotécnicas	Valor
Angulo de fricción último	29° - 36°
Cohesión efectiva	0 Kg/cm <sup>2</sup>
Peso unitario en seco	1.4 - 1.7 gr/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica de sólidos	2.2 - 2.7
Densidad relativa	0 - 50%
Conductividad hidráulica	1.3 - 100 m/día

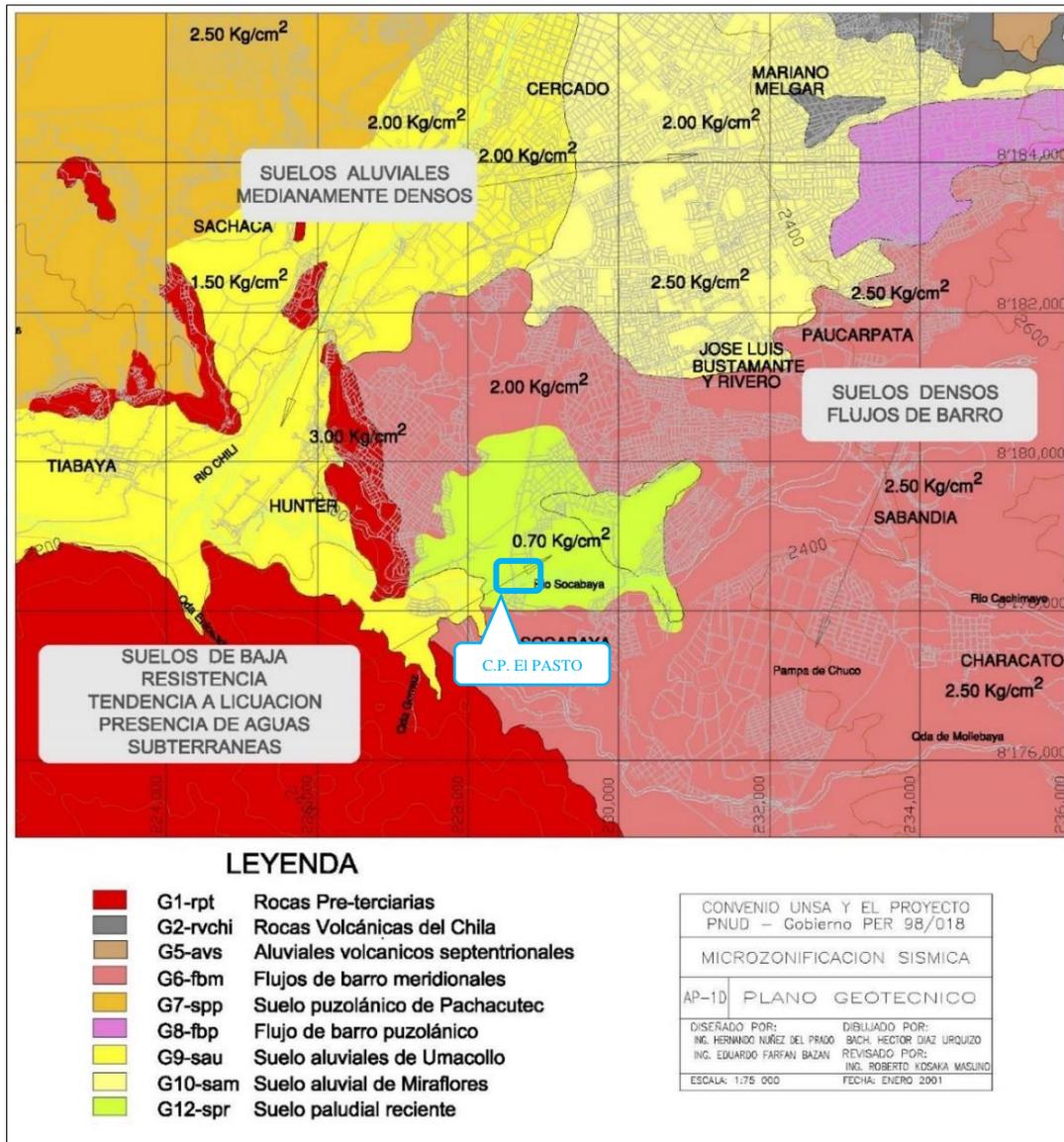
Fuente: Nuñez de Prado et al. (2001)

Málaga et ál. (2002), en el distrito de Socabaya distingue cuatro unidades geotécnicas definidas por sus características físicas y mecánicas: Material Flujo De Barro (M-fb), Material Aluvial (M-a), Material Eluvial (M-e), Material Paludial (M-p). La zona geotécnica de Material Paludial (M-p) está constituida por arenas medias a finas de origen eólico, con presencia de materiales de cenizas volcánica, presentando bajas densidades en estado de saturación.

El centro Poblado el Pasto se extiende principalmente por la unidad geotécnica material Paludial (M-p), de origen palustre proveniente de la formación fangosa por saturación,

corresponde superficialmente a una arena limosa algo alterada por material antrópico de relleno gravoso, como uso de material estabilizante, este material paludial presenta variaciones desde unos pocos centímetros hasta más de dos metros en torrenteras, presentando valores de capacidad portante menores de  $1.00 \text{ kg/cm}^2$ . Para el cálculo de capacidad portante considera la cimentación de una vivienda típica, con un ancho de cimiento corrido de 0.40 m, emplazada a una profundidad de 0.80 m.

Según Seminario & Pinto (2018), las características y propiedades de los suelos estudiados en el C.P El Pasto, corresponden en su mayoría a arenas limosas (SM), encontrándose también limos de baja plasticidad (LM) y gravas limosas (GM) en menor porcentaje. De acuerdo al criterio de que suelos sin cohesión, con densidades relativas bajas son más susceptibles a licuarse. Se estableció el nivel freático promedio del área de estudio en 1.80 m, encontrándose el nivel más superficial de aguas a 0.80 m.



*Figura 21 Mapa geotécnico.*

*Fuente: Nuñez de Prado et al. (2001)*

### 3.7 Sismología

Según se indica en la norma E.030 Diseño Sismo resistente (2016) “el territorio nacional se considera dividido en cuatro zonas, a cada zona se le asigna un factor Z, este factor Z se expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad”.

Para el caso de estudio, la zona es correspondiente a 3 y un factor Z de 0.35.



**CAPÍTULO IV**  
**METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

## 4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 4.1 Diseño metodológico

La presente tesis corresponde a una investigación experimental, y de forma cuantitativa porque recoge y analiza los datos numéricos con referencia a las variables (dependientes o independientes).

### 4.2 Adquisición de datos

#### 4.2.1 Instrumentación

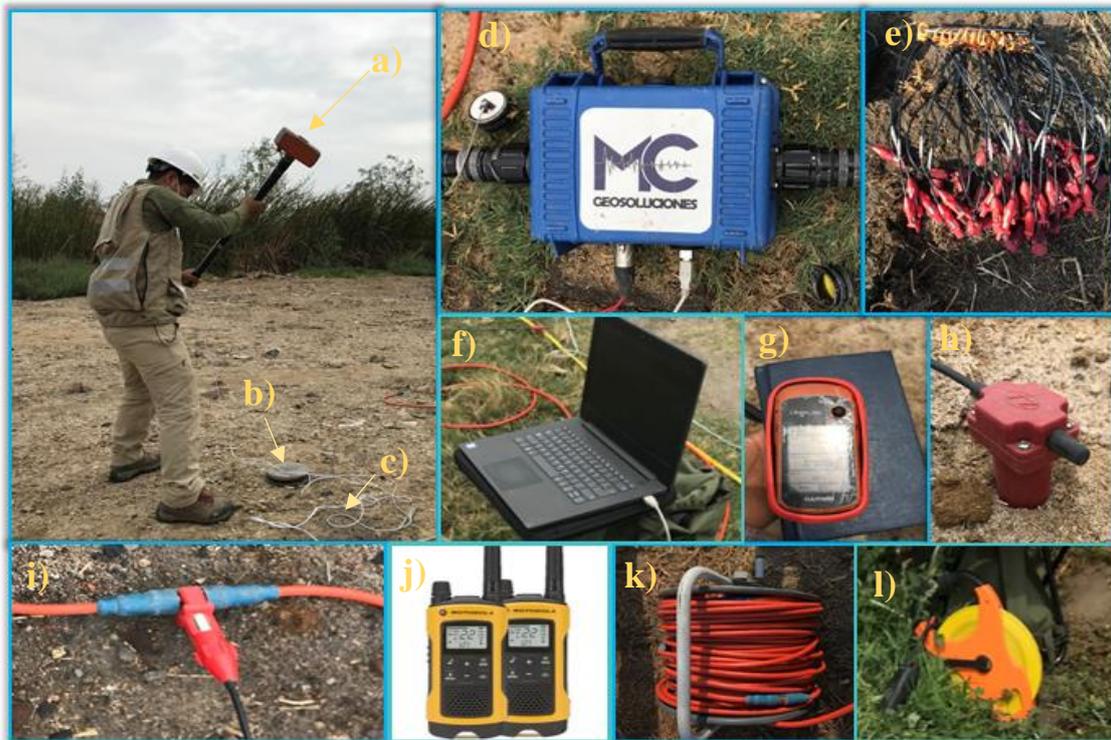
##### *a. Equipo de Refracción Sísmica y MASW*

- Martillo de 20 lbs. (a)
- Placa metálica de 15 x 15. (b)
- Un disipador “trigger”. (c)
- Registrador multipropósito, modelo SEISMOGRAPH DBS 280B de 24-canales. (d)
- Cable sísmico de 24 canales para la conexión de los geófonos. (e)
- Laptop portátil. (f)
- 24 geófonos verticales de 4.5 Hz de frecuencia natural. (h)
- Un conversor A/D (analógico/digital). (i)
- 03 radios de comunicación. (j)
- Cable poder de 12 V. (k)
- 01 caja de herramientas.
- Equipo de protección personal (guantes, chaleco, casco y zapatos de protección).

##### *b. Equipo de Campo*

- GPS (g)
- 01 cinta Métrica de plástico 50m. (l)
- 01 flexómetro de 5m.
- 01 camioneta

- Cámara Fotográfica
- Libreta de Campo



*Figura 22. Equipo sísmico utilizado para la adquisición de datos sísmicos.*

*Fuente: Elaboración propia.*

## 4.2.2 Diseño y parámetros de adquisición

### 4.2.2.1 Distribución de arreglo

La ubicación los arreglos sísmicos lineales, se basó principalmente en los puntos de calicatas y SPT que se realizaron en estudios anteriores en la misma zona de interés, con la finalidad de obtener mayor información del subsuelo en profundidad para la correlación de datos. Otro criterio para ubicar la posición de los arreglos MASW, es que el terreno sobre el cual se va a realizar el tendido de las líneas tiene que ser plano y sin relieves abruptos que puedan afectar la correcta toma de datos. La distribución de las líneas sísmicas se muestra en la figura 23 y abarcan la superficie total del PT. El Pasto para una mejor caracterización del suelo.



LÍNEA SÍSMICA	ORIENTACIÓN	NORTE	ESTE
LS01 -PTEP	E-O	228649.00	8178048.00
LS02 -PTEP	SO-NE	228860.86	8177792.23
LS03 -PTEP	N-S	228848.70	8177750.53
LS04 -PTEP	O-E	228708.50	8177955.98
LS05 -PTEP	N-S	228696.75	8177895.52
LS06 -PTEP	SE-NO	228612.99	8177841.26

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA  
FACULTAD DE ARQUITECTURA E  
INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:  
"CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA  
APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P. EL PASTO,  
DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA"

PLANO: **LÍNEAS SÍSMICAS**

ELABORADO POR: SHEYLA VIVEROS AGRAMONTE

ESCALA: 1:3,000 DATUM: DWGS84

Lámina N°: **05**

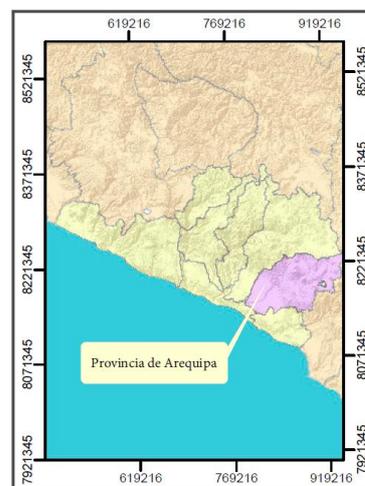


Figura 23. Distribución de las líneas sísmicas en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2.2 *Parámetros de adquisición de refracción sísmica y MASW*

Los parámetros de adquisición de datos para los ensayos se muestran en la tabla 7 y 8 respectivamente:

**Tabla 7. Parámetros de adquisición de refracción sísmica**

Parámetros	Descripción
Configuración del dispositivo	Lineal
Longitud de dispositivo	75m
Intervalo de geófono	3m
Profundidad de investigación	1/3 de la longitud de la línea extendida
Numero de geófonos	24
Tipos de geófono	Geófono vertical de 14 Hz
Localización de punto de tiro	2 en extremos y 3 en puntos intermedios
Equipo de Fuente Sísmica	Comba de 20 Lb. Platillo metálico compacto
Intervalo de muestreo	0.250 milisegundos
Longitud de registro	0.5 segundos
Staking	De acuerdo a la calidad de la data (4-10)

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8. Parámetros de adquisición de MASW**

Parámetros	Descripción
Configuración del dispositivo	Lineal
Longitud de dispositivo	69 m
Intervalo de geófono	3 m
Profundidad de investigación	Hasta 30 m
Numero de geófonos	24
Tipos de geófono	Geófono vertical de 4.5 Hz
Localización de punto de tiro	Al 10%, al 13% al 17% paso normal
Equipo de Fuente Sísmica	Comba de 20 Lb. Platillo metálico compacto
Intervalo de muestreo	0.5 milisegundos
Longitud de registro	1 segundo
Staking	De acuerdo a la calidad de la data (4-10)

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.3 **Procedimientos de campo para la Refracción Sísmica y MASW**

Los trabajos de campo comprenden tres etapas principales para realizar los registros sísmicos, a continuación, se detalla los procedimientos efectuados en campo:

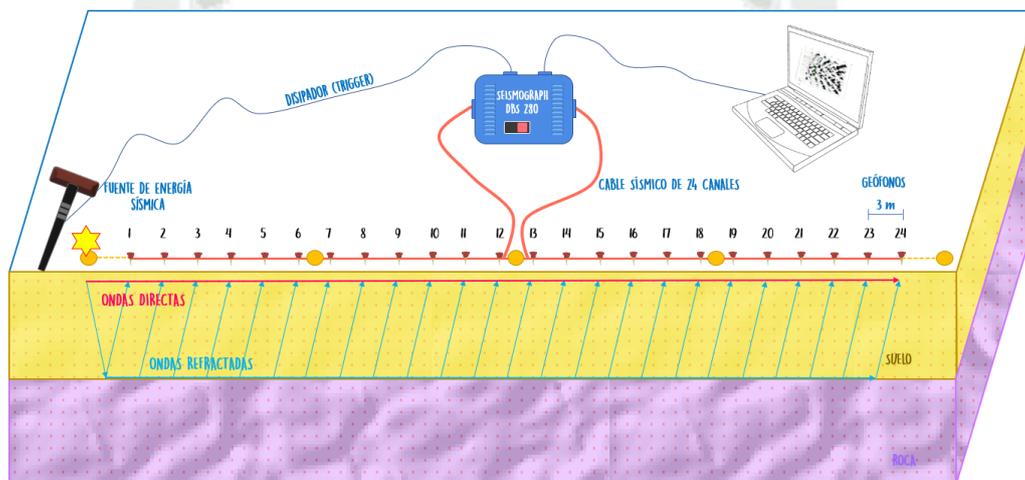
**Reconocimiento de la zona de estudio.** Estudio visual del area para valorar la accesibilidad y las probables contingencias.

**Instalación de equipos y cables.** Se realiza tendido del equipo sismico en la zona ubicada anteriormente en gabinete, la instalación de los geófonos a cada 3 metros.

**Toma de datos.** Se realiza el golpe, se verifica la información registrada en la computadora portátil.

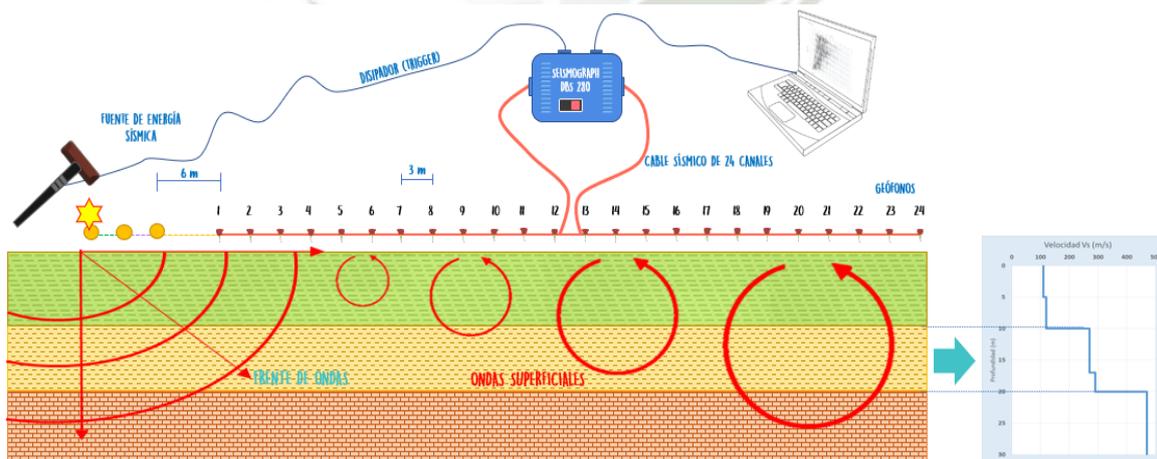
En las figuras 24 y 25, se presenta el esquema de la disposición que se usaron para cada arreglo lineal efectuado en este estudio.

Una vez ejecutados los ensayos establecidos se procederá a levantar el equipo sísmico y dejar el campo sin ningún residuo que se haya utilizado en la toma de datos.



**Figura 24.** Esquema de la disposición del equipo y tendido sísmico lineal para la adquisición de refracción sísmica.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 25.** Esquema de la disposición del equipo y tendido sísmico lineal para la adquisición de MASW.

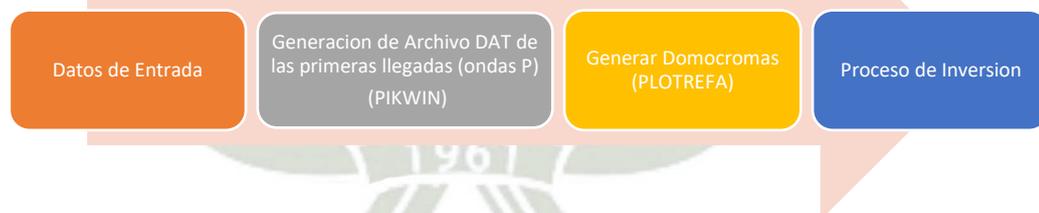
Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Procesamiento de datos

#### 4.3.1 Procesamiento de datos de refracción sísmica

Para el análisis de las señales registradas, se usarán los módulos Pikwin y Plotrefa del software SeisImager. La figura 26 muestra el procedimiento que consistió en los siguientes pasos:

- Uso del programa PIKWIN para el control de calidad y el posicionamiento de las fuentes de generación de las ondas sísmicas.
- Selección de las primeras llegadas de las “Ondas P” para generar un archivo .vs que será usado en la siguiente etapa del procesamiento.
- Uso del programa PLOTREFA para la obtención de las domocromas usando el archivo .vs generado con el módulo anterior.
- Cálculo del inverso de la pendiente de cada domocroma.
- Inversión de las curvas tiempo-distancia para obtención de perfil sísmico.



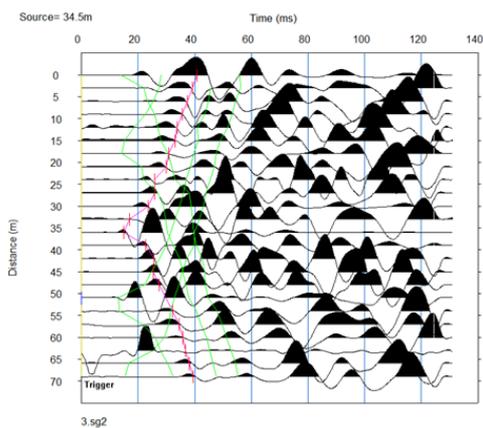
**Figura 26.** *Procesamiento Refracción sísmica.*

*Fuente: Elaboración propia.*

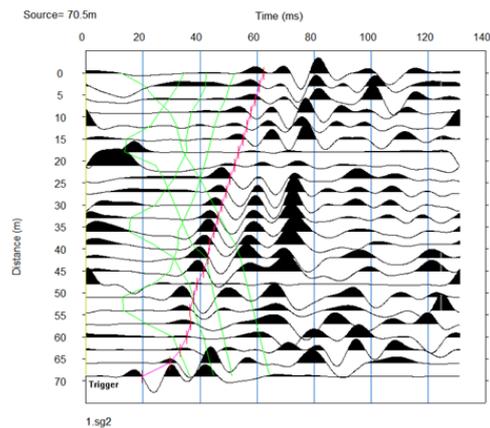
##### 4.3.1.1 Registros Refracción Sísmica

Usando el módulo PIKWIN los registros obtenidos en campo son analizados y revisados para eliminar cualquier tipo de ruido y/o incoherencias en la toma de los datos con la finalidad de mejorar la relación señal/ruido. De igual manera, se procede al “picado” de los primeros tiempos de arribos. La figura 27 corresponde a los registros sísmicos luego del proceso de control de calidad de los 06 tendidos realizados en el Pueblo Tradicional El Pasto.

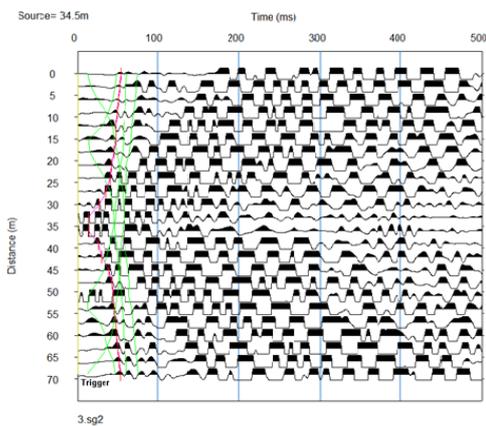
LS01-PETP



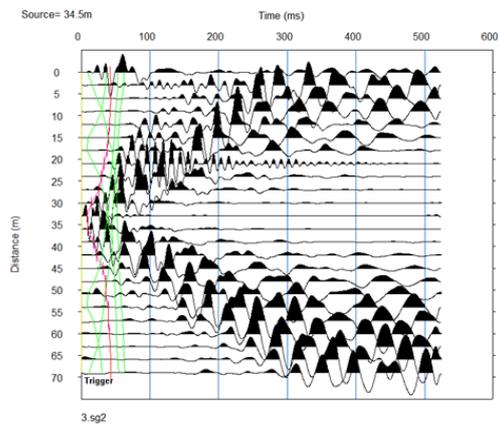
LS02-PETP



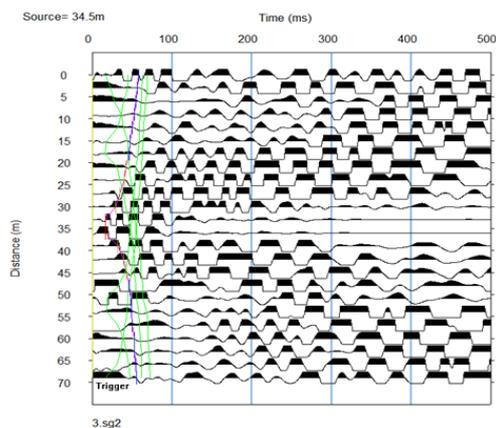
LS03-PETP



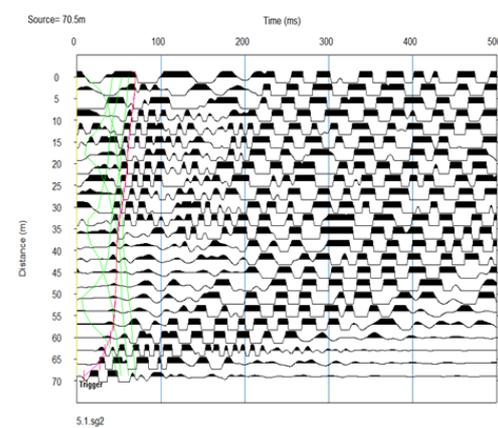
LS04-PETP



LS05-PETP



LS06-PETP



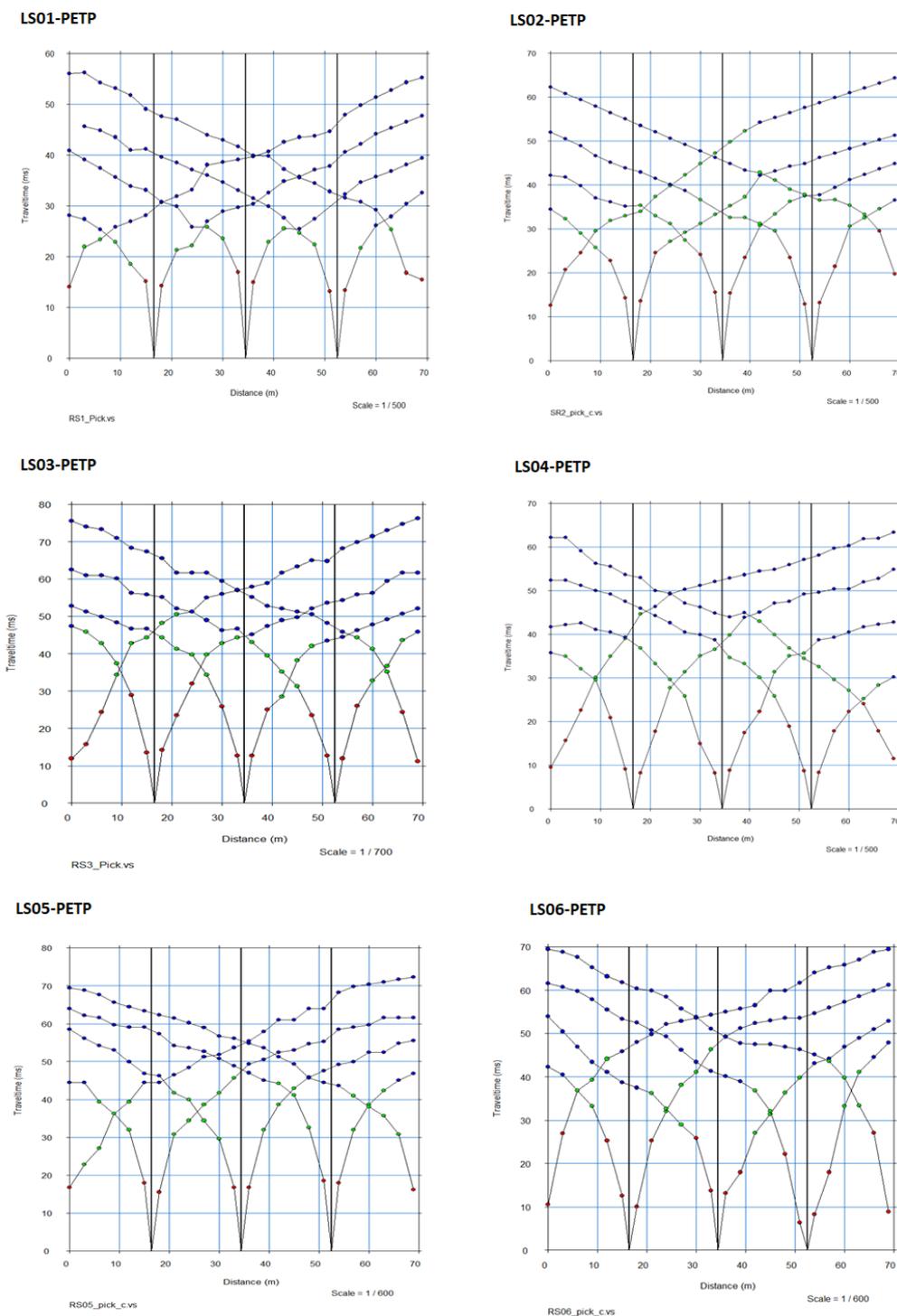
**Figura 27.** Registros obtenidos en campo de los tendidos sísmicos en el Pueblo Tradicional El Pasto.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.1.2 Domocromas

Usando el módulo PLOTREFA, a partir de los registros procesados en el módulo anterior y con la topografía de la zona de estudio se obtienen las Domocromas (curvas tiempo-distancia)

el cual se les asignará un modelo de capas necesarias para el proceso de inversión. La figura 28 corresponde a las Domocromas de los 06 tendidos sísmicos en la zona de estudio.



**Figura 28.** Domocromas de los tendidos sísmicos en el Pueblo Tradicional El Pasto.

*Fuente: Elaboración propia.*

### 4.3.1.3 Perfiles

Luego de asignar las capas en el modelo de Domocromas, se invierte la data usando el método *Do time term inversion* obteniendo una sección de velocidad preliminar con el número de capas de acuerdo a lo asignado (figura 29). Posteriormente se verificarán los datos observados y teóricos para realizar la inversión tomográfica con la finalidad de obtener la sección de velocidad final.

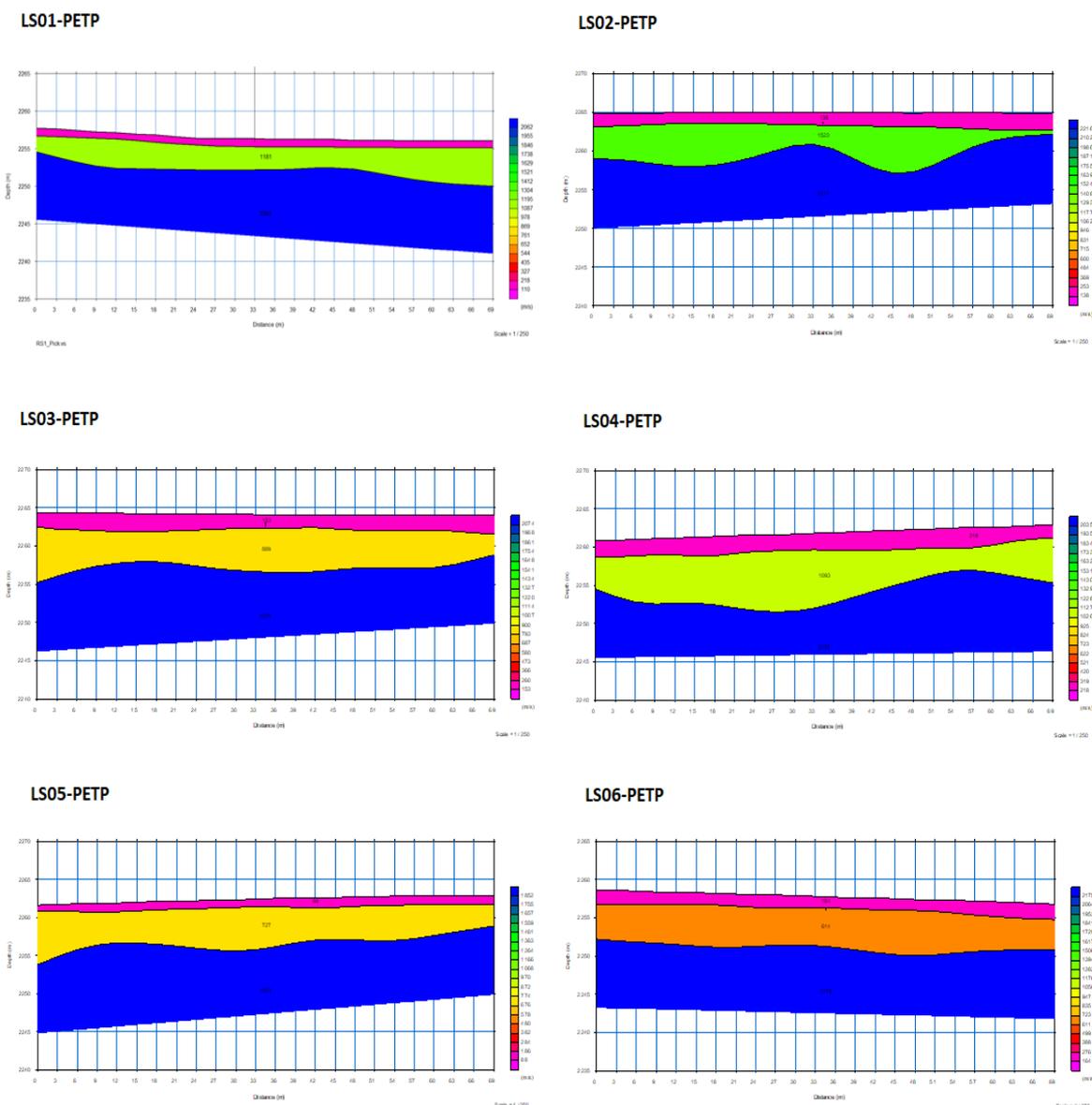


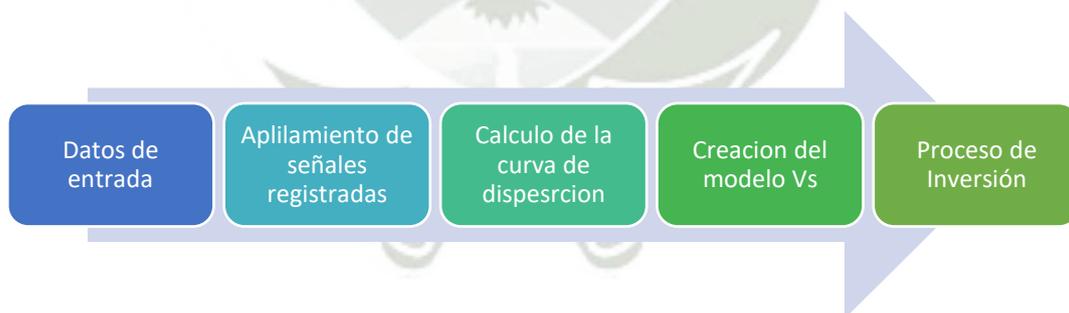
Figura 29. Perfiles de los tendidos sísmicos en el Pueblo Tradicional El Pasto.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.2 Procesamiento de datos MASW

Para el Análisis y procesamiento de los datos, se emplea el módulo Surface Wave Analysis Wizard del Software SeisImager/SW (Geometrics), la figura 30 muestra el flujo de procesamiento de los datos, siendo la siguiente:

- a) Análisis de las señales registradas para cada arreglo sísmico usando el módulo PIKWIN. Esto permite reducir el nivel de ruido en la señal mediante la combinación de las señales sísmicas (Staking).
- b) Determinación de la curva de dispersión usando el módulo WAVE-EQ mediante la transformada de Fourier, el cual convierte la señal del dominio del tiempo a dominio de frecuencia para determinar las velocidades de Fase de los diferentes modos de propagación de la onda (Imágenes de Dispersión). Las bajas frecuencias caracterizan el modo fundamental de las ondas superficiales.
- c) Construcción del perfil  $V_s$  a través de la inversión de la curva de dispersión en el cual se obtiene un modelo de velocidad de ondas de corte (ondas S) respecto a la profundidad del terreno.

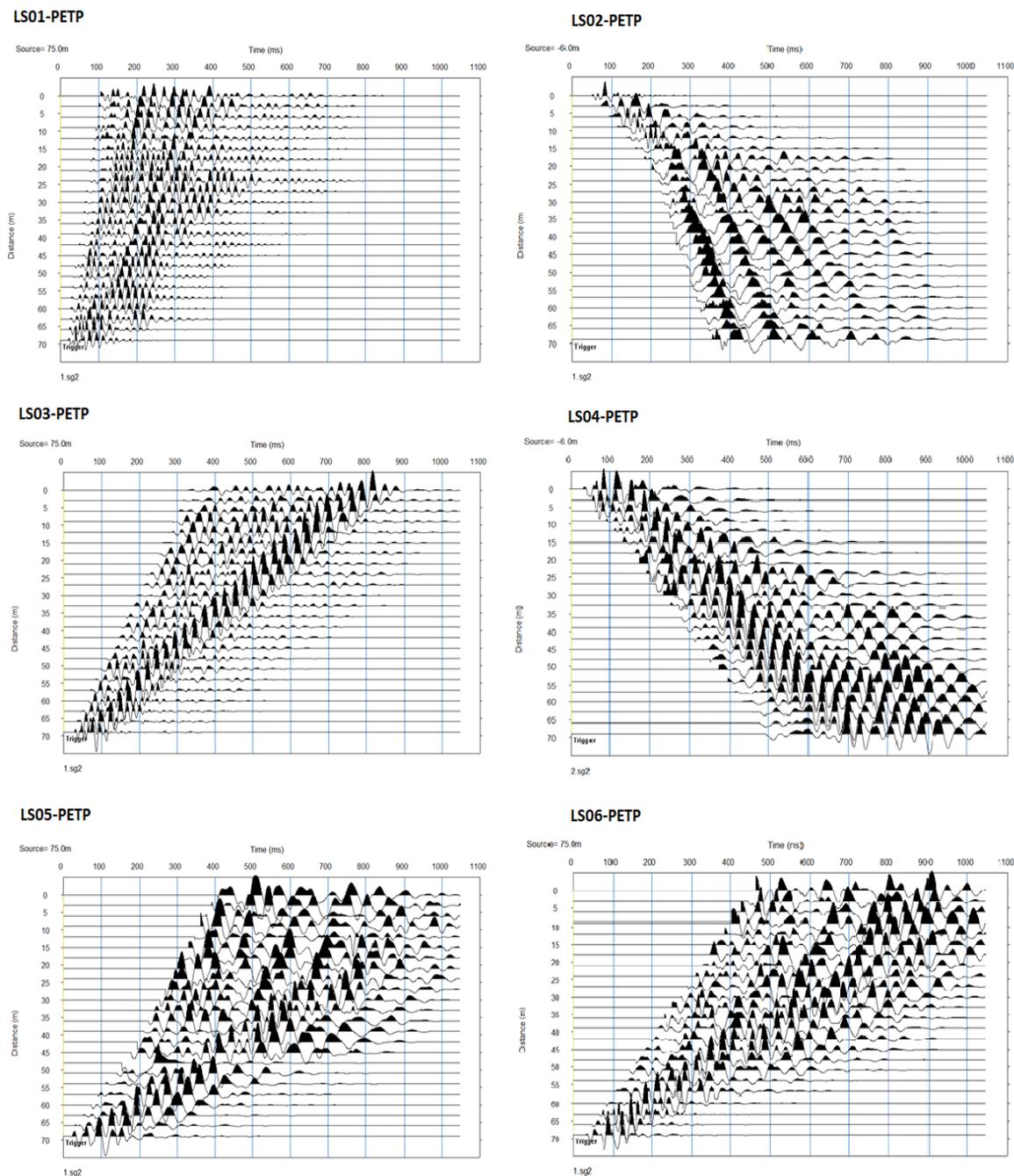


**Figura 30.** *Procesamiento MASW.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### 4.3.2.1 Registros MASW (Modulo PIKWIN)

A continuación, la figura 31 muestra los registros (en el dominio del tiempo) de los 06 tendidos sísmicos MASW realizadas en la zona del Pueblo Tradicional El Pasto. Cada registro sísmico fue analizado y revisado (QC) mediante el módulo PIKWIN.

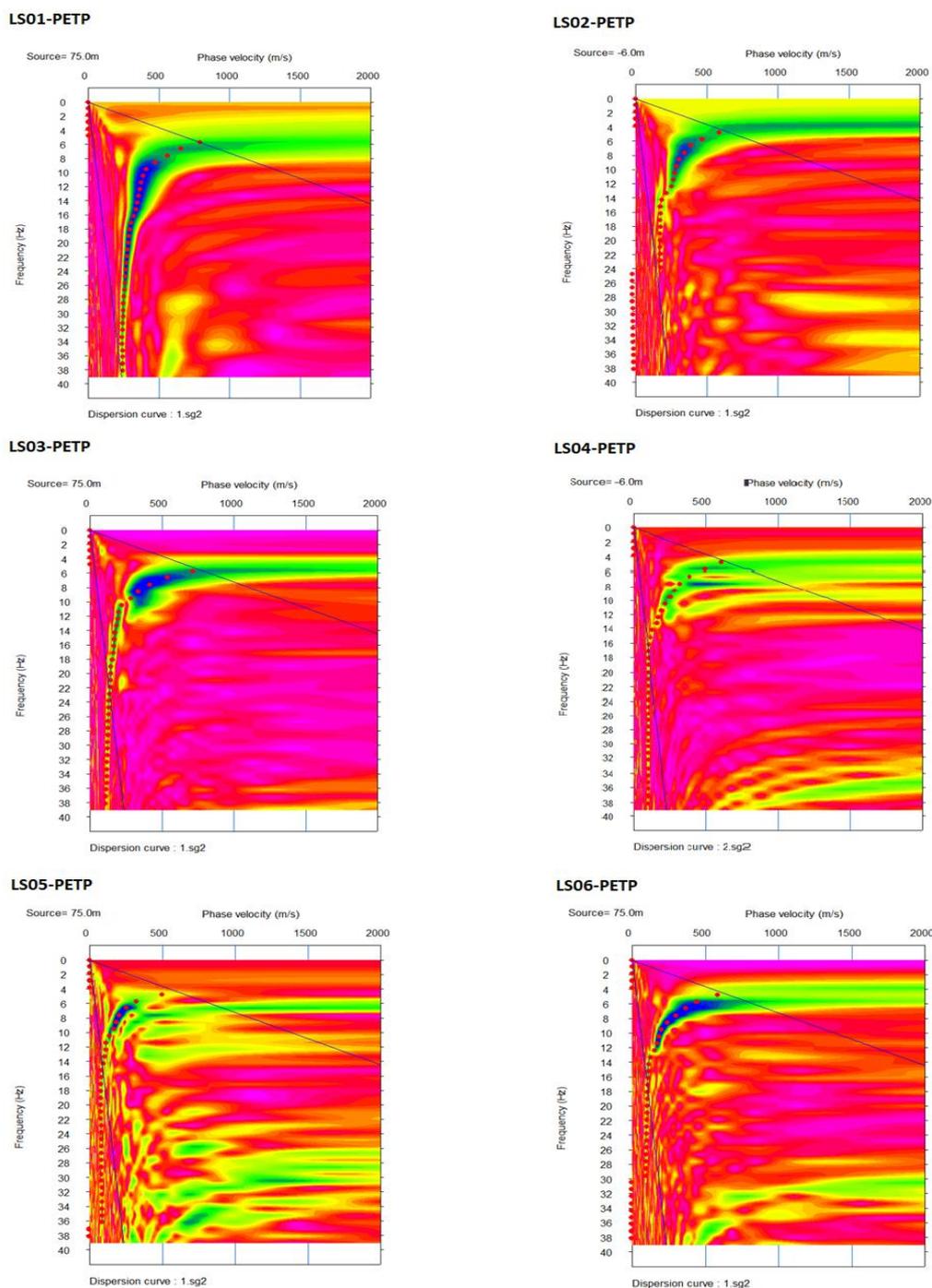


**Figura 31.** Registros MASW de los tendidos sísmicos en el Pueblo Tradicional El Pasto.

*Fuente: Elaboración propia.*

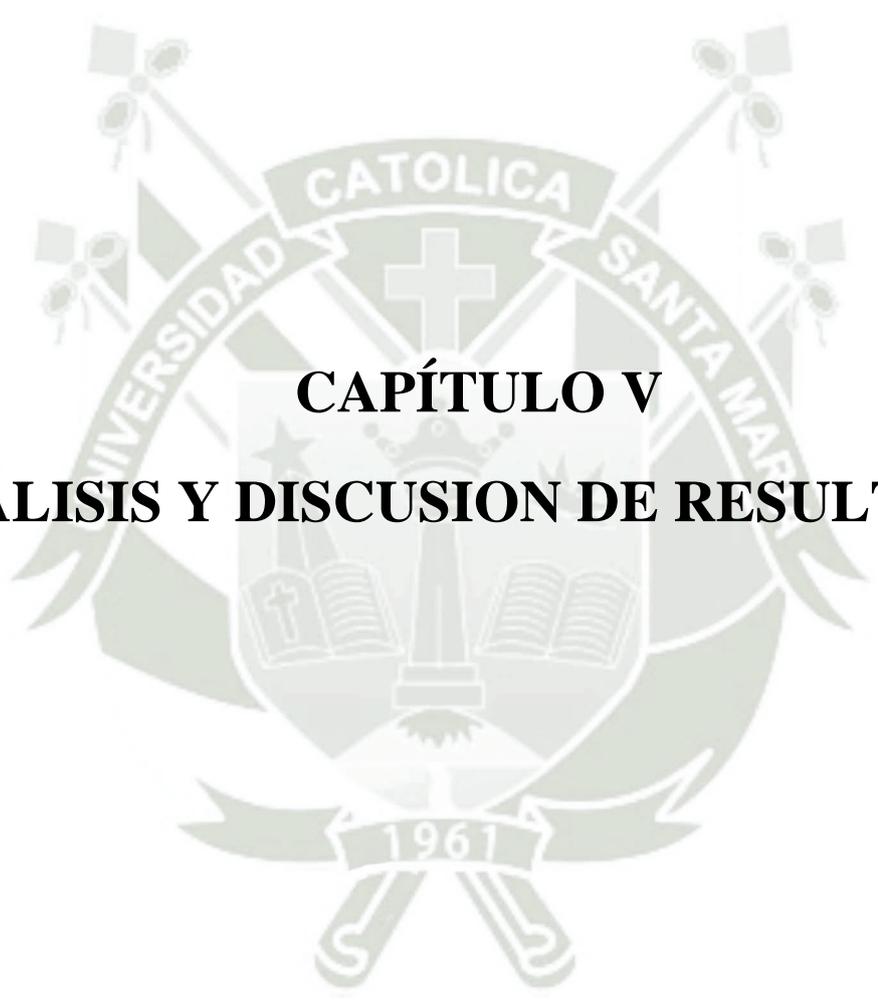
### 4.3.2.2 *Imágenes de dispersión (Modulo WaveEQ)*

Luego del análisis de los registros en el módulo anterior se obtienen las imágenes de dispersión (en el dominio de las frecuencias) que permiten identificar el modo fundamental de propagación de las ondas sísmicas para calcular la curva de dispersión (figura 32).



**Figura 32.** Curvas de dispersión de los tendidos sísmicos en el Pueblo Tradicional El Pasto.

Fuente: Elaboración propia.



**CAPÍTULO V**  
**ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS**

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Los ensayos geofísicos de MASW y refracción sísmica fueron distribuidos adecuadamente en el P.T. El Pasto. De la clasificación sísmica, según la Norma E-030, se presenta cinco tipos de suelos: S0, S1, S2, S3 y S4 correspondiente a roca dura, roca o suelos muy rígidos, suelos intermedios, suelos blandos y suelos de condiciones excepcionales respectivamente; ocupando la mayor área del P.T. El Pasto los suelos intermedios o S2, secundado por roca o suelos muy rígidos denominado también S1 y con menos área de influencia se ubica el suelo blando o tipo S3. Según los resultados obtenidos, hasta una profundidad de 30 m de investigación, no se evidencian suelos de condiciones excepcionales o tipo S4 ni roca dura o tipo S0.

### 5.1 Perfiles de velocidad Vp

Se realizaron 06 líneas sísmicas de refracción, a continuación se analizan los resultados obtenidos:

#### 5.1.1 Perfil sísmico RS – 01

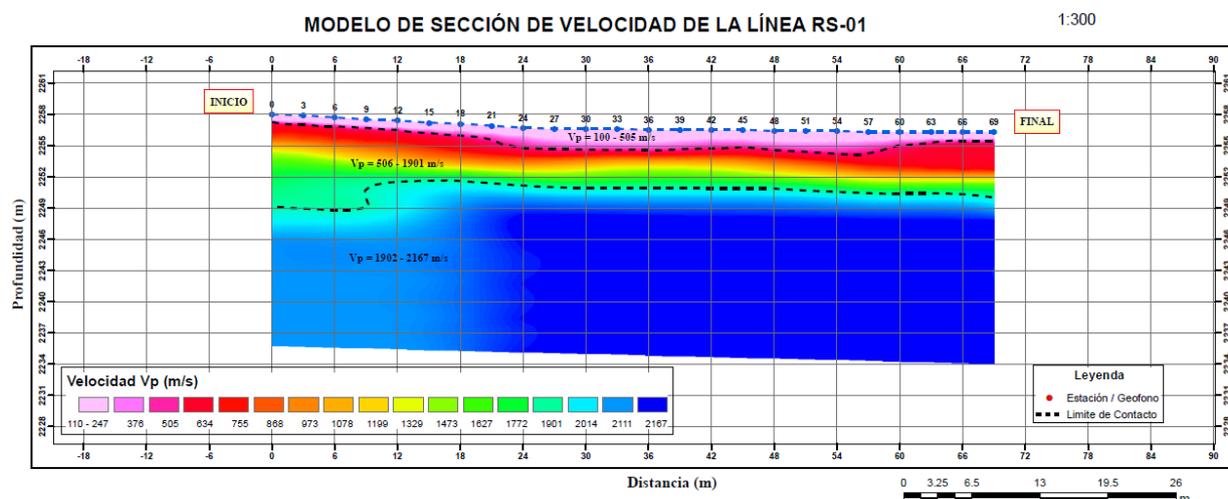
EL primer ensayo correspondiente a la línea RS-01 con una longitud de 69 m, muestra la presencia de tres estratos:

El primer estrato presenta valores de velocidades de ondas P entre 100 y 505 m/s con un espesor máximo 0.8 y 2 m aproximadamente, clasificado como suelos blandos intemperizados. Estratigráficamente está compuesto por arenas, limos y arcillas.

El segundo estrato presenta valores de velocidades de ondas P entre 506 y 1901 m/s con un espesor de 3.5 m a una profundidad de 2m aproximadamente. Sin embargo, en los primeros 9m del perfil sísmico, el espesor del estrato es de aproximadamente 7.7 m. Este estrato está conformado por Gravas o arenas secas y arenas saturadas.

A partir de los 5.5 m de profundidad se muestran valores de velocidades entre 1902 y 2167 m/s que estratigráficamente está compuesto por Areniscas Friables y rocas alteradas o aluvión compacto.

El perfil correspondiente a la línea de RS01 se presenta en el ANEXO 8.1.



*Figura 33. Perfil sísmico RS-01.*

*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 9. Resultados obtenidos en LS-RS-01**

N° Estrato	Tipo de Suelo	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	Suelos Blandos Intemperizados	100 – 505	0.8 – 2.0
2	Gravas o arenas secas y arenas saturadas	506 - 1901	3.5
3	Areniscas Friables y rocas alteradas o aluvión compacto	1902 - 2167	-

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.2 Perfil sísmico RS – 02

El siguiente ensayo correspondiente a la línea de refracción RS-02 se ha identificado la presencia de tres estratos: El primer estrato tiene un espesor de 1.6 m aproximadamente. Presenta valores de velocidad entre 100 y 534 m/s que corresponden a suelos blandos intemperizados. Estratigráficamente está compuesto por arenas, limos y arcillas.

El segundo estrato presenta valores de velocidades entre 535 y 1830 m/s con un espesor de 4.8 a 5.8 m aproximadamente. Sobre la parte final del perfil sísmico, se observa un estrechamiento del estrato llegando a tener 2.2 m de espesor. Este estrato está conformado por Gravas o arenas secas y arenas saturadas.

A partir de los 3.8 m de profundidad se muestran valores de velocidades entre 1831 y 2330 m/s que estratigráficamente está compuesto por Areniscas Friables y compactas, o rocas alteradas o aluvi3n compacto.

El perfil correspondiente a la línea de RS02 se presenta en el ANEXO 8.2.

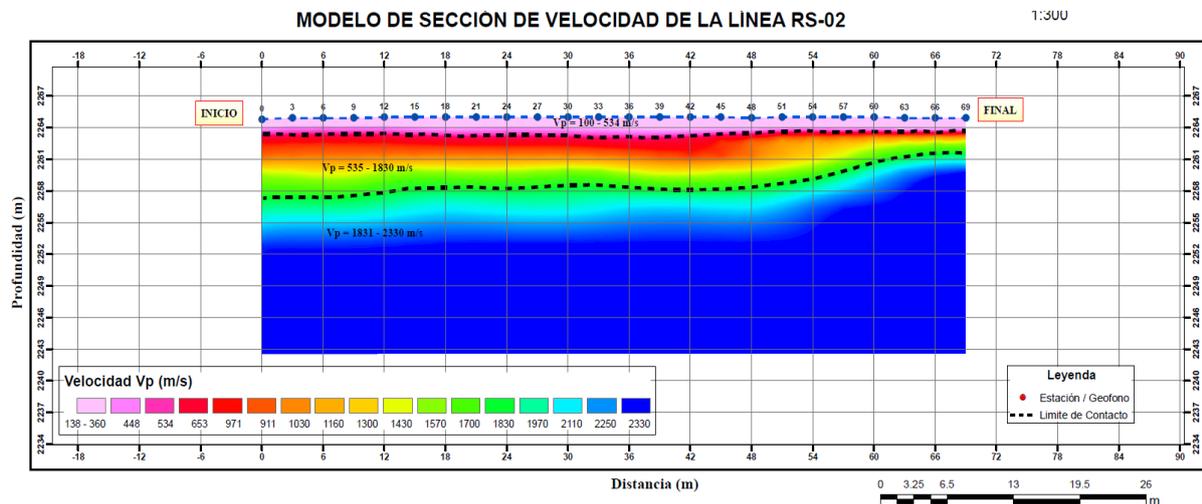


Figura 34. Perfil sísmico RS-02.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Resultados obtenidos en LS-RS-02

N° Estrato	Tipo de Suelo	$V_p$ (m/s)	Espesor (m)
1	Suelos Blandos Intemperizados	100 – 534	1.6
2	Gravas o arenas secas y arenas saturadas	535 - 1830	4.8 – 5.8
3	Areniscas Friables y rocas alteradas o aluvi3n compacto	1831 - 2330	-

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.3 Perfil sísmico RS – 03

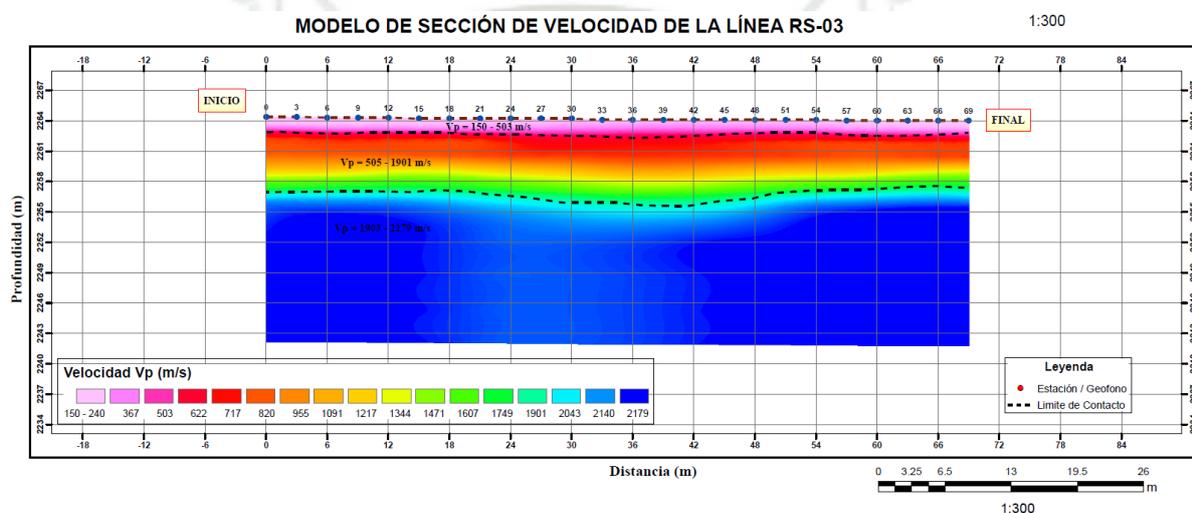
El siguiente ensayo correspondiente a la línea de refracción RS-03 muestra la presencia de tres estratos:

El primer estrato tiene un espesor de 1.3 m. Presenta valores de velocidad entre 150 y 503 m/s que corresponden a suelos blandos intemperizados conformada, en su mayor parte, por arenas, limos y arcillas.

El segundo estrato presenta valores de velocidades entre 505 y 1901 m/s con un espesor entre 5.7 y 6.4 m aproximadamente. Estratigráficamente está conformado por Gravas o arenas secas y arenas saturadas.

A partir de los 7 m de profundidad se muestran valores de velocidades entre 1903 y 2179 m/s que estratigráficamente está compuesto por Areniscas Friables y compactas, o rocas alteradas o aluvión compacto.

El perfil correspondiente a la línea de RS03 se presenta en el ANEXO 8.3.



*Figura 35. Perfil sísmico RS-03.*

*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 11. Resultados obtenidos en LS-RS-03**

N° Estrato	Tipo de Suelo	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	Suelos Blandos Intemperizados	150 – 503	1.3
2	Gravas o arenas secas y arenas saturadas	505 - 1901	5.7 – 6.4
3	Areniscas Friables y rocas alteradas o aluvión compacto	1903 - 2179	-

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.4 Perfil sísmico RS – 04

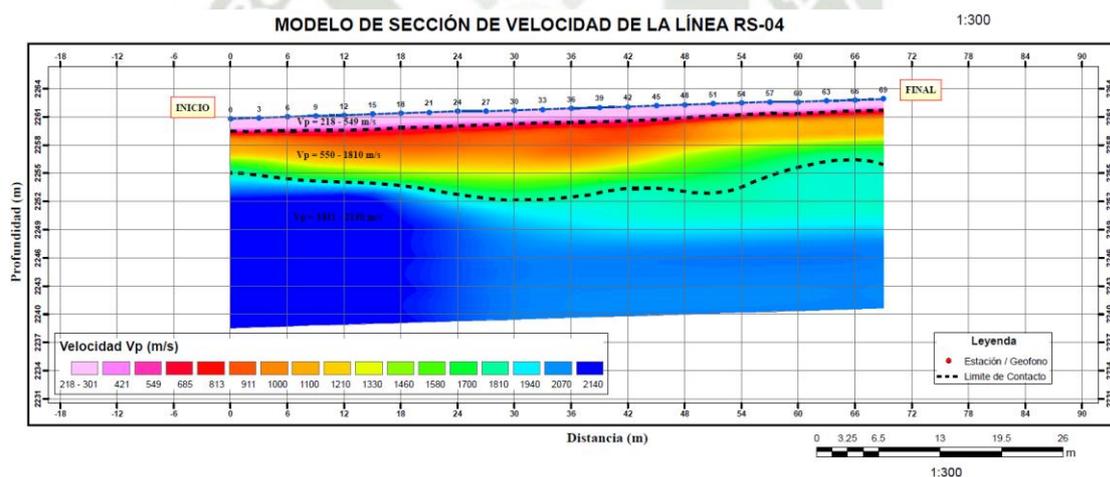
El siguiente ensayo correspondiente a la línea de refracción RS-04 muestra la presencia de tres estratos:

El primer estrato tiene un espesor de 1.1 m aproximadamente. Presenta valores de velocidad entre 218 y 549 m/s que corresponden a suelos blandos intemperizados conformada principalmente por arenas, limos y arcillas.

El segundo estrato presenta valores de velocidades entre 550 y 1810 m/s con espesores que varían desde los 4.6 m hasta los 8.1 m. El tipo de suelo correspondiente a este estrato corresponde a Gravas o arenas secas y arenas saturadas.

A partir de los 5.7 m de profundidad se muestran valores de velocidades entre 1811 y 2140 m/s que estratigráficamente está compuesto por Areniscas Friables y compactas, o rocas alteradas o aluvión compacto.

El perfil correspondiente a la línea de RS04 se presenta en el ANEXO 8.4.



**Figura 36.** Perfil sísmico RS-04.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 12.** Resultados obtenidos en LS-RS-04

N° Estrato	Tipo de Suelo	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	Suelos Blandos Intemperizados	218 – 549	1.1
2	Gravas o arenas secas y arenas saturadas	550 - 1810	4.6 – 8.1
3	Areniscas Friables y rocas alteradas o aluvión compacto	1811 - 2140	-

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.5 Perfil sísmico RS – 05

El siguiente ensayo correspondiente a la línea de refracción RS-05 muestra la presencia de tres estratos:

El primer estrato tiene un espesor que varía entre 0.8 y 2 m. Presenta valores de velocidad entre 88 y 445 m/s que corresponden a suelos blandos intemperizados conformada principalmente por arenas, limos y arcillas.

El segundo estrato presenta valores de velocidades entre 446 y 1790 m/s con espesores que varían desde los 5 m hasta los 8.4 m. El tipo de suelo correspondiente a este estrato corresponde a Gravas o arenas secas y arenas saturadas.

A partir de los 6.1 m de profundidad se muestran valores de velocidades entre 1791 y 1950 m/s que estratigráficamente está compuesto por Areniscas Friables y compactas, o rocas alteradas o aluvión compacto.

El perfil correspondiente a la línea de RS06 se presenta en el ANEXO 8.5.

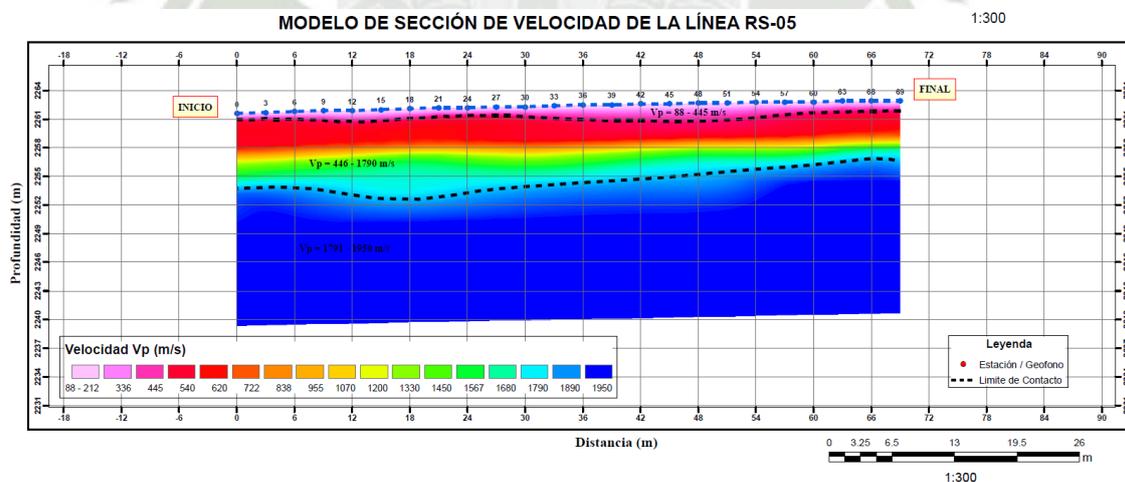


Figura 37. Perfil sísmico RS-05.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Resultados obtenidos en LS-RS-05

N° Estrato	Tipo de Suelo	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	Suelos Blandos Intemperizados	88 – 445	0.8 – 2.0
2	Gravas o arenas secas y arenas saturadas	446 - 1790	5.0 – 8.4
3	Areniscas Friables y rocas alteradas o aluvión compacto	1791 - 1950	-

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.6 Perfil sísmico RS – 06

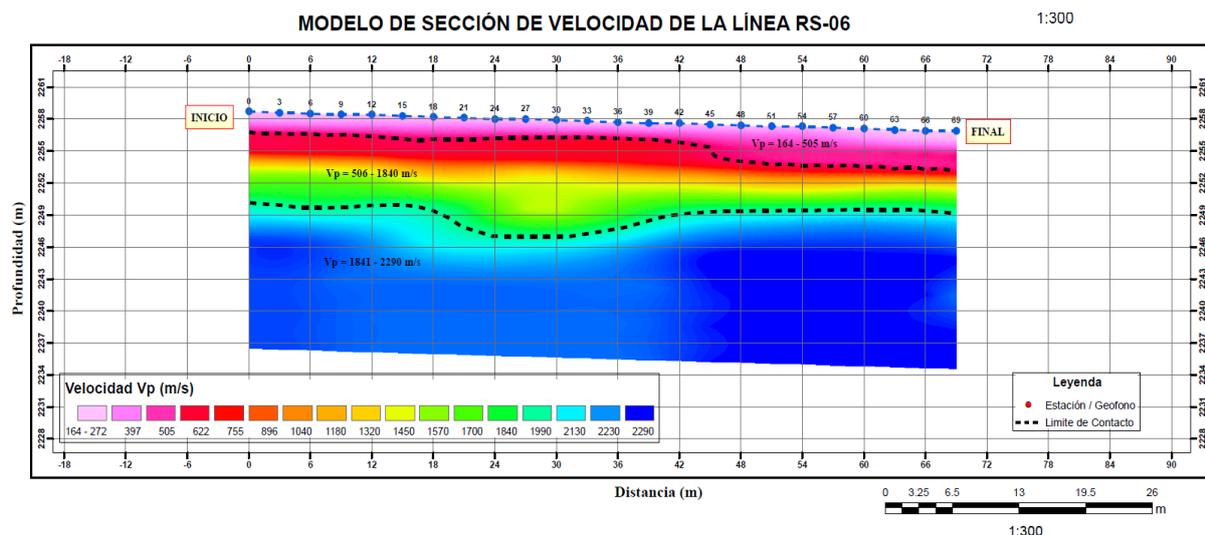
En el siguiente y último ensayo, correspondiente a la línea RS-06, se han identificado la presencia de 3 estratos:

El primer estrato tiene un espesor que varía entre 1.7 y 3.6 m. Presenta valores de velocidad entre 164 y 505 m/s que corresponden a suelos blandos intemperizados conformada principalmente por arenas, limos y arcillas.

El segundo estrato presenta valores de velocidades entre 506 y 1840 m/s con espesores que varían desde los 3.9 m hasta los 9.2 m siendo la sección media del perfil sísmico el que presenta el mayor espesor de este estrato. El tipo de suelo correspondiente a este estrato corresponde a Gravas o arenas secas y arenas saturadas.

A partir de los 8.6 m de profundidad se muestran valores de velocidades entre 1841 y 2290 m/s que estratigráficamente está compuesto por Areniscas Friables y compactas, o rocas alteradas o aluvión compacto.

El perfil correspondiente a la línea de RS-06 se presenta en el ANEXO 8.6.



*Figura 38. Perfil sísmico RS-05.*

*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 14. Resultados obtenidos en LS-RS-06**

N° Estrato	Tipo de Suelo	Vp (m/s)	Espesor (m)
1	Suelos Blandos Intemperizados	164 – 505	1.7 – 3.6
2	Gravas o arenas secas y arenas saturadas	506 - 1840	3.9 – 9.2
3	Areniscas Friables y rocas alteradas o aluvión compacto	1841 - 2290	-

Fuente: Elaboración propia

## 5.2 Perfiles de velocidad de ondas de corte (Vs)

A partir del proceso de inversión de las curvas de dispersión de cada arreglo MASW, se han obtenido perfiles de velocidad Vs cuyos resultados son confiables hasta una profundidad de 30 m. Cada arreglo sísmico de MASW se encuentra ubicado sobre la línea de Refracción que se realizaron con anterioridad.

Para el análisis de los resultados se ha considerado el rango de velocidades de ondas de cortes (Vs) para cada tipo de suelos según lo que establece la norma E-030. A continuación, se muestran los resultados de los 06 ensayos MASW y su respectiva interpretación geofísica.

**Tabla 15. Resumen de estudios MASW (Profundidad de alcance es 30.0m).**

Línea	Ensayo	Coordenadas UTM WGS 84		Vs 30 (m/s)	Tipo de Suelo según IBC	Tipo de suelo según E-030
		Este (m)	Norte (m)			
LS01-PTEP	MASW 01	228649	8178048	415.83	Suelo muy denso y roca blanda	Suelos intermedios
LS02-PTEP	MASW 02	228861	8177792	312.90	Suelo rígido	Suelos intermedios
LS03-PTEP	MASW 03	228849	8177751	326.37	Suelo rígido	Suelos intermedios
LS04-PTEP	MASW 04	228709	8177956	309.30	Suelo rígido	Suelos intermedios
LS05-PTEP	MASW 05	228697	8177896	239.03	Suelo rígido	Suelos Intermedios
LS06-PTEP	MASW 06	228613	8177841	278.70	Suelo rígido	Suelos intermedios

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.1 Perfil unidimensional MASW – 01

En el ensayo correspondiente a la línea MASW-01, según el modelo unidimensional de ondas de corte, se han identificado la presencia de dos estratos:

El primer estrato del subsuelo presenta varias subcapas con espesores del orden de 2 m aproximadamente. El rango de velocidades de este estrato es entre 252 y 498 m/s con un espesor total de 20.85 m clasificado, según la norma E-030, como suelos intermedios (S2) y que estratigráficamente está conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos.

A partir de los 20.85 m se tienen valores de velocidades mayores a 545 m/s que según la clasificación E-030 corresponden a rocas o suelos muy rígidos conformada por estratos de grava coluvial-eluvial que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. El espesor de esta capa es de 15.58 m.

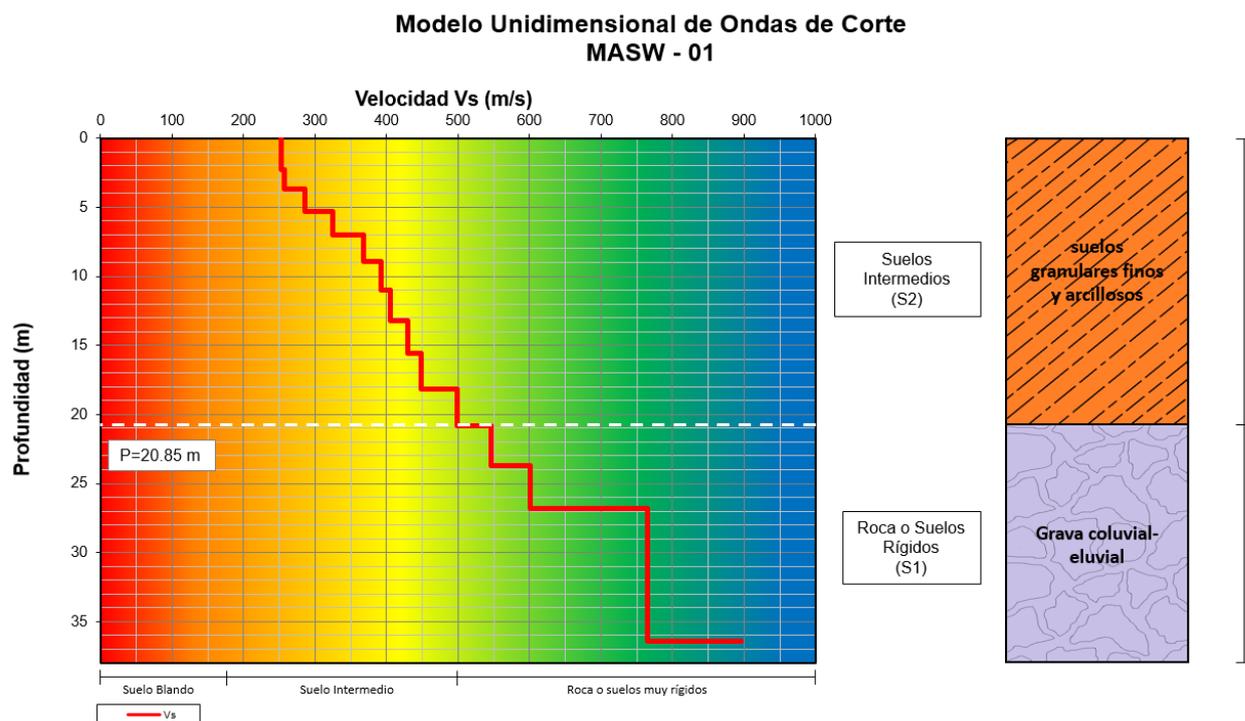


Figura 39. Modelo Unidimensional de Ondas de Corte MASW-01.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Resumen de velocidades de onda de corte a partir del ensayo MASW-01

Vs (m/s)	Profundidad (m)	Normas IBC				Norma E-030			
		N° Capa	Clase	Tipo de suelo	Espesor (m)	N° Capa	Clase	Tipo de suelo	Espesor (m)
252.56	0 - 1.07	1	D	Suelo rígido	7.01	1	S2	Suelos Intermedios	20.85
252.8	1.07 - 2.31								
256.68	2.31 - 3.71								
285.5	3.71 - 5.27								
324.52	5.27 - 7.01								
367.95	7.01 - 8.9	2	C	Suelo muy denso y Roca blanda	19.78				
392.31	8.9 - 10.96								
405.1	10.96 - 13.19								
430.16	13.19 - 15.58								
447.96	15.58 - 18.13								
498.89	18.13 - 20.85								
545.98	20.85 - 23.74								
601.76	23.74 - 26.79								
765.58	26.79 - 36.43	3	B	Roca	9.64				

Fuente: Elaboración propia

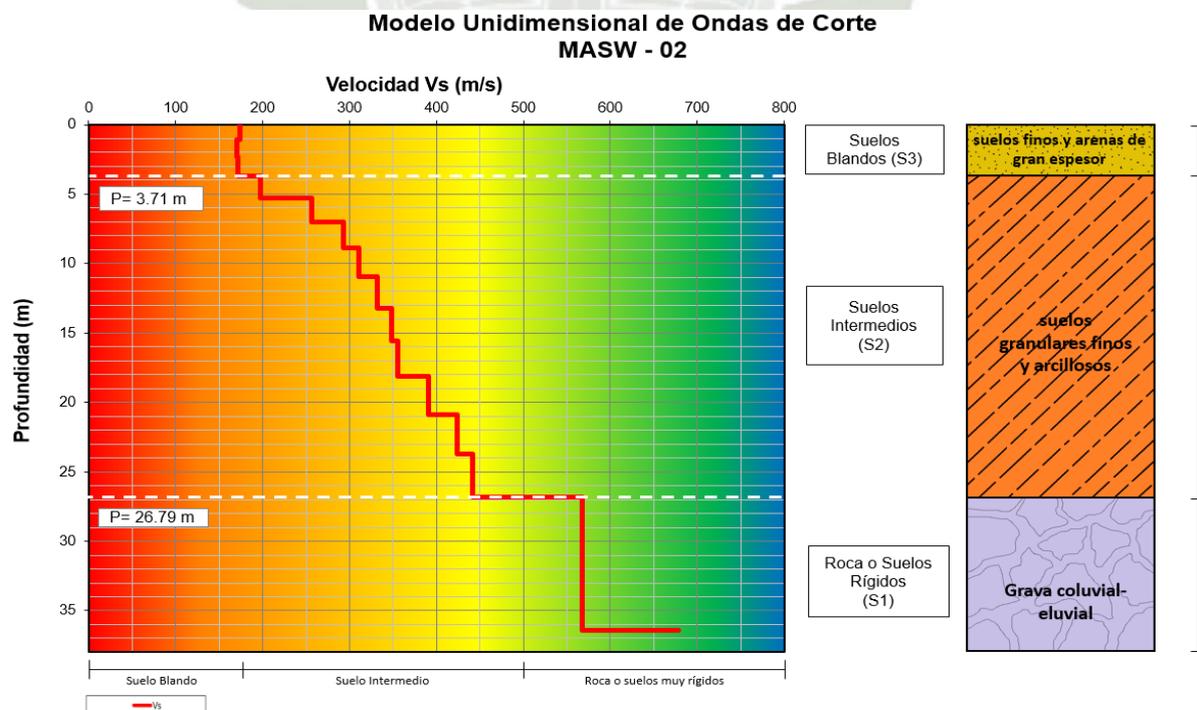
### 5.2.2 Perfil unidimensional MASW – 02

El siguiente ensayo correspondiente a la línea MASW-02 se identifica la presencia de tres estratos:

El primer estrato tiene un espesor de 3.71 m. Presenta valores de velocidad entre 170 y 173 m/s que corresponden a suelos blandos (S3). Este estrato está conformado principalmente por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentra en estado suelto.

El segundo estrato presenta varias subcapas con espesores del orden de 2 y 3 m aproximadamente. Este estrato presenta valores de velocidades entre 197 y 441 m/s con un espesor de 23.08 m conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos que según la norma E-030 se clasifica como suelos intermedios (S2).

A partir de los 26.79 m de profundidad se tienen rocas o suelos muy rígidos (S1) con valores de velocidades mayores a 568 m/s conformada por grava coluvial-eluvial que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. El espesor de esta capa es de 9.64 m.



*Figura 40. Modelo Unidimensional de Ondas de Corte MASW-02.*

*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 17. Resumen de velocidades de onda de corte a partir del ensayo MASW-02**

Vs (m/s)	Profundidad (m)	Normas IBC				Norma E-030			
		N° Capa	Clase	Tipo de suelo	Espesor (m)	N° Capa	Clase	Tipo de suelo	Espesor (m)
173.32	0 - 1.07	1	E	Suelo blando	3.71	1	S3	Suelos blandos	3.71
170.54	1.07 - 2.31								
172.06	2.31 - 3.71								
197.85	3.71 - 5.27	2	D	Suelo rígido	14.42	2	S2	Suelos Intermedios	23.08
256.75	5.27 - 7.01								
293.45	7.01 - 8.9								
310.96	8.9 - 10.96								
331.44	10.96 - 13.19								
348.01	13.19 - 15.58								
355.62	15.58 - 18.13	3	C	Suelo muy denso y Roca blanda	18.3	3	S1	Roca o suelos muy rígidos	9.64
391.15	18.13 - 20.85								
424.12	20.85 - 23.74								
441.09	23.74 - 26.79								
567.96	26.79 - 36.43								

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.3 Perfil unidimensional MASW – 03

El siguiente ensayo correspondiente a la línea MASW-03 muestra la presencia de tres estratos:

El primer estrato tiene un espesor de 3.71 m. Presenta valores de velocidad entre 124 y 172 m/s que corresponden a suelos blandos (S3) conformada, en su mayor parte, por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentra en estado suelto.

El segundo estrato del subsuelo presenta varias subcapas con espesores del orden de 2 m aproximadamente. Los valores de velocidades se encuentran entre 189 y 451 m/s que corresponden a suelos intermedios (S2) con un espesor de 11.87 m. Estratigráficamente está conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos.

A partir de los 15.58 m de profundidad se tienen valores de velocidades mayores a los 529 m/s correspondiente a roca o suelos rígidos (S1) conformada por estratos de grava coluvial-

eluvial que se encuentran a nivel superficial. Esta capa tiene un espesor de 20.85 m hasta los 36.43 m de profundidad.

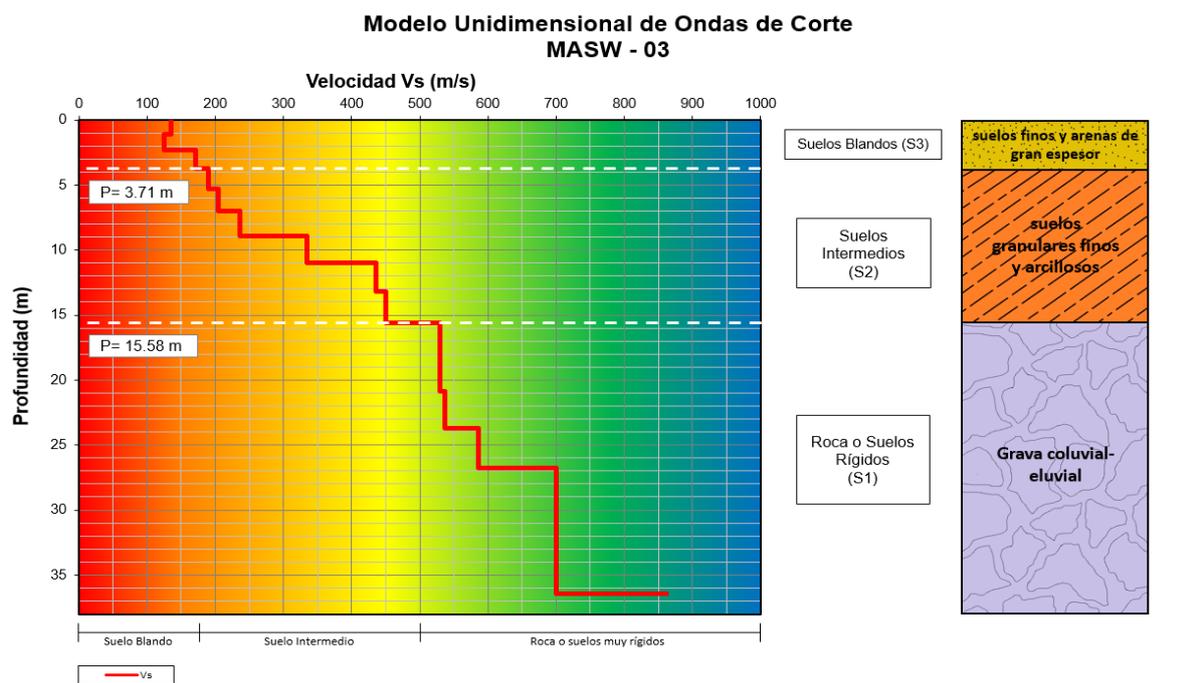


Figura 41. Modelo Unidimensional de Ondas de Corte MASW-03.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Resumen de velocidades de onda de corte a partir del ensayo MASW-03

Vs (m/s)	Profundidad (m)	Normas IBC				Norma E-030			
		N° Capa	Clase	Tipo de suelo	Espesor (m)	N° Capa	Clase	Tipo de suelo	Espesor (m)
135.53	0 - 1.07	1	E	Suelo blando	3.71	1	S3	Suelos blandos	3.71
124.4	1.07 - 2.31								
171.79	2.31 - 3.71								
189.24	3.71 - 5.27	2	D	Suelo rígido	7.25	2	S2	Suelos Intermedios	11.87
204.02	5.27 - 7.01								
236.67	7.01 - 8.9								
334.1	8.9 - 10.96								
434.96	10.96 - 13.19	3	C	Suelo muy denso y Roca blanda	25.47	3	S1	Roca o suelos muy rígidos	20.85
450.69	13.19 - 15.58								
528.9	15.58 - 18.13								
530.07	18.13 - 20.85								
536.29	20.85 - 23.74								
585.96	23.74 - 26.79								
699.68	26.79 - 36.43								

Fuente: Elaboración propia

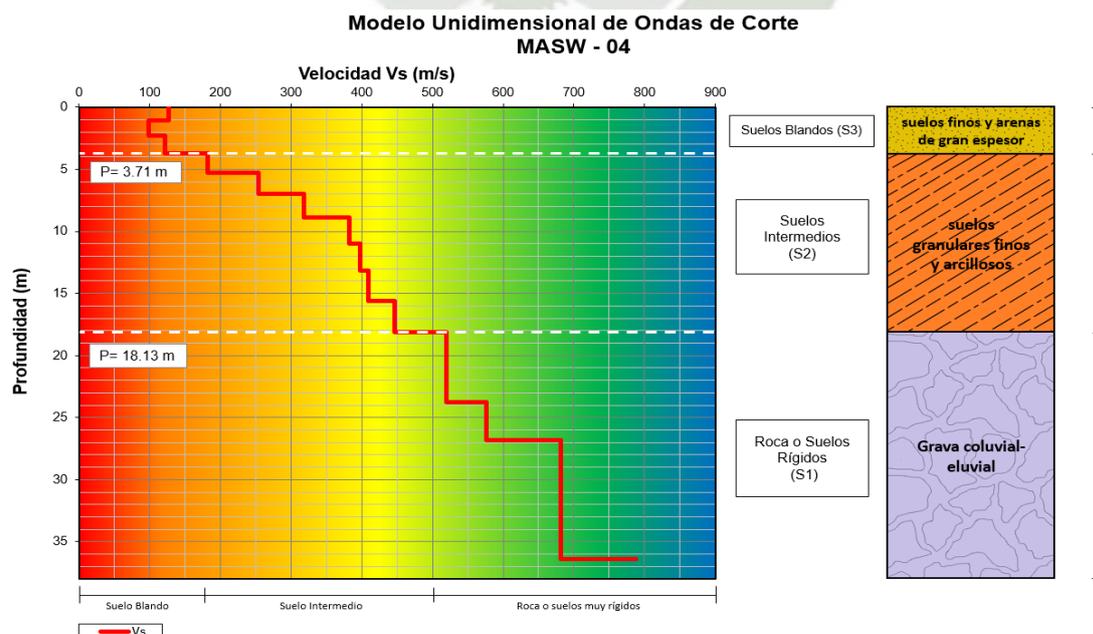
### 5.2.4 Perfil unidimensional MASW – 04

En el siguiente ensayo, correspondiente a la línea MASW-04, se muestra la presencia de tres estratos:

El primer estrato tiene un espesor de 3.71 m. Presenta valores de velocidad entre 99 y 127 m/s que corresponden a suelos blandos (S3) según la Norma E-030 que estratigráficamente está conformada por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentra en estado suelto.

EL segundo estrato del subsuelo presenta varias subcapas del orden de 2 y 3 m de espesor aproximadamente. Este estrato presenta valores de velocidades entre 181 y 446 m/s con un espesor de 14.42 m correspondiente a suelos intermedios (S2) conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos.

El ultimo estrato se encuentra a 18.13 m de profundidad con valores de velocidades mayores a los 520 m/s correspondiente a roca o suelos rígidos (S1) conformada por grava coluvial-eluvial que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. El espesor de esta capa es de 18.3 m hasta los 36.43 m de profundidad.



**Figura 42.** Modelo Unidimensional de Ondas de Corte MASW-04.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 19. Resumen de velocidades de onda de corte a partir del ensayo MASW-04**

Vs (m/s)	Profundidad (m)	Normas IBC				Norma E-030			
		N° Capa	Clase	Tipo de suelo	Espesor (m)	N° Capa	Clase	Tipo de suelo	Espesor (m)
127.06	0 - 1.07	1	E	Suelo blando	3.71	1	S3	Suelos blandos	3.71
98.89	1.07 - 2.31								
121.2	2.31 - 3.71								
181.61	3.71 - 5.27	2	D	Suelo rígido	5.19	2	S2	Suelos Intermedios	14.42
254.08	5.27 - 7.01								
317.55	7.01 - 8.9								
382	8.9 - 10.96	3	C	Suelo muy denso y Roca blanda	27.53	3	S1	Roca o suelos muy rígidos	18.3
397.71	10.96 - 13.19								
408.91	13.19 - 15.58								
445.94	15.58 - 18.13								
519.82	18.13 - 20.85								
519.75	20.85 - 23.74								
576	23.74 - 26.79	3	S1	Roca o suelos muy rígidos	18.3				
681.2	26.79 - 36.43								

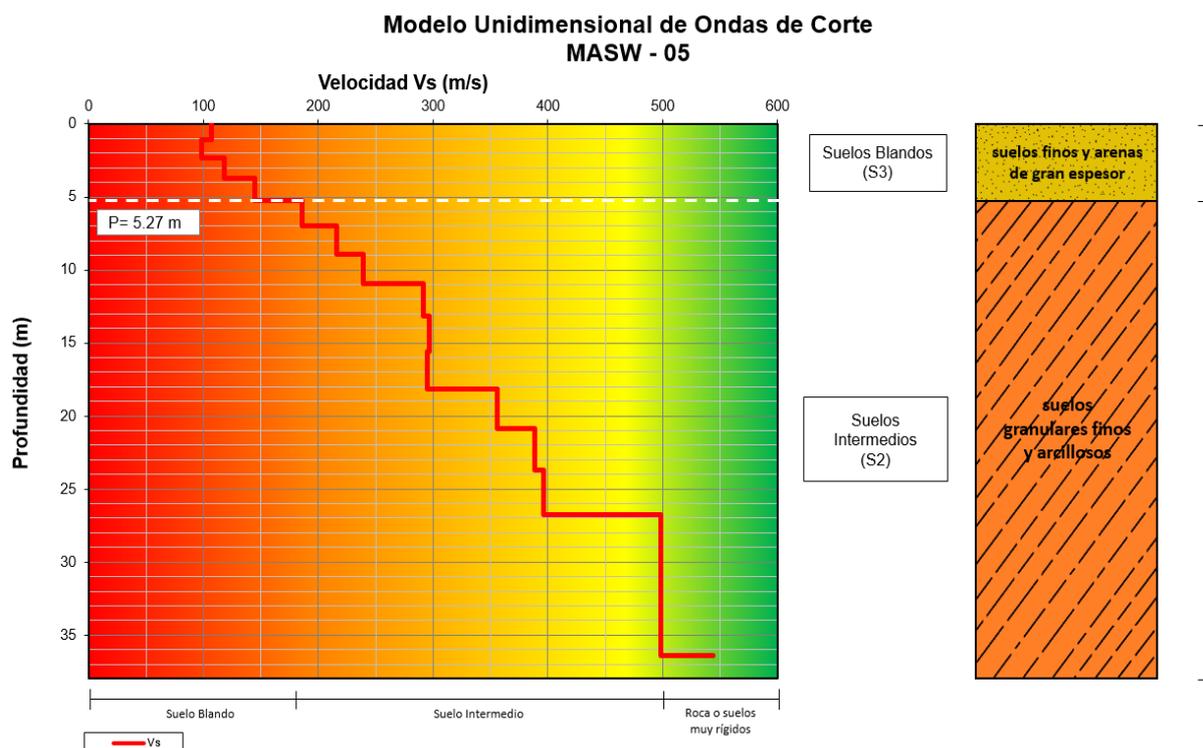
Fuente: Elaboración propia

### 5.2.5 Perfil unidimensional MASW – 05

En el siguiente ensayo, que corresponde a la línea MASW-05, se muestra la presencia de dos estratos:

El primer estrato tiene un espesor de 5.27 m. Presenta valores de velocidad entre 99 y 145 m/s que corresponden a suelos blandos (S3) según la Norma E-030, conformada principalmente por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentra en estado suelto.

El segundo estrato presenta subcapas con espesores del orden de 2 m aproximadamente. Este estrato presenta valores de velocidades entre 185 y 498 m/s con un espesor de 31.16 m correspondiente a suelos intermedios (S2). Estratigráficamente está conformada por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos.



**Figura 43.** Modelo Unidimensional de Ondas de Corte MASW-05.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 20.** Resumen de velocidades de onda de corte a partir del ensayo MASW-05

Vs (m/s)	Profundidad (m)	Normas IBC				Norma E-030			
		Nº Capa	Clase	Tipo de suelo	Espesor (m)	Nº Capa	Clase	Tipo de suelo	Espesor (m)
107.37	0 - 1.07	1	E	Suelo blando	5.27	1	S3	Suelos blandos	5.27
98.84	1.07 - 2.31								
118.55	2.31 - 3.71								
144.75	3.71 - 5.27								
185.86	5.27 - 7.01	2	D	Suelo rígido	15.58	2	S2	Suelos Intermedios	31.16
215.54	7.01 - 8.9								
239.06	8.9 - 10.96								
291.11	10.96 - 13.19								
296.48	13.19 - 15.58								
295.29	15.58 - 18.13								
355.67	18.13 - 20.85	3	C	Suelo muy denso y Roca blanda	15.58				
388.69	20.85 - 23.74								
396.05	23.74 - 26.79								
497.96	26.79 - 36.43								

Fuente: Elaboración propia

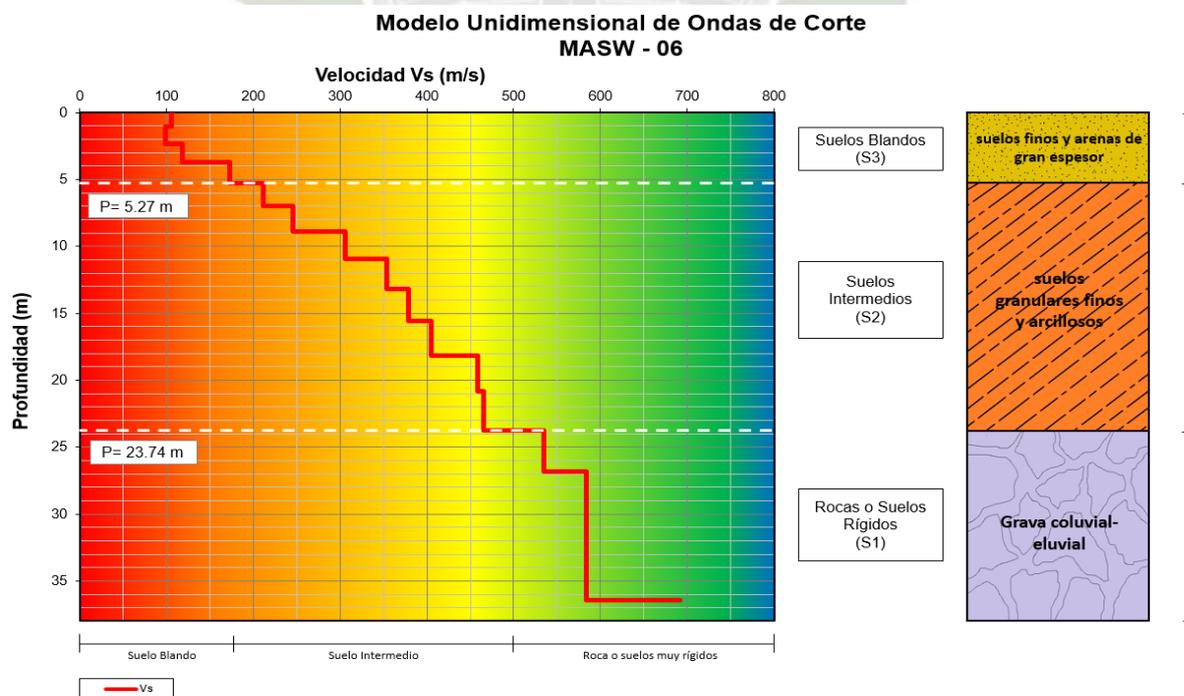
### 5.2.6 Perfil unidimensional MASW – 06

En el siguiente y último ensayo, correspondiente a la línea MASW-06, se han identificado la presencia de tres estratos:

El primer estrato tiene un espesor de 5.27 m. Presenta valores de velocidad entre 99 y 173 m/s que corresponden a suelos blandos (S3) según la Norma E-030. Estratigráficamente está conformada por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentra en estado suelto.

El segundo estrato presenta subcapas con espesores del orden de 2 m aproximadamente. Este estrato presenta valores de velocidades entre 211 y 465 m/s con un espesor total de 18.47 m correspondiente a suelos intermedios (S2) conformada por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos.

A partir de los 23.74 m de profundidad los valores de velocidades son mayores a los 534 m/s correspondiente a roca o suelos muy rígidos (S1) conformada por estratos de grava coluvial-eluvial que se encuentran a nivel superficial. El espesor de esta capa es de 12.69 m.



**Figura 44.** Modelo Unidimensional de Ondas de Corte MASW-06.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 21. Resumen de velocidades de onda de corte a partir del ensayo MASW-06**

Vs (m/s)	Profundidad (m)	Normas IBC				Norma E-030			
		Nº Capa	Clase	Tipo de suelo	Espesor (m)	Nº Capa	Clase	Tipo de suelo	Espesor (m)
105.76	0 - 1.07	1	E	Suelo blando	5.27	1	S3	Suelos blandos	5.27
99.07	1.07 - 2.31								
118.23	2.31 - 3.71								
172.67	3.71 - 5.27								
211.97	5.27 - 7.01	2	D	Suelo rígido	7.92	2	S2	Suelos Intermedios	18.47
245.86	7.01 - 8.9								
305.56	8.9 - 10.96								
354.25	10.96 - 13.19								
378.91	13.19 - 15.58	3	C	Suelo muy denso y Roca blanda	23.24	3	S1	Roca o suelos muy rígidos	12.69
405.48	15.58 - 18.13								
458.96	18.13 - 20.85								
465.76	20.85 - 23.74								
534.84	23.74 - 26.79								
583.5	26.79 - 36.43								

Fuente: Elaboración propia

### 5.3 Obtención de parámetros geotécnicos a partir de Vs y Vp

En base a los valores de velocidades de ondas primarias Vp y ondas de corte Vs obtenidos a partir de los estudios geofísicos, y aplicando las fórmulas descritas en el marco teórico del capítulo II, se calcularon los parámetros dinámicos correspondiente a la Densidad Estimada, Razón de Poisson, Módulo de Corte, Módulo de Young y Módulo de Bulk.

Cabe mencionar, que las velocidades Vs y Vp para hallar los parámetros dinámicos corresponden a las velocidades promedio de cada estrato o capa del subsuelo. A continuación, en la tabla 22 se presentan los resultados de los parámetros dinámicos obtenidos para las 06 líneas sísmicas realizadas en el pueblo tradicional El Pasto:

**Tabla 22. Parámetros Dinámicos obtenidos a partir de valores Vs y VP para las 06 líneas sísmicas**

PARAMETROS DINAMICOS PARA LS-01							
Nº de Capa	Velocidad Capa Vs (m/s)**	Velocidad Capa Vp (m/s)*	Densidad Estimada d (kg/m³)***	Razón de Poisson v	Módulo de Corte G (MN/m²) (MPa)	Módulo de Young E (MN/m²) (MPa)	Módulo Bulk K (MN/m²) (MPa)
1	355.86	1620.78	1848.47	0.47	234.08	690.39	4543.71

2	702.21	2166.32	1957.13	0.44	965.05	2781.86	7897.98
---	--------	---------	---------	------	--------	---------	---------

**PARAMETROS DINAMICOS PARA LS-02**

N° de Capa	Velocidad Capa Vs (m/s)**	Velocidad Capa Vp (m/s)*	Densidad Estimada d (kg/m³)***	Razón de Poisson v	Módulo de Corte G (MN/m²) (MPa)	Módulo de Young E (MN/m²) (MPa)	Módulo Bulk K (MN/m²) (MPa)
1	171.97	460.09	1781.65	0.42	52.69	149.52	306.89
2	335.04	2054.39	1838.95	0.49	206.43	613.65	7486.09
3	623.40	2327.93	1936.44	0.46	752.54	2199.49	9490.69

**PARAMETROS DINAMICOS PARA LS-03**

N° de Capa	Velocidad Capa Vs (m/s)**	Velocidad Capa Vp (m/s)*	Densidad Estimada d (kg/m³)***	Razón de Poisson v	Módulo de Corte G (MN/m²) (MPa)	Módulo de Young E (MN/m²) (MPa)	Módulo Bulk K (MN/m²) (MPa)
1	143.91	377.97	1771.58	0.42	36.69	103.84	204.17
2	308.28	1562.88	1829.44	0.48	173.86	514.55	4236.78
3	623.75	2133.44	1936.18	0.45	753.30	2189.49	7808.27

**PARAMETROS DINAMICOS PARA LS-04**

N° de Capa	Velocidad Capa Vs (m/s)**	Velocidad Capa Vp (m/s)*	Densidad Estimada d (kg/m³)***	Razón de Poisson v	Módulo de Corte G (MN/m²) (MPa)	Módulo de Young E (MN/m²) (MPa)	Módulo Bulk K (MN/m²) (MPa)
1	115.72	513.95	1761.43	0.47	23.59	69.50	433.82
2	341.11	1568.84	1840.91	0.48	214.21	631.99	4245.38
3	617.04	2038.64	1934.05	0.45	736.36	2134.81	7056.19

**PARAMETROS DINAMICOS PARA LS-05**

N° de Capa	Velocidad Capa Vs (m/s)**	Velocidad Capa Vp (m/s)*	Densidad Estimada d (kg/m³)***	Razón de Poisson v	Módulo de Corte G (MN/m²) (MPa)	Módulo de Young E (MN/m²) (MPa)	Módulo Bulk K (MN/m²) (MPa)
1	117.38	410.40	1762.66	0.46	24.29	70.69	264.50
2	336.88	1826.77	1838.62	0.48	208.66	618.63	5857.40

**PARAMETROS DINAMICOS PARA LS-06**

N° de Capa	Velocidad Capa Vs (m/s)**	Velocidad Capa Vp (m/s)*	Densidad Estimada d (kg/m <sup>3</sup> )**	Razón de Poisson v	Módulo de Corte G (MN/m <sup>2</sup> ) (MPa)	Módulo de Young E (MN/m <sup>2</sup> ) (MPa)	Módulo Bulk K (MN/m <sup>2</sup> ) (MPa)
1	123.93	468.25	1764.37	0.46	27.10	79.26	350.72
2	353.34	1853.02	1845.21	0.48	246.25	729.04	6300.38
3	603.45	2198.74	1929.85	0.46	712.85	2076.19	8379.28

Fuente: Elaboración propia

(\*) La velocidad de la Onda Longitudinal (Vp) es obtenida en campo por ensayos de Refracción sísmica

(\*\*) La velocidad de la Onda de Corte (Vs) es obtenida en campo por ensayos MASW

(\*\*\*) Valores de Densidad Obtenidos de Telford et, al 2001.

## 5.4 Correlación de resultados obtenidos

### 5.4.1 Correlación Geológica-Geomorfológica

La geomorfología del Pueblo Tradicional El Pasto, se distingue por un relieve llano casi horizontal, en algunas zonas se presenta el nivel freático superficialmente. La geología corresponde a suelos residuales que se forman por procesos naturales y antrópicos conformado por arenas limosas de aproximadamente 1 m de espesor.

Los resultados obtenidos mediante métodos geofísicos, muestran la presencia de suelos blandos hasta 5 m de profundidad conformado por material fino y arenas de poco espesor. De igual forma, dichos resultados dan indicios de zonas saturadas de agua lo que explicaría la formación de pequeños pantanos en la superficie del terreno.

Cabe mencionar, que el terreno plano de la zona hizo posible que se aplicara de manera correcta y sin inconvenientes la ejecución de los ensayos geofísicos sobre la zona de estudio para la obtención de los datos.

### 5.4.2 Correlación Geofísica

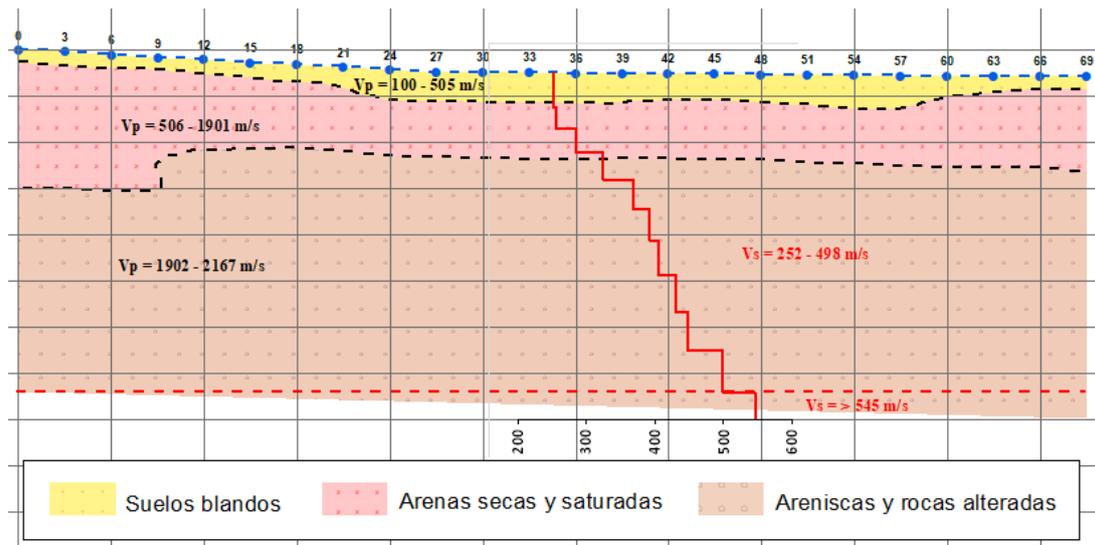
La siguiente descripción muestra la correlación de resultados de los ensayos geofísicos de Refracción sísmica y MASW realizados en el Pueblo Tradicional El Pasto.

#### A. Perfil LS-01

El perfil 1 se ubica sobre terreno agrícola de topografía plana en dirección E-O. La ejecución de los ensayos geofísicos se pudo realizar sin complicaciones y con resultados favorables. La longitud del tendido es de 69 m a de largo de la superficie del terreno. Para el ensayo de refracción, la profundidad investigación del subsuelo es de 23 m aproximadamente (1/3 de la longitud del tendido sísmico) y para el método MASW la profundidad de investigación es alrededor de los 30 m.

El modelo de velocidades muestra la presencia de 3 capas; Según los resultados del ensayo de refracción, la primera capa cercana a la superficie está compuesta por suelos blandos. Sin embargo, el modelo unidimensional MASW, no contempla la capa de suelos blandos ya que sus valores VS son mayores a 250 m/s categorizado como suelos granulares arcillosos, dando como resultados la presencia de 2 capas para este ensayo. Esta diferencia en los resultados de ambos métodos se debe principalmente a que el ensayo de refracción es un método geofísico con mayor capacidad de resolución para estimar contactos estratigráficos, lo que hace posible determinar capas del subsuelo de menor espesor.

También se observa que los valores de velocidad para ambos métodos (VS y VP), incrementan con la profundidad en una relación directa que indica que la capa más cercana a la superficie está compuesta por suelos blandos o poco compactos y a medida que se incrementa la profundidad los suelos tienden a ser más duros y compactos.



**Figura 45.** Perfil de velocidades  $V_p$  y  $V_s$  para la línea sísmica LS-01.

Fuente: Elaboración propia.

## B. Perfil LS-02

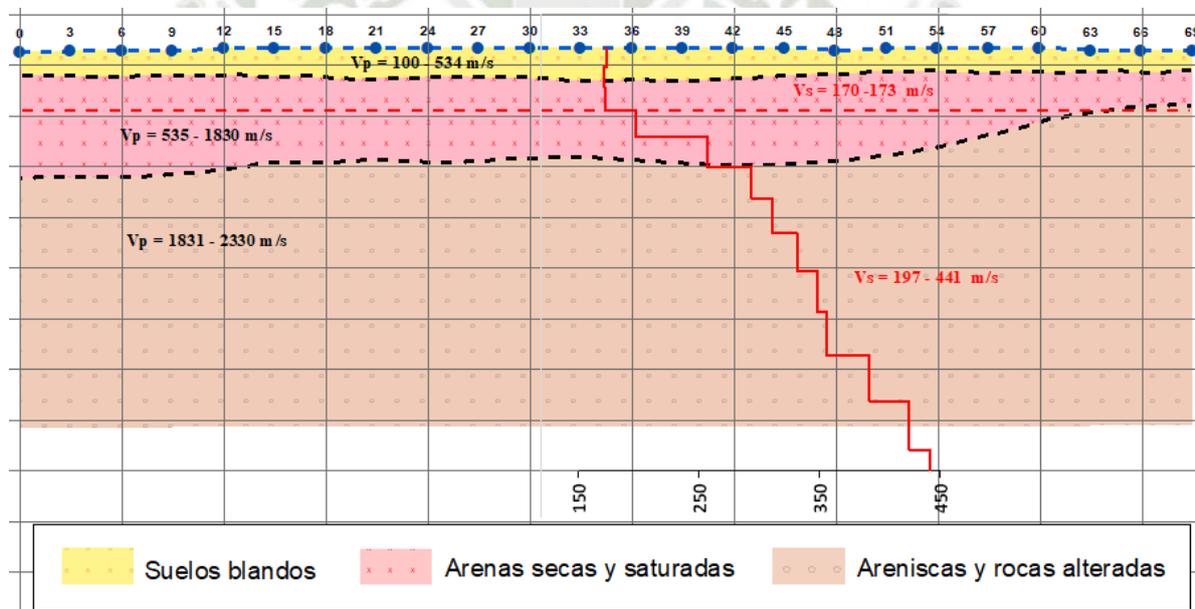
El perfil 2 se ubica sobre propiedad de terceros, de topografía plana y en dirección SO-NE. La ejecución de los ensayos geofísicos se pudo realizar sin complicaciones y con resultados favorables.

El modelo de velocidades del ensayo MASW y de Refracción Sísmica muestran la presencia de 3 capas en el subsuelo:

La primera capa corresponde a suelos blandos de poco espesor, en el cual, se puede apreciar un ligero cambio en los valores de velocidad  $V_s$  para los primeros 3 m de profundidad que pasa de un valor  $V_s$  positivo a  $V_s$  negativo visto en el perfil del ensayo MASW. El término para esta anomalía en los valores  $V_s$  se describe como el cambio de impedancia que existe entre 2 capas que subyacen entre ellas. En este caso en particular, la capa superior tiene mayor velocidad  $V_s$  que la capa subyacente por lo que se trataría de una “impedancia negativa”. Esto se debe posiblemente a que en dicha zona exista saturación de agua, que se ve reflejado en la disminución de los valores  $V_s$  respecto a la capa más superficial.

Subyacente a la capa de suelos blandos, según los resultados del método de refracción, se puede apreciar 2 capas de considerable espesor que van desde los 3 m hasta los 21 m de profundidad. La presencia de estas 2 capas se correlaciona con el resultado del método MASW el cual indica que entre los 3 y 21 m de profundidad existen suelos arenosos y granulares finos categorizado como suelos intermedios según la norma E-030.

Por debajo de los 21 m de profundidad el ensayo MASW muestra la presencia de suelos duros y más compactos debido a que los valores de velocidades VS don mayores a 500 m/s. Este resultado complementa el resultado del método de refracción pudiendo ampliar la profundidad de investigación del subsuelo.



**Figura 46.** Perfil de velocidades  $V_p$  y  $V_s$  para la línea sísmica LS-02.

Fuente: Elaboración propia.

### C. Perfil LS-03

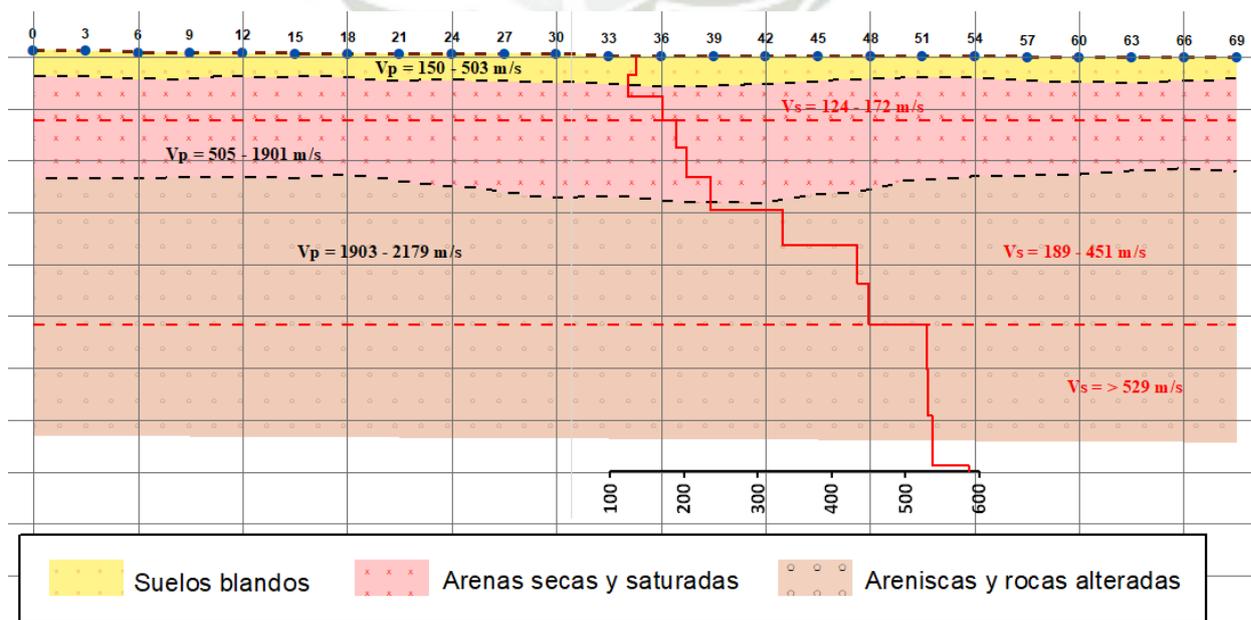
El perfil 3 se ubica sobre terreno agrícola, la topografía en esta zona es plana y la línea sísmica tiene orientación N-S. Los ensayos geofísicos se realizaron sin complicaciones y con resultados favorables.

El modelo de velocidades muestra la presencia de 3 capas para ambos métodos; De acuerdo a los resultados de Refracción y de MASW, la primera capa corresponde a suelos blandos de poco espesor.

En el perfil de velocidades MASW, se muestra un cambio más pronunciado de los valores de velocidad  $V_s$  (que pasa de  $V_s$  positivo a  $V_s$  negativo) entre 1 y 2 m. de profundidad. Este hecho debido al cambio de impedancia entre una zona del terreno que tiene mayor velocidad  $V_s$  a una de menor velocidad  $V_s$  (impedancia negativa), indica la existencia de saturación de agua que hace que los valores  $V_s$  disminuyan respecto a la capa más superficial.

Por debajo de la capa de suelos blandos, se tiene la presencia de arenas y areniscas hasta los 21 m de profundidad. En correlación con los resultados del MASW, el tipo de suelo obtenido por este método es coherente con los resultados de refracción, el cual está clasificado como suelos intermedios según la norma E-030 conformado por suelos granulares y arcillosos.

Por debajo de los 21 m de profundidad el ensayo MASW muestra la presencia de suelos duros y más compactos por las velocidades  $V_s$  mayores a 500 m/s. Este resultado complementa el resultado del método de refracción pudiendo ampliar la profundidad de investigación del subsuelo.



*Figura 47. Perfil de velocidades  $V_p$  y  $V_s$  para la línea sísmica LS-03.*

*Fuente: Elaboración propia.*

#### **D. Perfil LS-04**

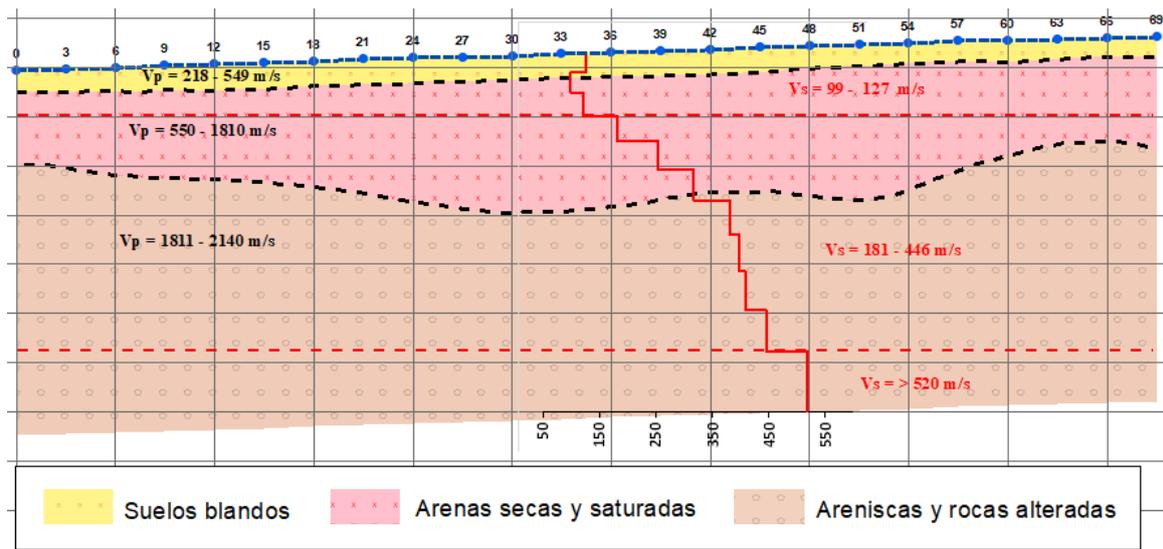
El perfil 4 se ubica sobre propiedad de terceros, en una zona plana cuya dirección de la línea sísmica es E-O. Los ensayos geofísicos se realizaron sin complicaciones y con resultados favorables.

De acuerdo al modelo de velocidades de la línea 4, se ha identificado 3 capas tanto para el ensayo de Refracción como para el ensayo MASW. De acuerdo a los resultados de estos ensayos, la primera capa corresponde a suelos blandos de poco espesor.

En este perfil, al igual que en el perfil 3, se aprecia un cambio de los valores de velocidad  $V_s$  (que pasa de  $V_s$  positivo a  $V_s$  negativo) entre 1 y 2 m. de profundidad debido al fenómeno de impedancia negativa, que indica la posible existencia de saturación de agua en la primera capa del subsuelo.

Por debajo de la capa de suelos blandos, se tiene la presencia de arenas y areniscas hasta los 21 m de profundidad. En correlación con los resultados del MASW, el tipo de suelo obtenido por este método es coherente con los resultados de refracción, el cual está clasificado como suelos intermedios según la norma E-030 conformado por suelos granulares y arcillosos.

Por debajo de los 21 m de profundidad el ensayo MASW muestra la presencia de suelos duros y más compactos por las velocidades  $V_s$  mayores a 500 m/s. Este resultado complementa el resultado del método de refracción pudiendo ampliar la profundidad de investigación del subsuelo.



*Figura 48. Perfil de velocidades  $V_p$  y  $V_s$  para la línea sísmica LS-04.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### E. Perfil LS-05

El perfil 5 se ubica sobre zona urbana, de terreno plano y dirección de la línea N-S. Los ensayos geofísicos se realizaron sin complicaciones y con resultados favorables.

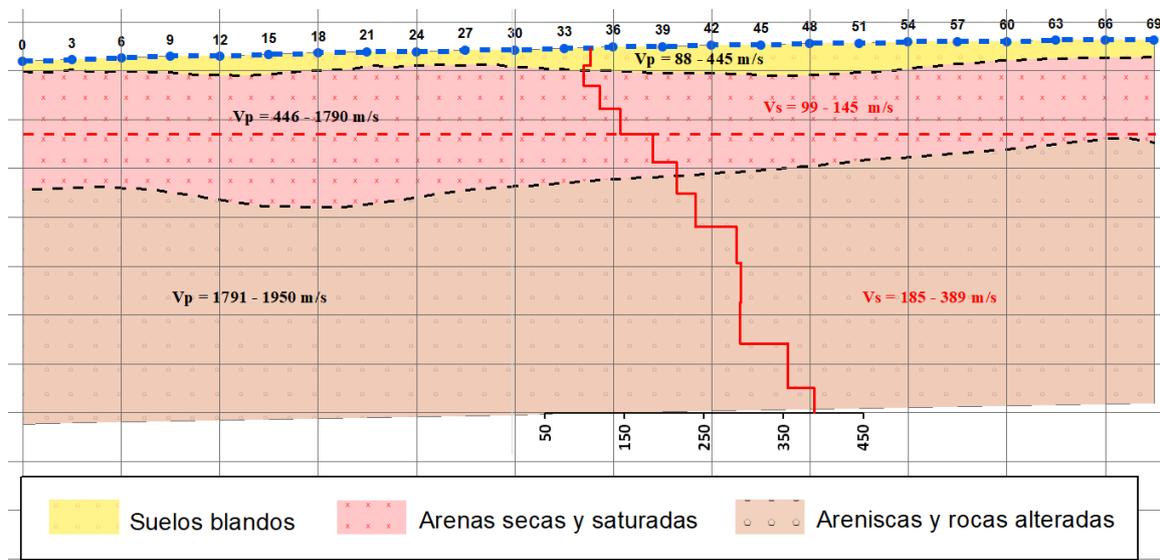
De acuerdo al modelo de velocidades de la línea 5, se ha identificado 3 capas en el ensayo de Refracción y 2 capas en el MASW.

De acuerdo a los resultados de los ensayos geofísicos, la primera capa corresponde a suelos blandos de poco espesor. Cabe señalar que en el perfil 5 del ensayo MASW, entre 1 y 2 m de profundidad se observa un cambio en los valores de velocidad  $V_s$  (impedancia negativa) lo que indica la existencia de saturación de agua en esta capa del subsuelo.

Las capas subyacentes a la capa de suelo blando, según el método de refracción, está conformado por arenas y areniscas hasta los 21 m de profundidad que se corrobora con el perfil de velocidades obtenido en el ensayo MASW el cual indica que por debajo de la capa de suelos blandos se encuentran suelos de mayor velocidad  $V_s$ , y por consiguiente suelos más compactos categorizados como suelos intermedios según la norma E-030.

Por debajo de los 21 m de profundidad, según los resultados del MASW, se mantiene la capa de suelos intermedios debido a que los valores de velocidades  $V_s$  son menores a 500 m/s.

Por consiguiente, en esta zona de estudio no existe una capa de suelos duros o roca como lo obtenido en resultados anteriores.



*Figura 49. Perfil de velocidades  $V_p$  y  $V_s$  para la línea sísmica LS-05.*

*Fuente: Elaboración propia.*

## F. Perfil LS-06

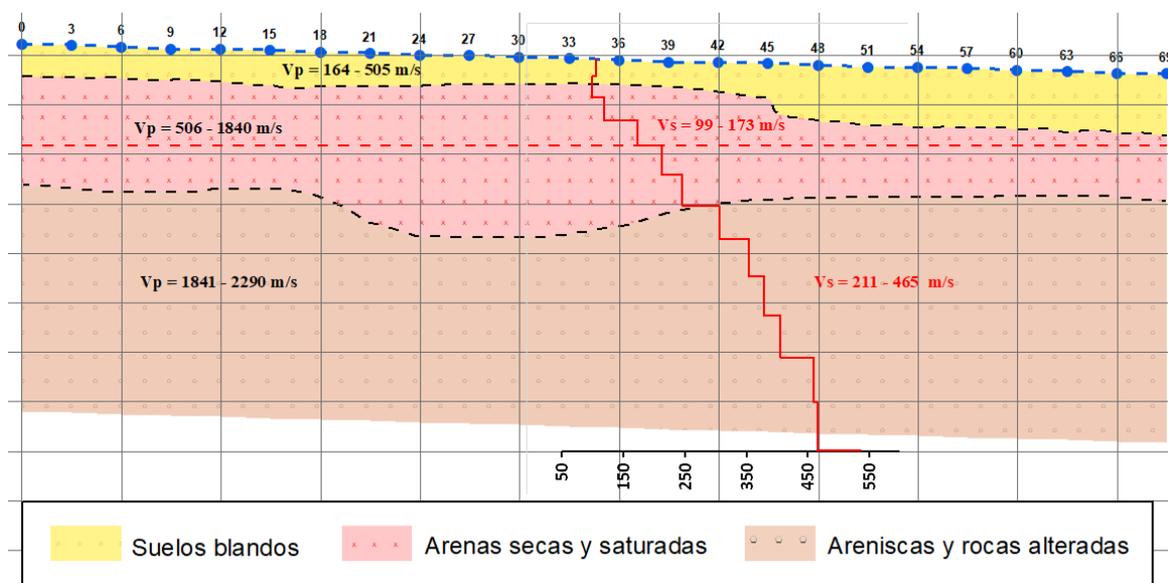
El perfil 6 se ubica sobre zona urbana, de terreno plano con dirección NO-SE. Los ensayos geofísicos se realizaron sin complicaciones y con resultados favorables.

De acuerdo al modelo de velocidades de la línea 6, se han identificado hasta 3 capas de suelos tanto para el ensayo de Refracción como para el MASW. De acuerdo a los resultados de estos ensayos, la primera capa corresponde a suelos blandos de poco espesor.

Al igual que en los perfiles 2 al 5, se observa una impedancia negativa entre los 1 y 2 m. de profundidad, donde los valores de velocidad  $V_s$  de la capa superior tiene mayor velocidad  $V_s$  que la capa subyacente. Esto debido a que posiblemente exista una zona con mayor saturación de agua que hace que los valores  $V_s$  disminuyan respecto a la capa más superficial.

Por debajo de la capa de suelos blandos, se tiene la presencia de arenas y areniscas hasta los 21 m de profundidad. En correlación con los resultados del MASW, el tipo de suelo obtenido por este método es coherente con los resultados de refracción, el cual está clasificado como suelos intermedios según la norma E-030 conformado por suelos granulares y arcillosos.

Por debajo de los 21 m de profundidad el ensayo MASW muestra la presencia de suelos duros y más compactos por las velocidades VS mayores a 500 m/s. Este resultado complementa el resultado del método de refracción pudiendo ampliar la profundidad de investigación del subsuelo.



*Figura 50. Perfil de velocidades  $V_p$  y  $V_s$  para la línea sísmica LS-06.*

*Fuente: Elaboración propia.*

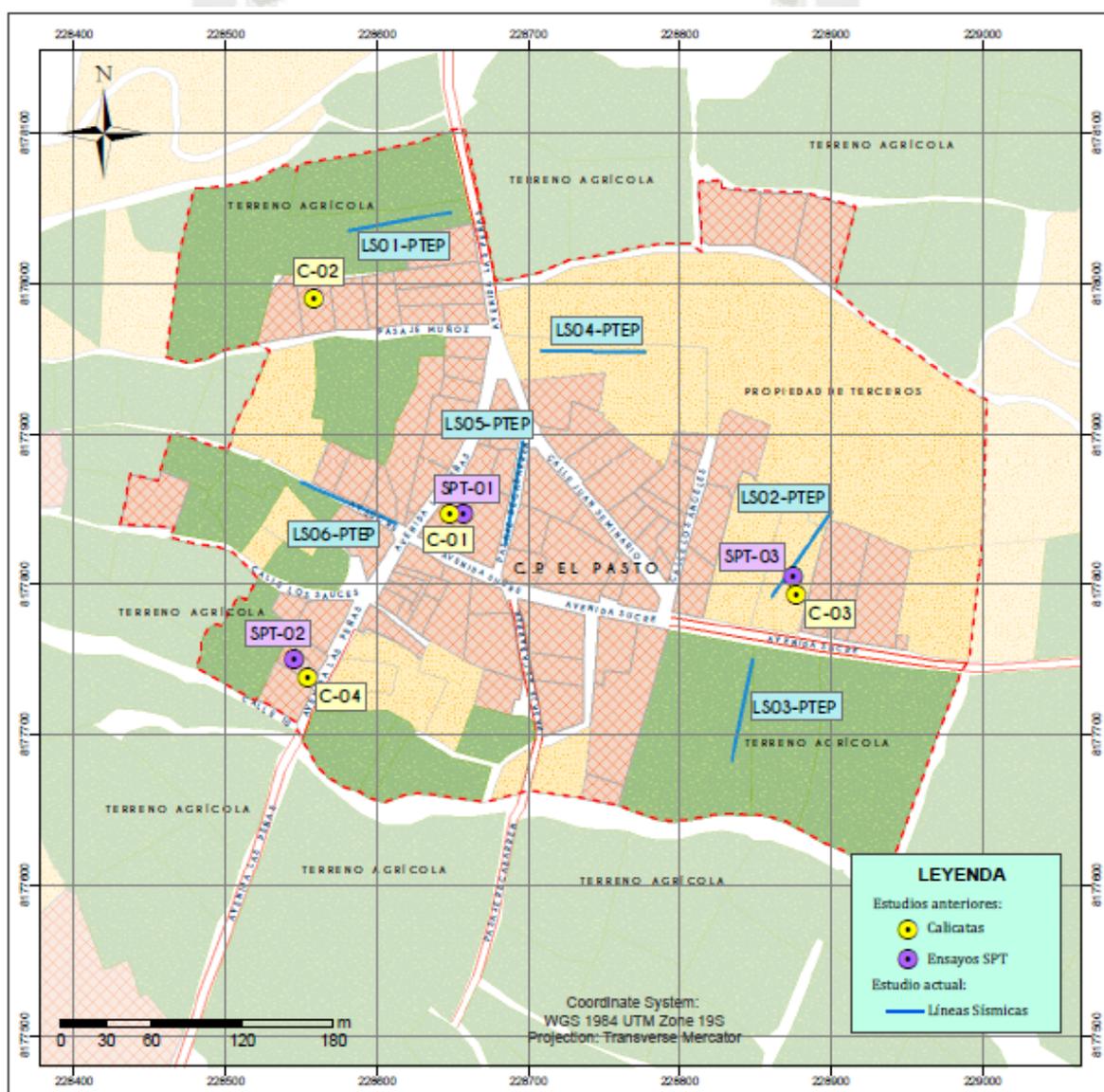
### 5.4.3 Correlación con investigaciones anteriores

Como se ha descrito anteriormente, los resultados obtenidos por métodos geofísicos, indican que la composición de subsuelo en el PT. El Pasto está conformado por 3 capas o estratos de diferente composición estratigráfica hasta los 30 m de profundidad, siendo la capa más superficial (entre los 3 y 5 m de profundidad) la que está conformada por suelos finos y arenas de gran espesor (Suelos Blandos según la norma E-030) con velocidades de ondas de corte menores a 180 m/s.

En comparación con los resultados obtenidos en la investigación “Evaluación de potencial de licuefacción de suelos en el centro poblado El Pasto, Distrito de Socabaya, Arequipa”

realizado por Seminario & Pinto (2018), se corrobora que el tipo de suelo hasta los 3 m de profundidad corresponde a suelos blandos de poco espesor.

En dicha investigación, se realizaron 04 calicatas y 03 ensayos de Penetración Estándar (SPT) para evaluar el potencial de licuefacción en dicha zona. La siguiente imagen (figura 51) muestra la ubicación de las líneas sísmicas realizadas en el presente estudio y la ubicación de las calicatas y SPT de investigación realizada por Seminario & Pinto (2018).



**Figura 51.** Ubicación de líneas sísmicas (color azul) y puntos de calicatas (círculos amarillos) y SPT (círculos morados) del estudio de Seminario & Pinto (2018).

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 51, la ubicación de las líneas sísmicas del presente estudio tiene como base los puntos de calicatas y ensayos SPT que se realizaron en la investigación “Evaluación de potencial de licuefacción de suelos en el centro poblado El Pasto, Distrito de Socabaya, Arequipa”. Dada la topografía del terreno, dichas líneas sísmicas se desplegaron lo más cerca posible a los ensayos ejecutados en dicha investigación. El siguiente cuadro muestra la relación de calicatas y ensayos SPT próximas a la ubicación de las líneas sísmicas efectuadas en el presente estudio.

**Tabla 23. Relación de líneas sísmicas distribuidas en base a las calicatas y ensayos SPT del estudio realizado por Seminario & Pinto (2018)**

Estudio Actual	Estudio Anterior Seminario & Pinto (2018)	
	Calicata	SPT
LS-01	Calicata-02	No realizado
LS-02	Calicata-03	SPT-03
LS-03	No realizado	No realizado
LS-04	No realizado	No realizado
LS-05	Calicata-01	SPT-01
LS-06	Calicata-04	SPT-02

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.3.1 Correlación de resultados obtenidos por métodos geofísicos y ensayos SPT

En el análisis de los resultados obtenidos mediante ensayos SPT de estudios anteriores, se calcularon los valores de velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ) de los 3m superiores, usando el valor  $N$  del ensayo SPT mediante la relación  $V_s = aN^b$  (Ecuación 15)

Los valores de velocidad obtenidos mediante la fórmula descrita líneas arriba en comparación con los valores de velocidad obtenidos por métodos geofísicos se muestran en el siguiente cuadro comparativo:

**Tabla 24. Cuadro comparativo de valores de velocidad  $V_s$  obtenidos por ensayo SPT (Estudio Anterior) y MASW (estudio Actual)**

Estudio Anterior Seminario & Pinto (2018)			Estudio Actual		
Ensayo SPT	Prof. (m) *	Vs (m/s) *	Línea Sísmica	Prof. (m) **	Vs (m/s) **
SPT-1	3	115.37	LS-05	5.27	99 - 145
SPT-2	3	113.66	LS-06	5.27	99 - 173
SPT-3	3	119.10	LS-02	3.71	170 - 173

Fuente: Elaboración propia

*Vs (m/s) \*:* Velocidad promedio de ondas de corte S, calculado a partir del valor N del ensayo SPT.

*Vs (m/s) \*\*:* Rango de velocidades de ondas de corte (Vs) de la primera capa del subsuelo obtenidos del método geofísico MASW.

*Prof. (m)\*:* Profundidad de investigación analizado por calicatas.

*Prof. (m)\*\*:* Profundidad de la primera capa del subsuelo obtenido por método MASW

Como se observa en la tabla 24, los valores de velocidad obtenidos a partir de métodos geofísicos se encuentran dentro del rango de valores de velocidad VS obtenidos de ensayos SPT. Cabe recalcar que los valores Vs de los estudios anteriores, son una aproximación a los valores Vs reales, que fueron calculados mediante correlación empírica a través del valor N del ensayo SPT.

Con los resultados obtenidos tanto por métodos directos (ensayo SPT) como por métodos indirectos (Refracción y MASW) se corrobora que el tipo de suelo en las zonas donde se realizaron los ensayos respectivos, hasta los 3 m de profundidad, son clasificados como suelos blandos conformados por arenas limosas con contenido de suelos finos.

En definitiva, la determinación del tipo de suelo mediante métodos directos o geotécnicos, solo contemplan la parte más superficial del subsuelo, concretamente los 3 primeros metros de profundidad; no obstante, la aplicación de métodos geofísicos como complemento de otros métodos de estudio de suelos, no solo permite la evaluación del subsuelo cercano a la superficie, sino también permite evaluar la composición del terreno a mayores profundidades en las que los métodos directos no tienen alcance.

#### 5.4.3.2 Correlación de resultados obtenidos por métodos geofísicos y Calicatas.

Los resultados que se exponen en la investigación “Evaluación de potencial de licuefacción de suelos en el centro poblado El Pasto, Distrito de Socabaya, Arequipa” del 2018, indican que los suelos del P.T. El Pasto presentan susceptibilidad a la licuefacción **Muy Alta a Alta** a causa del elevado nivel freático muy cerca de la superficie (Ver tabla 25).

Para corroborar los resultados de susceptibilidad de licuefacción obtenidas mediante las 04 calicatas realizadas en el P.T El Pasto, se elaboró un cuadro comparativo de los valores de velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ) obtenidos por métodos geofísicos (Estudio actual) con los valores de velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ) de las calicatas calculados partir del valor de numero de golpes del ensayo SPT (Estudio Anterior).

**Tabla 25. Cuadro comparativo de valores de velocidad de ondas de corte  $V_s$  de Calicatas (estudio Anterior) y método MASW (estudio Actual)**

Estudio Anterior Seminario & Pinto (2018)					Estudio Actual		
Calicata	Nivel Freático (m)	Prof. (m) *	$V_s$ (m/s) **	Resultado de susceptibilidad	Línea Sísmica	Prof. (m) **	$V_s$ (m/s) **
Calicata-1	0.78	3	99-138	Susceptible	LS-05	5.27	99 - 145
Calicata-2	2.2	3	No calculado	No susceptible	LS-01	7.01	253 - 325
Calicata-3	1.8	3	76-158	Susceptible	LS-02	3.71	170 - 173
Calicata-4	2.4	3	95-155	Susceptible	LS-06	5.27	99 - 173

Fuente: Elaboración propia

$V_s$  (m/s) \*: Rango de velocidades de ondas de corte  $S$  obtenidos a partir del valor del número de golpes del ensayo SPT.

$V_s$  (m/s) \*\*: Rango de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) de la primera capa del subsuelo obtenidos del método geofísico MASW.

Prof. (m)\*: Profundidad de investigación realizado por calicatas.

Prof. (m)\*\*: Profundidad de la primera capa del subsuelo obtenido por método MASW

Según el estudio de Seminario & Pinto (2018), las zonas donde se realizaron las calicatas 1 y 4 se clasifican como suelos Susceptibles a licuefacción. Esta afirmación se relaciona con los resultados obtenidos por método geofísico correspondientes a las líneas LS-05 y LS-06 realizados en el presente estudio. Como se observa en la tabla 25, los valores de velocidades de las líneas sísmicas LS-05 y LS-06 obtenidos por método geofísico es concordante con los

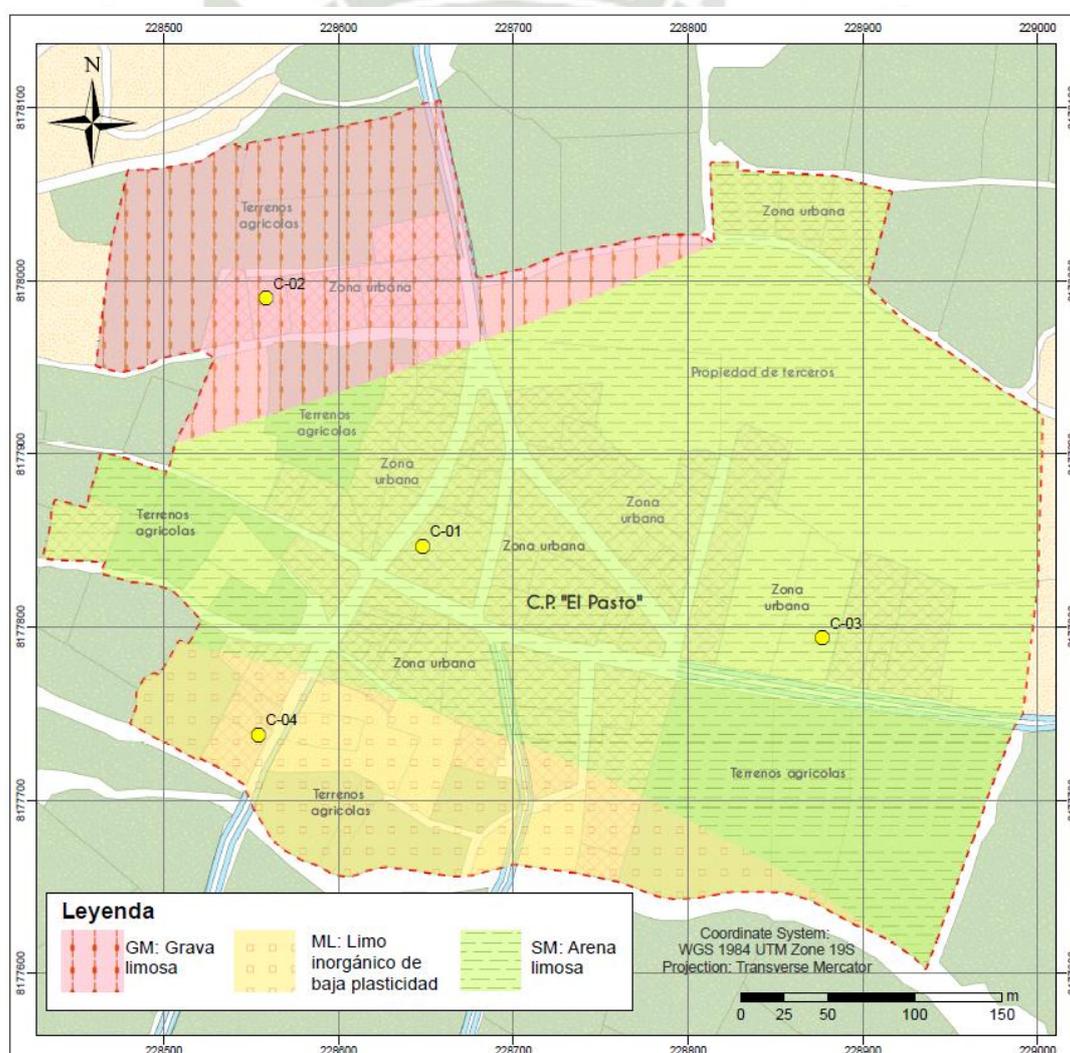
valores de velocidad  $V_s$  de las calicatas 1 y 4 que varían entre 95 y 173 m/s para ambos métodos (calicatas y MASW) hasta los 5.27 m de profundidad. En función de los valores de velocidad  $V_s$  obtenidos por método geofísico, se muestra un ligero cambio en los valores de velocidad  $V_s$  entre 1 y 3 m de profundidad que pasa de un valor  $V_s$  positivo a  $V_s$  negativo conocido como “impedancia negativa” que se da entre 2 capas subyacentes, siendo la capa superior de mayor velocidad que la capa inferior. Este hecho demuestra, en función de los valores de ondas de corte  $V_s$ , la existencia de saturación de agua sobre la capa más superficial del subsuelo, que refuerza los resultados de las calicatas 1 y 4 de la investigación de Seminario & Pinto (2018) donde se concluye que en estas zonas existe una alta probabilidad de licuefacción ante cargas cíclicas como son los eventos sísmicos.

Caso contrario sucede con la calicata 2, que según la investigación de Seminario & Pinto (2018), el resultado en esta zona de estudio es No Susceptible a licuefacción. Esta afirmación se debe a que en esta zona no se realizaron ensayos SPT, por lo tanto; no se obtuvieron valores de velocidades de ondas de corte  $V_s$  que permita hacer una comparación con los datos de velocidad  $V_s$  obtenidos por método geofísico. Sin embargo, los resultados obtenidos en la línea sísmica LS-01 ubicado muy próximo a la calicata 1, muestran valores de velocidad de ondas de corte  $V_s$  superiores a los 250 m/s relacionados a suelos duros según norma E-030. Los valores elevados de  $V_s$  en esta zona en particular, y en base a los perfiles de velocidad MASW que no muestran un cambio de impedancia negativa en comparación con las demás líneas sísmicas, corroboran el hecho de que en esta zona no es susceptible a licuefacción reforzando los resultados de la calicata 1.

En relación a la calicata 3, se observa una ligera diferencia en los valores de velocidad de ondas de corte  $V_s$  respecto de la línea LS-02. De acuerdo a la tabla 25, para las calicatas se obtuvieron valores  $V_s$  entre 76 - 158 m/s, y los resultados del método MASW muestran valores  $V_s$  entre 170 - 173 m/s. A pesar de la diferencia de resultados entre ambos métodos, los suelos

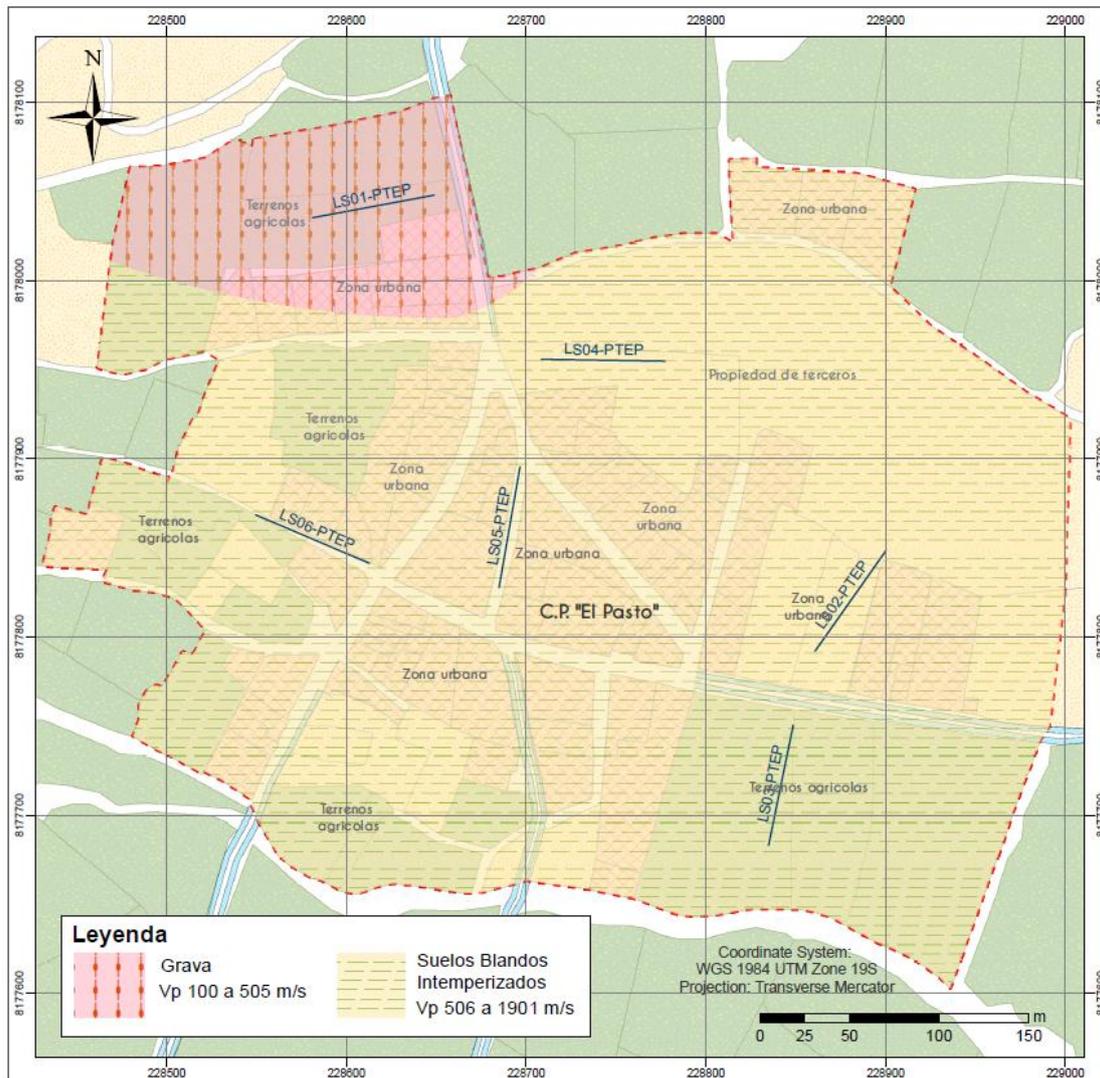
en dicha zona se pueden clasificar como zona probable a presentar licuación debido a los bajos valores de velocidad de ondas de corte  $V_s$  obtenidos por el método MASW y de los valores  $V_s$  obtenidos por Calicatas en el estudio de Seminario & Pinto (2018). A esto se suma el hecho de que en dicha zona existe un elevado nivel freático que hace que la zona sea Susceptible a licuefacción.

La siguiente imagen muestra una comparación de la clasificación del tipo de suelo obtenido mediante calicatas según el estudio de Seminario & Pinto (2018) como se muestra en la figura 52 y por método geofísico de Refracción Sísmica en la figura 53.



**Figura 52.** Mapa de clasificación de tipo de suelo según calicatas prof. 0.5 m a 1.0 m.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 53.** Mapa de clasificación de tipo de suelo según el método de refracción sísmica prof: 0.5 m a 1.0 m  
Fuente: Elaboración Propia

Según la figura 52, el mapa de clasificación de suelo según calicatas muestra 3 tipos de suelos hasta 1 m de profundidad donde se observa que hacia el Nor-Oeste del poblado, donde se realizó la calicata 02, el tipo de suelo corresponde a Grava Limosa. Para el resto del poblado el tipo de suelo corresponde a arenas y limos.

En comparación con los resultados obtenidos por el método de Refracción Sísmica, el mapa de clasificación de suelo por este método geofísico, muestra 2 tipos de suelos hasta 1 m de profundidad, donde se observa que sobre la línea de refracción LS-01 (donde se realizó la calicata 2 en el año 2018) el tipo de suelo se clasifica como Gravas. Para el resto del poblado el tipo de suelo se clasifica como suelos blandos intemperizados.

Los “Suelos blandos intemperizados” corresponden a velocidades  $V_p$  100 m/s a 505 m/s, los suelos “Gravas o arenas secas y arenas saturadas” corresponden a velocidades  $V_p$  506 m/s a 1901 m/s.

Esta clasificación se hace de acuerdo al valor de  $V_p$  para cada línea, según Curvich J. (1975), Dobrin M. (1961), NB (1976), Savicha y Satonov V. (1979), los valores menores a  $V_p=534$  m/s se describen como suelos blandos. Según la correlación de velocidades de onda P y tipo de suelo de acuerdo al autor Martínez V. A. (1990), indica que los limos tienen un valor de  $V_p=210$  m/s, arcilla  $V_p=350$  m/s, arena  $V_p=450$  m/s.

De esta manera, mediante la correlación de ambos métodos de estudio de suelos, se demuestra que en la zona Nor-Oeste del P.T. El Pasto, el tipo de suelo es más firme y compacto que en el resto del poblado.

### **5.5 Potencial de licuefacción en función de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ )**

Para el análisis de susceptibilidad de licuefacción del suelo, se usó el software LiqIT v. 4.7.7.5 de Geologismik que permite evaluar el potencial de licuefacción basado en datos de campo asociados a SPT, CPT y  $V_s$ .

- **Datos de entrada**

Los datos de entrada para el análisis del potencial de licuefacción son:

1. Valores de Velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ) obtenidos por el método sísmico MASW,
2. Valores del nivel freático en la zona de estudio.
3. Parámetros sísmicos correspondiente a las aceleraciones máximas del suelo ( $g$ ) y magnitud momento ( $M_w$ ).

Cabe señalar que los valores de nivel freático corresponden a los resultados obtenidos por calicatas en el estudio realizado por Seminario & Pinto (2018). Para cada línea sísmica del presente estudio se ha asociado una calicata de acuerdo a su proximidad. En la tabla 26 se

muestra la relación de las 06 líneas sísmicas y las calicatas asociadas a cada línea con su respectivo nivel freático.

**Tabla 26. Valores de nivel Freático asociados a cada línea sísmica según los resultados de calicatas**

N° de Línea	Calicata Próxima a línea sísmica	Nivel Freático en la zona (m)
LS-01	CAL-02	2.2
LS-02	CAL-03/SPT-03	1.8
LS-03	CAL-03	1.8
LS-04	CAL-01	0.78
LS-05	CAL-01/SPT-01	0.78
LS-06	CAL-04/SPT-02	2.4

Fuente: Elaboración propia

- **Metodología de evaluación de potencial de licuefacción**

Para el análisis de potencial de licuefacción se aplicó la metodología desarrollada por (Andrus & Stokoe, 2000) el cual se basa el uso de velocidades de ondas de corte  $V_s$  corregidas, que toma en cuenta el confinamiento del suelo en profundidad como parámetro para estimar la resistencia a licuefacción. El criterio para evaluar el potencial de licuefacción es el factor de seguridad (FS) que se basa en la comparación de esfuerzos cíclicos inducidos por sismos (CSR) y la resistencia cíclica del suelo (CRR)

$$FS = \frac{CSR}{CRR} \quad (\text{Ecuación 16})$$

La ventaja de esto método respecto a otros métodos de evaluación del potencial de licuefacción es la posibilidad de conocer la velocidad de ondas de corte en zonas donde es difícil obtener información con ensayos SPT o CPT o en lugares donde las perforaciones no son permitidas, en consecuencia, las velocidades de ondas de corte  $V_s$  se pueden usar parámetro de medida a la resistencia a licuefacción de un estrato de suelo.

- **Índice de potencial de licuefacción  $I_L$  según Iwasaki**

Siguiendo el análisis propuesto por Iwasaki et al. (1978) cuyo método se basa en evaluar la severidad de la licuación en un sitio según el valor de  $I_L$ , en aquellas regiones donde el valor

de  $I_L$  es superior que 15 ocurren daños severos, mientras que en regiones donde el valor de  $I_L$  es inferior a 5, los efectos producto de la licuación son menores. (Pérez, 2005)

**Tabla 27. Potencial de licuefacción según el valor de  $I_L$**

Grado	$I_L$	Potencial de licuefacción	Observaciones
1	0	Muy bajo	No son necesarias investigaciones en detalle.
2	<5	Bajo	Necesarias investigaciones en caso de obras especiales importantes
3	5 - 15	Alto	Necesarias investigaciones de detalle para cualquier tipo de obra e indicación de las medidas correctivas
4	>15	Muy alto	Imprescindible las investigaciones de detalle y las medidas correctivas

Fuente: Pérez (2005)

- **Escenarios para evaluar el potencial de licuefacción**

En el presente estudio, se han propuesto 4 escenarios de eventos sísmicos con diferentes magnitudes y aceleraciones del suelo (ver tabla 28).

**Tabla 28. Parámetros Sísmicos utilizados para la evaluación de potencial de licuefacción**

Parámetros sísmicos	Escenario	Escenario	Escenario	Escenario
	1	2	3	4
Aceleraciones máximas del suelo (g)	0.18	0.22	0.37	0.45
Magnitud momento (Mw)	7.8	7.9	8.3	8.4

Fuente: Seminario & Pinto (2018)

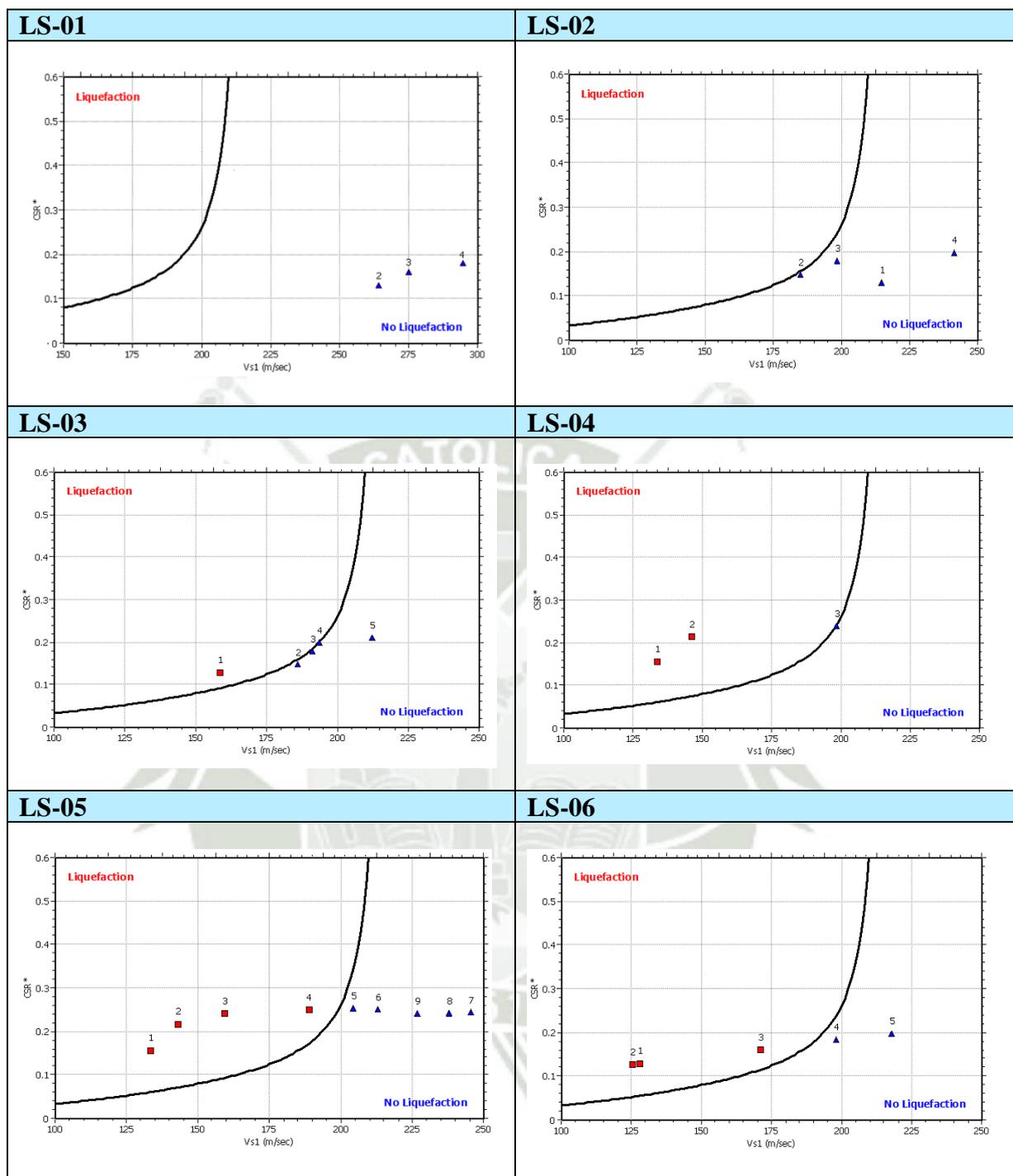
Los parámetros sísmicos de la tabla 28, conjuntamente con los datos de valores  $V_s$  y el nivel freático, se ingresan en el software LiqIT que dan como resultados gráficos CSR en función de  $V_s$  para el análisis del potencial de licuefacción.

### 5.5.1 Análisis e Interpretación del potencial de licuefacción

- **Escenario 1**

Para el escenario 1, se consideró un sismo de magnitud 7.8, aceleración del suelo 0.18 g.

Usando el software LiqIT se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 54.** Escenario 1 de potencial de licuefacción de las 06 líneas sísmicas realizadas en el P.T. El Pasto  
Fuente: Elaboración propia.

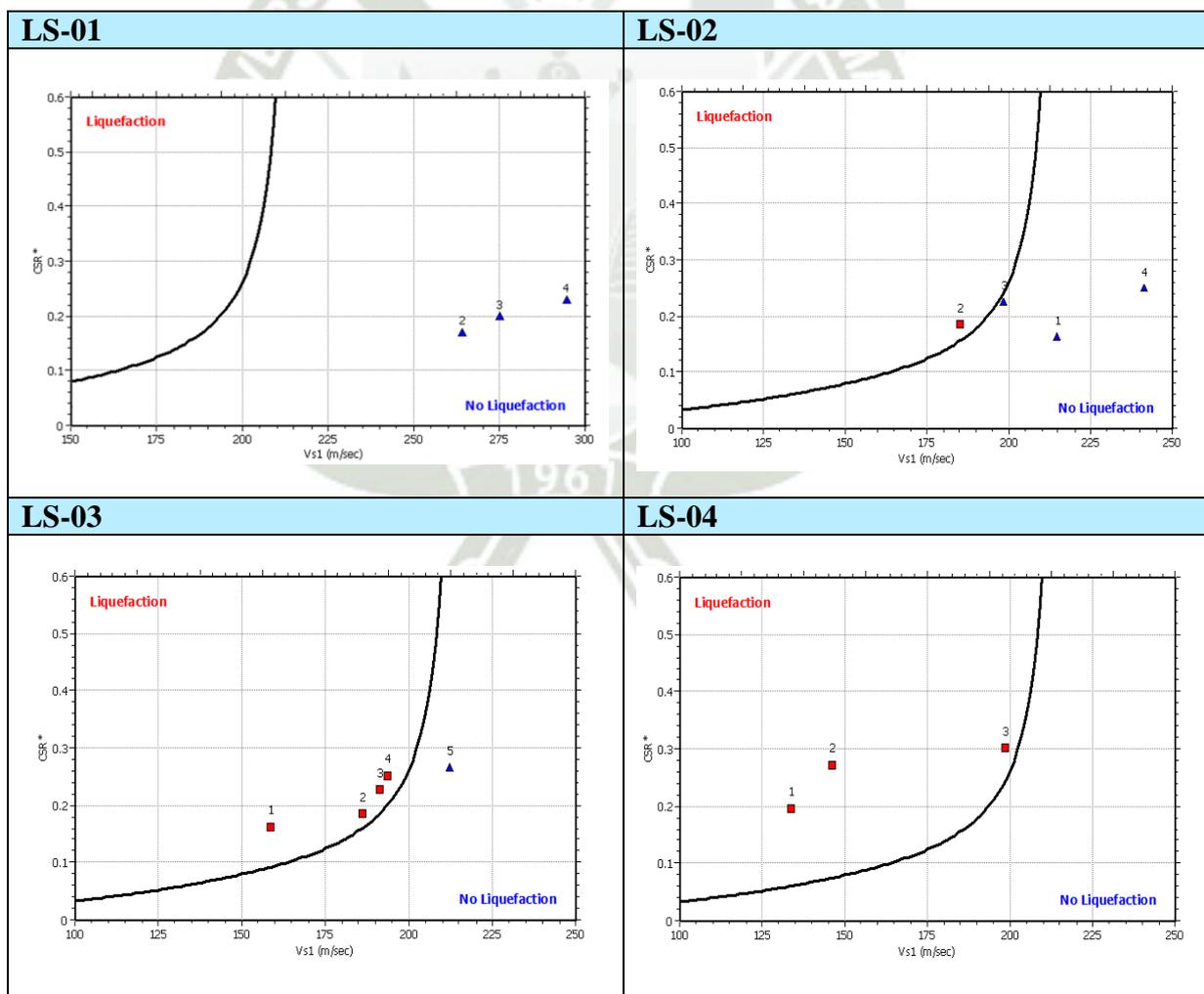
En la figura 54, se observa una mayor probabilidad de licuefacción sobre las zonas donde se realizaron las líneas sísmicas LS-03, LS-04, LS-05 y LS-06. La profundidad mínima de licuefacción se da en la línea LS-03 hasta 1.07 m de profundidad con un valor  $V_{s1}$  de 158.68 m/s y un factor de seguridad de 0.71. La profundidad máxima de licuefacción se da en la línea

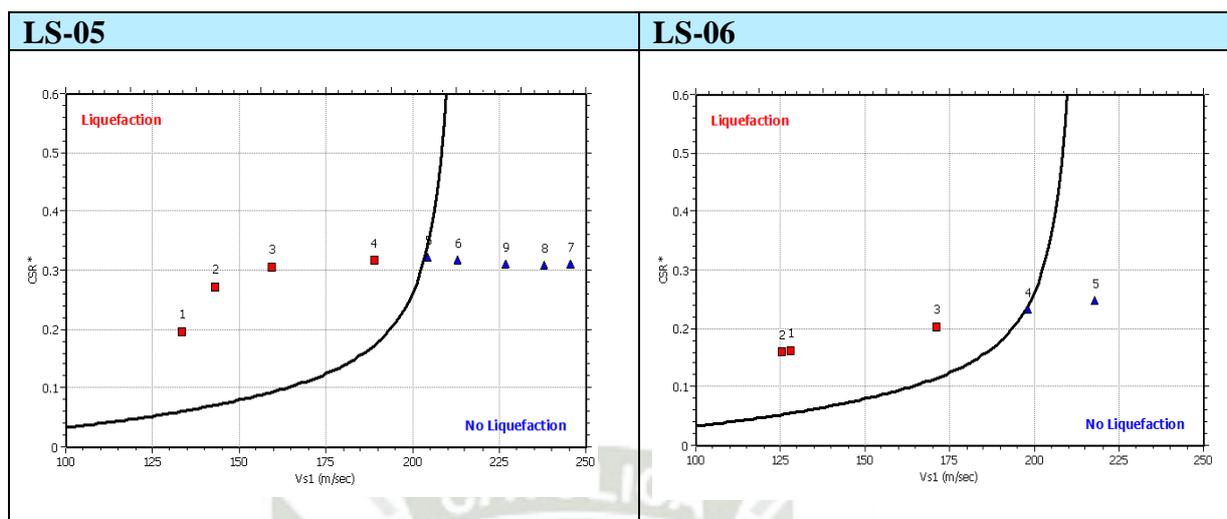
LS-05 hasta 5.27 m de profundidad con un valor  $V_s$  de 188.68 m/s y un factor de seguridad de 0.68. Las líneas LS-01 y LS-02 presentan un factor de seguridad superior a 1 por lo que no se considera como posible zona de licuefacción, a esto se adiciona el hecho de que los valores de velocidad son superiores a 200 m/s para el caso de la línea LS-01 que estratigráficamente no es apto a presentar licuefacción por ser considerado una zona de suelos compactos según la clasificación de la norma E-030 revisado en el análisis de los resultados obtenidos por el método MASW.

- **Escenario 2**

Para el escenario 2, se consideró un sismo de magnitud 7.9, aceleración del suelo 0.22g.

Usando el software LiqIT se obtuvieron los siguientes resultados:





**Figura 55.** Escenario 2 de potencial de licuefacción de las 06 líneas sísmicas realizadas en el P.T El Pasto.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 55, se observa una mayor probabilidad de licuefacción sobre las zonas donde se efectuaron las líneas sísmicas LS-02, LS-03, LS-04, LS-05 y LS-06. La profundidad mínima de licuefacción se da en la línea LS-02 hasta 2.31 m de profundidad con un valor Vs de 184.81 m/s y un factor de seguridad de 0.84. La profundidad máxima de licuefacción es hasta los 5.27 m de profundidad correspondiente a las líneas LS-03 y LS-05, cuyos valores Vs son 193.66 y 188.69 m/s, y el factor de seguridad es 0.79 y 0.54 respectivamente.

La línea LS-01 presenta un factor de seguridad superior a 1 y los valores de velocidad de ondas de corte Vs son superiores a los 250 m/s relacionados a suelos duros según norma E-030.

- **Escenario 3**

Para el escenario 3, se consideró un sismo de magnitud 8.3, aceleración del suelo 0.37g. Usando el software LiqIT se obtuvieron los siguientes resultados:

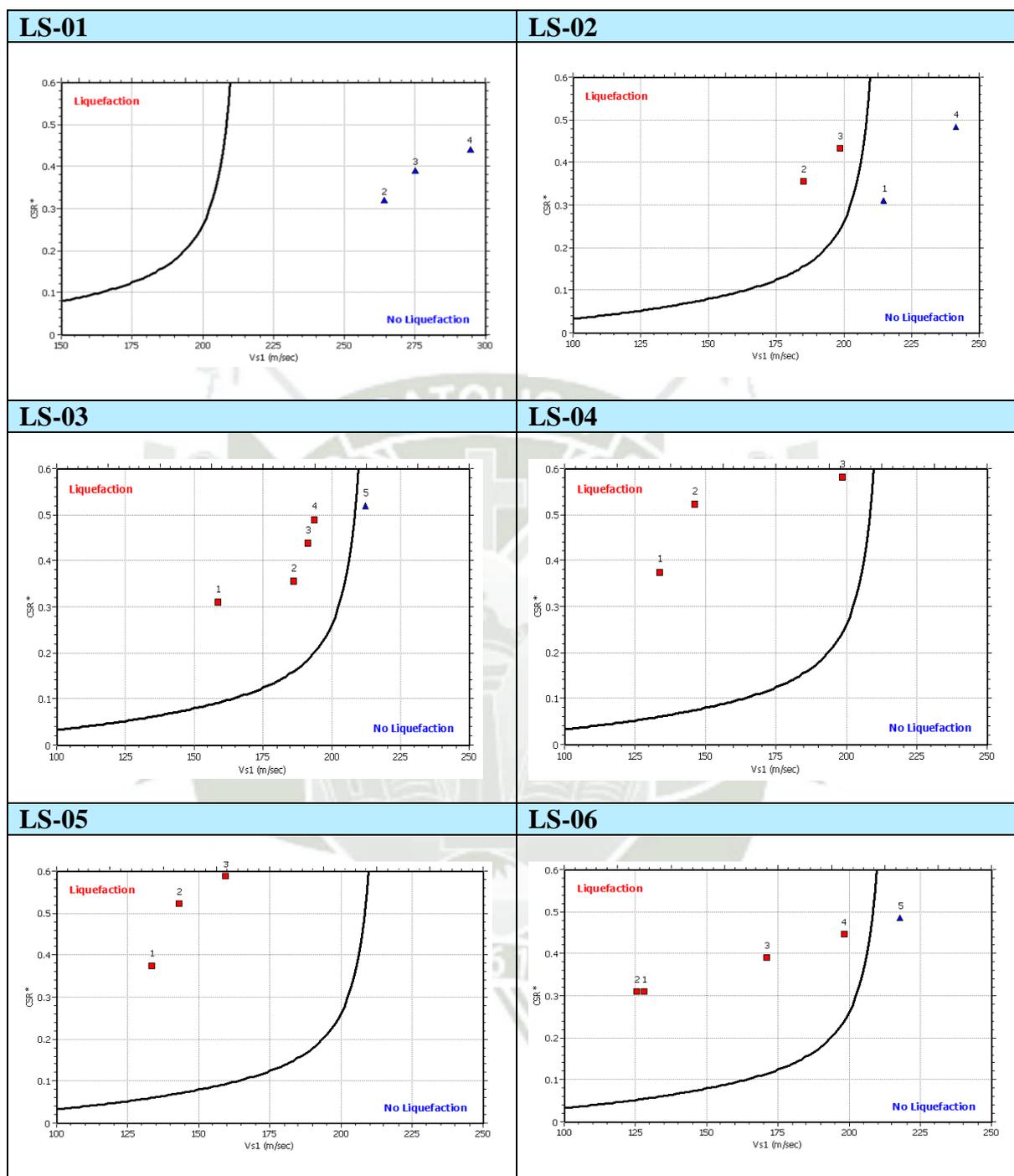


Figura 56. Escenario 3 de potencial de licuefacción de las 06 líneas sísmicas realizadas en el P.T El Pasto.

Fuente: Elaboración propia.

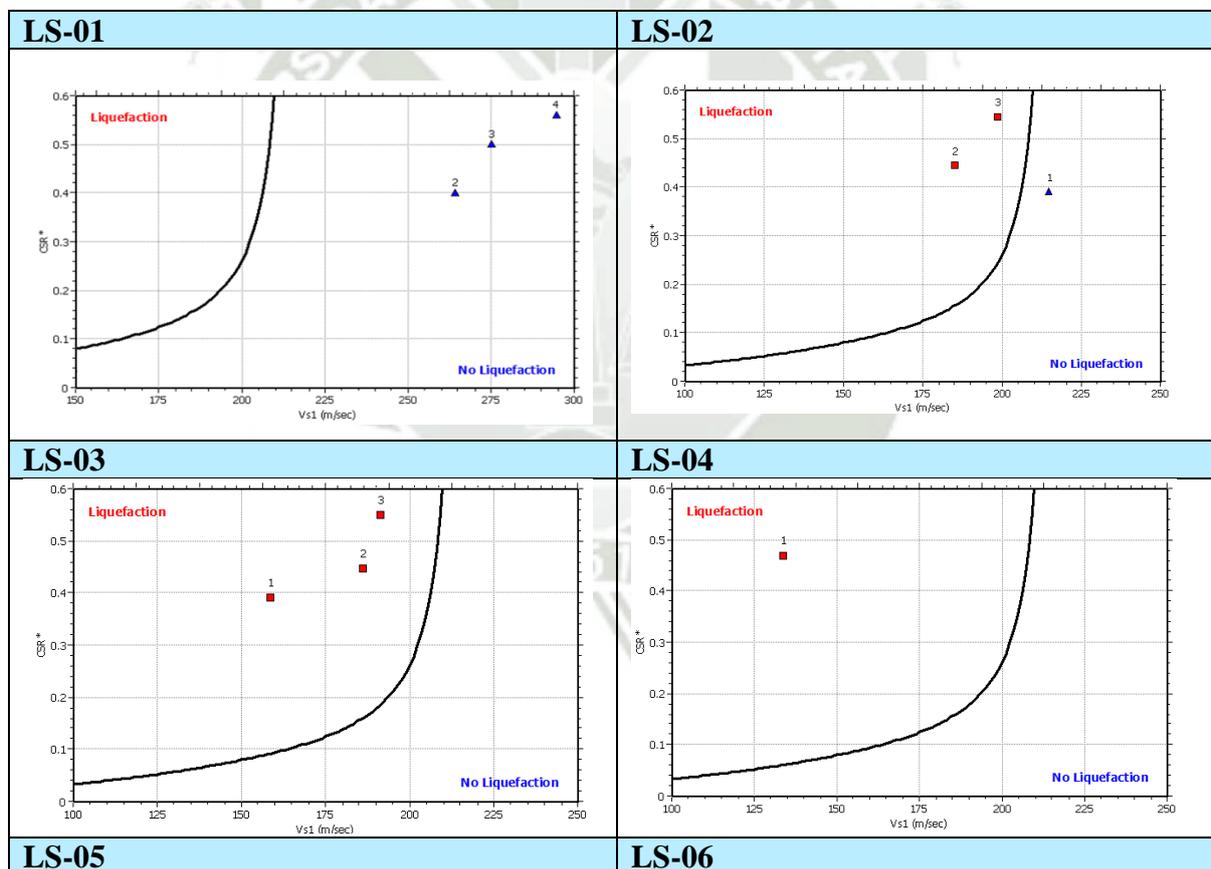
En la figura 54, se observa que las zonas con mayor potencial de licuefacción se dan en las líneas sísmicas LS-02, LS-03, LS-04, LS-05 y LS-06. La profundidad mínima de licuefacción es hasta los 3.71 m de profundidad correspondiente a las líneas LS-02 y LS-04

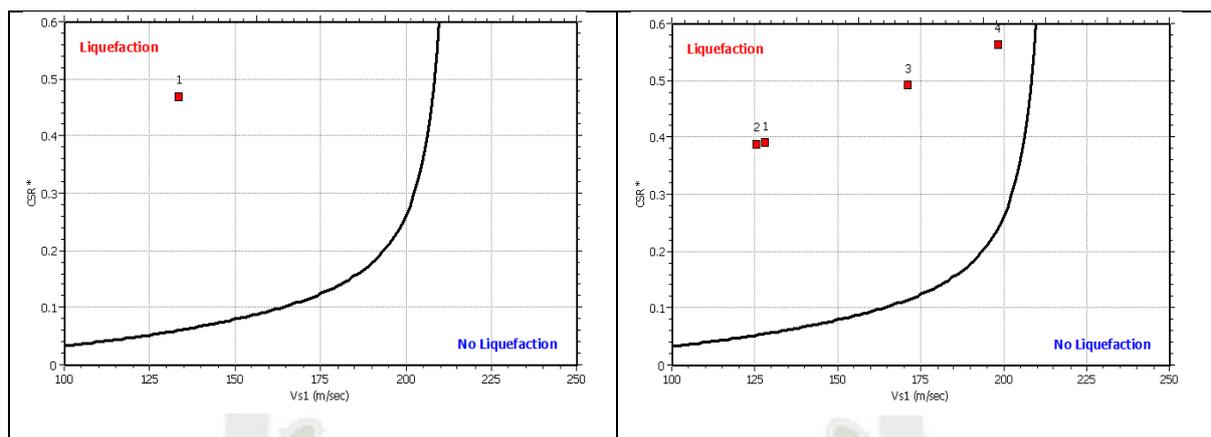
cuyos valores  $V_s$  son de 198.44 y 198.30 m/s y un factor de seguridad de 0.56 y 0.40 respectivamente. La profundidad máxima de licuefacción es hasta los 7.01 m de profundidad correspondiente a la línea LS-05, con un valor  $V_s$  de 204.13 m/s y un factor de seguridad de 0.34. La línea LS-01 presenta un factor de seguridad superior a 1 y los valores de velocidad de ondas de corte  $V_s$  son superiores a los 250 m/s relacionados a suelos duros según norma E-030.

- **Escenario 4**

Para el escenario 4, se consideró un sismo de magnitud 8.4, aceleración del suelo 0.45g.

Usando el software LiqIT se obtuvieron los siguientes resultados:





**Figura 57.** Escenario 4 de potencial de licuefacción de las 06 líneas sísmicas realizadas en el P.T El Pasto.

*Fuente: Elaboración propia.*

En la figura 57, se observa que las zonas con mayor potencial de licuefacción se dan en las líneas sísmicas LS-02, LS-03, LS-04, LS-05 y LS-06. La profundidad mínima de licuefacción es hasta los 3.71 m de profundidad correspondiente a las líneas LS-02 y LS-04 cuyos valores  $V_s$  son de 198.44 y 198.30 m/s y un factor de seguridad de 0.44 y 0.33 respectivamente. La profundidad máxima de licuefacción es hasta los 7.01 m de profundidad correspondiente a la línea LS-05, con un valor  $V_s$  de 204.13 m/s y un factor de seguridad de 0.43. La línea LS-01 presenta un factor de seguridad superior a 1 y los valores de velocidad de ondas de corte  $V_s$  son superiores a los 250 m/s relacionados a suelos duros según norma E-030.

### 5.5.2 Resultados

Usando el software LiqIT, en la tabla 29 se muestran los valores del índice de potencial de licuefacción  $I_L$ , según Iwasaki et al. (1978) para los 04 escenarios propuestos ante eventos sísmicos de diferente magnitud:

Tabla 29. Resultados del Índice de potencial de Licuefacción

Línea sísmica	Índice de potencial de Licuefacción $I_L$			
	Escenario1 7.8 Mv	Escenario 2 7.9 Mv	Escenario 3 8.3 Mv	Escenario 4 8.4 Mv
LS-01	0	0	0	0
LS-02	0	1.80	11.22	13.49
LS-03	2.92	10.62	26.64	30.19
LS-04	13.36	17.27	24.56	26.18
LS-05	24.25	28.39	41.09	44.00
LS-06	15.54	19.09	30.9	33.58

Fuente: Elaboración propia.

Según la metodología propuesta por Iwasaki et al. (1978) se tiene:

- $I_L = 0$  , indica zona de licuefacción muy baja
- $I_L >5$ , indica licuefacción no probable o zona de licuefacción baja
- $I_L$  entre 5 – 15, indica licuefacción probable o zona de licuefacción alta
- $I_L >15$ , indica licuefacción muy alta

En consecuencia, sobre la línea LS-01 el potencial de licuefacción en dicha zona, para los 04 escenarios propuestos, se clasifica como **Muy baja**. Dicha clasificación abarca la parte Nor-Oeste del P.T. El Pasto, entre el Pje. Muñoz y la Av. Las Peñas.

Sobre la línea LS-02, el potencial de licuefacción para un sismo de 7.8 Mv (escenario 1), se clasifica como **Muy Baja**. Para un sismo de 7.9 Mv (escenario 2) se clasifica como **Baja**, y para sismos de 8.3 y 8.4 Mv (escenarios 3 y 4) el potencial de licuefacción se clasifica como **Alta**. Esta clasificación se encuentra hacia el Este del P.T el Pasto sobre propiedades de terceros entre la Av. Sucre y la Calle Los Ángeles.

Sobre la línea LS-03, el potencial de licuefacción para un sismo de 7.8 Mv (escenario 1), se clasifica como **Baja**. Para un sismo de 7.9 Mv (escenario 2) se clasifica como **Alta**, y para sismos de 8.3 y 8.4 Mv (escenarios 3 y 4) el potencial de licuefacción se clasifica como **Muy**

**Alta.** Esta clasificación se encuentra hacia el Sur-Este del P.T el Pasto sobre terreno agrícola entre la Av. Sucre y el Psj. Recabarren.

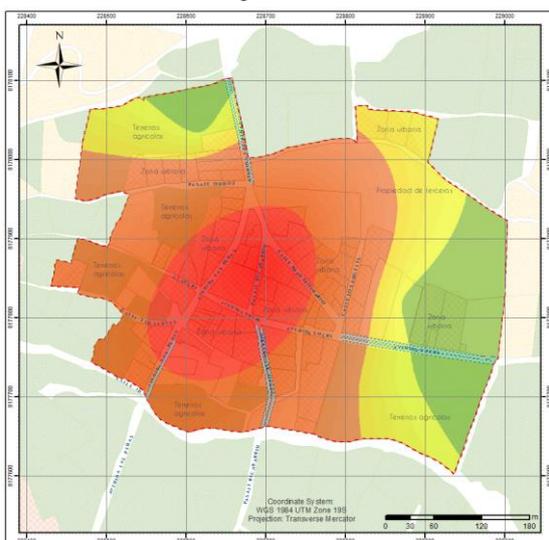
Sobre la línea LS-04, el potencial de licuefacción para un sismo de 7.8 Mv (escenario 1), se clasifica como **Alta**, y para sismos de 7.9, 8.3 y 8.4 Mv (escenarios 2, 3 y 4) el potencial de licuefacción se clasifica como **Muy Alta**. Esta clasificación se encuentra al margen derecho de la Av. Las Peñas y la Calle Juan Seminario que corresponde a propiedad de terceros.

Sobre la línea LS-05 el potencial de licuefacción en dicha zona, para los 04 escenarios propuestos, se clasifica como **Muy Alta**. Dicha clasificación se encuentra en el centro del P.T El Pasto entre la Av. Sucre, la Av. Las Peñas y la Calle Juan Seminario.

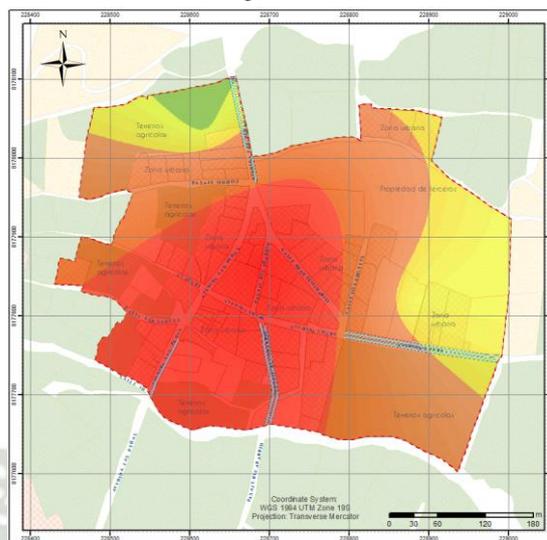
Finalmente, sobre la línea 6 el potencial de licuefacción en dicha zona, para los 04 escenarios propuestos, se clasifica como **Muy Alta**. Dicha clasificación abarca la parte Oeste y Sur Oeste del P.T. El Pasto, al margen izquierdo de la Av. Las peñas.

En la siguiente figura se muestra el potencial de licuefacción para los 04 escenarios propuestos de 7.8, 7.9, 8.3 y 8.4 de magnitud sísmica (Mv).

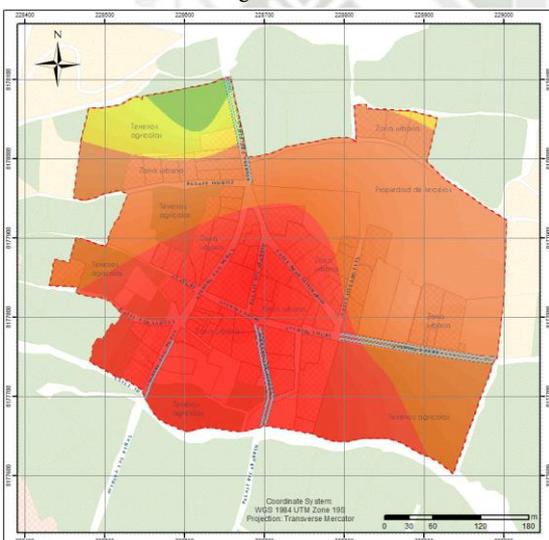
Escenario 1: Magnitud sísmica  $M_w = 7.8$



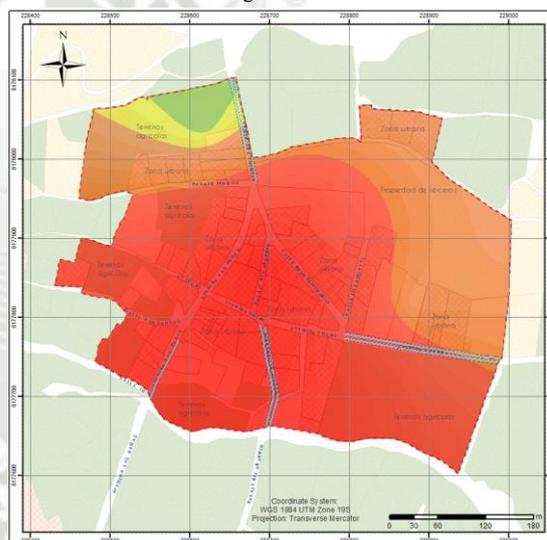
Escenario 2: Magnitud sísmica  $M_w = 7.9$



Escenario 3: Magnitud sísmica  $M_w = 8.3$



Escenario 4: Magnitud sísmica  $M_w = 8.4$



**Índice de Potencial de licuefacción**

- IL = 0.00 - Muy Baja
- IL < 5.00 - Baja
- IL 5.00 - 15.00 - Alta
- IL > 15.00 - Muy Alta

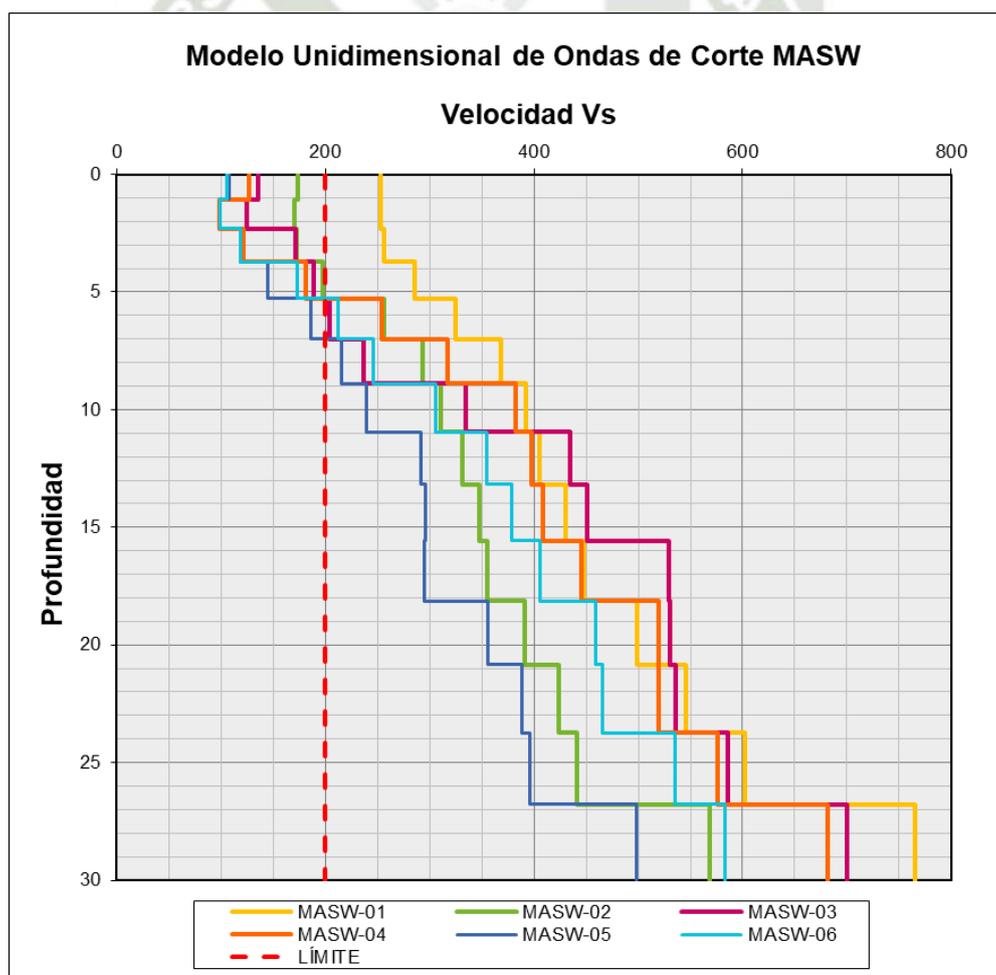
**Figura 58.** Mapa del Potencial de Licuefacción en el C.P El Pasto.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.5.3 Propagación de ondas de corte $V_s$ en suelos potencialmente licuables

Los ensayos MASW realizados fueron superpuestos donde se evidencia las probables zonas licuables analizando el conocimiento de las velocidades de propagación de las ondas de corte en estos sectores.

De acuerdo a la descripción de norma E-030, los suelos son tipificados en gran parte como tipo S2, sin embargo, los sectores en los cuales se desarrollaron los ensayos MASW presentados en la tabla son potencialmente licuables hasta una profundidad promedio de 5m. El fenómeno de la licuación ocurre para velocidades de ondas de corte  $V_s < 200$  m/s, tal como se muestra en la figura 59. Siempre y cuando se den las condiciones tales como el nivel freático alto, suelos granulares con cierto porcentaje de finos y la acción sísmica.



**Figura 59.** Suelos potencialmente licuables para  $V_s < 200$  m/s.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de la evaluación del potencial de licuefacción usando datos de velocidad de ondas de corte  $V_s$  obtenidos por el método geofísico MASW (método indirecto), no debe reemplazar a los resultados obtenidos por métodos directos como son los SPT y calicatas, por el contrario; deben ser considerados como información adicional que permita corroborar con mayor precisión zonas probables a licuefacción. Para resultados más exactos es necesario realizar estudios de tomografía eléctrica que permitan conocer la resistividad del suelo asociado a la presencia de capas superficiales con mayor o menor contenido de agua.

### 5.6 Clasificación $V_s$ 30

De acuerdo con Huanca & Flores (2019), “Se clasificó el tipo de suelo conforme a la NTE E-030 y se calculó el periodo fundamental de vibración del suelo ( $T_s$ ), tener en cuenta que este valor es referencial”.

Según el Código International Building Code (2009) el periodo fundamental de vibración del suelo ( $T_s$ ) es:

$$T_s = \frac{4H}{V_{S30}} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

$H$  = La potencia del estrato para nosotros 30 m.

$V_{s30}$  = El valor de la onda de corte  $V_s$  promedio.

De acuerdo a la Norma Técnica Peruana Sismorresistente E.030 (2016), el tipo de suelo es S2 correspondiente a suelos intermedios, con una velocidad de propagación de ondas de corte en los treinta metros superficiales ( $V_{s30}$ ) variante desde 239 a 416 m/s (Figura 60) y un periodo de vibración del suelo ( $T_s$ ) que va desde 0.29 a 0.50, teniendo un promedio de  $T_s=0.39$ , siendo valores estimados que deberán ser contrastados con el método de relación espectral H/V (Método de Nakamura).

Tabla 30. Velocidad de onda de corte Vs 30 y periodos fundamentales Ts

LÍNEA	ENSAYO	Vs 30 (m/s)	Ts	TIPO DE SUELO SEGÚN IBC	TIPO DE SUELO SEGÚN E-030
LS01-PTEP	MASW 01	415.83	0.29	Suelo muy denso y roca blanda	Suelos intermedios
LS02-PTEP	MASW 02	312.90	0.38	Suelo rígido	Suelos intermedios
LS03-PTEP	MASW 03	326.37	0.37	Suelo rígido	Suelos intermedios
LS04-PTEP	MASW 04	309.30	0.39	Suelo rígido	Suelos intermedios
LS05-PTEP	MASW 05	239.03	0.50	Suelo rígido	Suelos Intermedios
LS06-PTEP	MASW 06	278.70	0.43	Suelo rígido	Suelos intermedios

Fuente: Elaboración propia

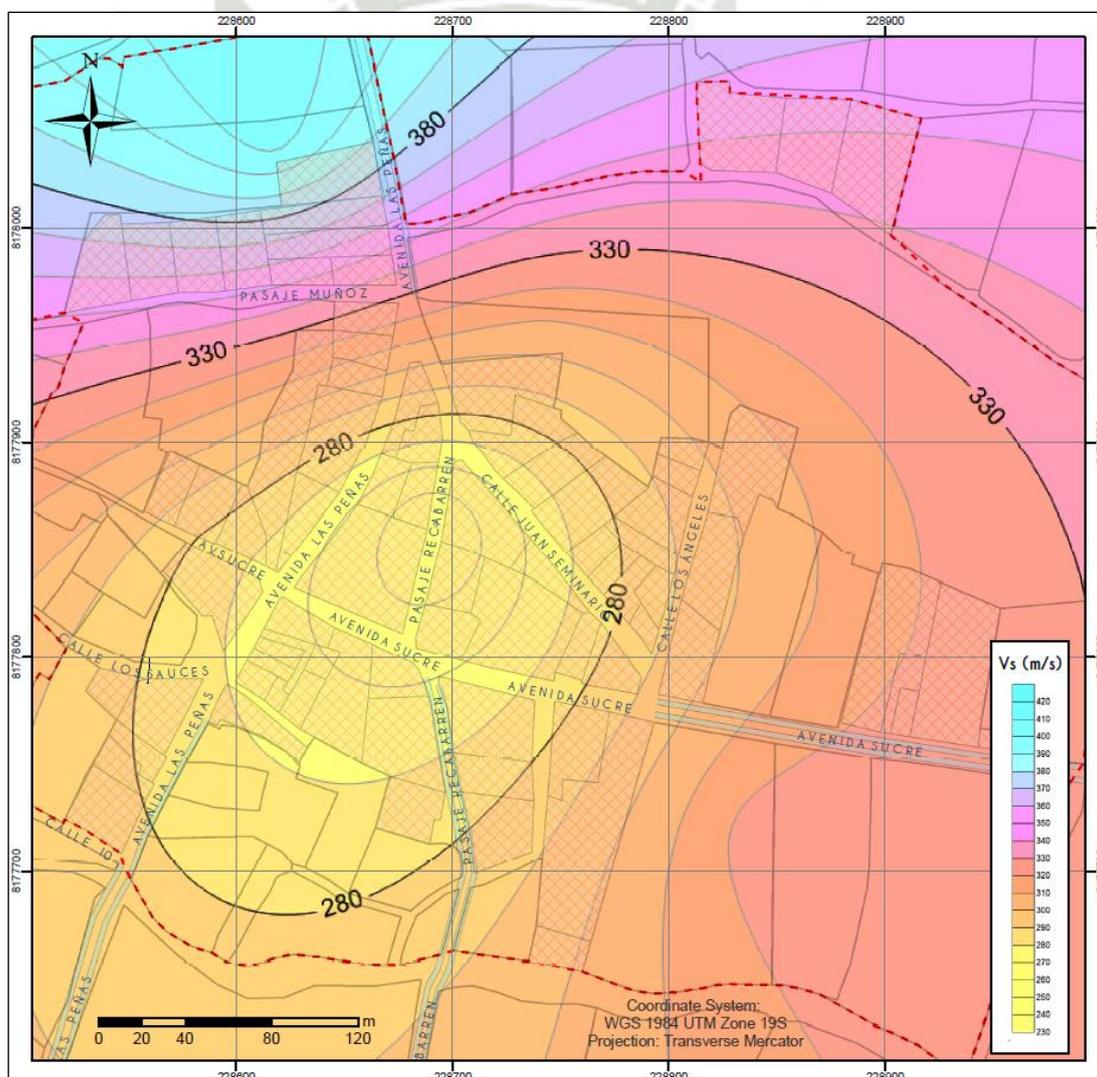


Figura 60. Mapa de isovelocidades de ondas de corte Vs30.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.7 Sismología

### 5.7.1 Factor Z

Según se indica en la norma E.030 Diseño Sismo resistente del Reglamento Nacional de Edificaciones, para el caso de estudio, la zona es correspondiente a 3 y un factor Z de 0.35.

### 5.7.2 Condiciones geotécnicas

De acuerdo a las condiciones del suelo encontrado, el perfil de suelo corresponde al tipo: “c. Perfil Tipo S2: Suelos intermedios”, debiendo considerar:

Vs: Velocidad promedio de las ondas de corte: 180 m/s a 500 m/s.

N60: Promedio ponderado del ensayo estándar de penetración: 15 a 50.

Su: Promedio ponderado de la resistencia al corte en condición no drenada: 50 kPa a 100 kPa.

### 5.7.3 Parámetros de sitio

Los parámetros de sitio se pueden considerar:

Factor de suelo “S”: 1.15.

Periodo TP: 0.60 s.

Periodo TL: 2 s.

### 5.7.4 Factor de seguridad frente a una falla por corte

Según lo indica la norma E.050 el RNE, los factores de seguridad mínimos son los siguientes:

a) Para cargas estáticas: 3.0.

b) Para sollicitación máxima de sismo o viento (la que sea más desfavorable): 2.5.

## 5.8 Estimación de la capacidad de carga

### 5.8.1 Factor de seguridad frente a una falla por corte

Según lo indica la norma E.050 el RNE, los factores de seguridad mínimos son los siguientes:

a) Para cargas estáticas: 3.0.

b) Para sollicitación máxima de sismo o viento (la que sea más desfavorable): 2.5.

### 5.8.2 Capacidad de carga del suelo

La capacidad de carga es analizada por las ecuaciones planteadas por Terzaghi teniendo en consideración la profundidad de cimentación, forma de cimentación, tipo de suelo y tipo de aplicación de carga. Para el caso de zapatas cuadradas, para suelos densos con cohesión y fricción, la capacidad de carga se define como:

$$q_D = 1.2CN_c + \gamma D_f + 0.4\gamma BN_\gamma \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde:

$q_D$  es la capacidad de carga o presión última o de falla por corte del suelo.

$C$  es la cohesión del suelo.

$\gamma$  es el peso específico aparente o natural del suelo.

$B$  es la base de la cimentación

$D_f$  es la profundidad o cota de cimentación.

$N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  son factores de carga que quedan definidos como:

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan (1.4 \phi) \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde  $\phi$  es el ángulo de fricción interna del suelo.

Según los autores Naranjo Aguay & Tatiana, (2012) existe una correlación entre la cohesión, ángulo de fricción y la velocidad de ondas:

Ángulo de fricción interna  $\phi$ :

$$\phi = \frac{9.17}{\sqrt{\frac{V_p}{V_s} - 1.41}} + 16 \quad (\text{Ecuación 22})$$

### 5.8.3 Capacidad de carga admisible del suelo

La capacidad de carga admisible ( $q_{adm}$ ) se define como:

$$q_{adm} = \frac{q_d}{F} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde F es el factor de seguridad al corte igual a 3 según norma E.050 del RNE.

### 5.8.4 Determinación de la capacidad de carga admisible del suelo

Para las condiciones indicadas en los puntos anteriores, se “estima” la capacidad admisible de carga del suelo para una cimentación superficial analizando el caso de una losa y de cimentación simétrica considerando un ancho de B y emplazada entre 0.4 y 0.8 m de profundidad, considerando el nivel freático promedio del área de estudio en 1.80 m, encontrándose el nivel más superficial de aguas a 0.80 m. La determinación del ángulo fricción y cohesión es aproximado. La siguiente tabla resume los cálculos realizados.

**Tabla 31. Estimación de carga admisible del suelo para B=0.4 m  $D_f=0.7$**

LÍNEA	Velocidad Capa $V_s$ (m/s)	Velocidad Capa $V_s$ (m/s)	Densidad $\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )*	$D_f$ (m)	B (m)	$q_{adm}$ (kg/m <sup>2</sup> )
LS01-PTEP	252.8	610.41	1811.77	0.7	0.4	0.94
LS02-PTEP	170.54	444.17	1781.14	0.7	0.4	0.83
LS03-PTEP	124.4	341.09	1764.57	0.7	0.4	0.77
LS04-PTEP	98.89	412.87	1755.34	0.7	0.4	0.52
LS05-PTEP	98.84	397.25	1756.01	0.7	0.4	0.53
LS06-PTEP	99.07	390.59	1755.41	0.7	0.4	0.54

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 32. Estimación de carga admisible del suelo para B=1.0 m  $D_f=0.7$**

LÍNEA	Velocidad Capa $V_s$ (m/s)	Velocidad Capa $V_s$ (m/s)	Densidad $\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )*	$D_f$ (m)	B (m)	$q_{adm}$ (kg/m <sup>2</sup> )
LS01-PTEP	252.8	610.41	1811.77	0.7	1	1.04
LS02-PTEP	170.54	444.17	1781.14	0.7	1	0.92
LS03-PTEP	124.4	341.09	1764.57	0.7	1	0.85
LS04-PTEP	98.89	412.87	1755.34	0.7	1	0.57
LS05-PTEP	98.84	397.25	1756.01	0.7	1	0.59
LS06-PTEP	99.07	390.59	1755.41	0.7	1	0.60

Fuente: Elaboración propia

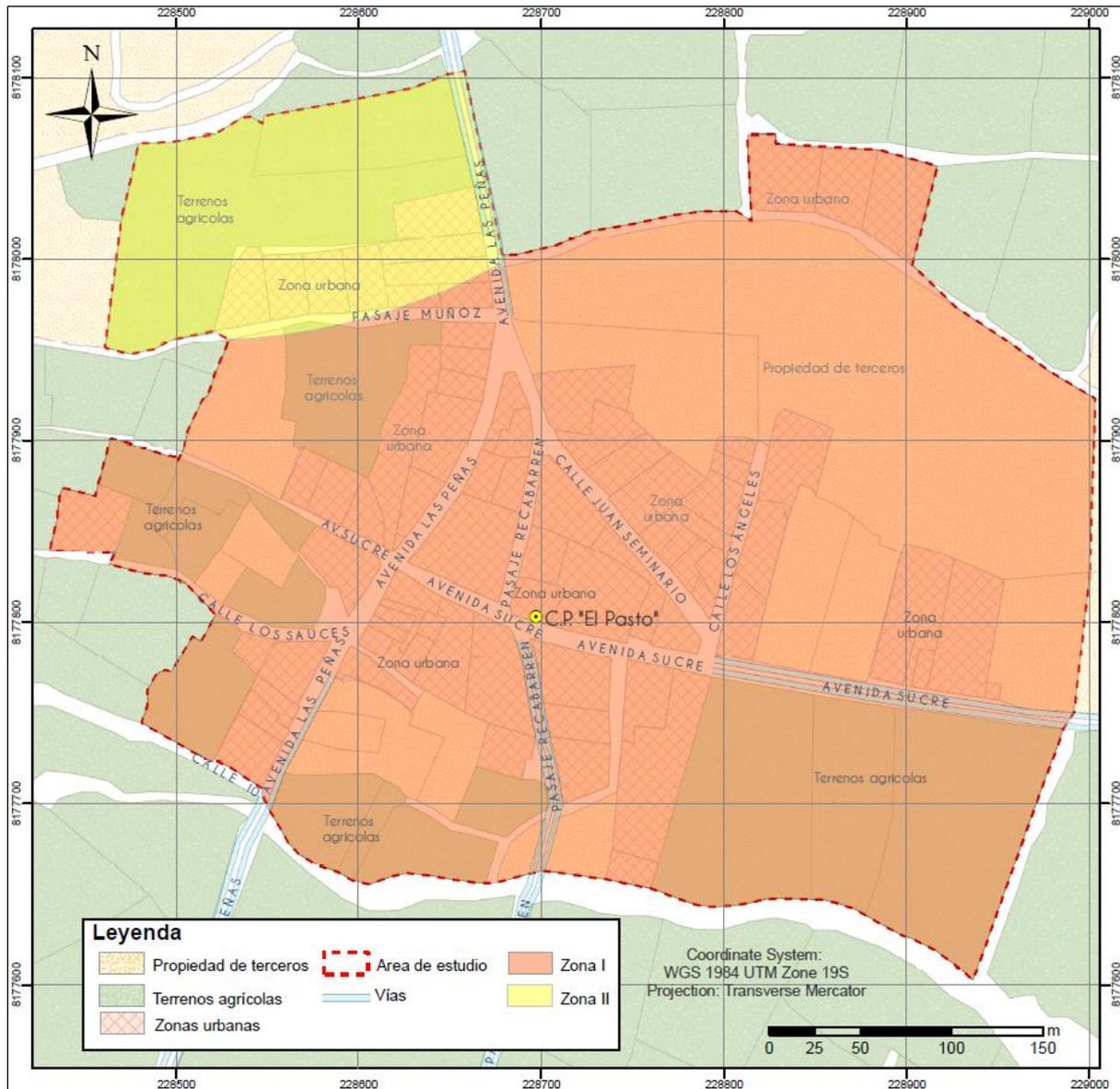
De acuerdo al capítulo 3 ítem 3.6, según el autor Málaga et ál. (2002), el centro Poblado el Pasto se extiende principalmente por la unidad geotécnica material Paludial (M-p), presentando valores de capacidad portante menores de  $1.00 \text{ kg/cm}^2$ . Los resultados obtenidos muestran conformidad con lo mencionado ya que los valores de carga admisible del suelo son menores a  $1.00 \text{ kg/cm}^2$  considerando un ancho de 0.4 m, emplazada a una profundidad de 0.7 m.

## 5.9 Zonificación Sísmica

Las características dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismoresistente (Norma E030), la existencia de 2 zonas que se muestran en la figura 61, cuyas características son las siguientes:

**ZONA I:** Conformada, en su mayor parte, por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentra en estado suelto hasta 5 m de profundidad con velocidades menores a 180 m/s. Subyaciendo a estos estratos se tiene una capa de suelos intermedios (S2) con valores de velocidades entre 180 y 500 m/s y una última capa de suelos rígidos (S1) con valores de velocidades mayores a 500 m/s. Esta zona se extiende por el centro y Sur-Oeste del poblado donde se realizaron las líneas sísmicas 2, 3 4, 5 y 6. Según los resultados geofísicos y geotécnicos, esta zona presenta mayores probabilidades de presentar licuefacción de suelos.

**ZONA II:** Incluye el área conformada por estratos superficiales de suelos granulares finos y arcillosos hasta una profundidad de 21 m con velocidades de ondas de corte Vs que varían entre los 200 y 500 m/s sin presencia de suelos blandos. Esta zona se extiende por la parte Nor-Oeste del centro donde se realizó la línea sísmica LS-01.



**Figura 61.** Mapa de zonificación sísmica del C.P. "El Pasto".

Fuente: Elaboración propia.



**CAPÍTULO VI**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio del comportamiento dinámico de los suelos para el Pueblo Tradicional El Pasto, del distrito de Socabaya, del Departamento de Arequipa, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

### 6.1 Conclusiones

1. En el estudio de la caracterización dinámica del subsuelo en el Pueblo Tradicional “El Pasto”, se acepta la utilización y aplicación de métodos geofísicos de Refracción Sísmica (RF) y Análisis multicanal de Ondas superficiales (MASW) como métodos indirectos y no destructivos capaces de analizar las propiedades físicas del subsuelo a mayor profundidad de investigación y con mayor resolución de los estratos que lo componen, haciendo posible la correlación de resultados con métodos geotécnicos de estudios anteriores y la identificación del tipo de suelo sobre el que yace el Pueblo Tradicional “El Pasto” bajo el criterio de la norma sismoresistente E-030 y la Norma Peruana E-050 de suelos y cimentaciones.
2. La caracterización dinámica de los suelos aplicando los métodos sísmicos en el Pueblo Tradicional “El Pasto”, ha permitido obtener valores de velocidad de ondas P (ondas primarias o longitudinales) y Ondas S (ondas de corte o Transversales) hasta aproximadamente 30 m de profundidad que permite evaluar la composición interna del subsuelo (espesor y estratigrafía) y su respuesta ante posibles eventos de carga cíclica como los sismos o terremotos. Así mismo, con los valores obtenidos de  $V_s$  y  $V_p$  se calcularon los parámetros geotécnicos correspondientes a la Densidad Estimada, Razón de Poisson ( $\nu$ ), Módulo de Corte ( $G$ ), Módulo de Young ( $E$ ) y Módulo de Bulk ( $K$ ).
3. A partir de las velocidades de ondas de corte  $V_s$  del método MASW, se han identificado la existencia de suelos formados por 3 capas de diferente composición estratigráfica y

espesores: Capa de suelo blando de 0 a 5 m de espesor, capa de suelos intermedios de 5 a 23 m de espesor y capa de suelos rígidos de 23 m hasta los 36.43m. Esta clasificación se extiende sobre toda la zona urbana del pueblo a excepción de la zona Nor-Oeste donde se realizó la línea LS-01 en el cual no se ha identificado capa de suelos blandos por tener valores  $V_s$  mayores a 200 m/s. siendo esta parte del pueblo la que está conformada por suelos más compactos que el resto de la zona de estudio.

4. Se elaboraron perfiles de velocidades de onda primarias ( $V_p$ ) del ensayo de refracción sísmica, identificado 3 capas del subsuelo hasta 20 m de profundidad. De acuerdo a la Norma internacional ASTM Designation - D5777, 1995, la primera capa del subsuelo está compuesto por suelos blandos intemperizados con valores  $V_p$  entre 88-549 m/s. La segunda capa compuesto por Gravas o arenas secas y arenas saturadas con valores  $V_p$  entre 446 y 1901 m/s, y la tercera capa compuesto por Areniscas Friables y rocas alteradas o aluvión compacto con valores  $V_p$  entre 1811 y 2330 m/s.
5. Se calcularon los parámetros geotécnicos de Densidad Estimada, Razón de Poisson, Modulo de corte, Modulo de Young y Modulo Bulk, a partir de los valores de velocidad de ondas primarias ( $V_p$ ) y ondas de corte ( $V_s$ ) obtenidos de los métodos geofísicos de Refracción Sísmica y MASW respectivamente. Se identificaron hasta 3 capas del subsuelo en las zonas donde se realizaron los estudios geofísicos.
6. La correlación de los resultados obtenidos con la geología, geomorfología y geotecnia de investigaciones anteriores, demuestran la existencia de una capa superficial de hasta 3 m de profundidad conformado por arenas limosas con contenido de suelos finos clasificado según la norma E-030 como suelos blandos.
7. En el análisis de los perfiles unidimensionales del método MASW, se ha identificado zonas con saturación de agua en la capa más superficial del subsuelo hasta 3 m de profundidad de manera que aumenta la probabilidad de licuefacción de suelos en dicha

zona frente a eventos sísmicos.

8. El tipo de suelo en base a la clasificación Vs30 de la Norma Técnica Peruana Sismoresistente E-030, se clasifica como S2 que corresponde a suelos intermedios, con una velocidad de propagación de ondas de corte que varía desde los 180 a 500 m/s en los 30 m superficiales. Según el mapa de isovelocidades de ondas de corte Vs30, la zona Nor-Oeste del P.T. El Pasto presenta suelos más compactos con valores Vs superiores al resto del centro poblado.
9. Se evaluó el potencial de licuefacción en el Pueblo Tradicional “El Pasto”, para 04 escenarios con magnitudes sísmicas de 7.8 Mv, 7.9 Mv, 8.3 Mv y 8.4 Mv, extraídos del estudio de Seminario & Pinto (2018), usando la metodología propuesta por Iwasaki (1978) para el cálculo del índice de potencial de zonas licuables ( $I_L$ ). Los resultados son los siguientes:
  - En el escenario 1, considerando un sismo de magnitud 7.8 Mv, la probabilidad de licuefacción del suelo es ALTA a MUY ALTA que abarca la zona central del poblado. El índice de potencial de licuefacción  $I_L$  tiene valores entre 15.24 - 24.25 y según la norma E-050, no está permitido cimentar directamente sobre este tipo de suelos licuables. Por otro lado, hacia el Este y Nor-Oeste del poblado, la probabilidad de que el suelo presente licuefacción es BAJA a MUY BAJA cuyos valores de índice de potencial de licuefacción  $I_L$  se encuentran entre 0 y 13.36.
  - En el escenario 2, considerando un sismo de magnitud 7.9 Mv, sobre el centro y sur del poblado, la probabilidad de licuefacción del suelo es MUY ALTA, cuyo valor de índice de potencial de licuefacción  $I_L$  varía entre 17.27 y 19.09. y hacia el Este y en la zona urbana del Nor-Oeste del poblado la probabilidad del suelo a presentar licuefacción es ALTA a BAJA con valores de  $I_L$  entre 1.8 y 10.62. En estas zonas, según la norma E-050, no está permitido cimentar directamente sobre este tipo de suelos licuables. Por otro

- lado, sobre terreno agrícola del Nor-Oeste del poblado el suelo tiene una probabilidad a presentar licuefacción de BAJA a MUY BAJA con valores de  $I_L$  que varían entre 0 y 1.80.
- En el escenario 3, considerando un sismo de magnitud 8.3 Mv, sobre el centro y sur del poblado, la probabilidad de licuefacción es MUY ALTA donde el índice de potencial de licuefacción  $I_L$  tiene valores que varían entre 26.24 y 30.9. Hacia el Este y sobre la zona urbana del Nor-Oeste del poblado la probabilidad de licuefacción es ALTA con valores de  $I_L$  de 11.22. En estas zonas de potencial de licuefacción ALTA y MUY ALTA, según la norma E-050, no está permitido cimentar directamente sobre este tipo de suelos licuables. Por otro lado, sobre terreno agrícola del Nor-Oeste del poblado el potencial de licuefacción es BAJA a MUY BAJA con valores de  $I_L$  entre 0 y 11.22.
  - En el escenario 4, considerando un sismo de magnitud 8.4 Mv, el potencial de licuefacción sobre la zona central del poblado es MUY ALTA cuyos índice de potencial de licuefacción  $I_L$  tiene valores que varían entre 30.19 a 33.58 extendiéndose hacia el Sur y Este del poblado y que de acuerdo a la norma E-050, no está permitido cimentar directamente sobre este tipo de suelos licuables. Por otro lado, en el Nor- Este del poblado la probabilidad de licuefacción del suelo es ALTA cuyo índice de potencial  $I_L$  es de 13.49 y solo en la zona Nor- Oeste del poblado, sobre zona agrícola, el potencial de licuefacción se considera de BAJA a MUY BAJA cuyo índice de potencial  $I_L$  tiene valores que se encuentran entre 0 y 13.49.
10. La zonificación sísmica-geotécnica, ha permitido identificar 2 zonas con diferentes características dinámicas, siendo la zona I la que se compone en su mayoría de suelos blandos de poco espesor con velocidades menores a 180 m/s y con posibilidades de licuefacción de suelos por la presencia de saturación de agua en la capa más superficial del subsuelo, mientras que La zona II no presenta suelos blandos debido a que sus

velocidades de ondas de corte  $V_s$  son superiores a 200 m/s.

11. En relación a los resultados obtenidos se tiene un potencial de licuación de suelos por lo que los criterios a considerar para el análisis de cimentaciones y diseño estructural se recomienda:

- Con el fin de mejorar el esfuerzo efectivo del suelo se debe considerar bombeo del agua y un sistema de drenaje subterráneo para eliminar la presencia de agua al menos a 1.50 m por debajo del nivel de la superficie del terreno, permitiendo así una mejor resistencia al corte.
- Considerando la NTE E.050 Suelos y Cimentaciones. Artículo 24 - Se deberá reemplazar con materiales seleccionados (Rellenos controlados o de ingeniería), se tiene que tener en consideración un material que permita el flujo del agua. Los rellenos con material de préstamo o rellenos estructurales permiten recibir cargas previamente diseñadas, el control de un relleno permite asegurar que el material cumpla con su contenido de humedad óptimo y que su grado de compactación obedezca a lo requerido. Los métodos empleados en su conformación, compactación y control, dependen principalmente de las propiedades físicas del material. Las cimentaciones pueden apoyarse en este tipo de relleno.
- Considerar en el diseño de cimentación una losa armada en dos direcciones conectada a los elementos de cimentación.
- Se ha estimado la capacidad de carga admisible del suelo menores a  $1.00 \text{ kg/cm}^2$ , analizando una losa de cimentación simétrica, tomando en consideración un ancho de 0.4 m y emplazada entre 0.7 de profundidad, cuyos datos deben considerarse en el diseño estructural.
- Se recomienda como valor de capacidad de carga admisible del suelo  $q_{adm}=1.00 \text{ kg/cm}^2$ , corresponde a una profundidad de 0.4 m y un ancho de cimentación de base mínima de

1.0 m. Los esfuerzos a aplicar en el terreno no deberán exceder la capacidad admisible del suelo.

- Considerando las inspecciones de campo se identifica que el suelo no presenta agresividad por lo que se recomienda uso de cemento tipo I o IP.

## 6.2 Recomendaciones

1. Realizar más exploraciones geofísicas para un mejor análisis del comportamiento dinámico de los suelos en el P.T. El Pasto.
2. Realizar más campañas de exploraciones geotécnicas y geofísicas en áreas que aún no han sido estudiadas para ser contrastados con los resultados geofísicos obtenidos en el presente estudio.
3. Realizar estudios de tomografía eléctrica o sondaje eléctrico vertical (SEV) que permitan conocer la resistividad del suelo asociado a la presencia de capas superficiales con mayor o menor contenido de agua.
4. Realizar mediante un adecuado programa de exploración de campo un nuevo análisis de licuefacción con una mayor cantidad de muestras de suelo y complementar con otros métodos geofísicos de exploración.
5. Se recomienda verificar la capacidad portante en las zonas donde presenten distintos tipos de suelo al estudio realizado.
6. Se recomienda analizar la factibilidad de establecer dentro del Reglamento nacional de construcciones Norma E.050 de suelos y cimentaciones un apartado de estudios sísmicos para la clasificación de suelos tomando en cuenta las propiedades dinámicas de los estratos que lo componen en base a la velocidad de ondas de corte, periodo fundamental y espesor del estrato.

## REFERENCIAS

- Aguilar Bardales, Z., & Alva Hurtado, J. (2002). *Microzonificación Sísmica de Arequipa*. Lima: CISMID: III Curso Internacional Microzonificación y su Aplicación en la Mitigación de Desastres. Obtenido de [http://www.jorgealvahurtado.com/files/redacis19\\_a.pdf](http://www.jorgealvahurtado.com/files/redacis19_a.pdf)
- Aguilar, B. Z. (1991). *"Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Arequipa"*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Alsulaimani, G. S. (2017). *Acquisition of active multichannel analysis of surface waves (MASW) data in karst terrain*. EE.UU.: Doctoral Dissertations.
- Andrus, R., & Stokoe, K. (2000). Liquefaction Resistance Based on Shear-Wave Velocity. *Engg. Div*, 1015-1025.
- ASTM. Designation - D5777. (1995). "Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation". *American Society for Testing and Materials*, 35.
- Bello Orta, G. (1961). *The refraction method of seismic prospecting*. Texas, USA: Electro-Technical Labs.
- Braja Das, M. (2015). *"Fundamentos de Ingeniería Geotécnica"* (Cuarta Edición ed.). México: Cengage Learning.
- Cantos Figuerola, J. (1974). *"Tratado de geofísica aplicada"* (2da ed.). Madrid-España: Sección de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Minas.
- Cantos Figuerola, J. (1987). *Tratado de Geofísica Aplicada 2da Edicion*. Madrid: Sección de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Minas.
- Cetin, K., Seed, R., Tokimatsu, K., Harder, L., Kayen, R., & Moss, R. (2004). *"Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential"*.

- Cox, M. (1999). *Static Corrections for Seismic Reflection Surveys*. Oklahoma, EE.UU.: Society of Exploration Geophysicists.
- Huanca, C., & Flores, T. R. (2019). "*Estudio geotécnico y geofísico con fines de cimentación para tres asociaciones de vivienda en la ciudad de Tacna*". Tacna: Universidad Privada de Tacna.
- IGC. (2011). *Geomaster Geofísica*. Obtenido de Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya: <https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geofisica-aplicada/Tecnicas/Sismica-activa>
- INGEMMET. (s.f.). *Instituto Geológico, minero y metalúrgico*. Recuperado el 11 de abril de 2021, de [https://portal.ingemmet.gob.pe/web/guest/funciones\\_ambiental\\_riesgo](https://portal.ingemmet.gob.pe/web/guest/funciones_ambiental_riesgo)
- Instituto Municipal de Planeamiento de Arequipa. (2016-2025). *IMPLA*. Obtenido de "Plan de Desarrollo Metropolitano de Arequipa PDM": <http://impla.gob.pe/publicaciones/pdm-2016-2025/>
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F. T., & Yasuda, S. (1978). "A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan". "*2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application*", (págs. 885-896).
- Málaga, G., Farfán, B., Rendón, D., & Núñez, M. (2002). *Proyecto de mitigación Sector Lara-Socabaya- Arequipa*. Arequipa: Sistema Nacional de Defensa Civil & Universidad Nacional de San Agustín.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (16 de Enero de 2016). NTP E.030 "Diseño Sismo resistente". *Reglamento Nacional de Edificaciones*. Lima, Perú: El Peruano.

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (3 de Diciembre de 2018). NTP E.050 “Suelos y cimentaciones”. *Reglamento Nacional de Edificaciones(5)*, 5. Lima, Perú: El Peruano.
- Municipalidad Distrital de Socabaya & Colegio de Arquitectos del Perú. (2019). *Plan Urbano Distrital 2009-2019*. Arequipa: Municipalidad de Socabaya & Colegio de Arquitectos del Perú Regional.
- Naranjo Aguay, H., & Tatiana, D. (2012). *"Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional"*. Quito-Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Núñez de Prado, S., Farfán, E., Díaz, H., & Kosaka, R. (Febrero de 2001). Geología y estratigrafía del cuaternario y zonificación geotécnica-sísmica del área urbana de Arequipa. Arequipa: CONVENIO UNSA - CEREN. Obtenido de [http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios\\_CS/Region\\_Arequipa/arequipa/arequipa\\_IIIg](http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_Arequipa/arequipa/arequipa_IIIg)
- Ólafsdóttir, E. Á. (2014). *Multichannel Analysis of Surface Waves - Methods for dispersion analysis of surface wave data*. Islandia: University of Iceland, School of engineering and natural sciences.
- Park, C. B., & Carnevale, M. (2010). Optimum MASW Survey — Revisit after a Decade of Use. *American Society of Civil Engineers*, 1303-1312.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *68th Annual International Meeting Society of Exploration Geophysicists*, 1377-1380.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *GEOPHYSICS, VOL. 64, NO.3*, 800-808.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. *The Leading Edge*, 60-64.

- Patiño, J. S. (2015). *Valoración del perfil de suelos residuales de anfígolita por ensayos de línea de refracción sísmica y MASW: caso las palmas, escuela de ingeniería de Antioquia*. Colombia: Escuela de ingeniería Antioquia.
- Pérez, E. (2005). *"Evaluación del Potencial de Licuación de suelos arenosos en la ciudad de Cartago"*. Costa Rica: "Universidad de Costa Rica".
- Praetor, M. n. (2016). *La Maquina de Von Neumann*. Obtenido de <https://vonneumannmachine.wordpress.com/tag/principio-de-fermat/>
- Rix, G., & Leipski, E. (1991). Accuracy and resolution of surface wave inversion: Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics. *Geotechnical Special Publication no. 29, American Society of Civil Engineers*, 17-23.
- Robinson, A. E., & Clark, D. (2017). *"Basic Geophysics, Society of Exploration Geophysicists"*. Tulsa, Oklahoma (USA).
- Robles, A. (2018). *Guía básica de procesamiento de datos para distintos métodos aplicados en estudios de microzonificación sísmica*. Ciudad de Mexico: Dirección de Investigación Subdirección de Riesgos Sísmicos.
- Seminario, G., & Pinto, M. (2018). *Evaluación de potencial de licuefacción de suelos en el centro poblado el Pasto, Distrito de Socabaya, Arequipa*". Arequipa: Universidad Católica Santa María.
- Shearer, P. M. (1999). Introduction to seismology. En P. M. Shearer, *Introduction to seismology* (pág. 412). New York: Cambridge University Press.
- Socabaya, M. D. (2018). *Plan Anual de Evaluación y Fiscalización Ambiental PLANEFA*. Arequipa.
- Soto, E. (2015). *Aplicación de métodos geofísicos y geotécnicos para determinar la geometría en 3D del basamento rocoso y la caracterización de sitio en la ciudad de Huarmey-Ancash*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

- Strobbia, C. (2003). *Surface Wave Methods Acquisition, processing and inversion*. Italia: Polotecnico di Torino.
- Taipodia, J., Baglari, D., & Dey, S. B. (2015). Dispersion Analysis using active MASW survey data. *50th indian Geotechnical conference*, (pág. 3). India.
- Terford, W. M., & al., e. (2001). *"Applied Geophysics"*. New York, USA: Cambridge University Press.
- TerraDaT. (2017). *MASW (análisis de ondas superficiales)*. Obtenido de Terra Dat Geophysical innovation: <http://terradat.es/survey-methods/masw/>
- Tokimatsu, K. (1997). Geotechnical site characterization using surface waves. *International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (1 ; Tokyo 1995-11-14)*, (págs. 1333-1368). Netherlands.
- Xia, J., Miller, R. D., & Park, C. B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *GEOPHYSICS, VOL. 64, NO.3*, 691-700.
- Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., & Ivanov, J. (2000). Construction of 2-D vertical shear-wave velocity field by the multichannel analysis of surface waves technique. *Proceeding of the Symposium of the Application of Geophysics to Engineering Environmental Problems (SAGEEP 2000) Arlington, VA.*, 1197-1206.
- Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., & Tian, G. (2003). Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes. *Journal of Applied Geophysics*, 45-47.
- Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., Hunter, J. A., Harris, J. B., & Ivanov, J. (2002). Comparing shear-wave velocity profiles from multichannel analysis of surface wave with borehole measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 181-190.
- Yanqui, C. (1990). *"Geología Preliminar de la Ciudad de Arequipa"*. Lima: Informe Técnico presentado al CISMID, FIC, UNI.



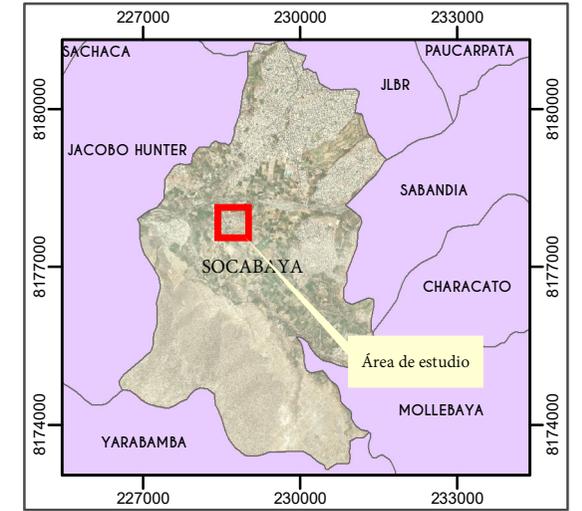
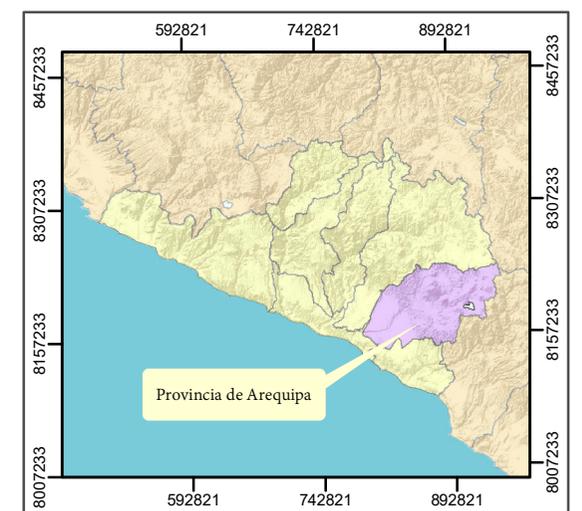
## ANEXOS

---



## **Anexo 1: Mapa de ubicación**

---



**LEYENDA**

- Area de estudio
- Centro Poblado El Pasto
- Propiedad de terceros
- Terrenos agrícolas
- Zonas urbanas
- Vias

Coordinate System:  
WGS 1984 UTM Zone 19S  
Projection: Transverse Mercator

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA  
FACULTAD DE ARQUITECTURA E  
INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:  
"CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA  
APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P.EL PASTO,  
DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA"

PLANO:  
**MAPA DE UBICACIÓN**

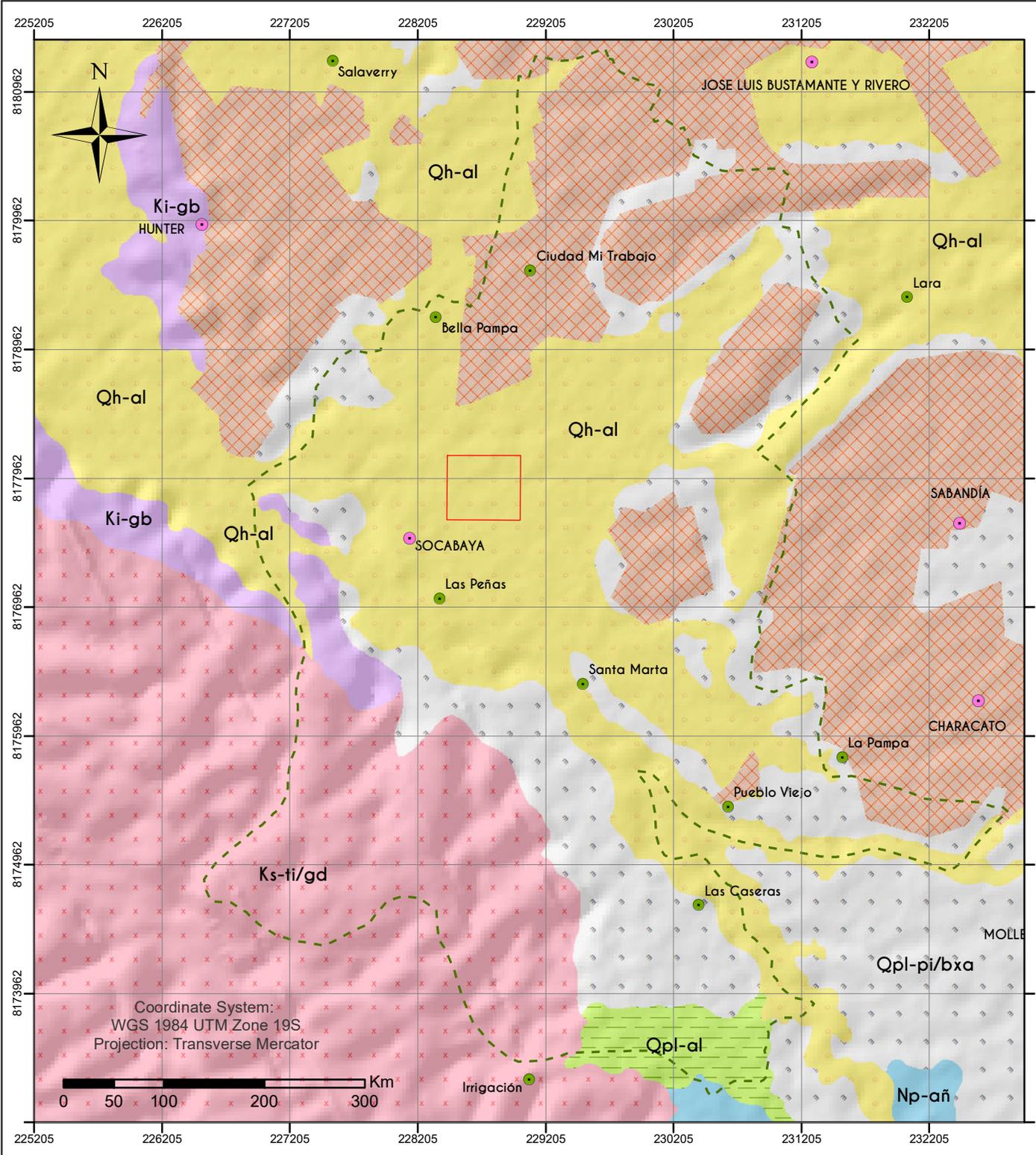
ELABORADO POR: SHEYLA VIVEROS AGRAMONTE  
ESCALA: 1:3,000      DATUM: DWGS84

Lámina N°:  
**01**



## **Anexo 2:** **Mapa geológico**

---



**SIMBOLOGÍA**



**LEYENDA**

ERATERMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	DESCRIPCION
CENOZOICA	CUATERNARIO	HOLOCENA	Depósitos aluviales Qh-al	Bloques, gravas y arenas
		PLEISTOCENA	Depósito de avalancha del Pichu-Pichu Qpl-pi/bxa	Bloques, arenas y cenizas
	NEÓGENO	PLIOCENA	Conglomerado aluvial pleistoceno Qpl-al	Arenas, gravas
			Fm. Añashuayco Np-añ	Tobas soldadas y no soldadas
MESOZOICA	CRETÁCEO	SUPERIOR	Rocas Intrusiva: Superunidad Tiabaya Ks-ti/gd	Granodiorita. Segmento Toquepala
			Rocas Intrusivas: Rocas básicas tempranas Ki-gb	Gabrodiorita. Segmento Arequipa



**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA**  
**FACULTAD DE ARQUITECTURA E**  
**INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

---

**TESIS:**  
 “CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P.EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA”

---

<b>PLANO:</b> <b>MAPA GEOLÓGICO</b>	Lámina N°:
ELABORADO POR: SHEYLA VIVEROS AGRAMONTE	<b>02</b>
ESCALA: 1:44,000	FUENTE: INGEMET

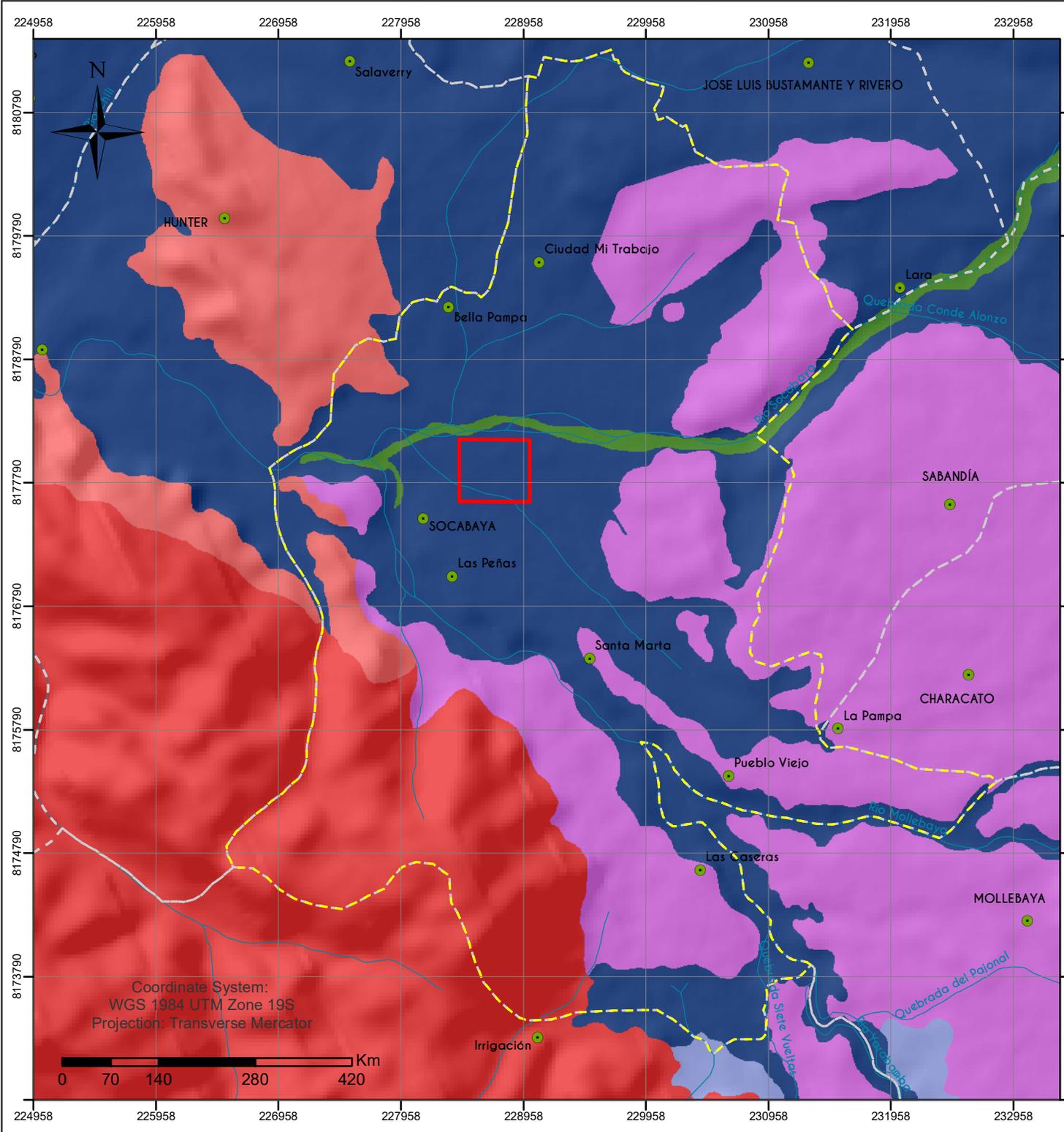
Coordinate System:  
 WGS 1984 UTM Zone 19S  
 Projection: Transverse Mercator





### **Anexo 3:** **Mapa geomorfológico**

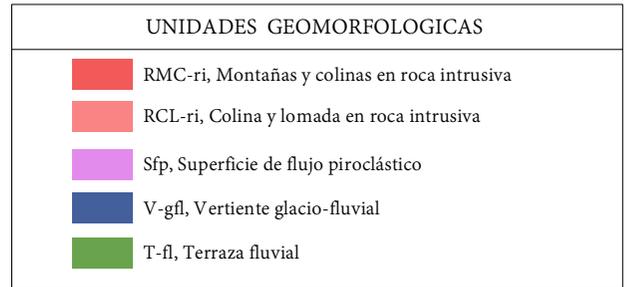
---



**SIMBOLOGÍA**



**LEYENDA**



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA  
 FACULTAD DE ARQUITECTURA E  
 INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE  
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**TESIS:**  
 “CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA  
 APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P.EL PASTO,  
 DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA”

**PLANO:**  
**MAPA GEOMORFOLÓGICO** Lámina N°:

ELABORADO POR: SHEYLA VIVEROS AGRAMONTE **03**

ESCALA: 1:45,000 FUENTE: INGEMET

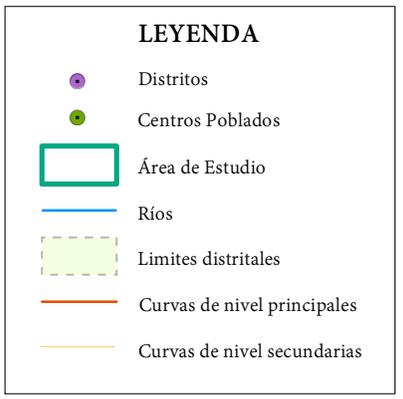
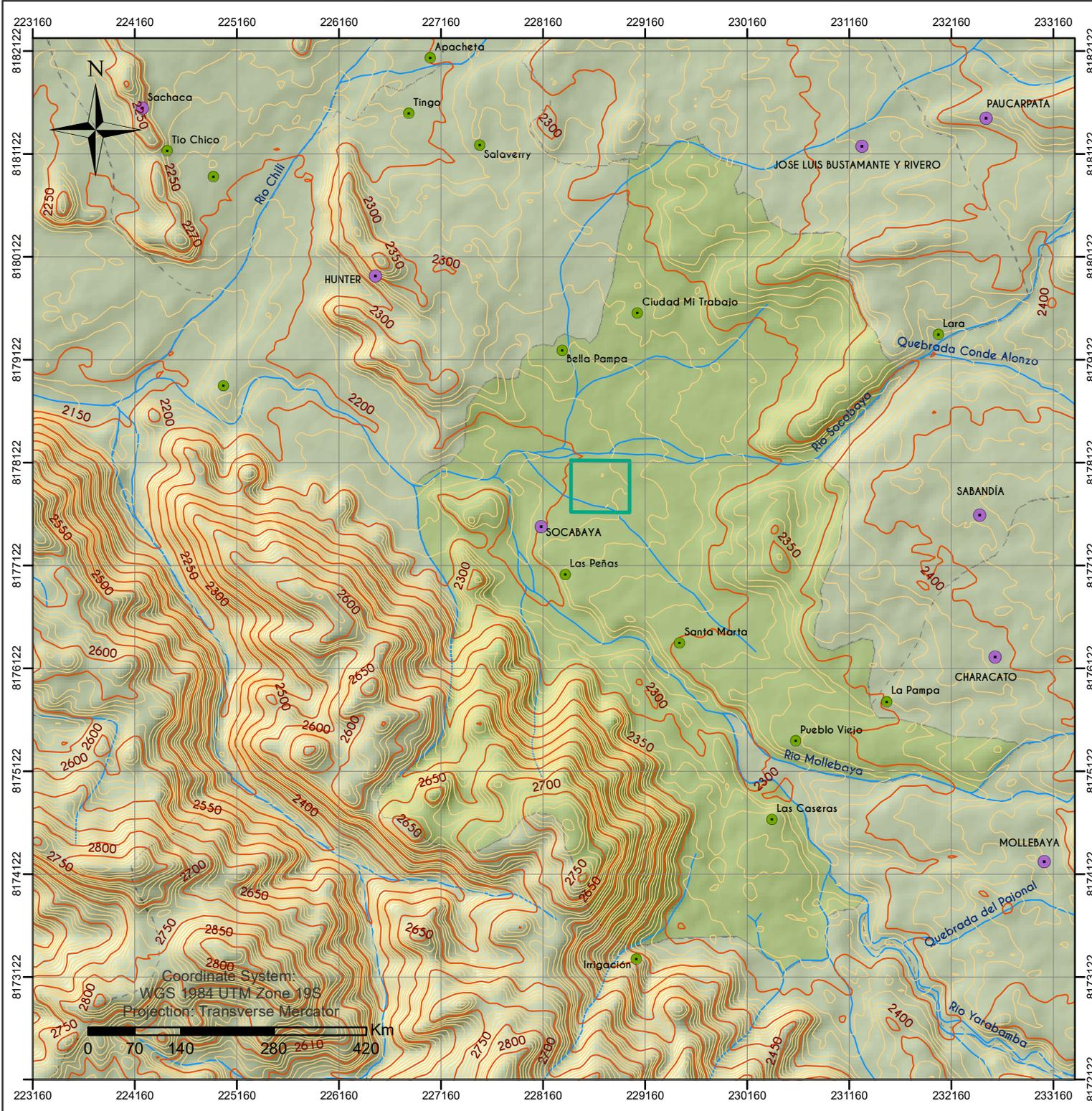
Coordinate System:  
 WGS 1984 UTM Zone 19S  
 Projection: Transverse Mercator





**Anexo 4:**  
**Mapa topográfico**

---

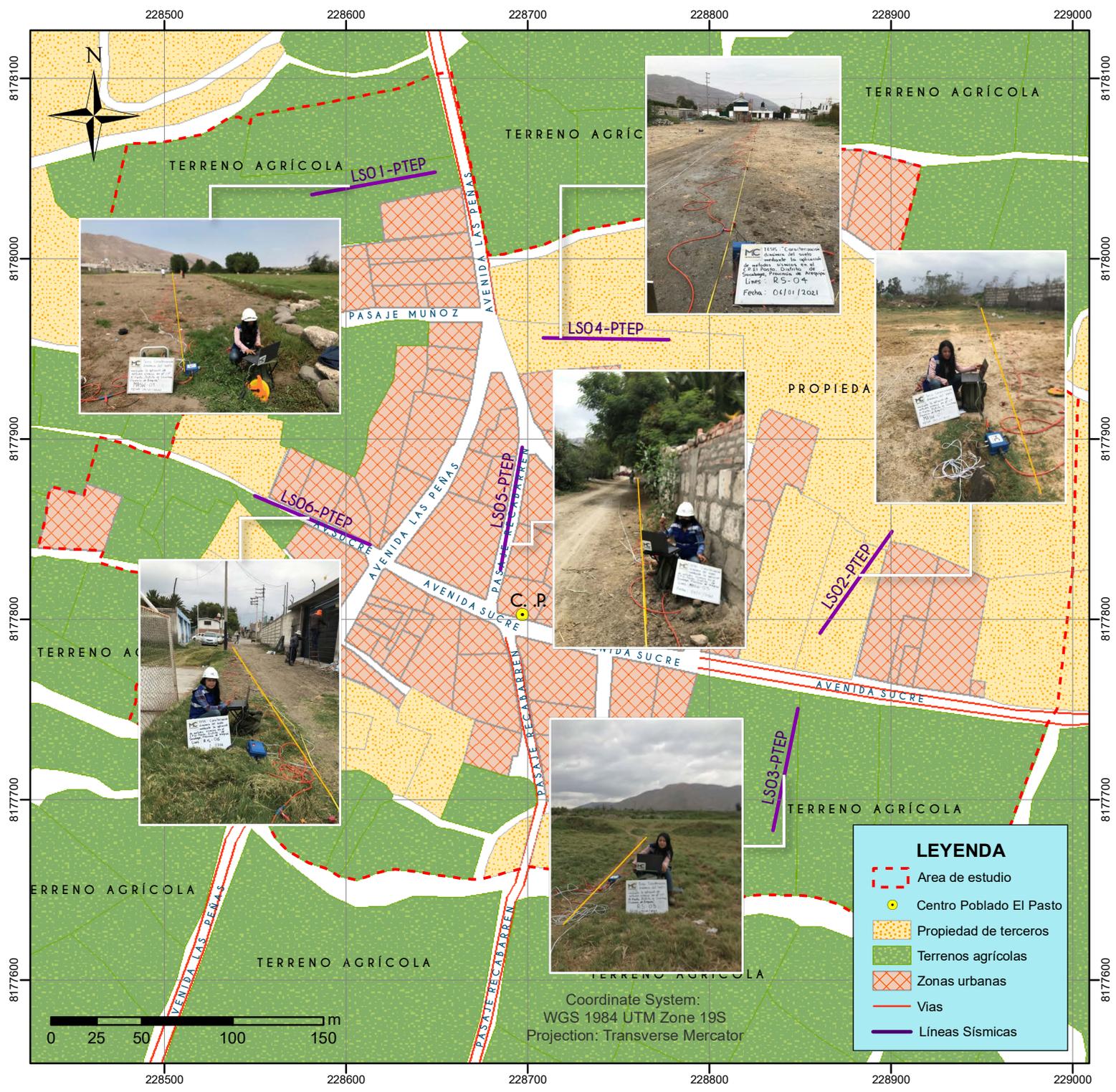


 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>	
<p>TESIS: "CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P. EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA"</p>	
<p>PLANO: <b>MAPA TOPOGRÁFICO</b></p>	<p>Lámina N°: <b>04</b></p>
<p>ELABORADO POR: SHEYLA VIVEROS AGRAMONTE</p>	<p>ESCALA: 1:53,000</p>
<p>FUENTE: ASTER GDEM</p>	



## **Anexo 5:** **Ubicación de las líneas sísmicas**

---

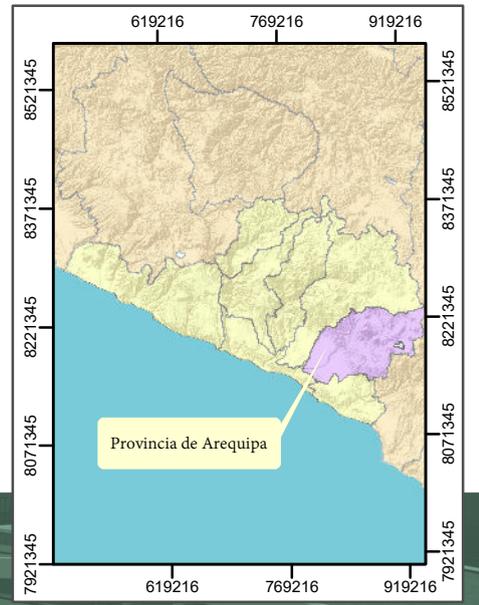


LÍNEA SÍSMICA	ORIENTACIÓN	NORTE	ESTE
LS01-PTEP	E-O	228649.00	8178048.00
LS02-PTEP	SO-NE	228860.86	8177792.23
LS03-PTEP	N-S	228848.70	8177750.53
LS04-PTEP	O-E	228708.50	8177955.98
LS05-PTEP	N-S	228696.75	8177895.52
LS06-PTEP	SE-NO	228612.99	8177841.26


**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA**  
 FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE  
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**TESIS:**  
 "CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P. EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA"

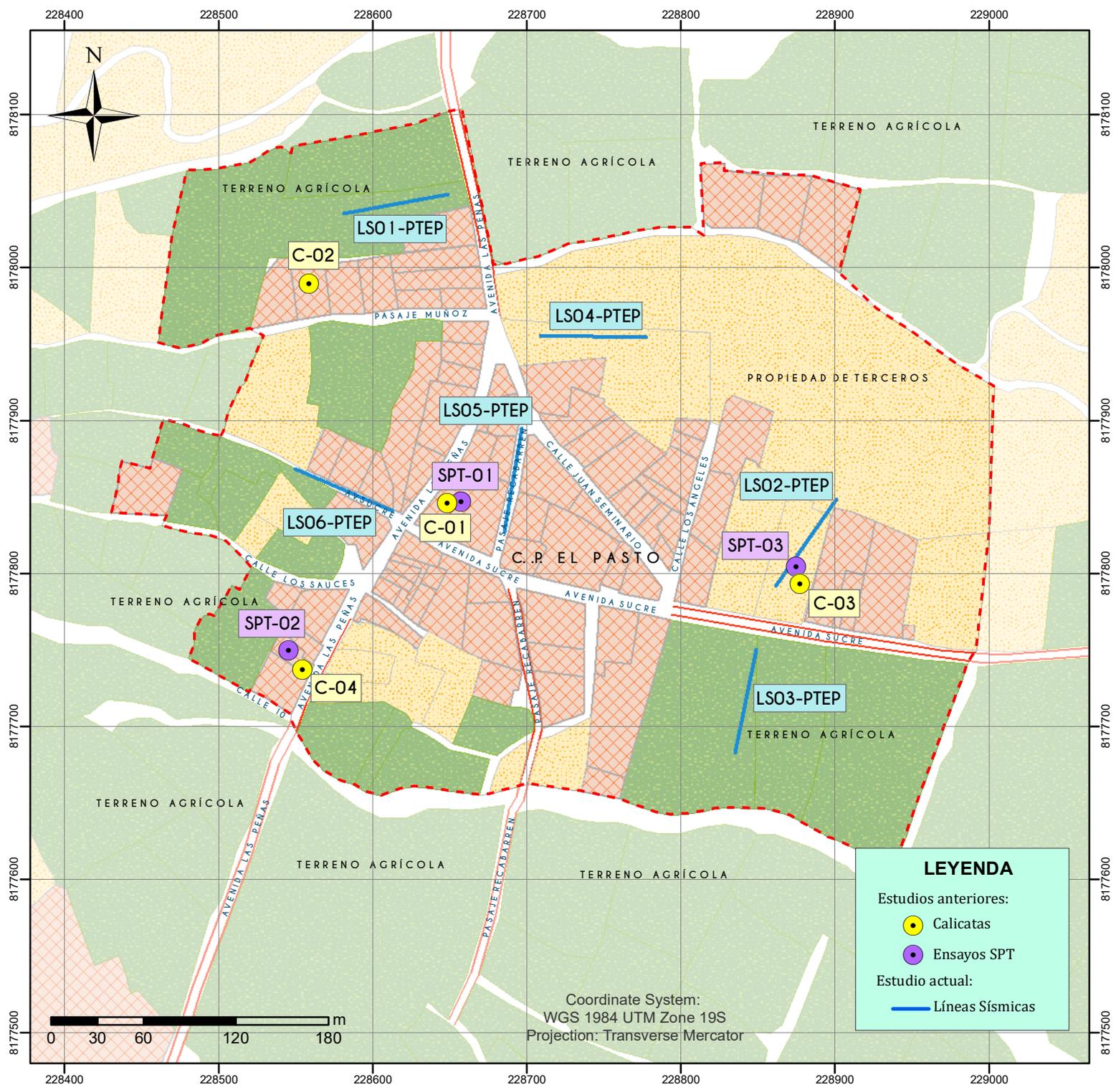
**PLANO:** LÍNEAS SÍSMICAS





**Anexo 6:**  
**Ubicación de las Calicatas y SPT**

---



**LEYENDA**

Estudios anteriores:

- Calicatas
- Ensayos SPT

Estudio actual:

- Líneas Sísmicas

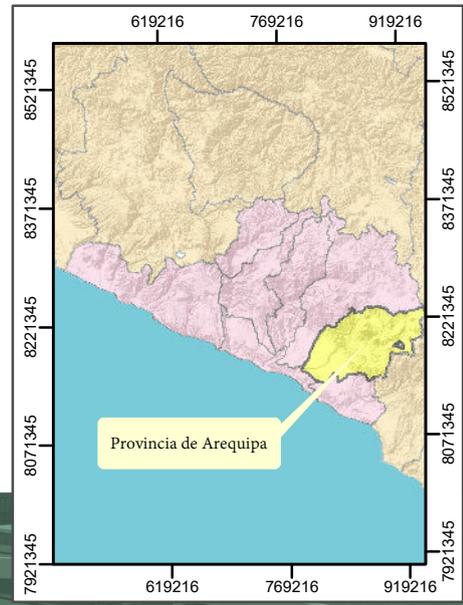
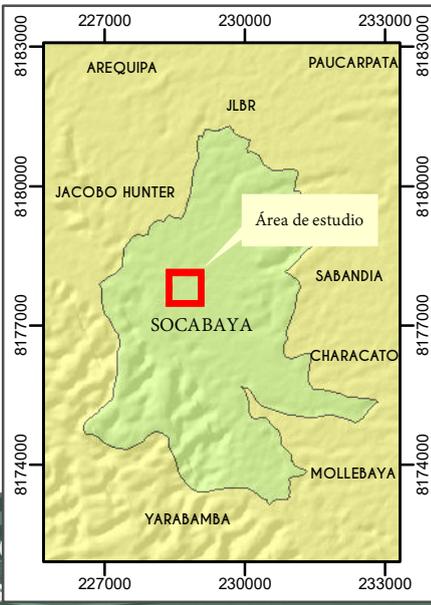
Coordinate System:  
WGS 1984 UTM Zone 19S  
Projection: Transverse Mercator

LÍNEA SÍSMICA	ORIENTACIÓN	NORTE	ESTE
LS01-PTEP	E-O	228649.00	8178048.00
LS02-PTEP	SO-NE	228860.86	8177792.23
LS03-PTEP	N-S	228848.70	8177750.53
LS04-PTEP	O-E	228708.50	8177955.98
LS05-PTEP	N-S	228696.75	8177895.52
LS06-PTEP	SE-NO	228612.99	8177841.26

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA  
FACULTAD DE ARQUITECTURA E  
INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:  
"CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA  
APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P.EL PASTO,  
DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA"

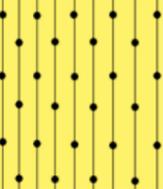
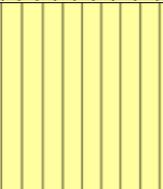
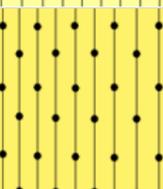
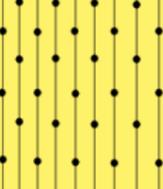
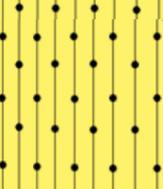
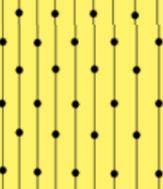
PLANO: UBICACIÓN DE CALICATAS Y SPT

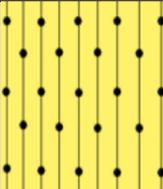
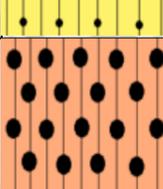
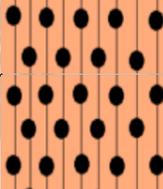
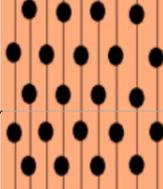
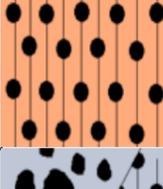


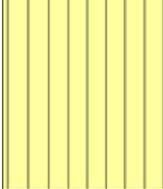
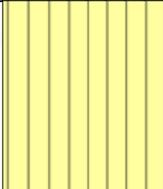
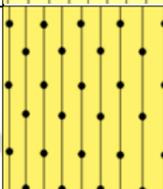
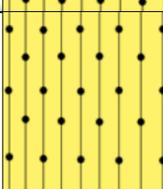
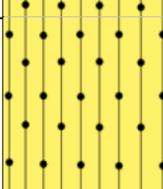
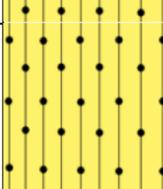


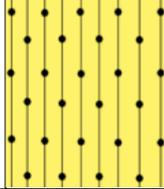
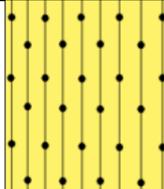
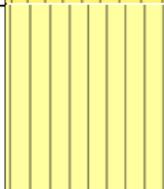
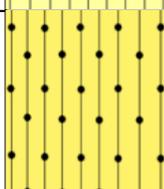
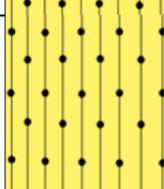
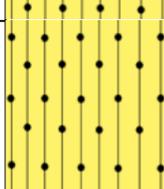
## **Anexo 7:** **Columnas estratigráficas de Calicatas**

---

PROYECTO:		CALICATA		
EVALUACIÓN DE POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN EL P.T. EL PASTO, SOCABAYA		<b>C-01</b>		
UBICACIÓN: DISTRITO DE SOCABAYA, AREQUIPA, PERÚ				
FECHA: 04/07/2018				
NIVEL FREÁTICO: 0.78 m				
PROF. METROS	ESTRATO	SIMBOLO		DESCRIPCIÓN
		SUCS	GRAFICO	
0.5 m	M-1	SM		ARENA-LIMOSA
1.0 m	M-2	ML		LIMO INORGÁNICO DE BAJA PLASTICIDAD
1.50 m	M-3	SM		ARENA-LIMOSA
2.0 m	M-4	SM		ARENA-LIMOSA
2.50 m	M-5	SM		ARENA-LIMOSA
3.0 m	M-6	SM		ARENA-LIMOSA

PROYECTO:		CALICATA		
EVALUACIÓN DE POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN EL P.T. EL PASTO, SOCABAYA		<b>C-02</b>		
UBICACIÓN: DISTRITO DE SOCABAYA, AREQUIPA, PERÚ				
FECHA: 04/07/2018				
NIVEL FREÁTICO: 2.20 m				
PROF. METROS	ESTRATO	SIMBOLO		DESCRIPCIÓN
		SUCS	GRAFICO	
0.5 m	M-1	SM		ARENA-LIMOSA
1.0 m	M-2	SM		GRAVA LIMOSA
1.50 m	M-3	SM		GRAVA LIMOSA
2.0 m	M-4	SM		GRAVA LIMOSA
2.50 m	M-5	SP-SM		GRAVA MAL GRADUADA LIMOSA

PROYECTO:		CALICATA		
EVALUACIÓN DE POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN EL P.T. EL PASTO, SOCABAYA		<b>C-03</b>		
UBICACIÓN: DISTRITO DE SOCABAYA, AREQUIPA, PERÚ				
FECHA: 04/07/2018				
NIVEL FREÁTICO: 1.80 m				
PROF. METROS	ESTRATO	SIMBOLO		DESCRIPCIÓN
		SUCS	GRAFICO	
0.5 m	M-1	ML		LIMO INORGÁNICO DE BAJA PLASTICIDAD
1.0 m	M-2	ML		LIMO INORGÁNICO DE BAJA PLASTICIDAD
1.50 m	M-3	SM		ARENA-LIMOSA
2.0 m	M-4	SM		ARENA-LIMOSA
2.50 m	M-5	SM		ARENA-LIMOSA
3.0 m	M-6	SM		ARENA-LIMOSA

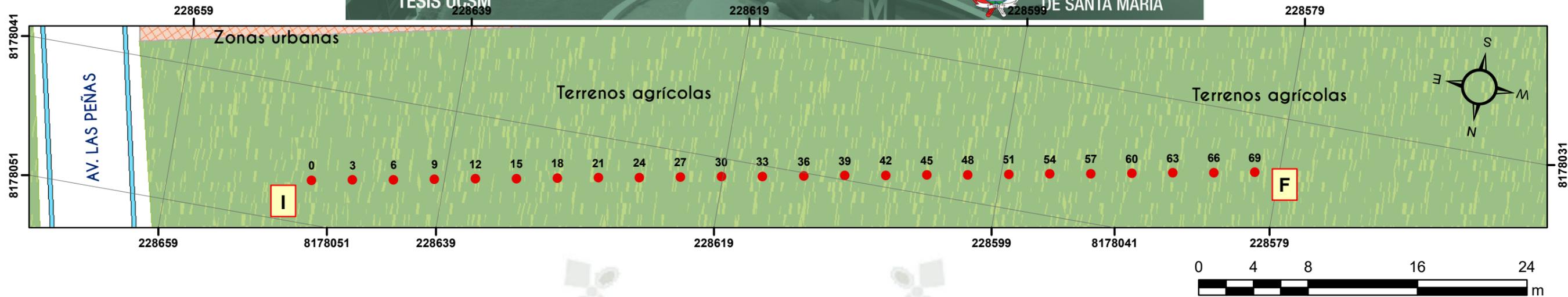
PROYECTO:		CALICATA		
EVALUACIÓN DE POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DE SUELOS EN EL P.T. EL PASTO, SOCABAYA		<b>C-04</b>		
UBICACIÓN: DISTRITO DE SOCABAYA, AREQUIPA, PERÚ				
FECHA: 04/07/2018				
NIVEL FREÁTICO: 2.40 m				
PROF. METROS	ESTRATO	SIMBOLO		DESCRIPCIÓN
		SUCS	GRAFICO	
0.5 m	M-1	SM		ARENA-LIMOSA
1.0 m	M-2	SM		ARENA-LIMOSA
1.50 m	M-3	ML		LIMO INORGÁNICO DE BAJA PLASTICIDAD
2.0 m	M-4	SM		ARENA-LIMOSA
2.50 m	M-5	SM		ARENA-LIMOSA
3.0 m	M-6	SM		ARENA-LIMOSA



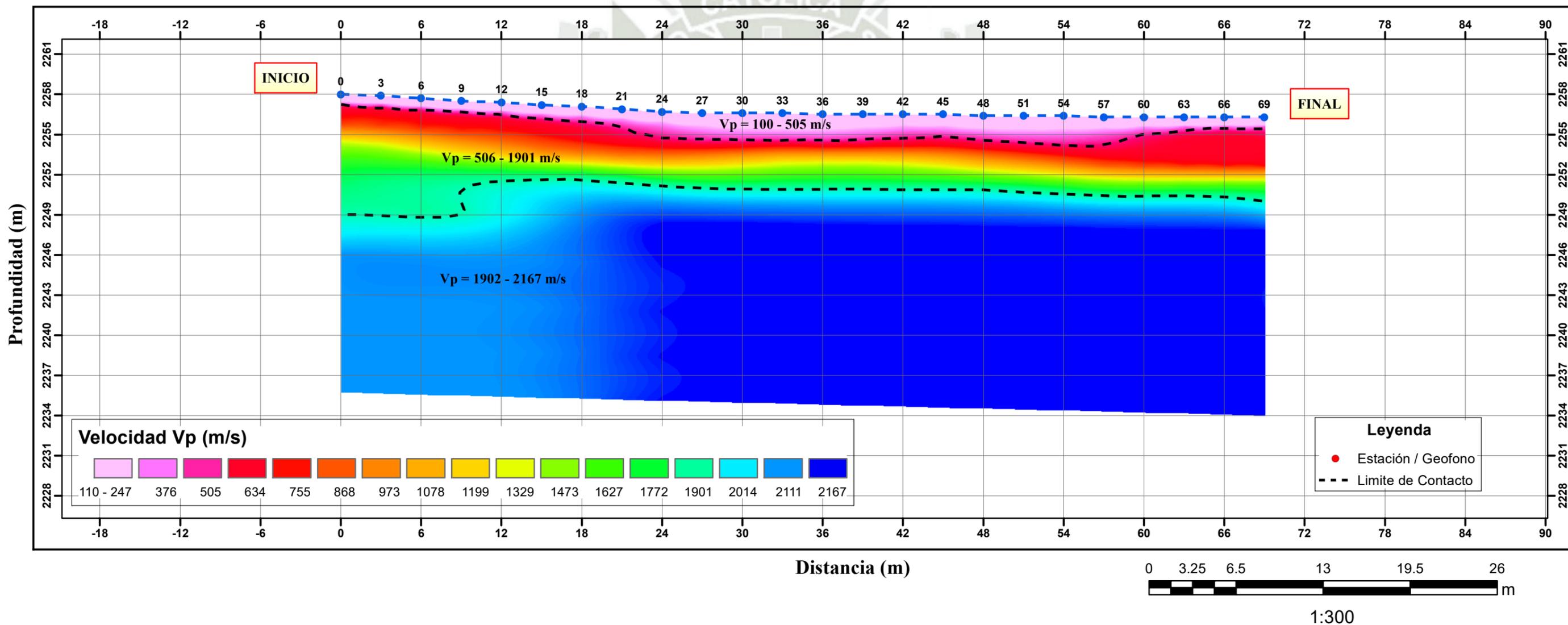


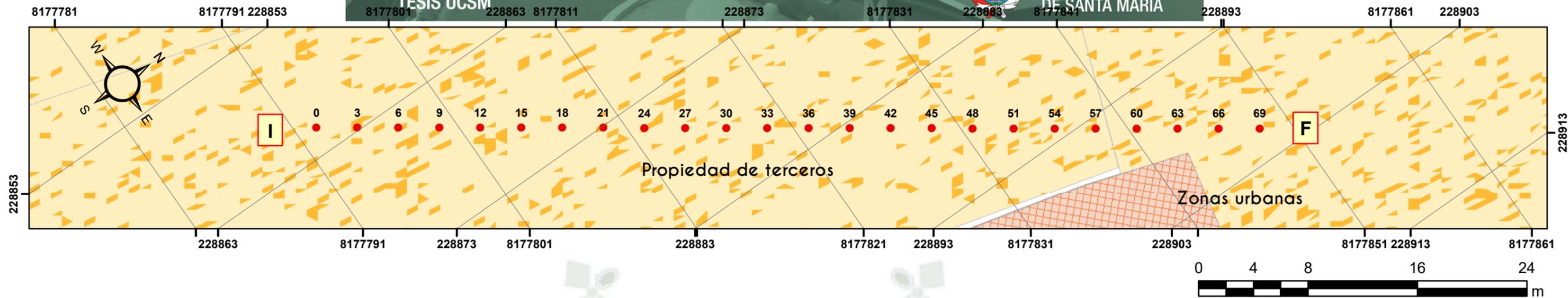
## **Anexo 8:** **Perfiles de Refracción Sísmica**

---

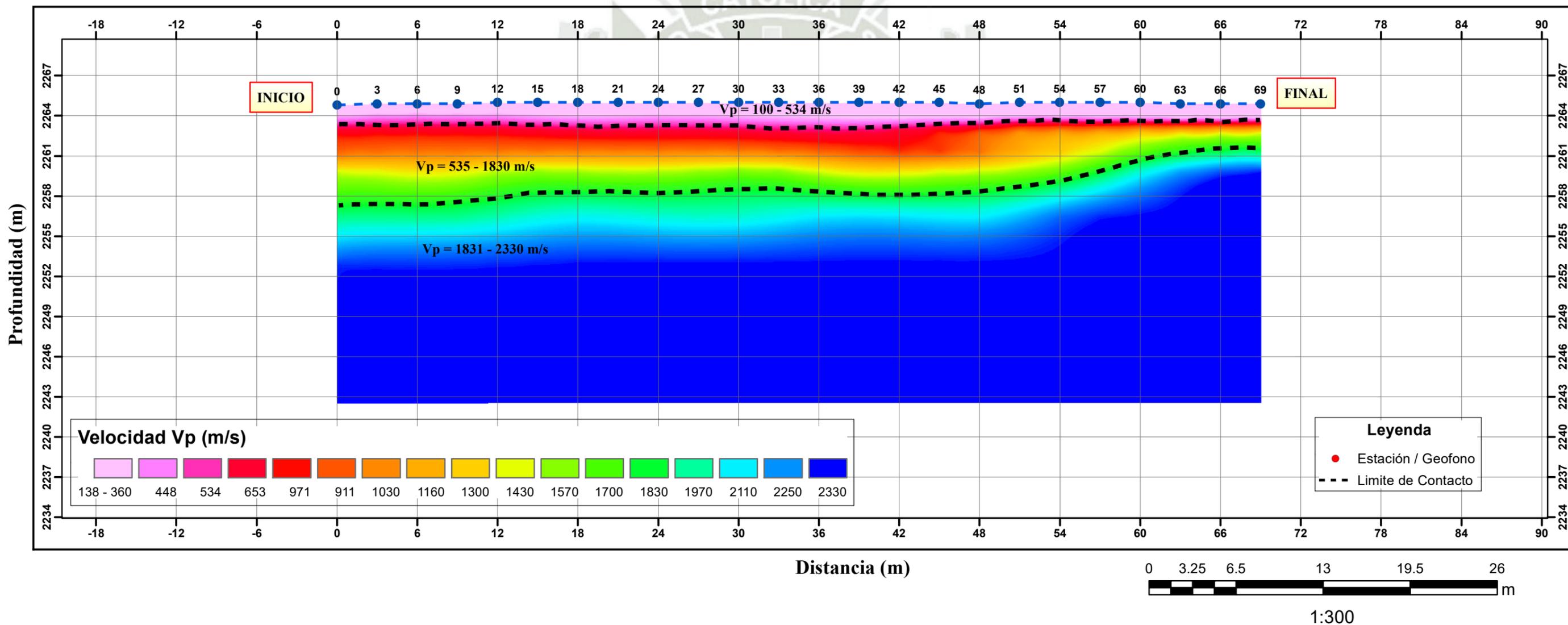


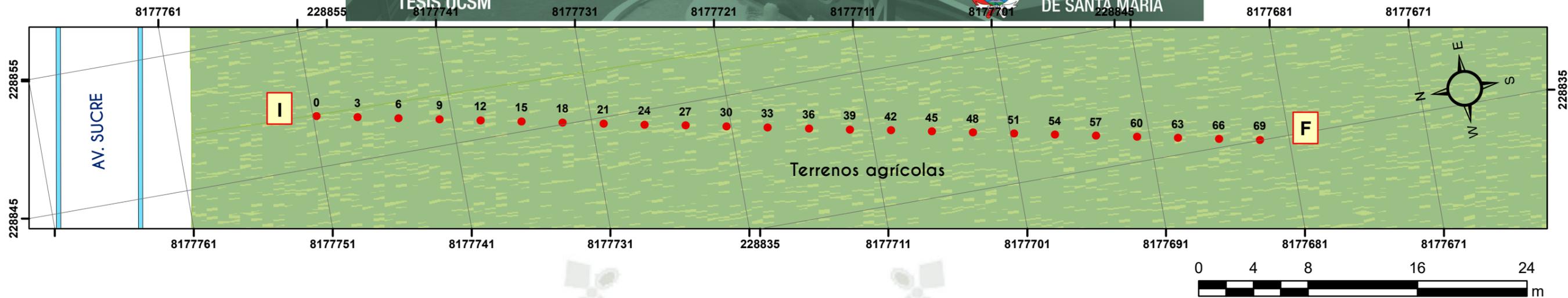
MODELO DE SECCIÓN DE VELOCIDAD DE LA LÍNEA RS-01



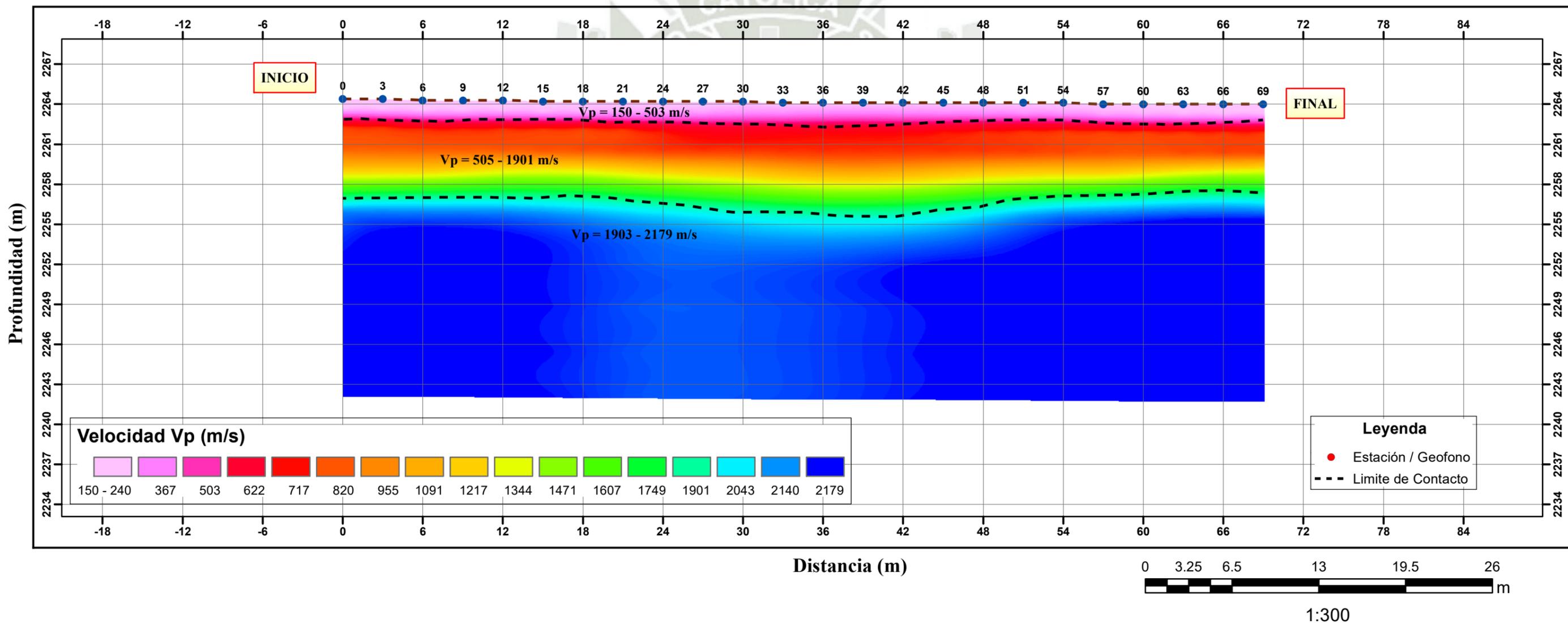


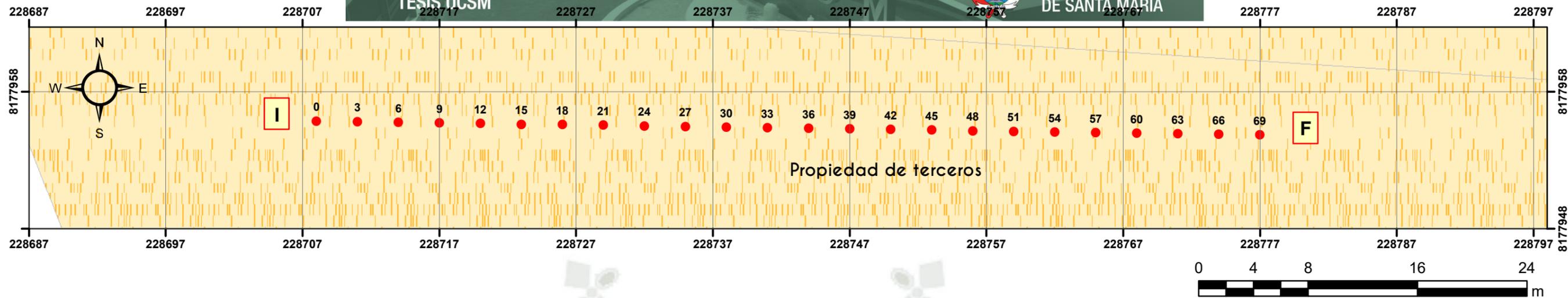
MODELO DE SECCIÓN DE VELOCIDAD DE LA LÍNEA RS-02



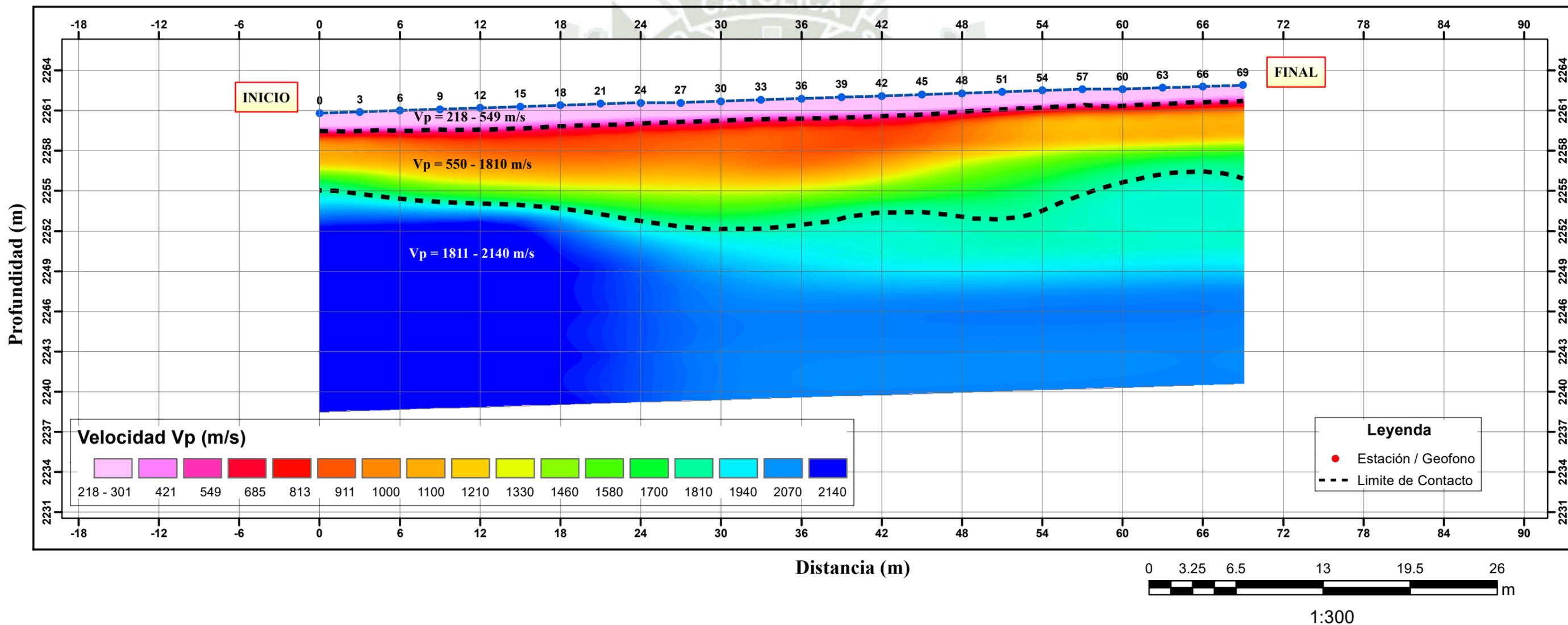


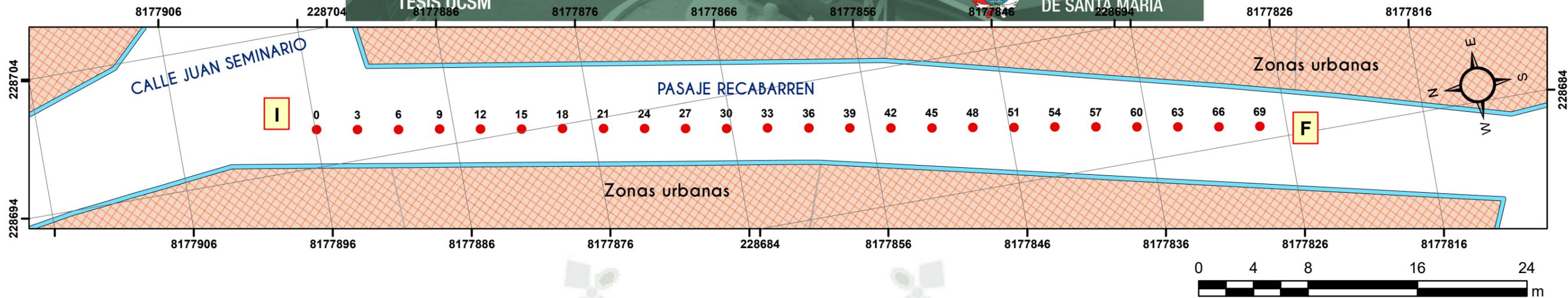
MODELO DE SECCIÓN DE VELOCIDAD DE LA LÍNEA RS-03



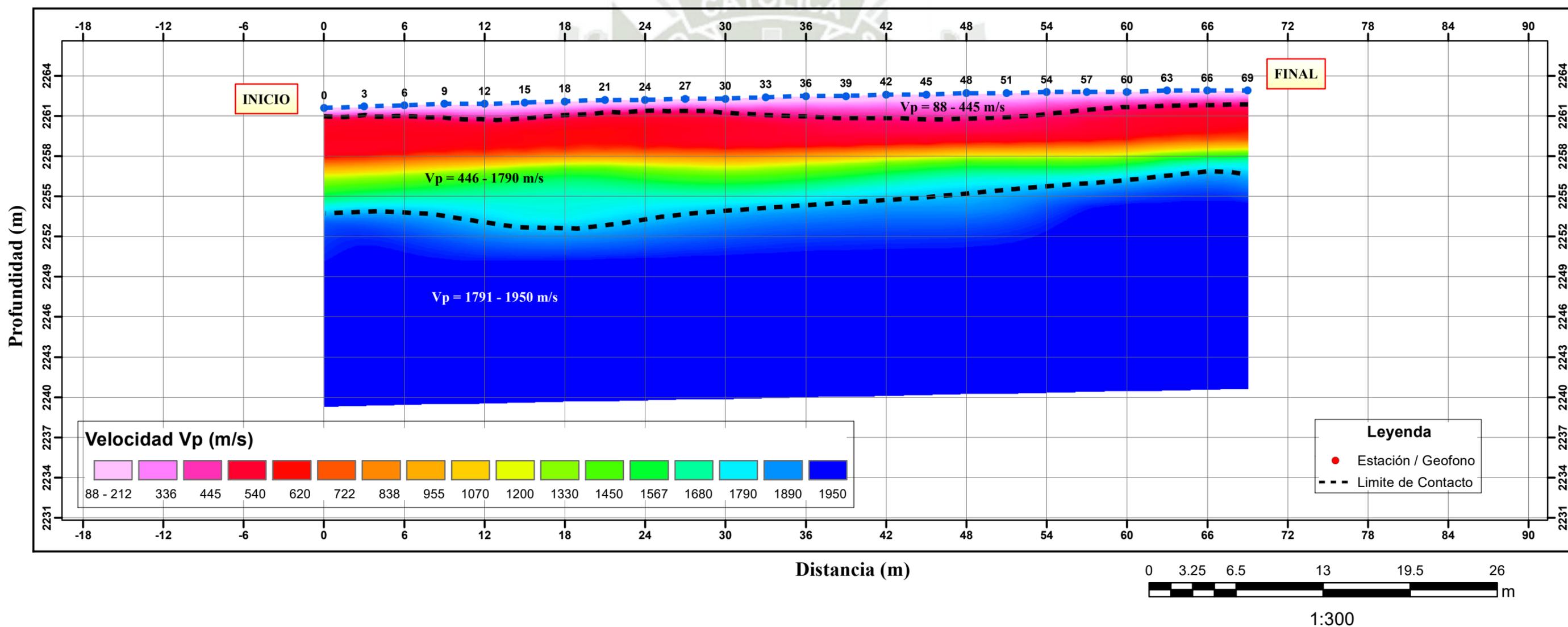


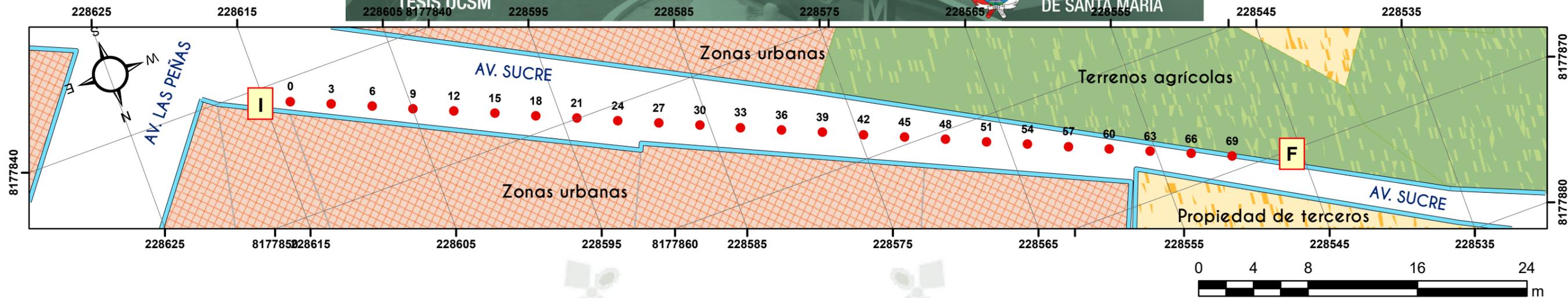
**MODELO DE SECCIÓN DE VELOCIDAD DE LA LÍNEA RS-04**



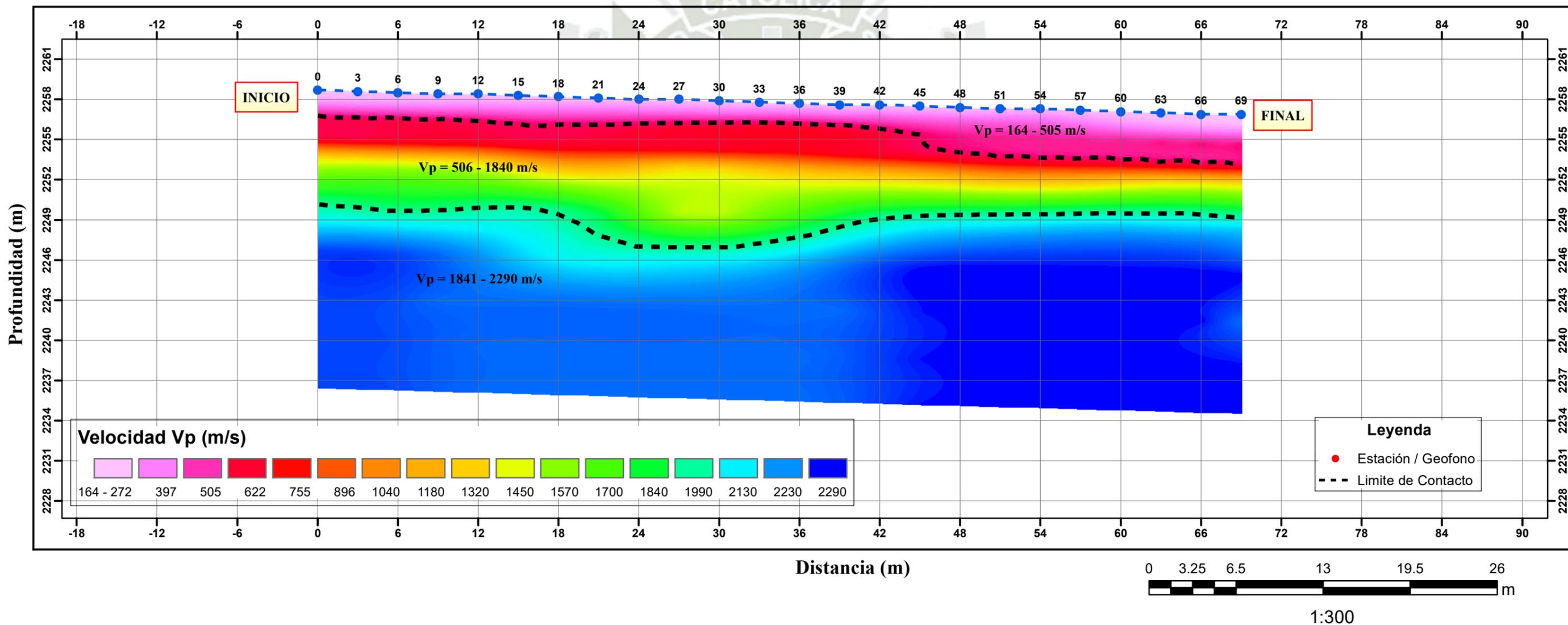


MODELO DE SECCIÓN DE VELOCIDAD DE LA LÍNEA RS-05





MODELO DE SECCIÓN DE VELOCIDAD DE LA LÍNEA RS-06

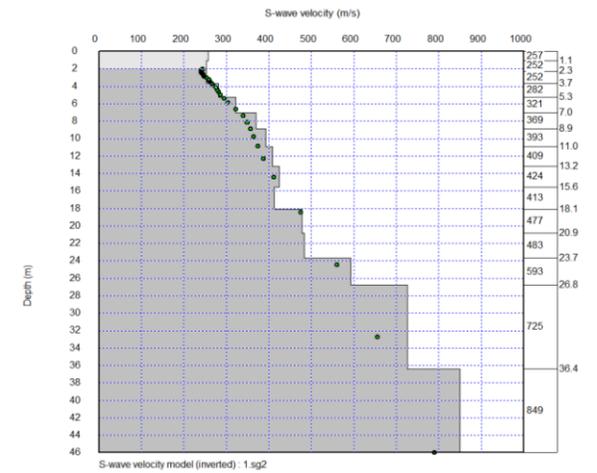
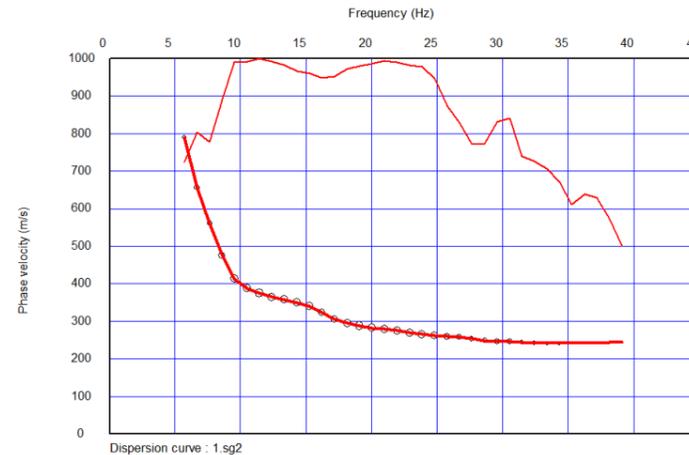
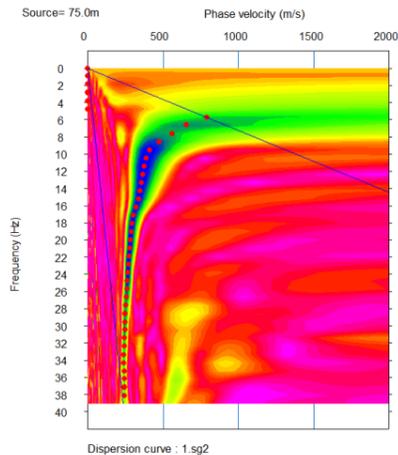
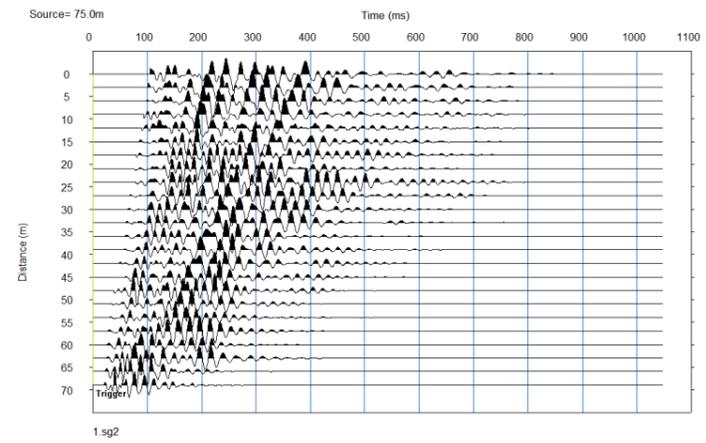




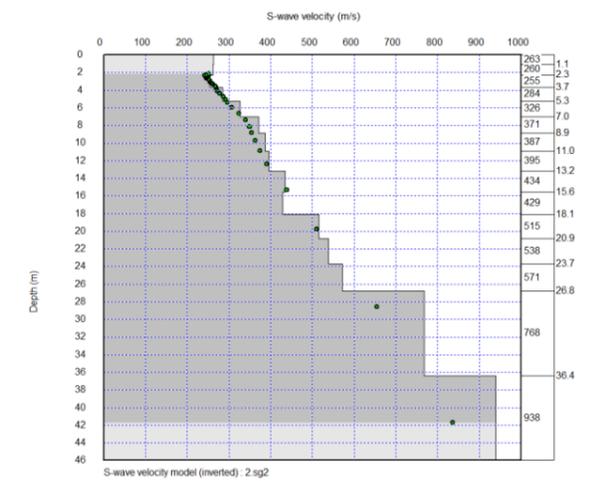
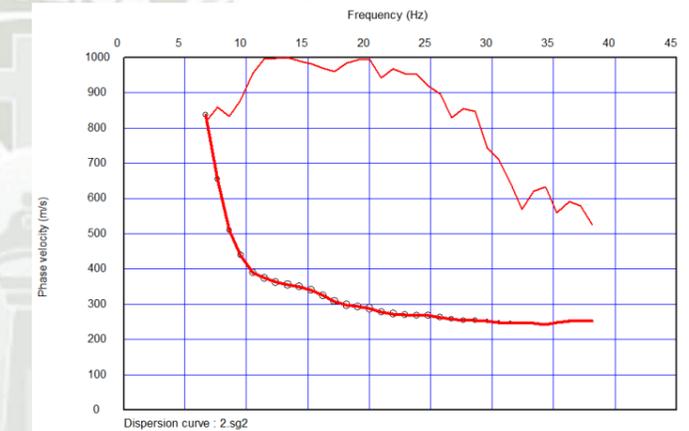
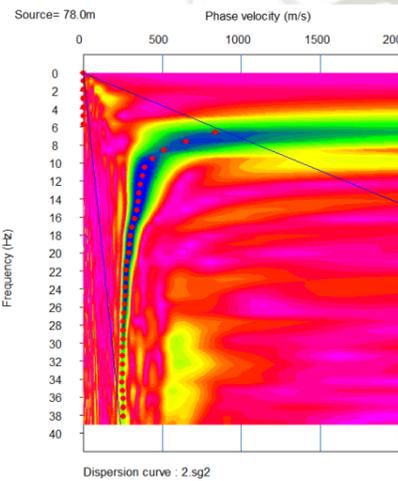
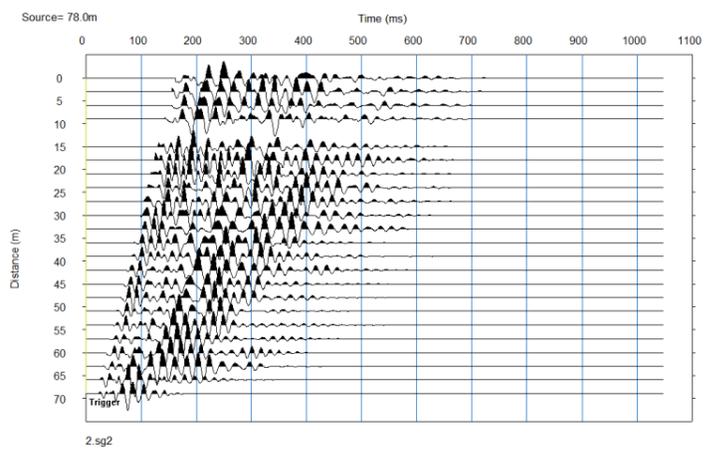
**Anexo 9:**  
**Secuencia de Procesamiento MASW**

---

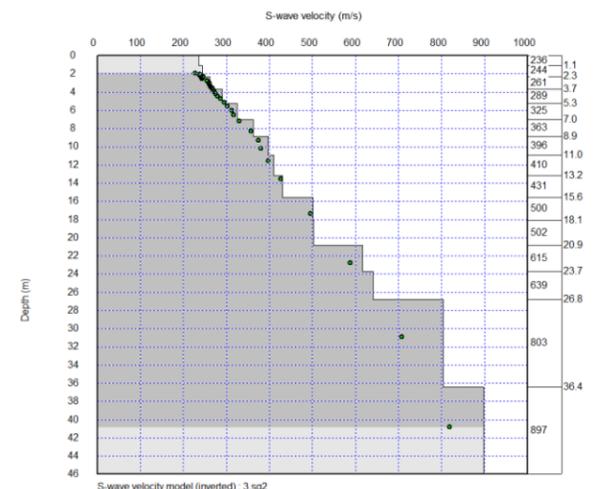
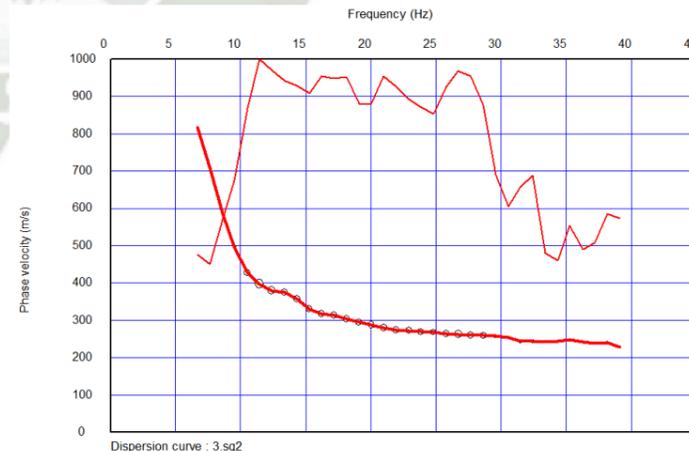
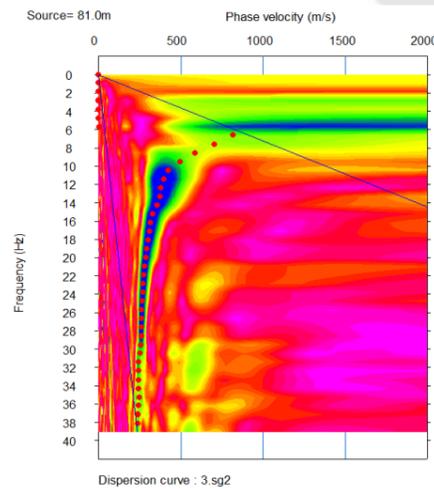
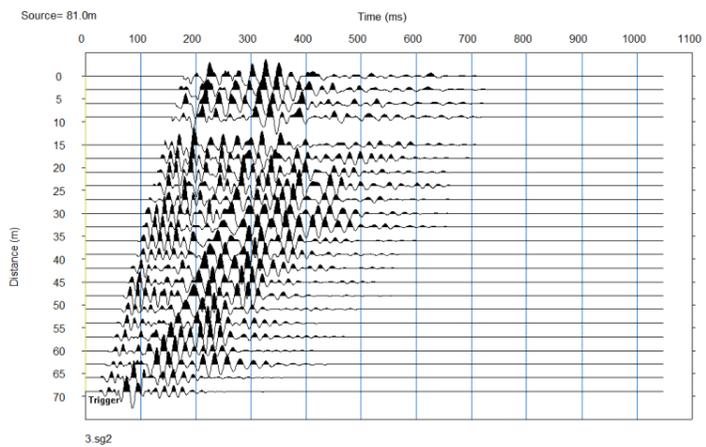
MASW LS01-PETP 75 m (10 %)



MASW LS01-PETP 78 m (13%)



MASW LS01-PETP 81 m (17%)



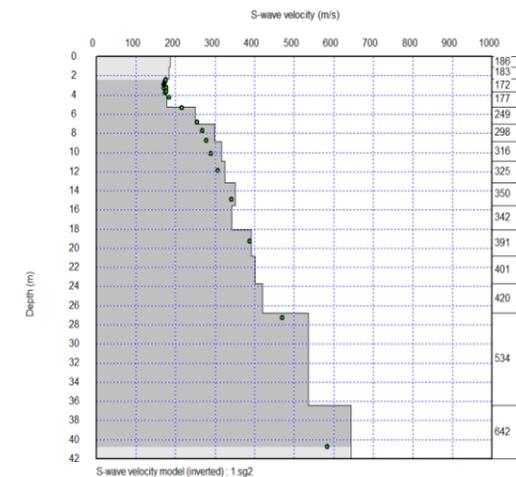
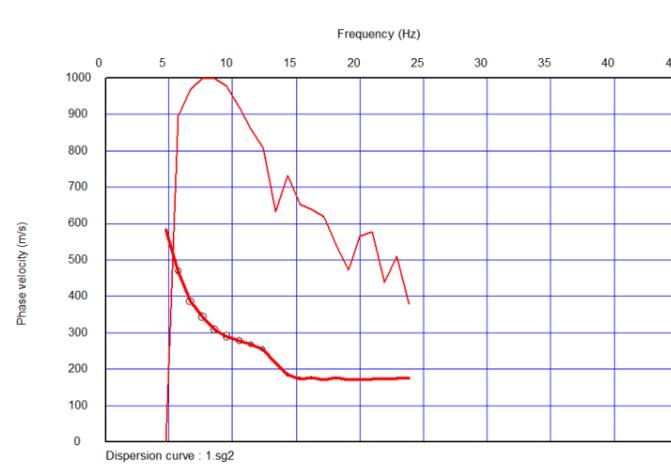
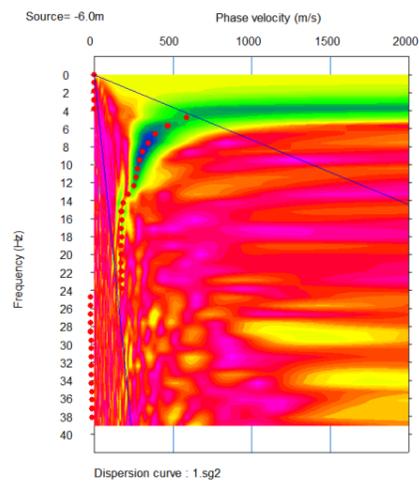
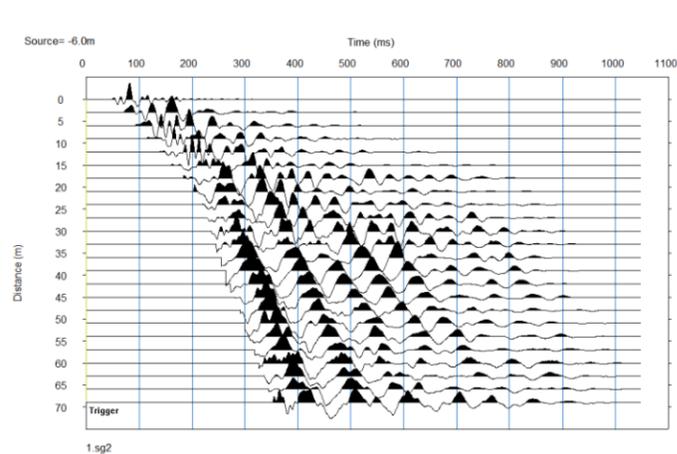
Registros MASW de del tendido sísmico LS01-PETP

Curva de velocidad de fase-frecuencia del perfil sísmico LS01-PETP

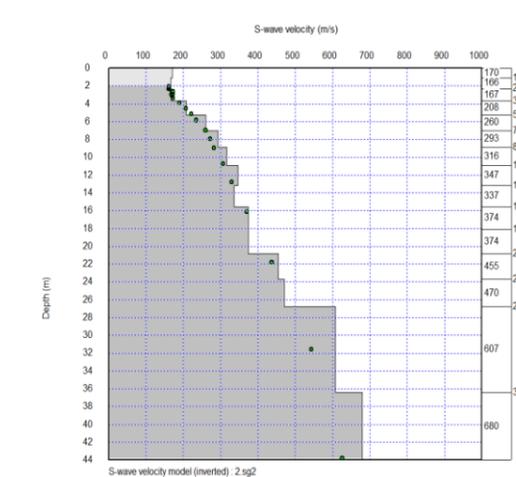
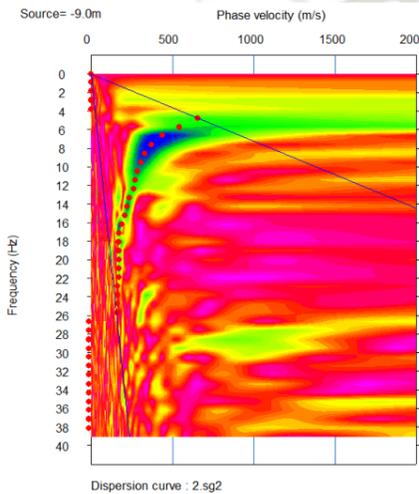
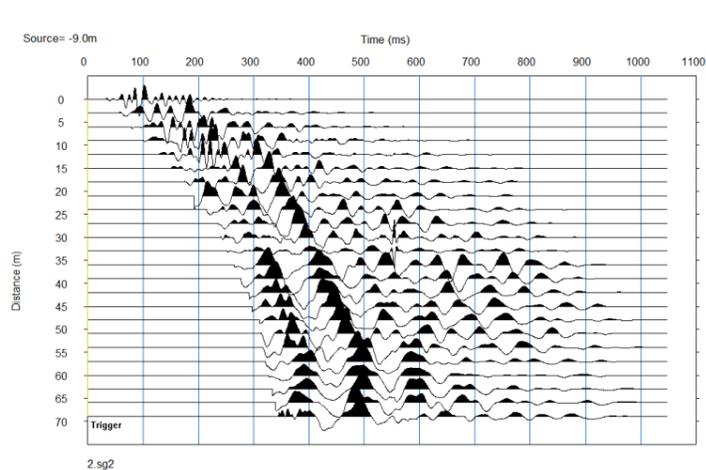
Curva de dispersión del perfil sísmico LS01-PETP

Modelado de la velocidad de onda de corte del perfil sísmico LS01-PETP

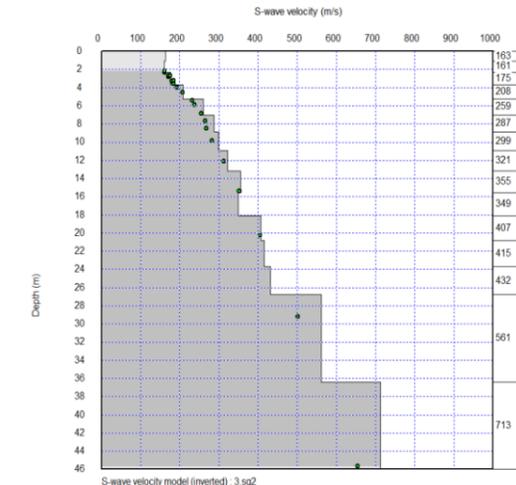
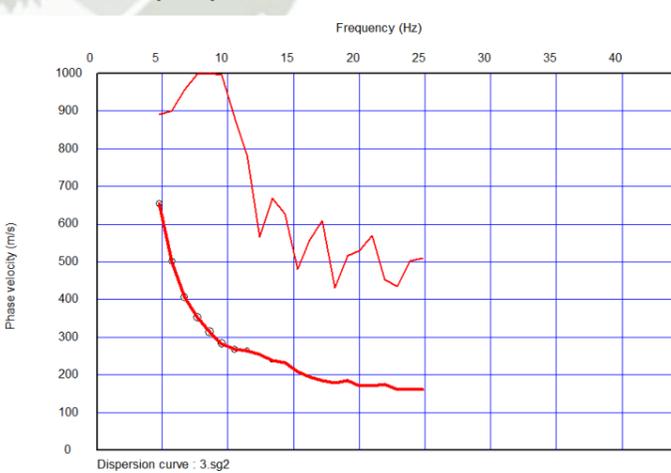
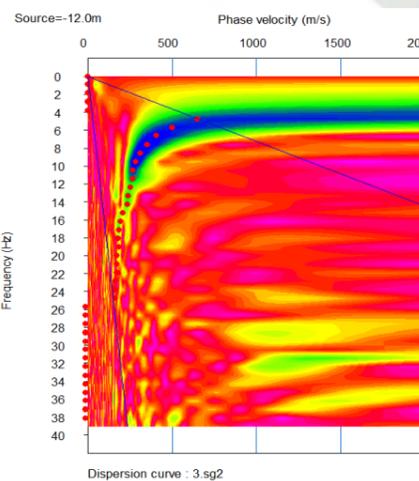
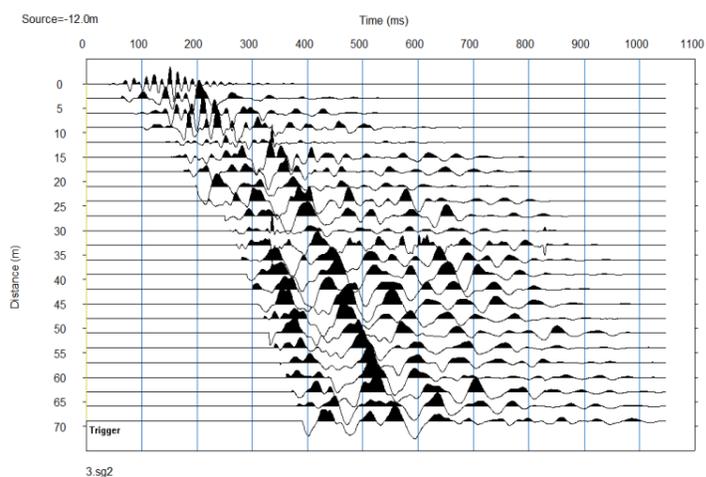
MASW LS02-PETP 75 m (10 %)



MASW LS02-PETP 78 m (13%)



MASW LS02-PETP 81 m (17%)



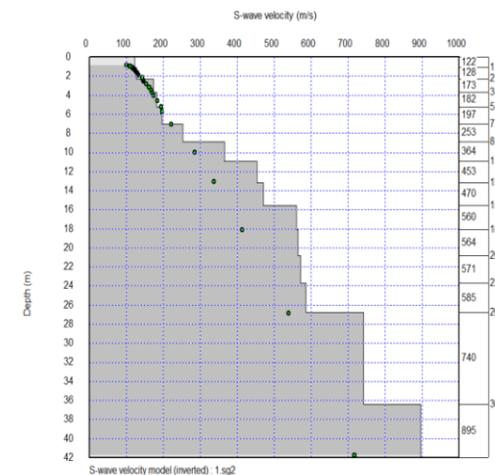
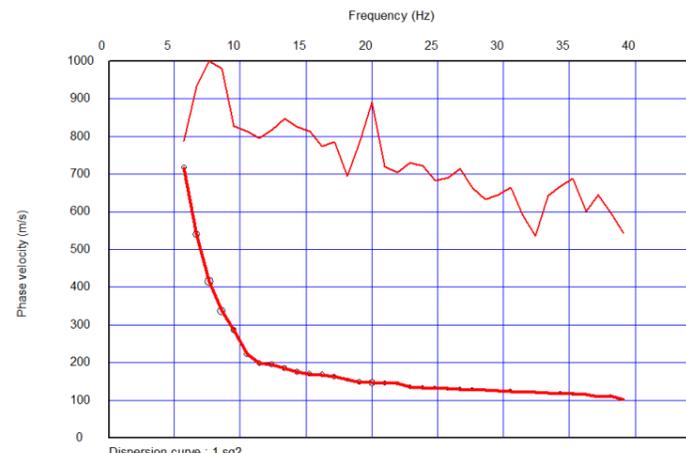
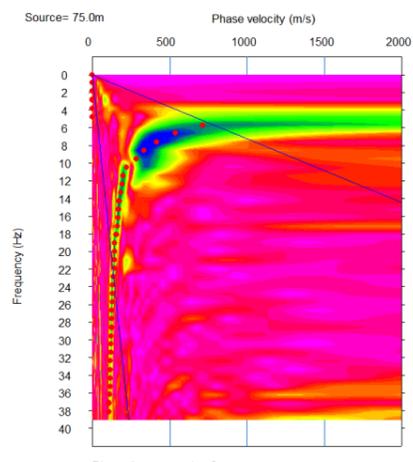
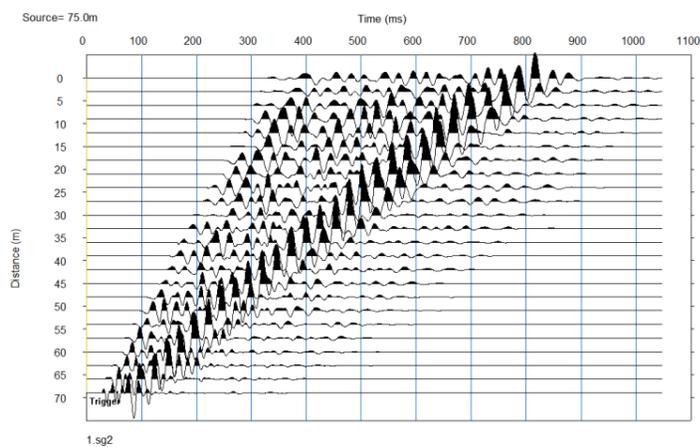
Registros MASW de del tendido sísmico LS01-PETP

Curva de velocidad de fase-frecuencia del perfil sísmico LS01-PETP

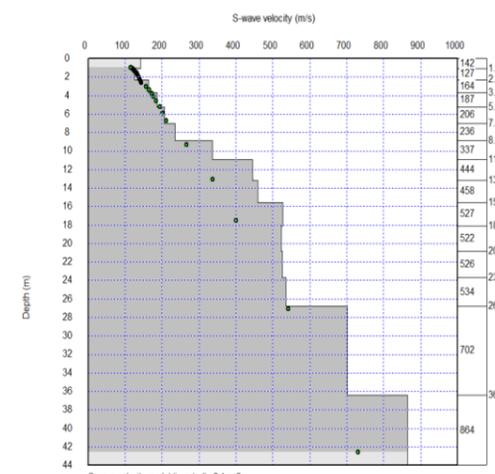
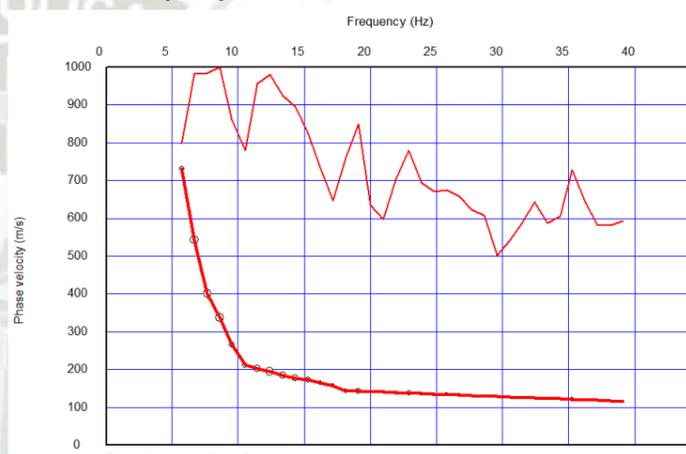
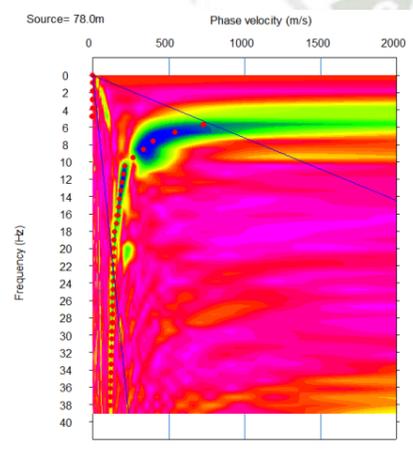
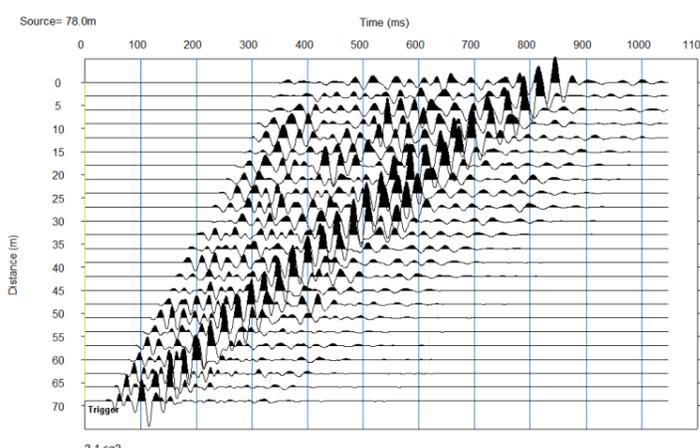
Curva de dispersión del perfil sísmico LS01-PETP

Modelado de la velocidad de onda de corte del perfil sísmico LS01-PETP

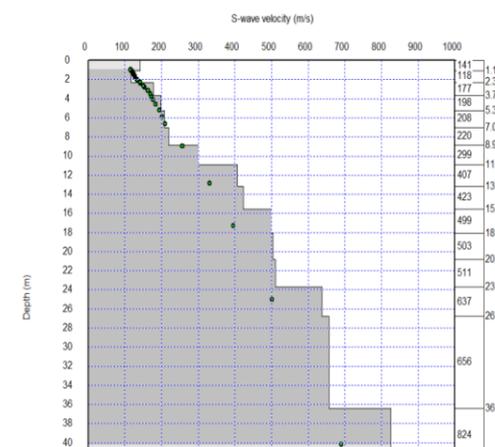
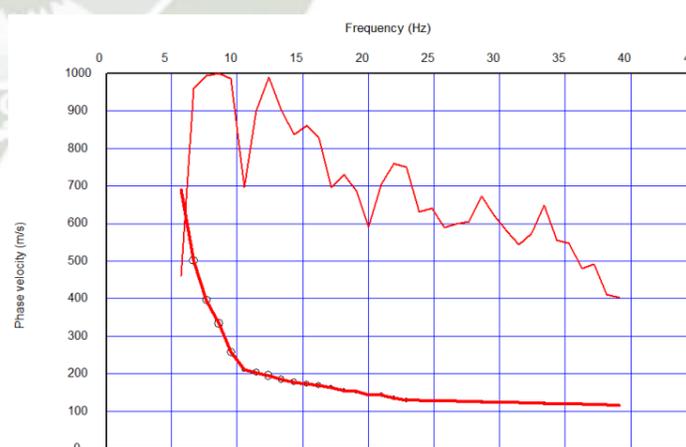
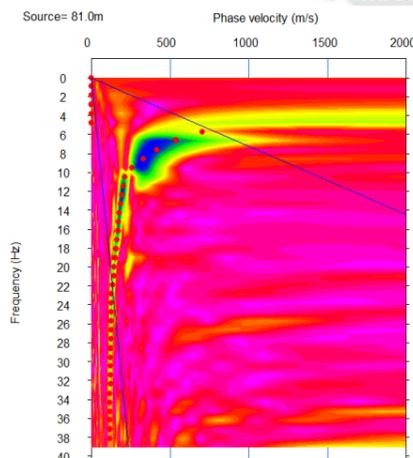
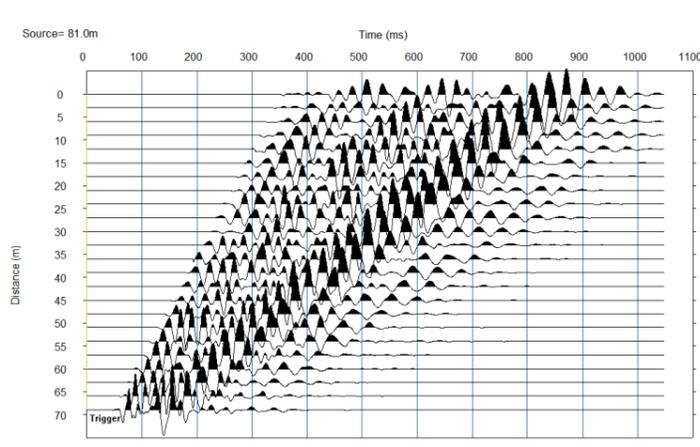
MASW LS03-PETP 75 m (10%)



MASW LS03-PETP 78 m (13%)



MASW LS03-PETP 81 m (17%)



Registros MASW de del tendido sísmico LS01-PETP

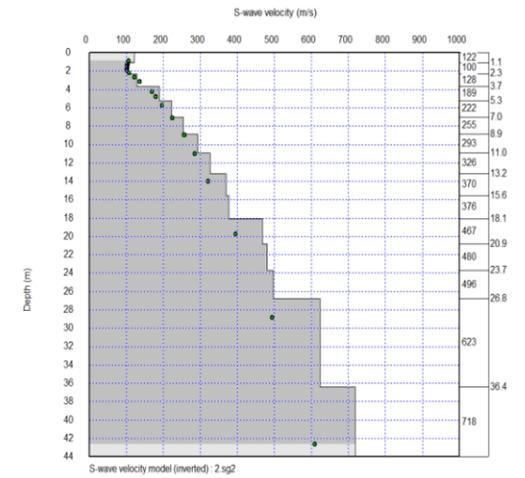
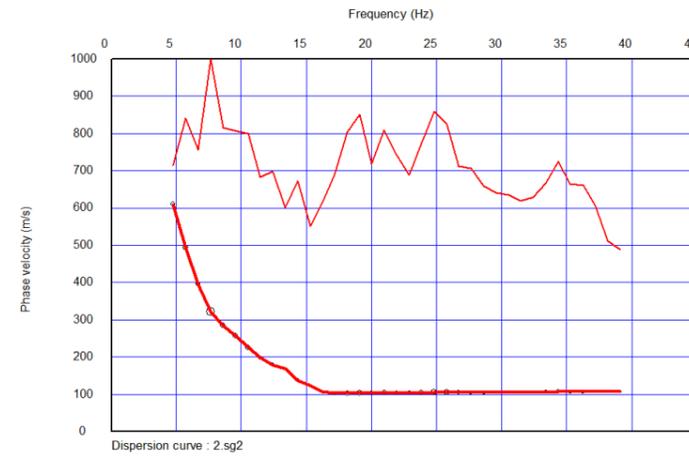
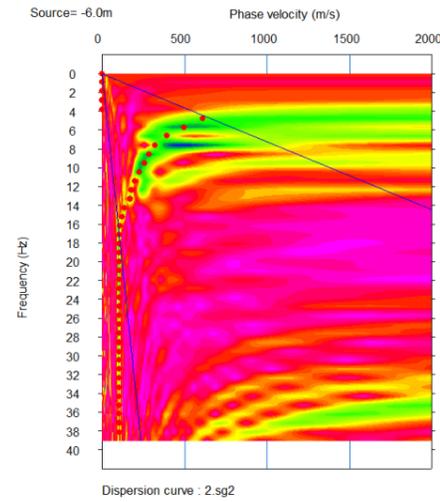
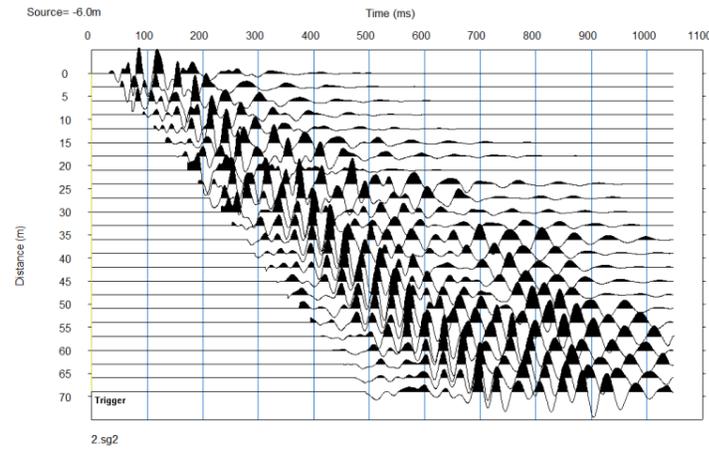
Curva de velocidad de fase-frecuencia del perfil sísmico LS01-PETP

Curva de dispersión del perfil sísmico LS01-PETP

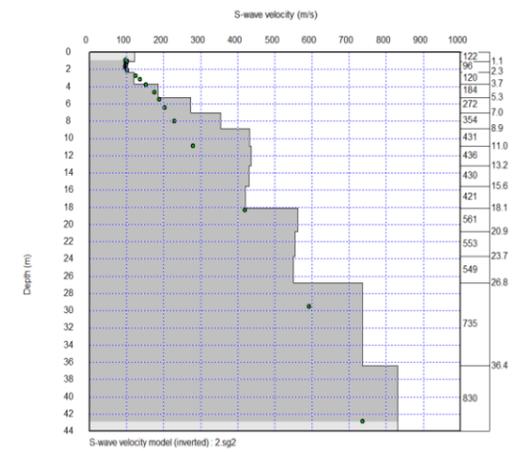
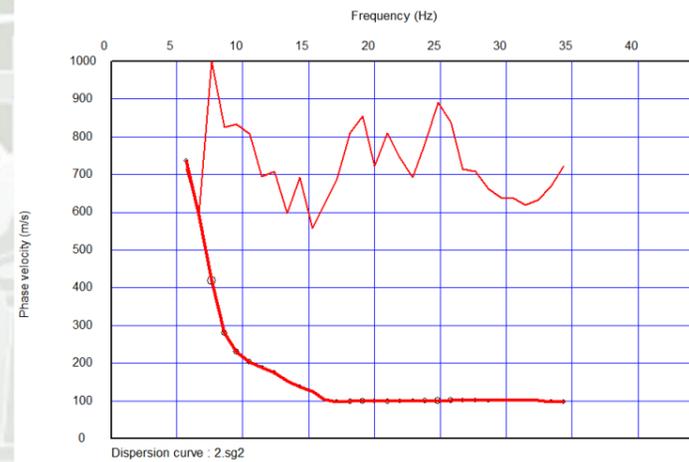
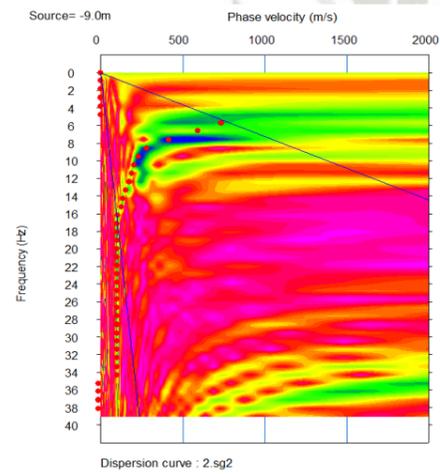
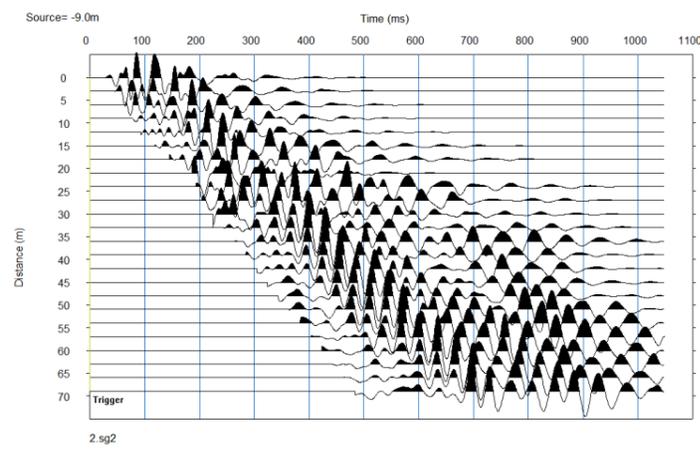
Modelado de la velocidad de onda de corte del perfil sísmico LS01-PETP



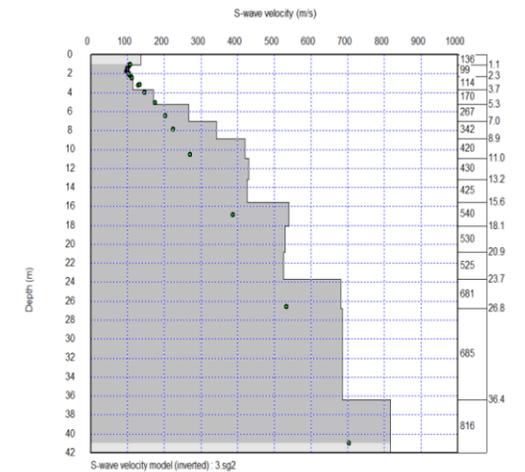
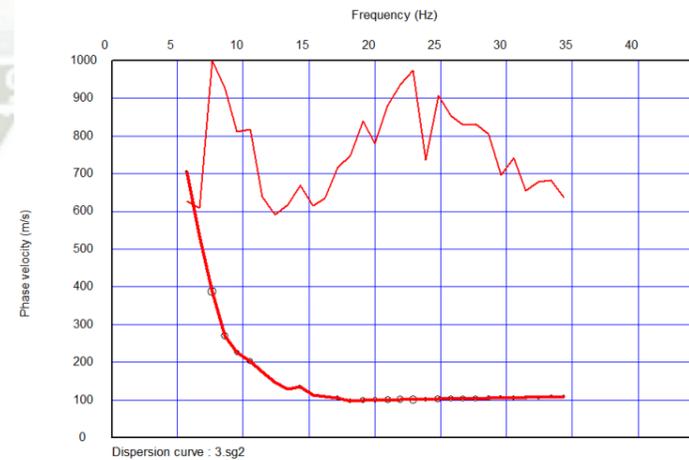
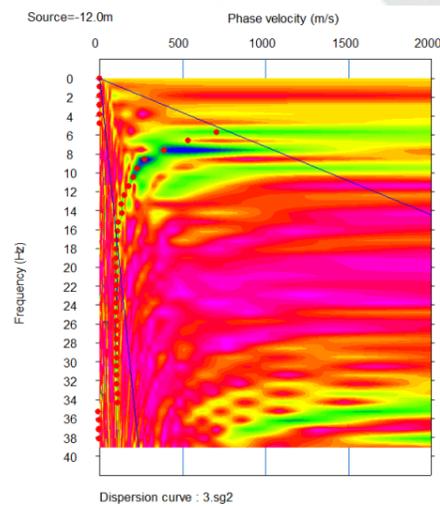
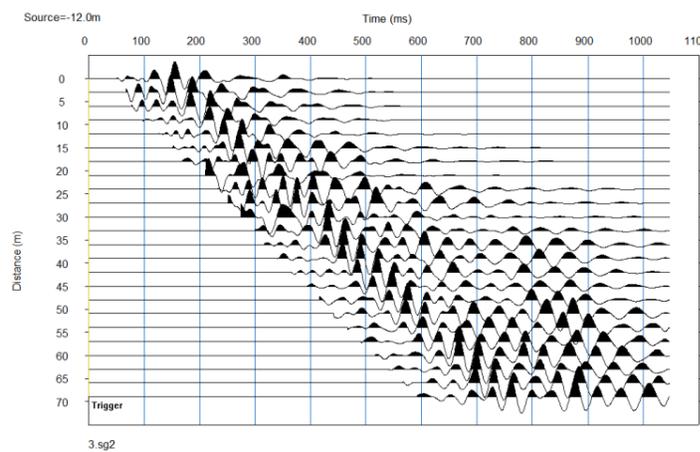
MASW LS04-PETP 75 m (10 %)



MASW LS04-PETP 78 m (13%)



MASW LS04-PETP 81 m (17%)



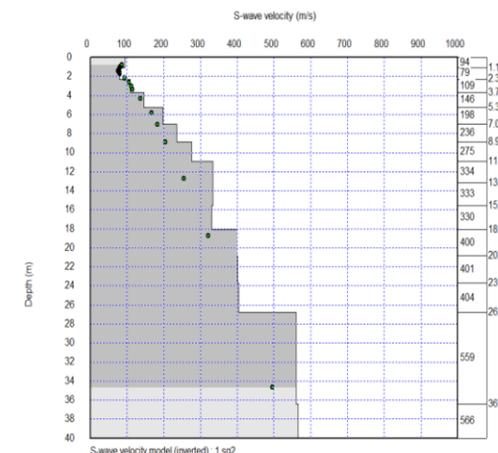
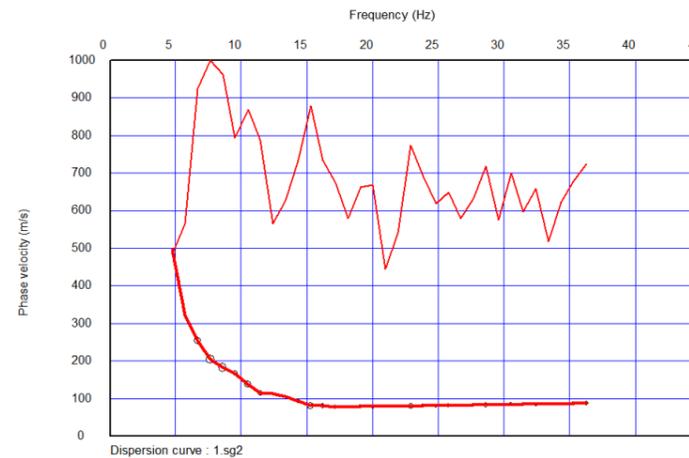
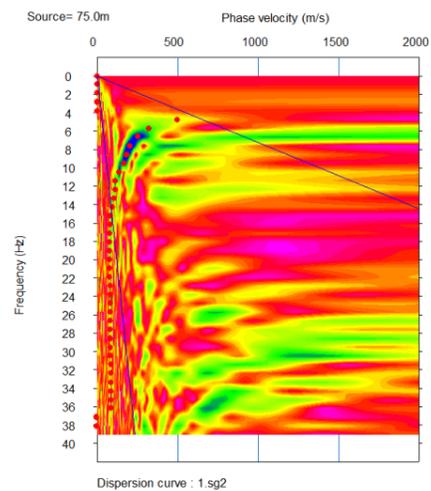
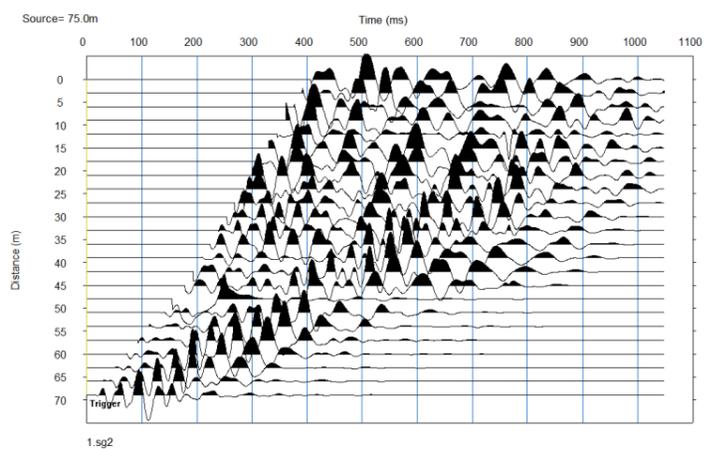
Registros MASW de del tendido sísmico LS01-PETP

Curva de velocidad de fase-frecuencia del perfil sísmico LS01-PETP

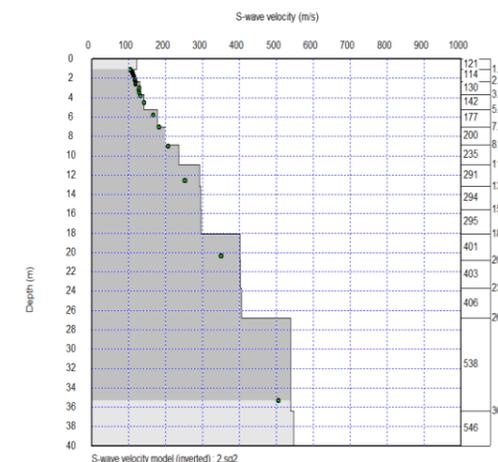
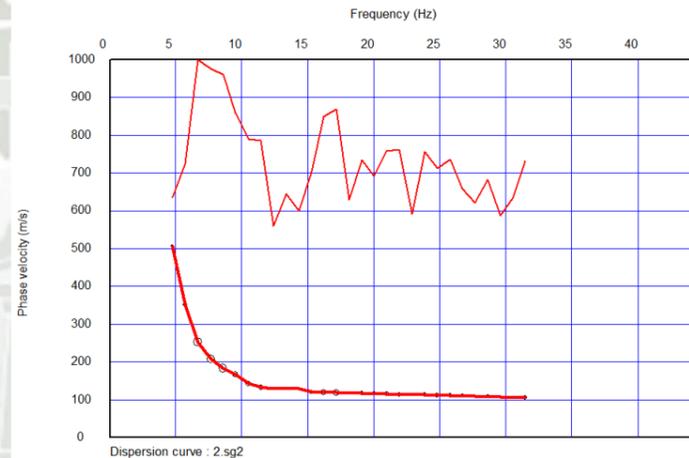
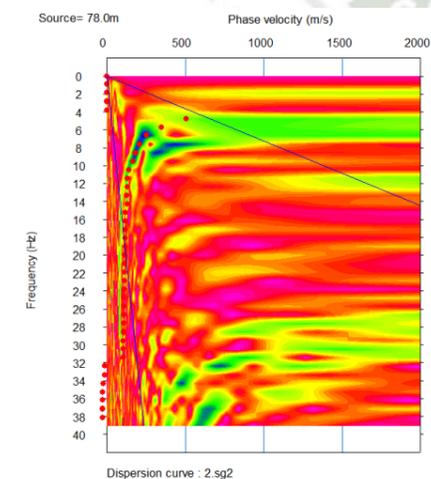
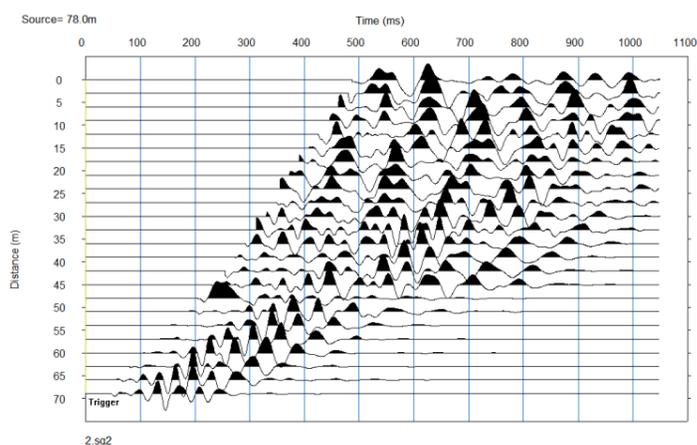
Curva de dispersión del perfil sísmico LS01-PETP

Modelado de la velocidad de onda de corte del perfil sísmico LS01-PETP

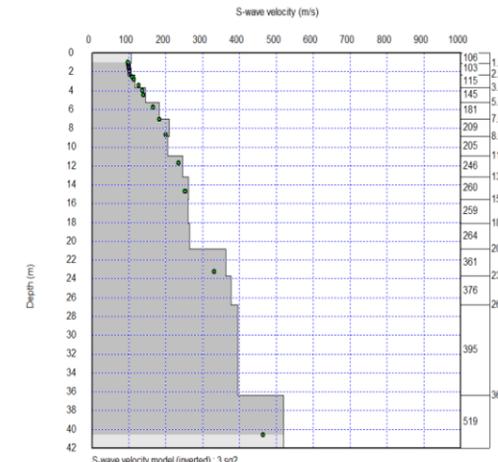
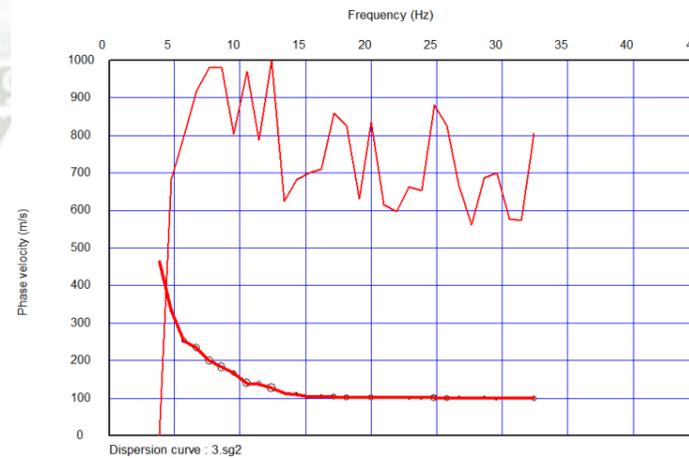
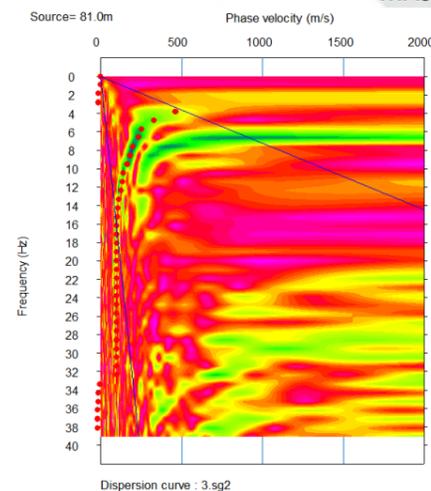
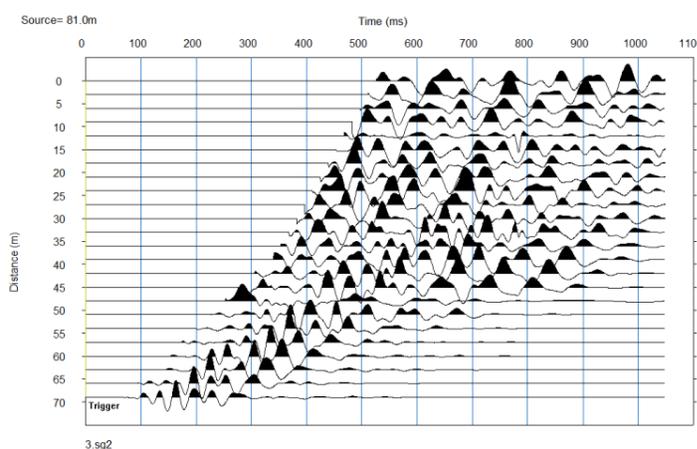
MASW LS05-PETP 75 m (10%)



MASW LS05-PETP 78 m (13%)



MASW LS05-PETP 81 m (17%)



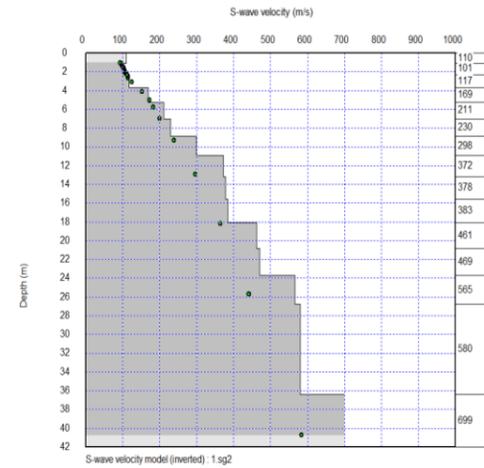
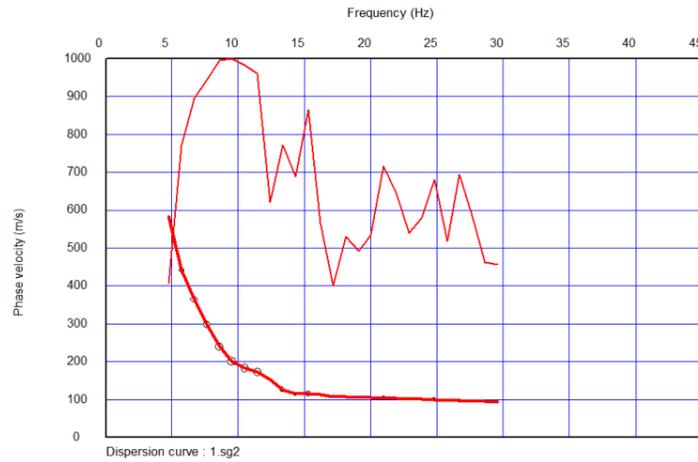
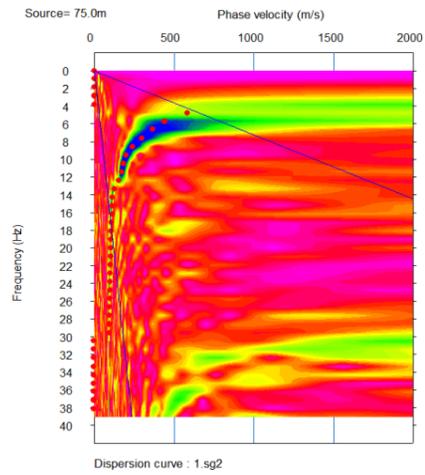
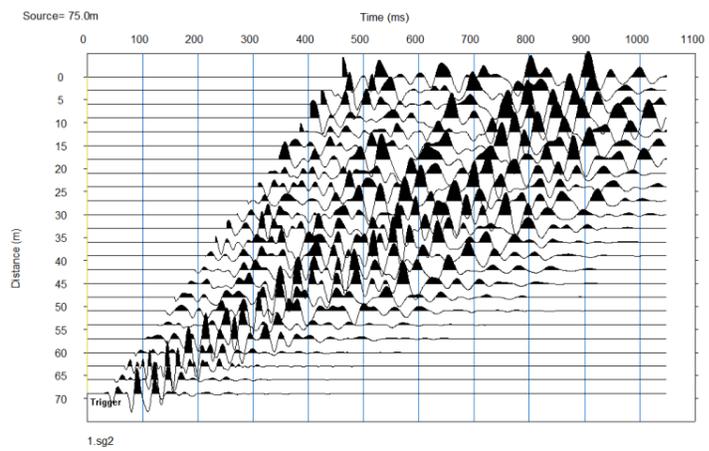
Registros MASW de del tendido sísmico LS01-PETP

Curva de velocidad de fase-frecuencia del perfil sísmico LS01-PETP

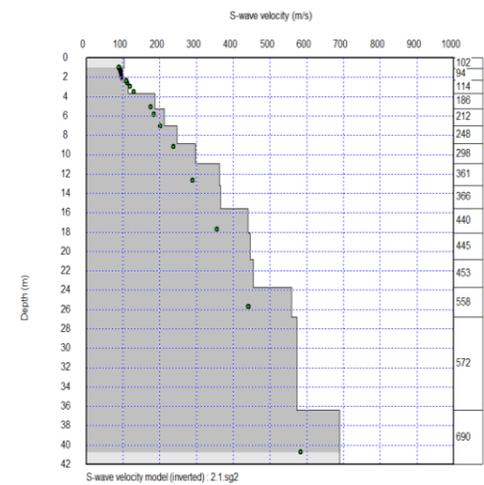
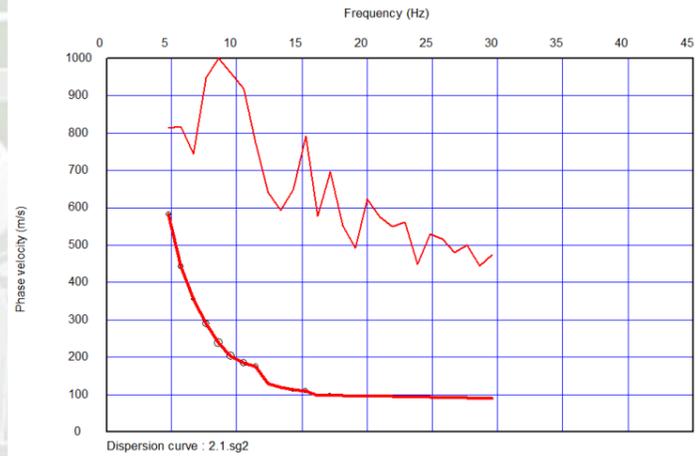
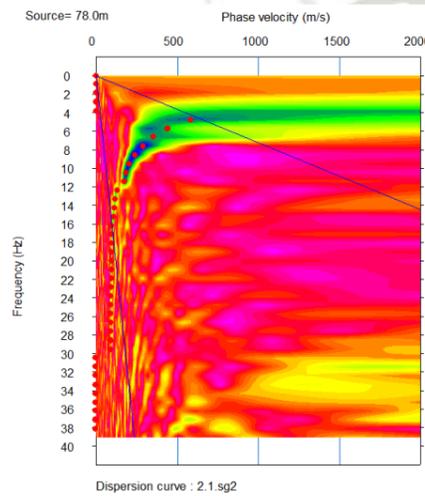
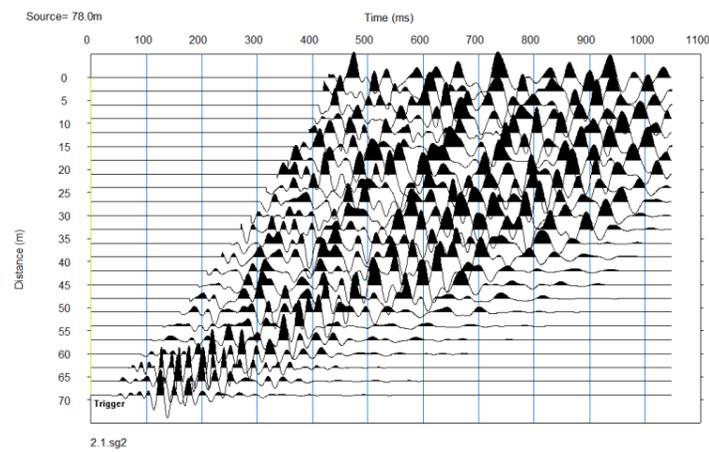
Curva de dispersión del perfil sísmico LS01-PETP

Modelado de la velocidad de onda de corte del perfil sísmico LS01-PETP

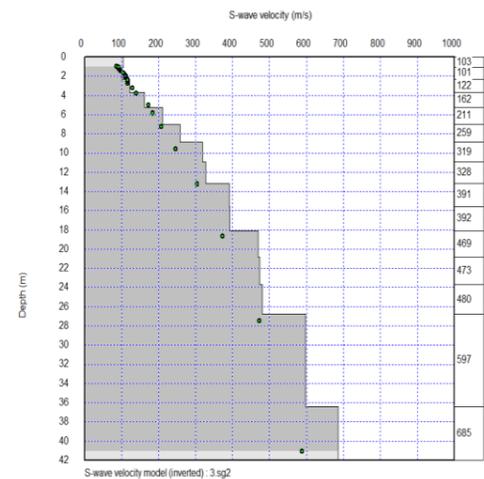
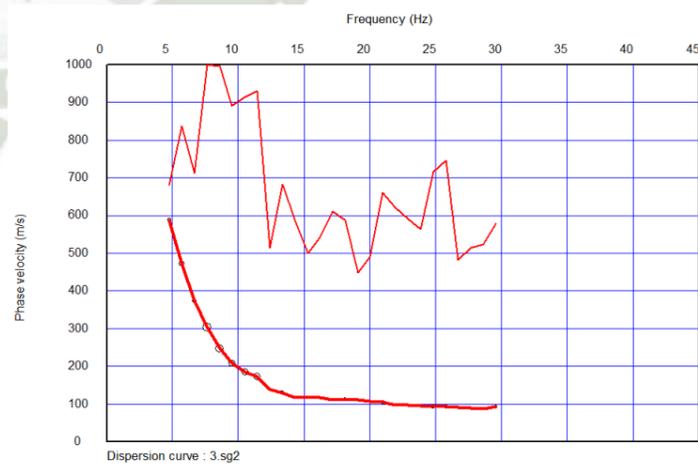
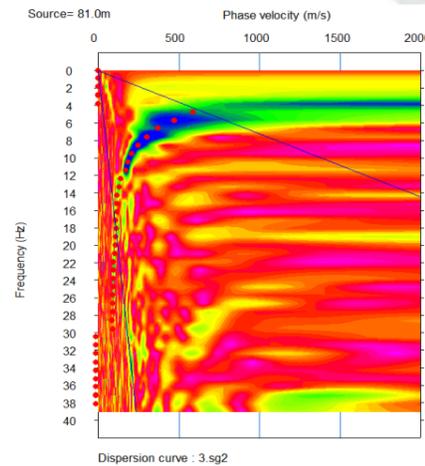
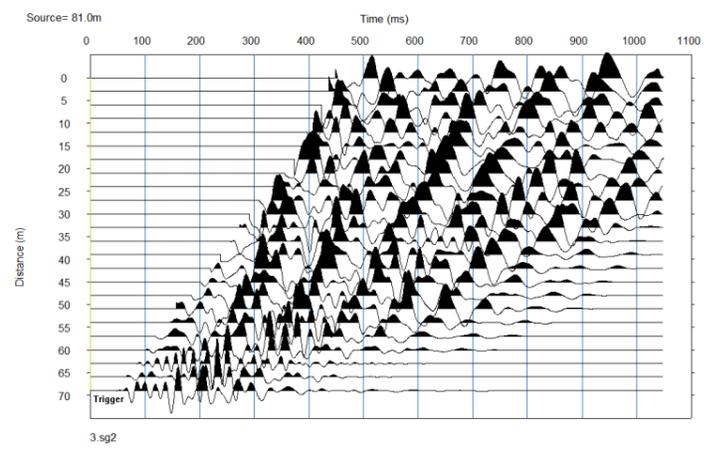
MASW LS06-PETP 75 m (10%)



MASW LS06-PETP 78 m (13%)



MASW LS06-PETP 81 m (17%)



Registros MASW de del tendido sísmico LS01-PETP

Curva de velocidad de fase-frecuencia del  
perfil sísmico LS01-PETP

Curva de dispersión del perfil sísmico LS01-PETP

Modelado de la velocidad de onda de corte del  
perfil sísmico LS01-PETP

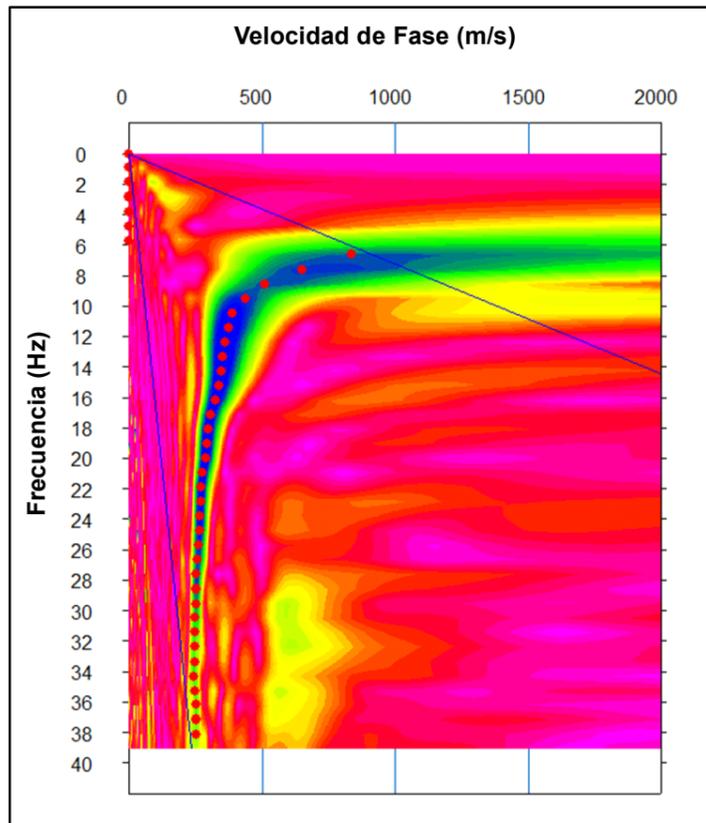


**Anexo 10:**  
**Perfiles MASW**

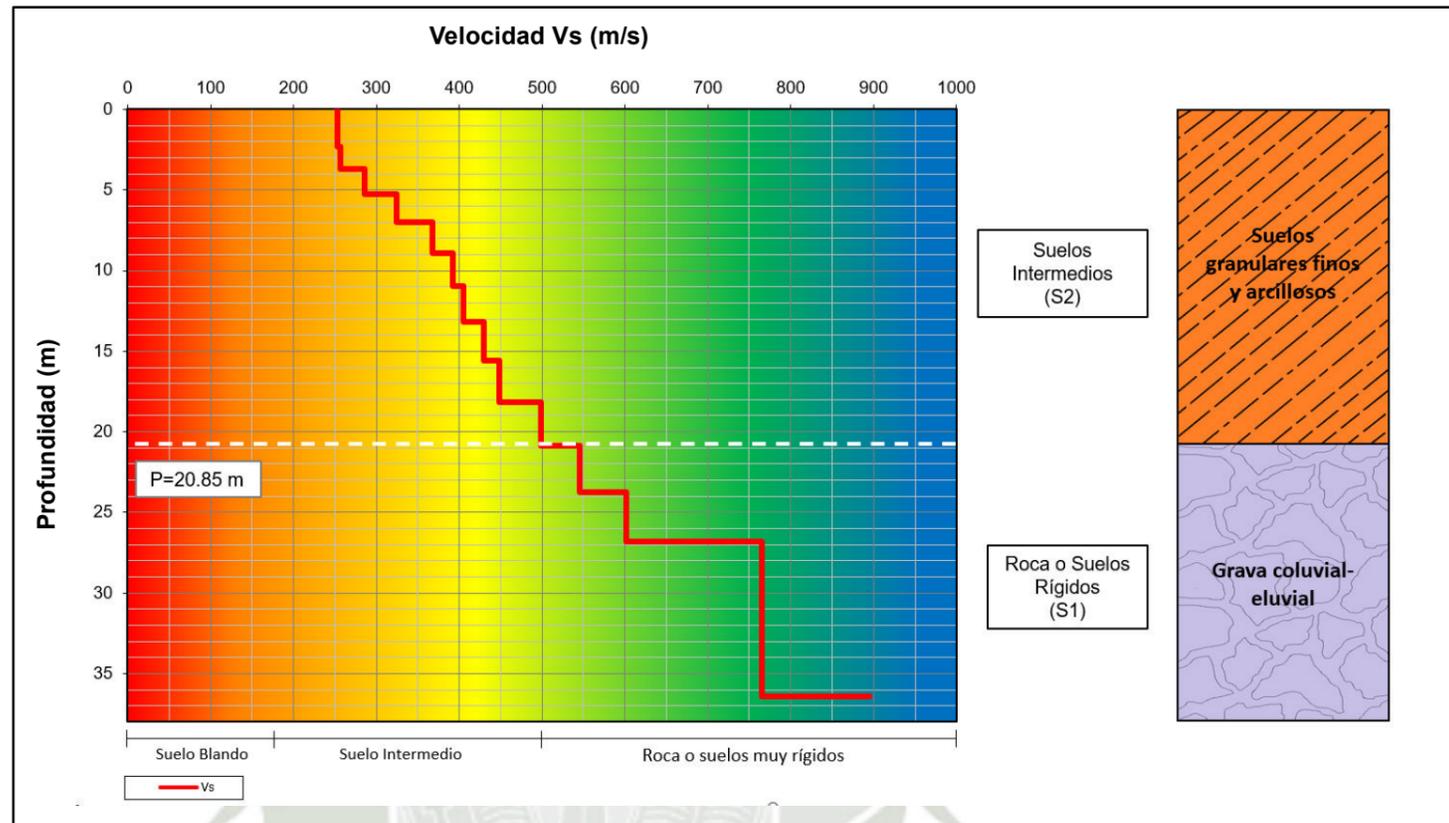
---

MASW-01

Curva de Dispersión

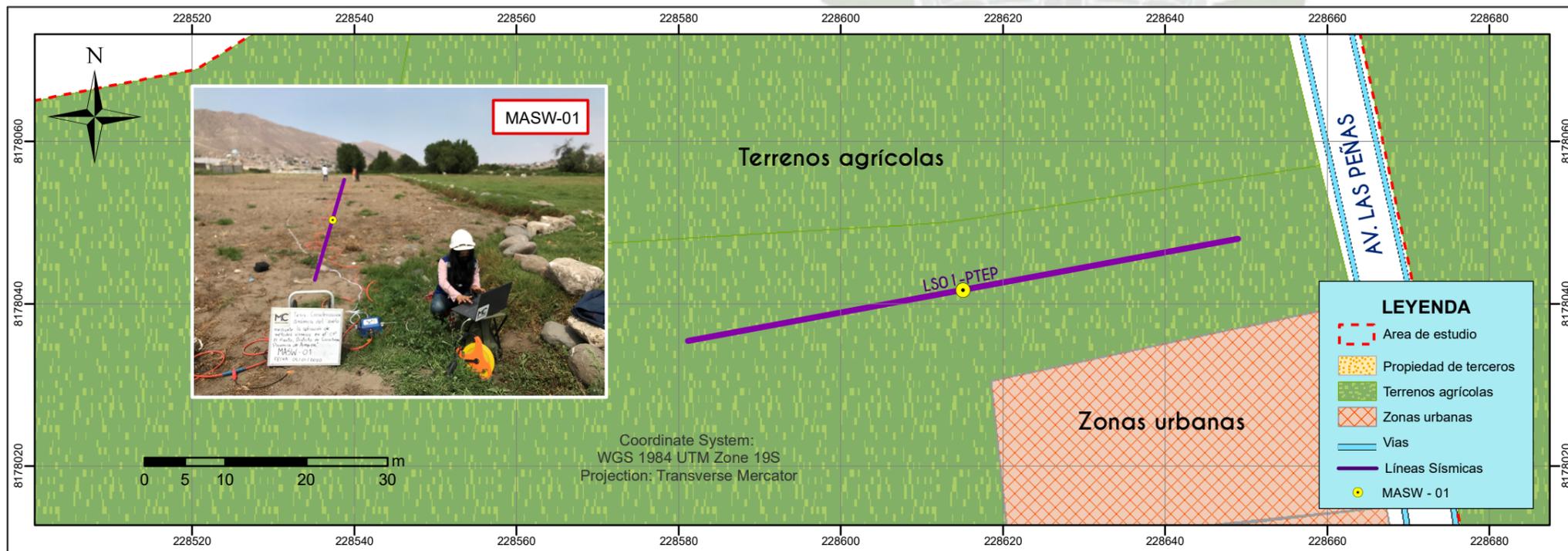


Modelo Unidimensional de Ondas de Corte



Cuadro Resumen

Depth(m)	Vs (m/s)
0	252.56
1.07	252.8
2.31	256.68
3.71	285.5
5.27	324.52
7.01	367.95
8.9	392.31
10.96	405.1
13.19	430.16
15.58	447.96
18.13	498.89
20.85	545.98
23.74	601.76
26.79	765.58
36.43	895.51



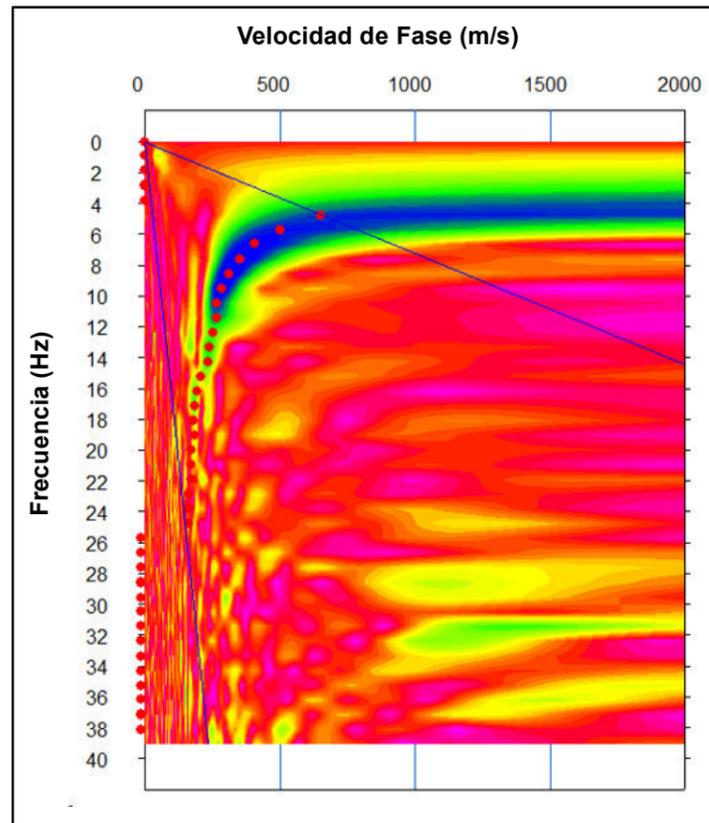
Resultados

Clase	Tipo de Suelo (Norma E-030)	Vs (m/s)	Espesor (m)
S2	Suelos Intermedios	252 – 498	20.85
S1	Roca o Suelos muy rígidos	> 545	15.58

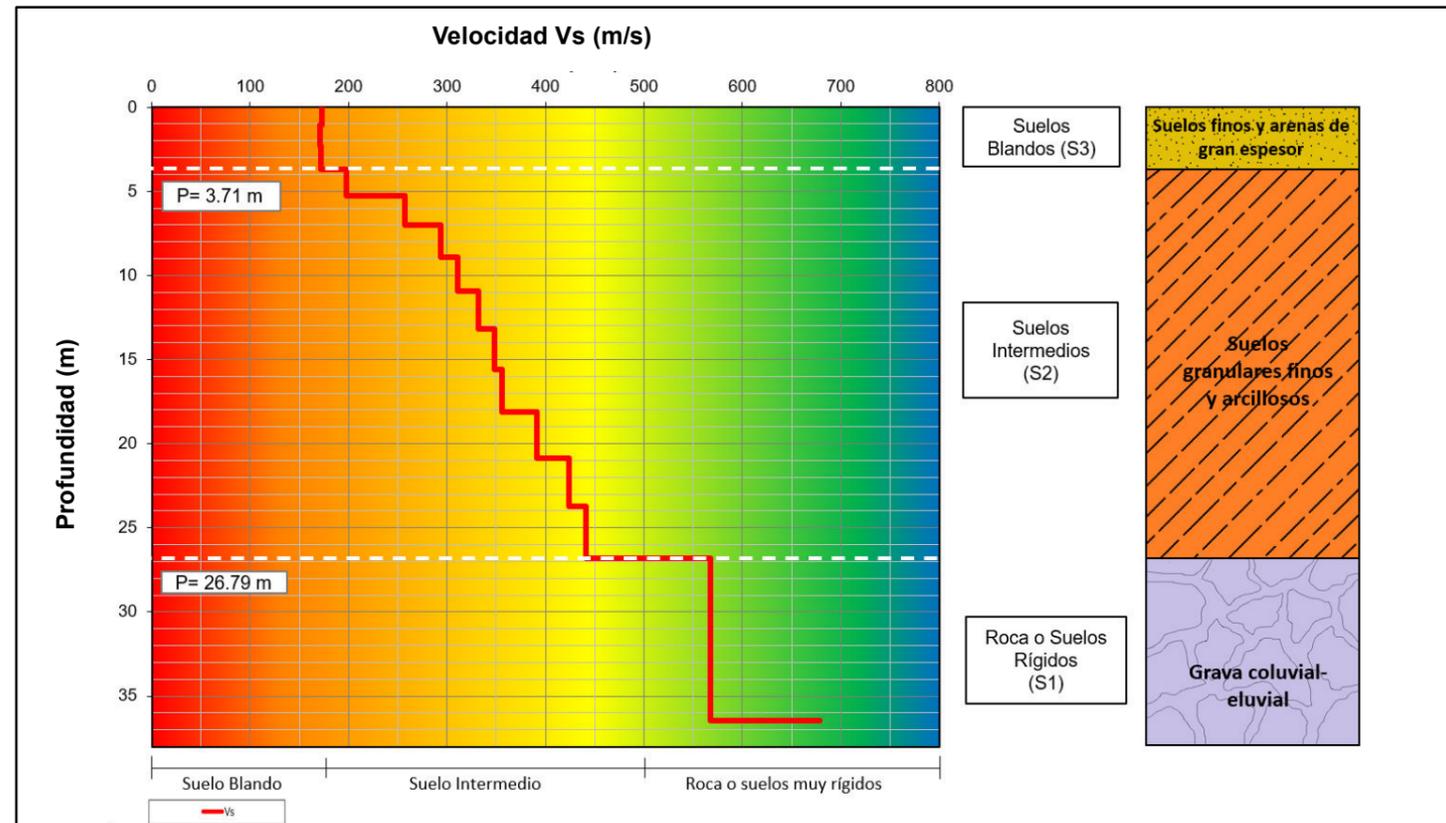
Clasificación	Tipo de Suelo (Norma E-030)	Vs (m/s)
Vs 30	Roca o suelos muy rígidos	766

MASW-02

Curva de Dispersión

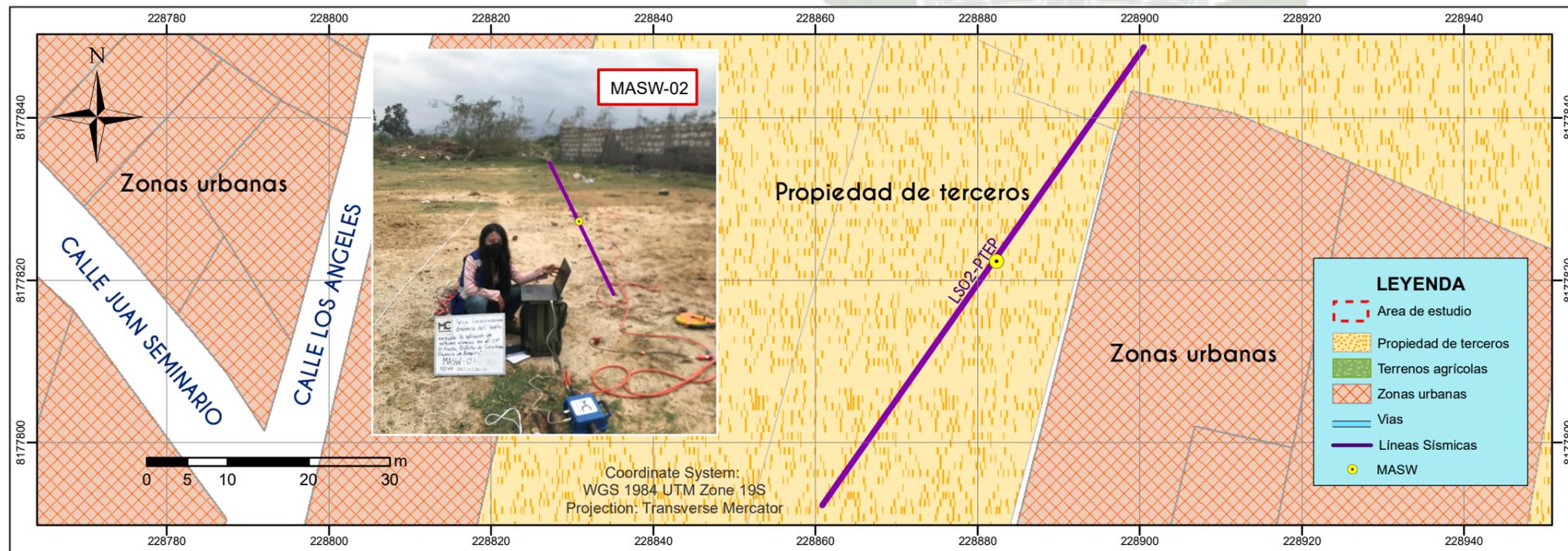


Modelo Unidimensional de Ondas de Corte



Cuadro Resumen

Depth(m)	Vs (m/s)
0	173.32
1.07	170.54
2.31	172.06
3.71	197.85
5.27	256.75
7.01	293.45
8.9	310.96
10.96	331.44
13.19	348.01
15.58	355.62
18.13	391.15
20.85	424.12
23.74	441.09
26.79	567.96
36.43	678.83



Resultados

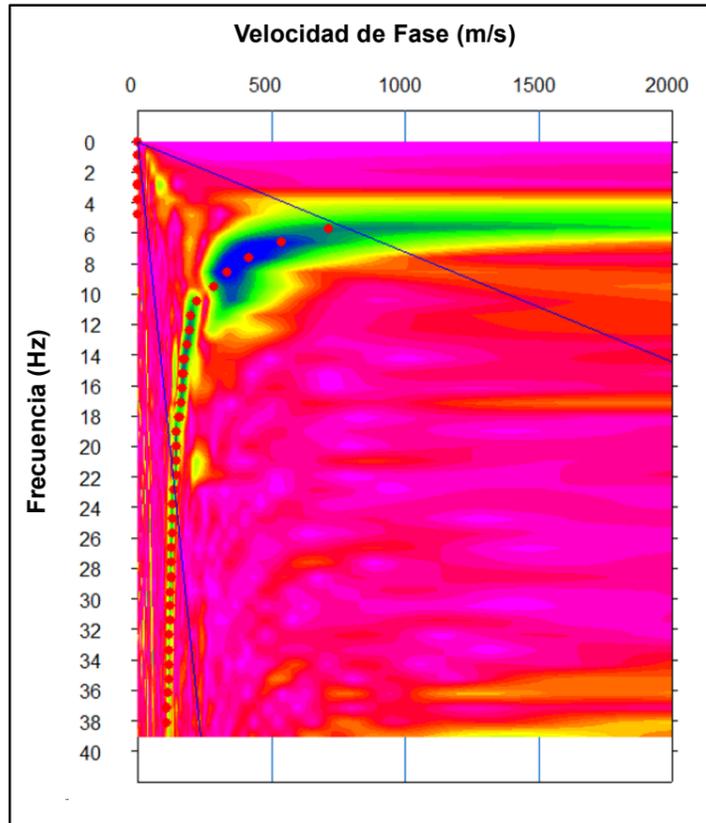
Clase	Tipo de Suelo (Norma E-030)	Vs (m/s)	Espesor (m)
S3	Suelos Blandos	170 – 173	3.71
S2	Suelos Intermedios	197 – 441	23.08
S1	Roca o Suelos muy rígidos	> 568	9.64

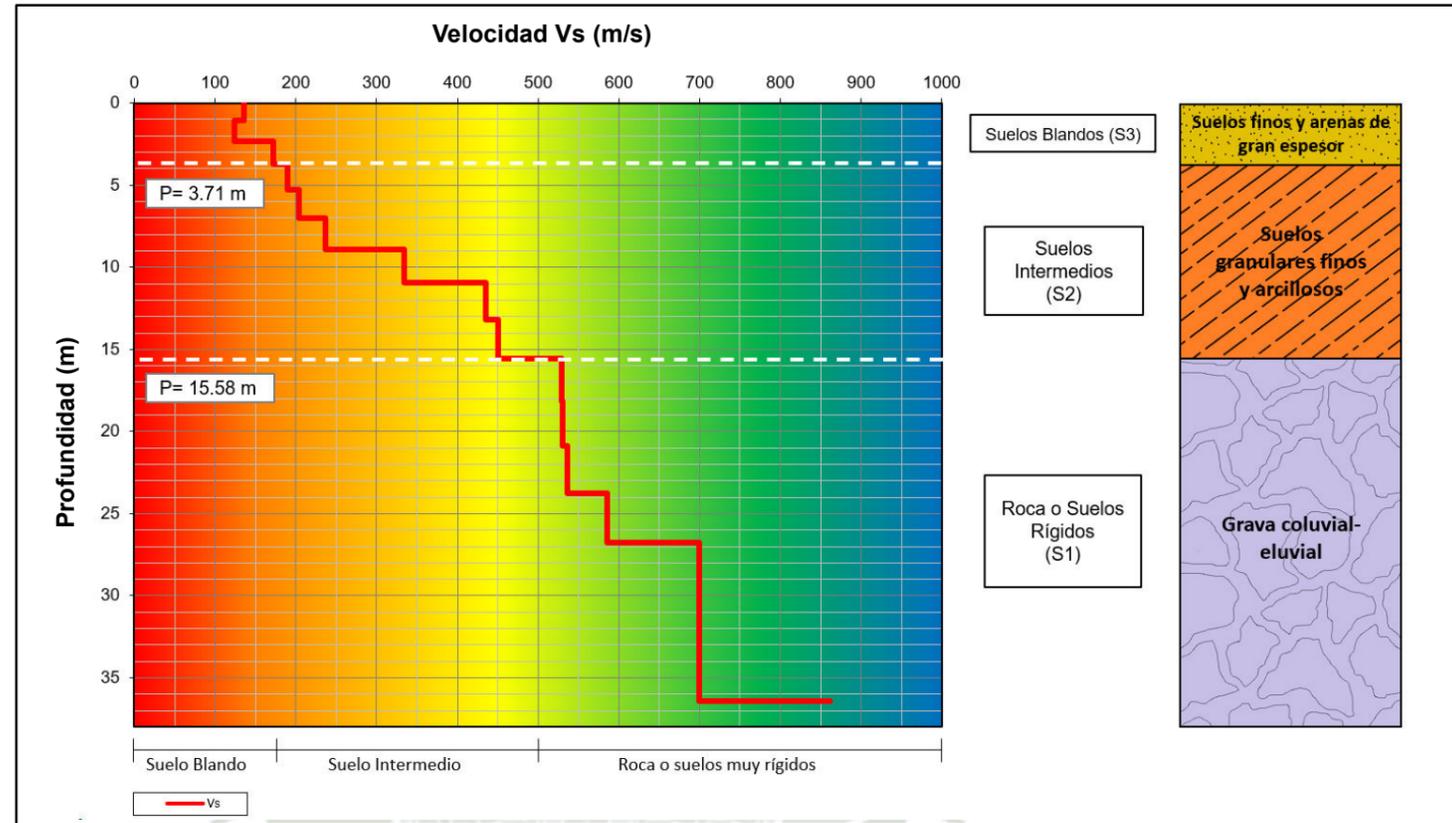
Clasificación	Tipo de Suelo (Norma E-030)	Vs (m/s)
Vs 30	Suelos intermedios	313

MASW-03

Curva de Dispersión

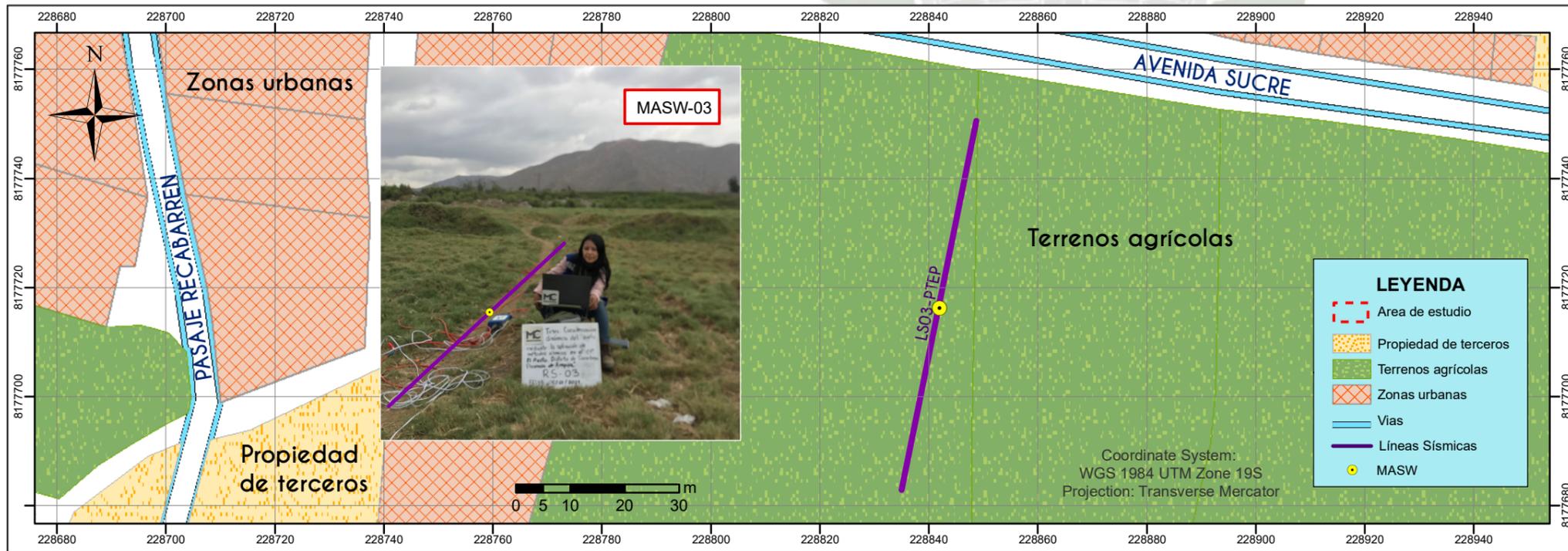


Modelo Unidimensional de Ondas de Corte



Cuadro Resumen

Depth(m)	Vs (m/s)
0	135.53
1.07	124.4
2.31	171.79
3.71	189.24
5.27	204.02
7.01	236.67
8.9	334.1
10.96	434.96
13.19	450.69
15.58	528.9
18.13	530.07
20.85	536.29
23.74	585.96
26.79	699.68
36.43	861.61



Resultados

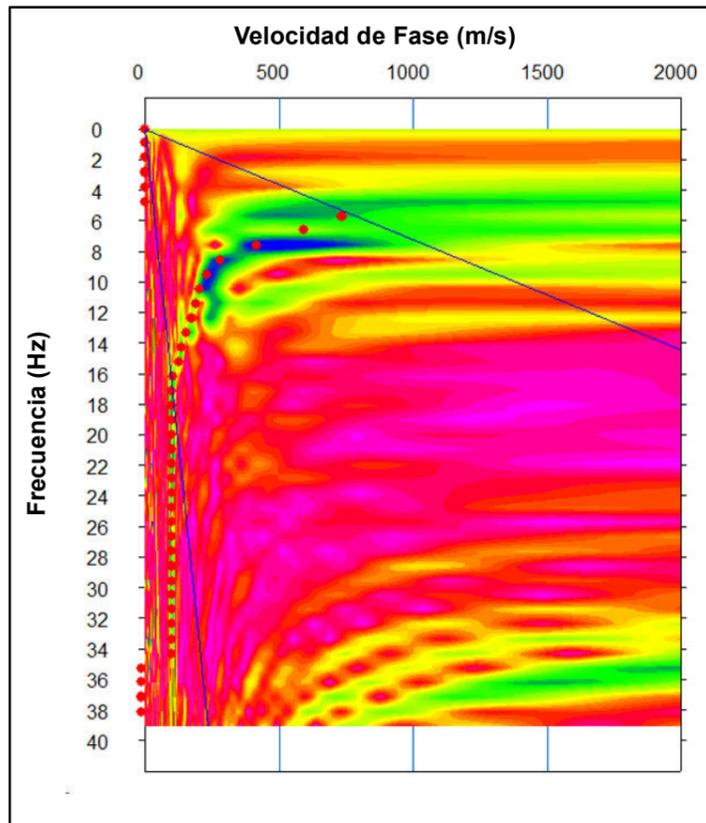
Clase	Tipo de Suelo (Norma E-030)	Vs (m/s)	Espesor (m)
S3	Suelos Blandos	124 – 172	3.71
S2	Suelos Intermedios	189 – 451	11.87
S1	Roca o Suelos muy rígidos	> 529	20.85

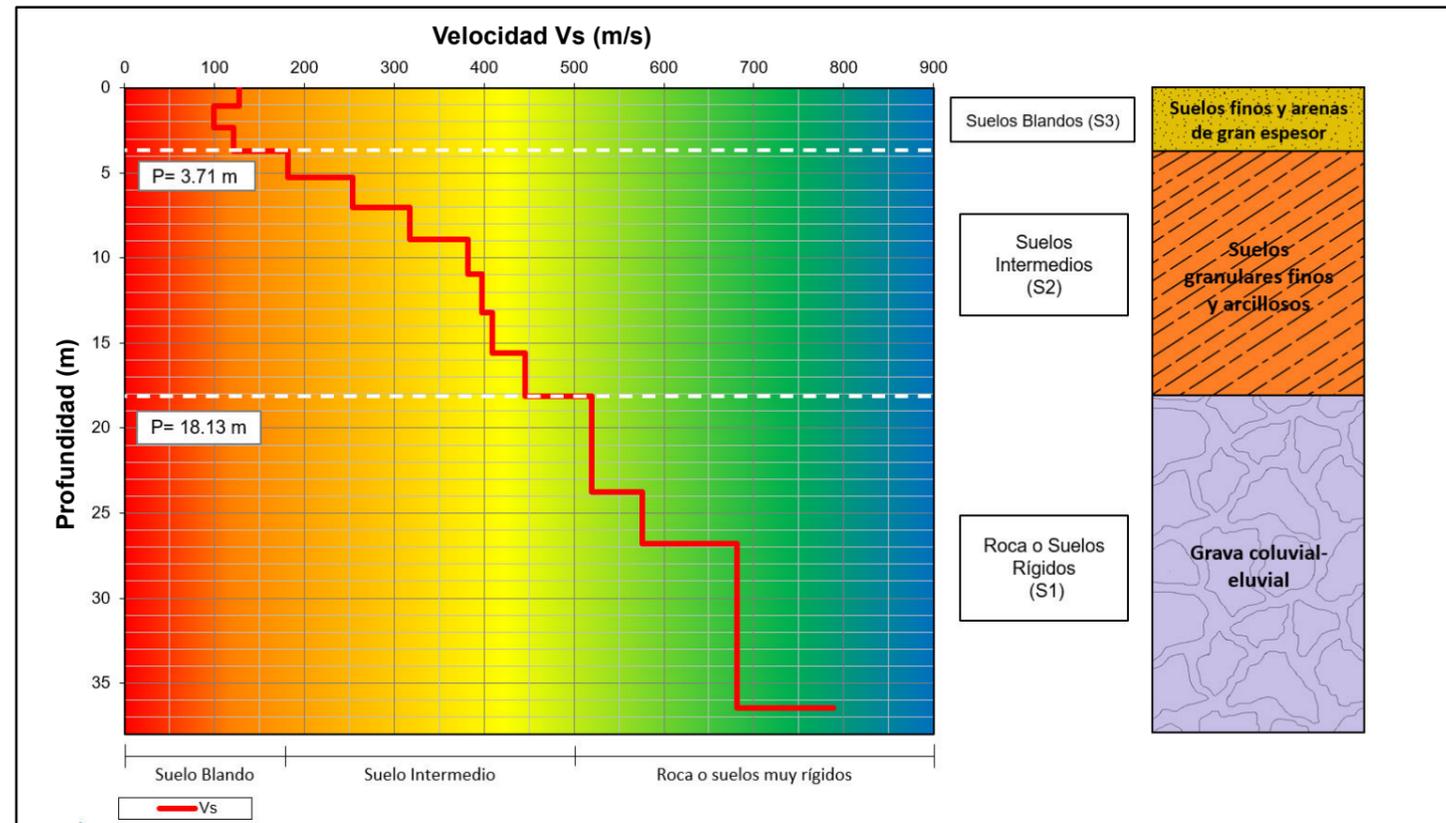
Clasificación	Tipo de Suelo (Norma E-030)	Vs (m/s)
Vs 30	Suelos intermedios	326

MASW-04

Curva de Dispersión

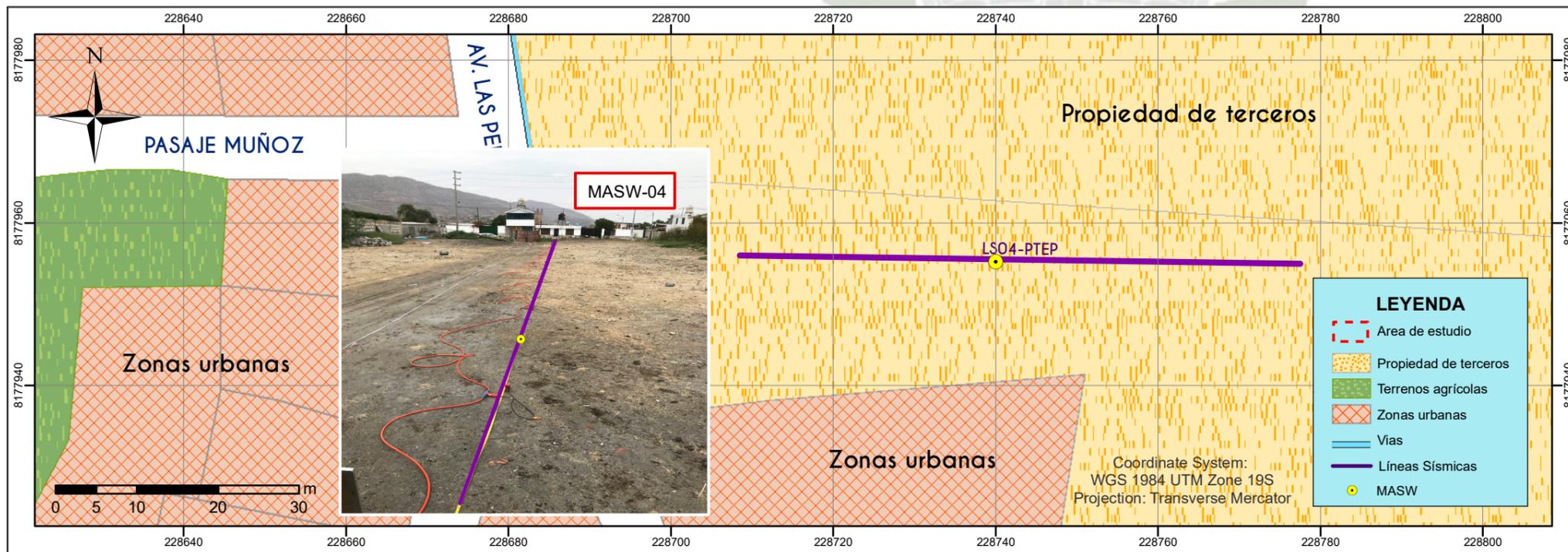


Modelo Unidimensional de Ondas de Corte



Cuadro Resumen

Depth(m)	Vs (m/s)
0	127.06
1.07	98.89
2.31	121.2
3.71	181.61
5.27	254.08
7.01	317.55
8.9	382
10.96	397.71
13.19	408.91
15.58	445.94
18.13	519.82
20.85	519.75
23.74	576
26.79	681.2
36.43	788.41



Resultados

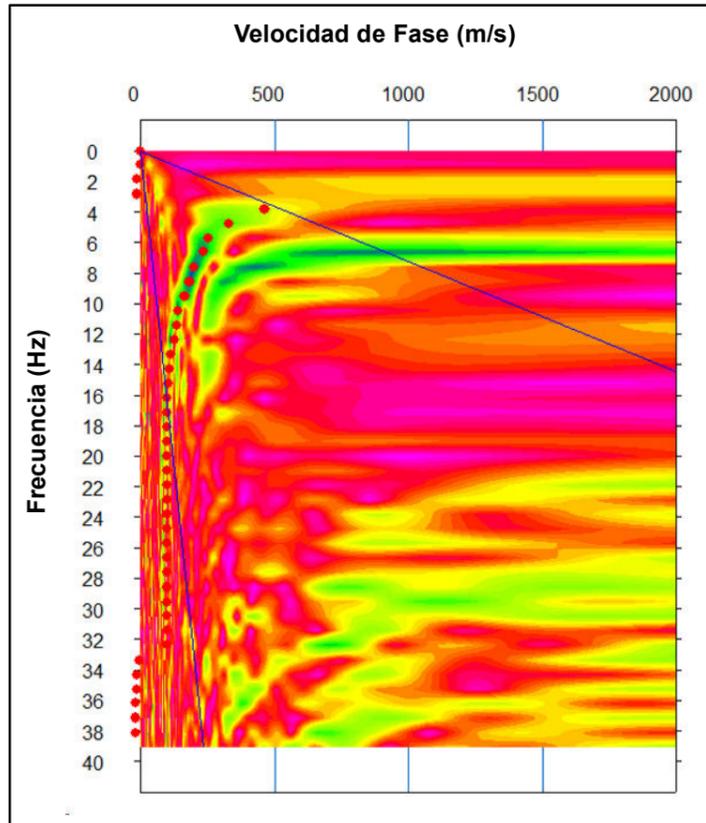
Clase	Tipo de Suelo (Norma E-030)	Vs (m/s)	Espesor (m)
S3	Suelos Blandos	99 – 127	3.71
S2	Suelos Intermedios	181 – 446	14.42
S1	Roca o Suelos muy rígidos	> 520	18.3

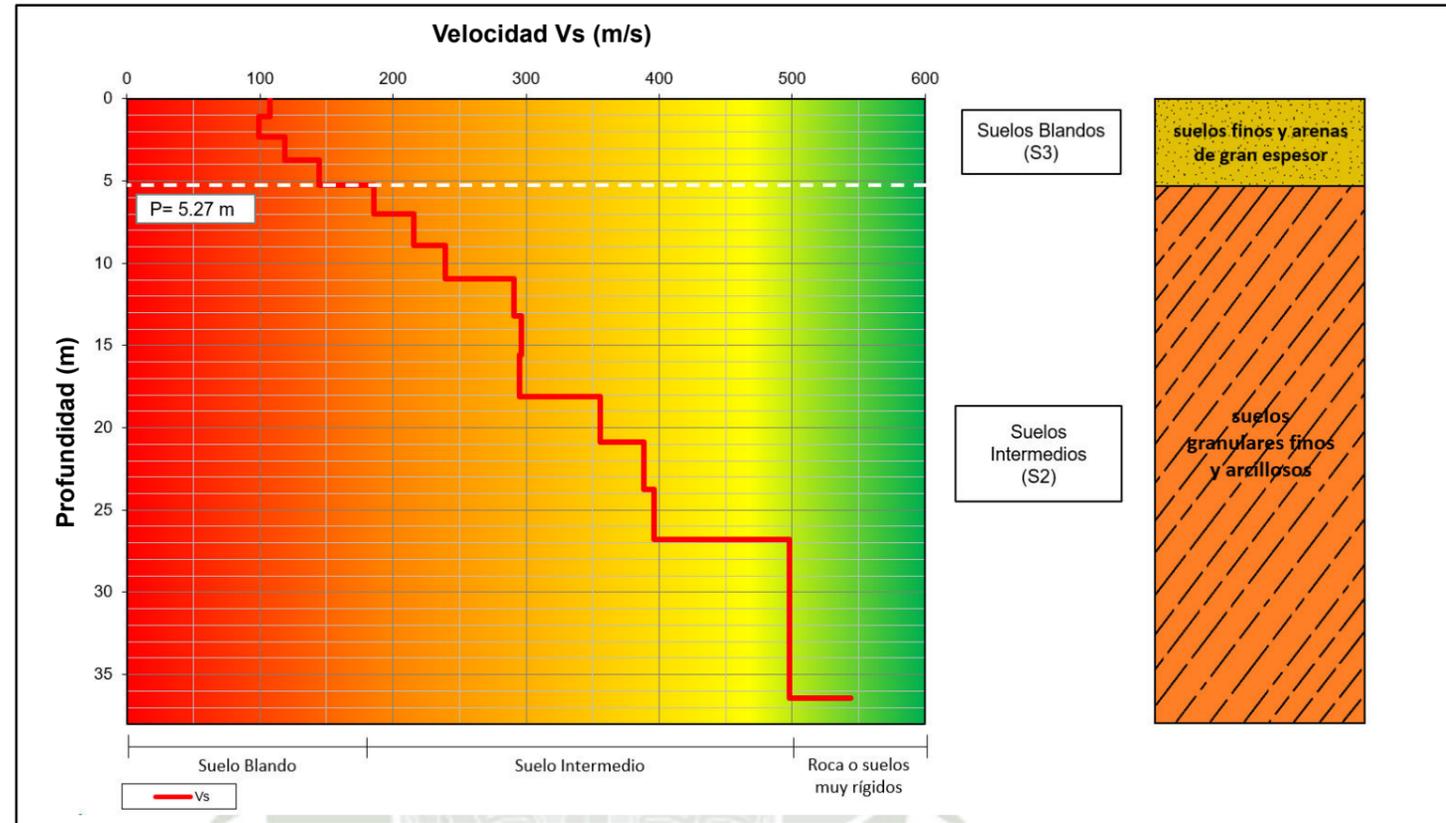
Clasificación	Tipo de Suelo (Norma E-030)	Vs (m/s)
Vs 30	Suelos intermedios	309

MASW-05

Curva de Dispersión

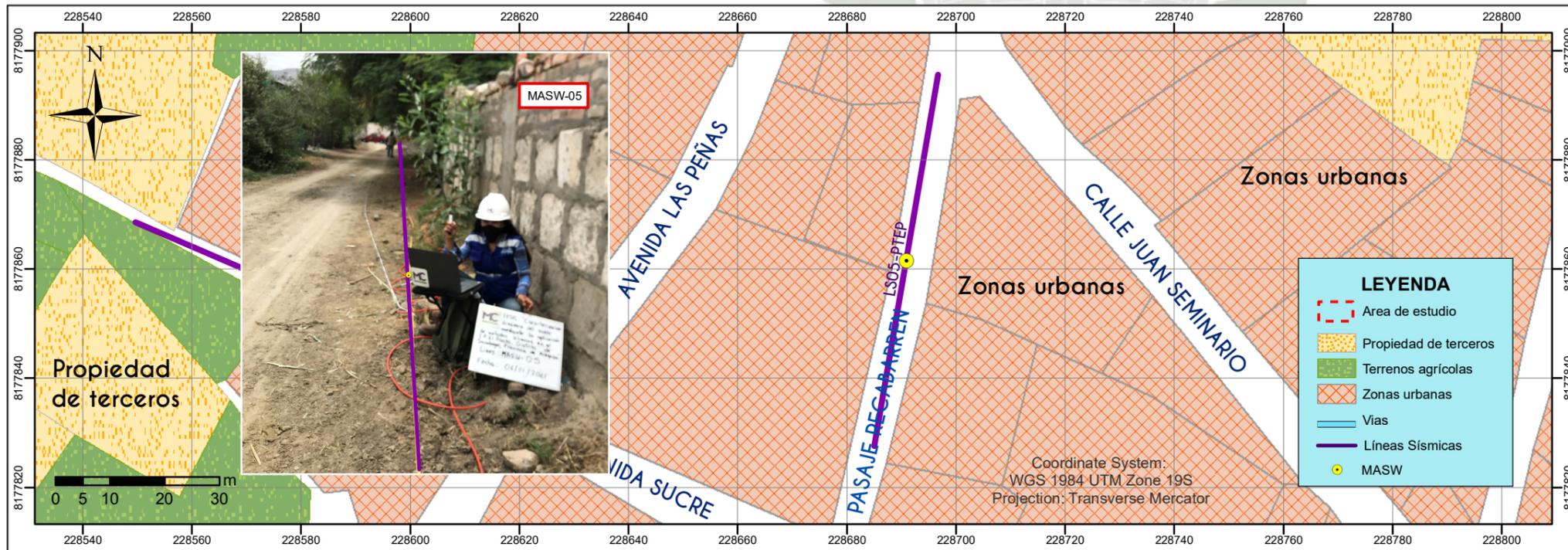


Modelo Unidimensional de Ondas de Corte



Cuadro Resumen

Depth(m)	Vs (m/s)
0	107.37
1.07	98.84
2.31	118.55
3.71	144.75
5.27	185.86
7.01	215.54
8.9	239.06
10.96	291.11
13.19	296.48
15.58	295.29
18.13	355.67
20.85	388.69
23.74	396.05
26.79	497.96
36.43	543.95



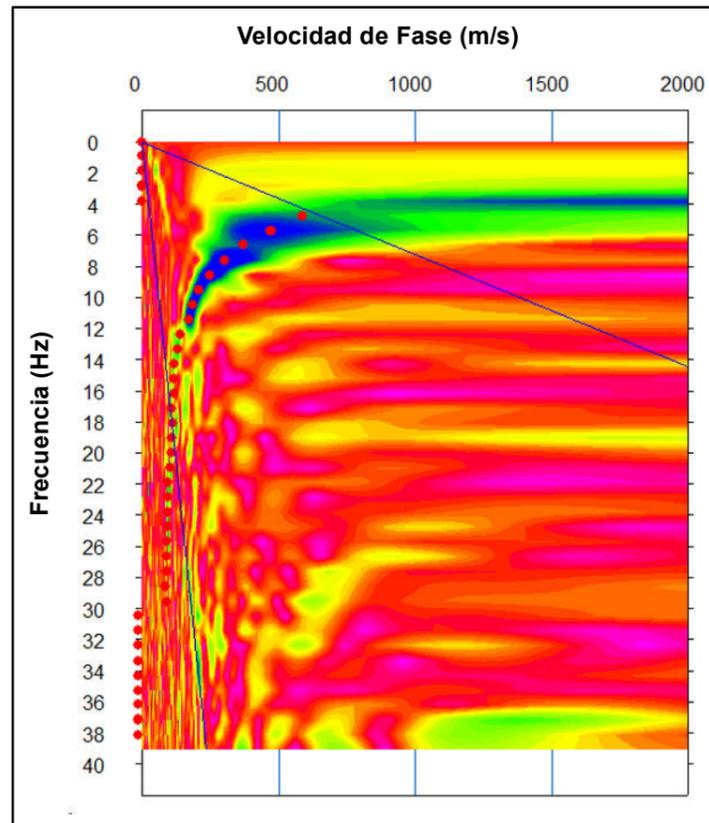
Resultados

Clase	Tipo de Suelo (Norma E-030)	Vs (m/s)	Espesor (m)
S2	Suelos Intermedios	99 – 145	5.27
S1	Roca o Suelos muy rígidos	185 – 498	31.16

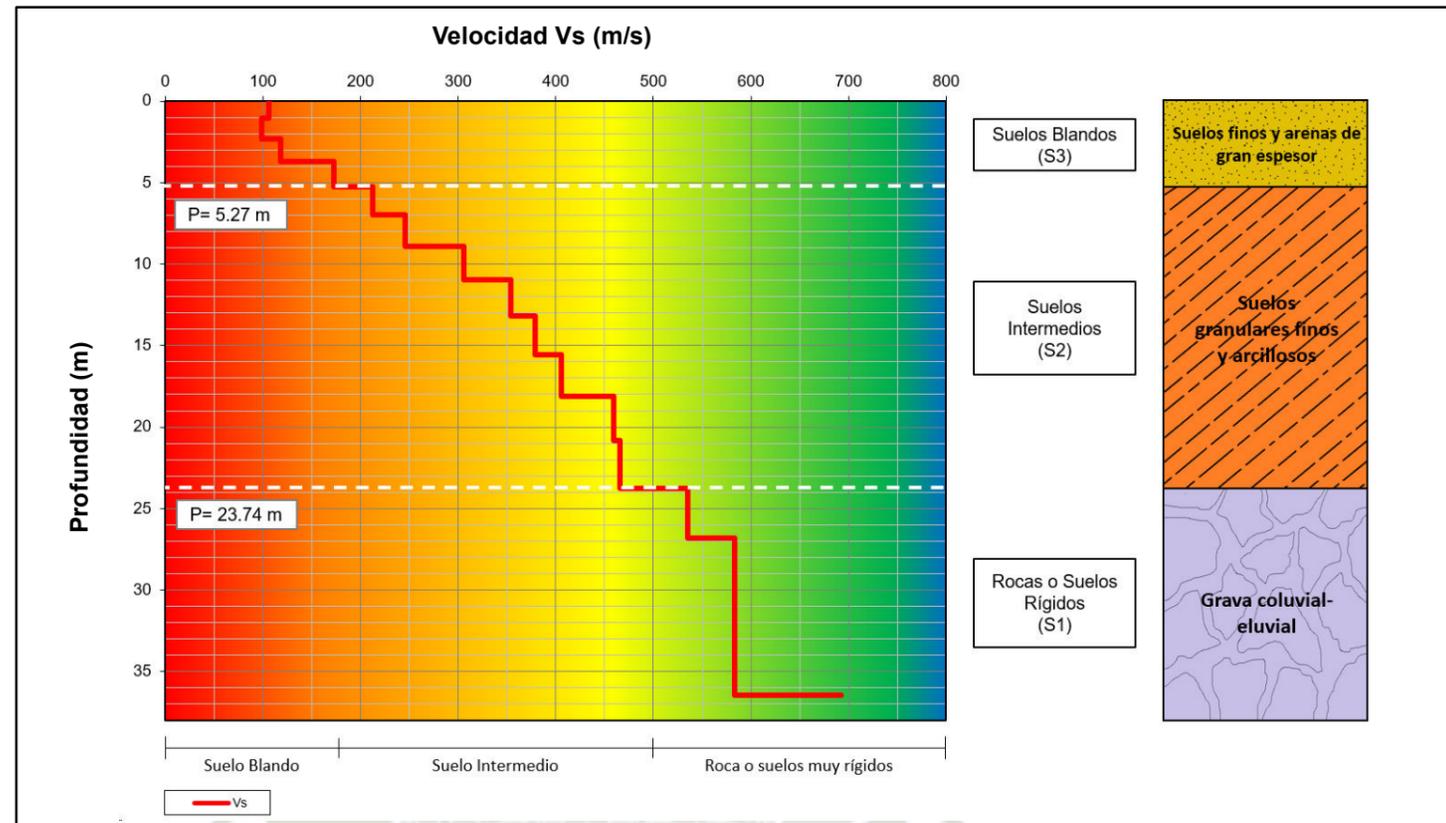
Clasificación	Tipo de Suelo (Norma E-030)	Vs (m/s)
Vs 30	Suelos intermedios	239

MASW-06

Curva de Dispersión

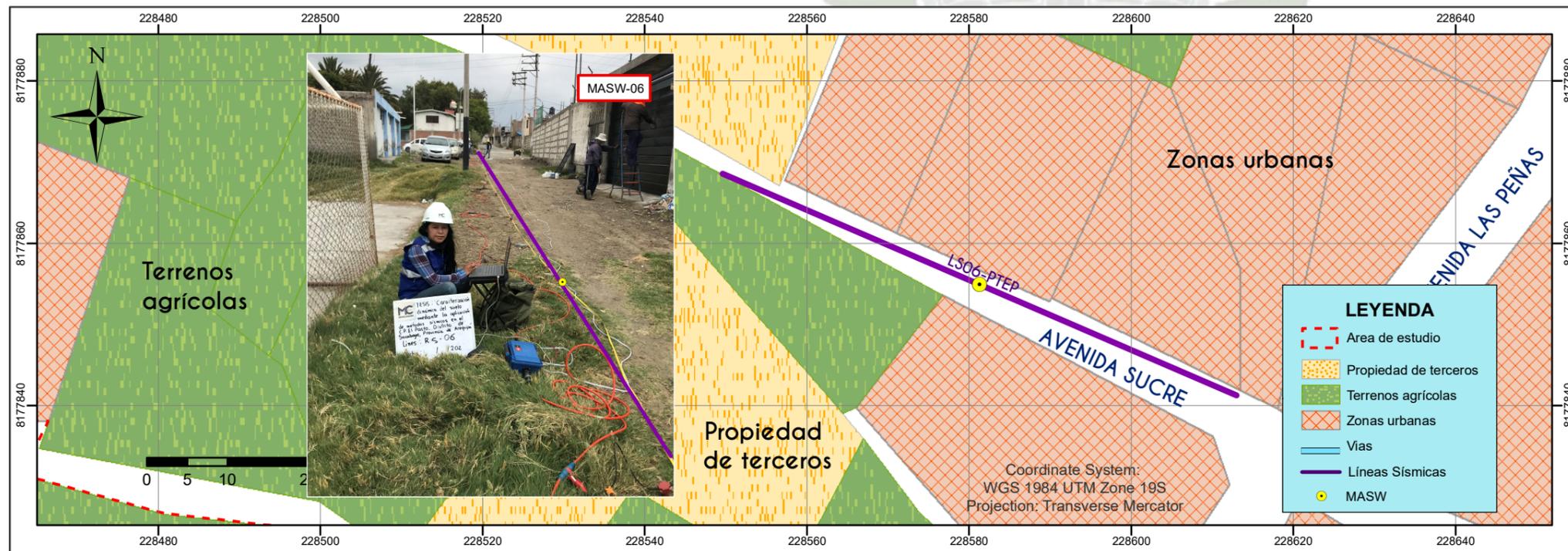


Modelo Unidimensional de Ondas de Corte



Cuadro Resumen

Depth(m)	Vs (m/s)
0	105.76
1.07	99.07
2.31	118.23
3.71	172.67
5.27	211.97
7.01	245.86
8.9	305.56
10.96	354.25
13.19	378.91
15.58	405.48
18.13	458.96
20.85	465.76
23.74	534.84
26.79	583.5
36.43	692.02



Resultados

Clase	Tipo de Suelo (Norma E-030)	Vs (m/s)	Espesor (m)
S3	Suelos Blandos	99 – 173	5.27
S2	Suelos Intermedios	211 – 465	18.47
S1	Roca o Suelos muy rígidos	> 534	12.69

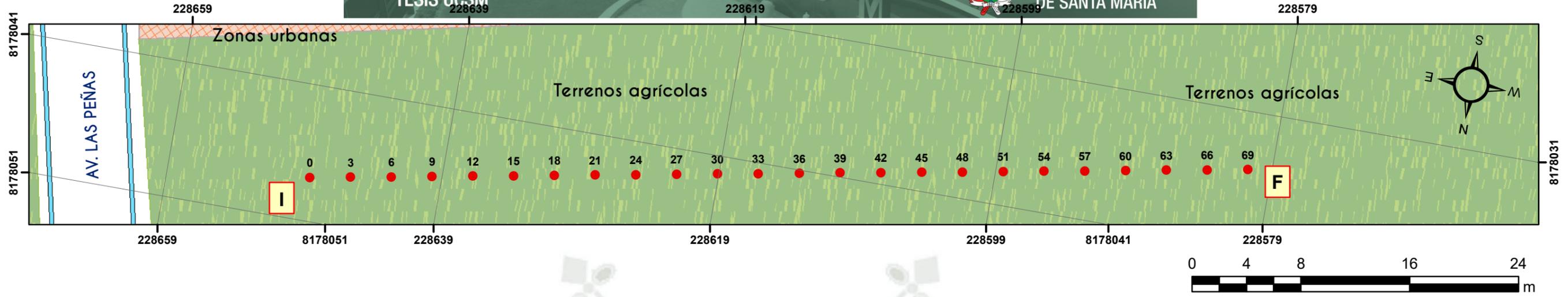
  

Clasificación	Tipo de Suelo (Norma E-030)	Vs (m/s)
Vs 30	Suelos intermedios	279

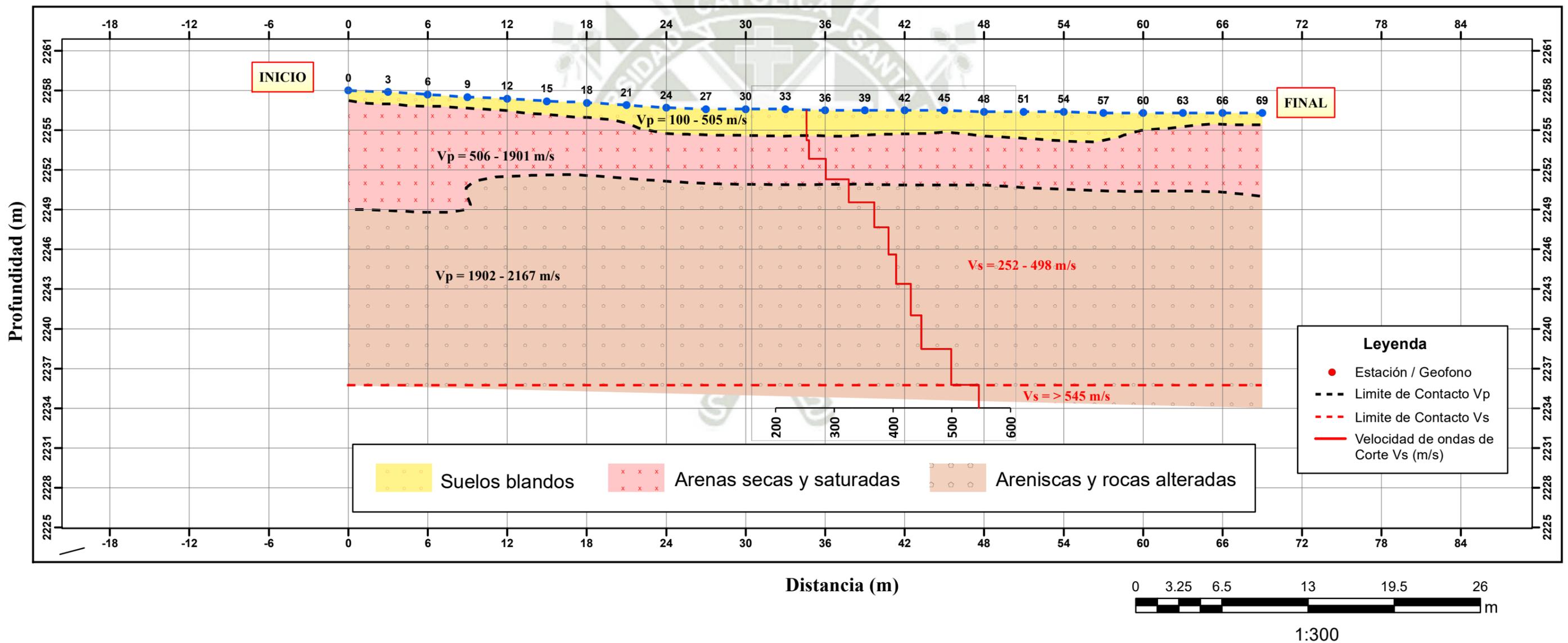


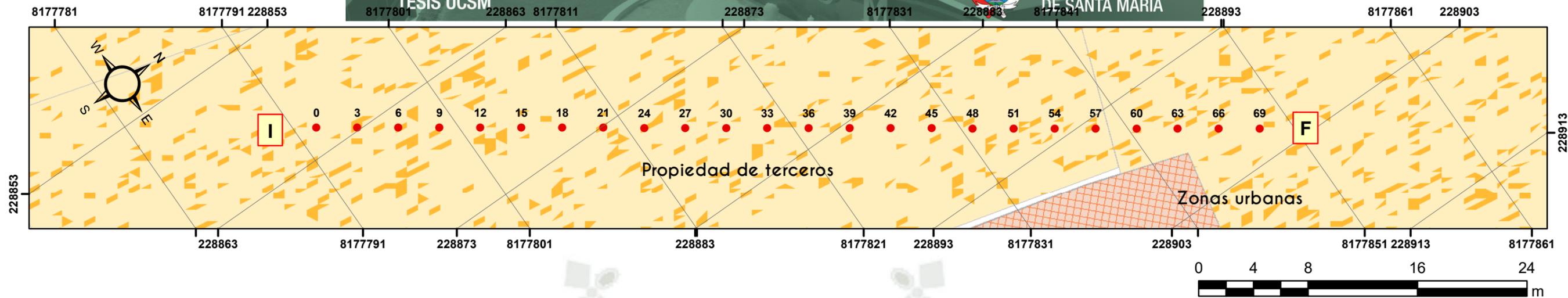
**Anexo 11:**  
**Correlación de velocidades  $V_p$  y  $V_s$**

---



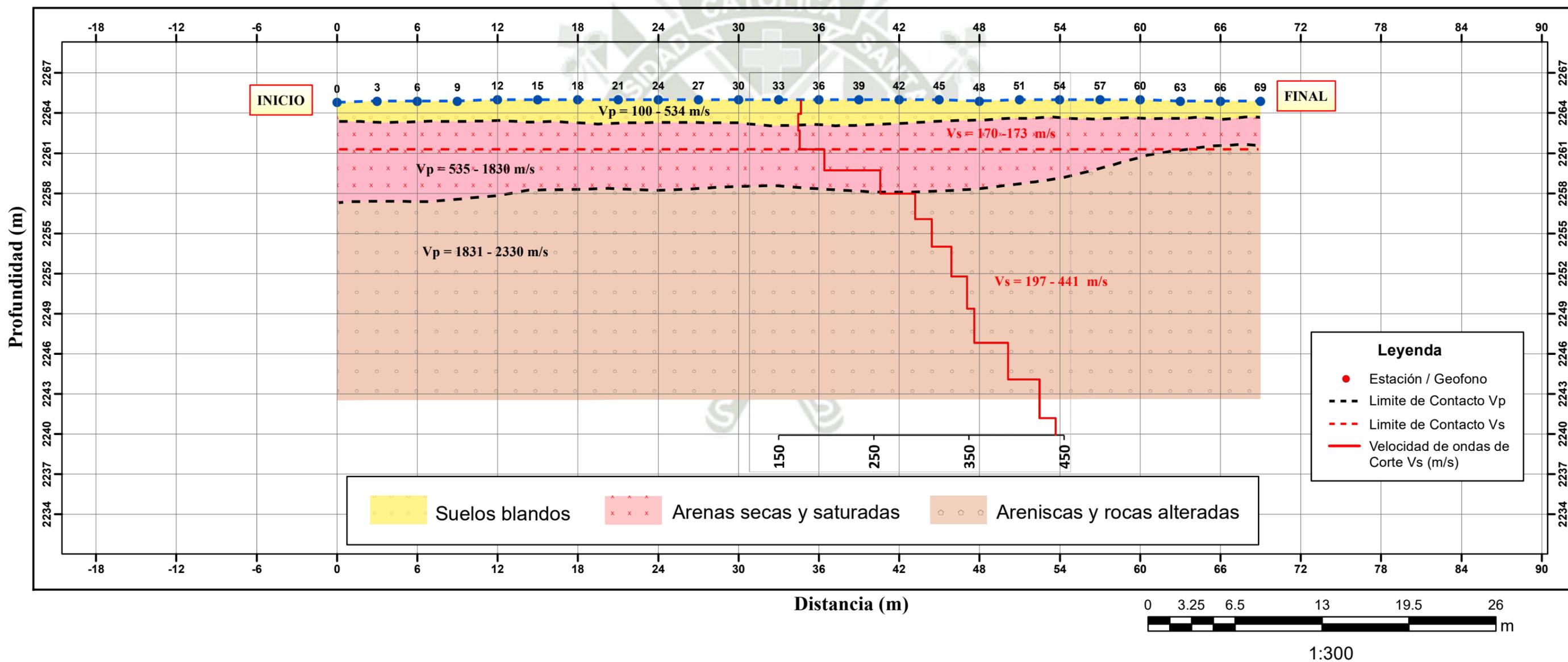
MODELO DE SECCIÓN DE VELOCIDAD Vp - Vs DE LA LÍNEA- 01

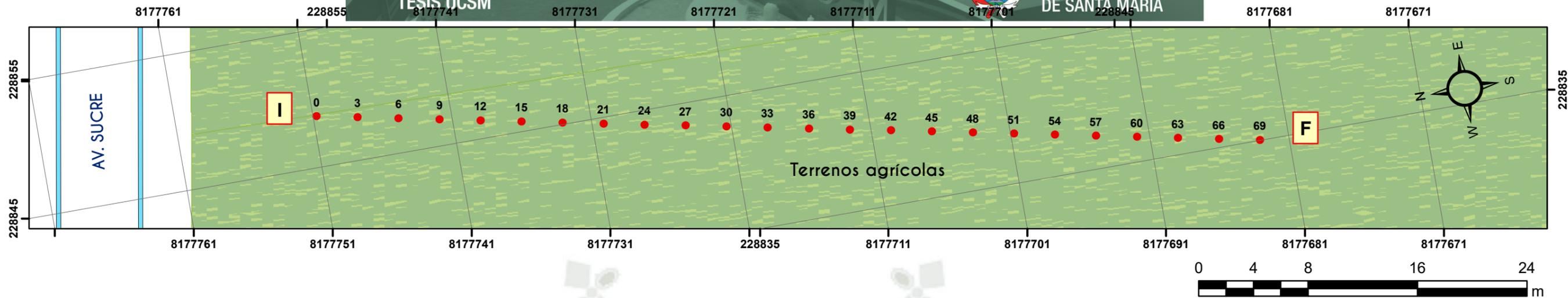




MODELO DE SECCIÓN DE VELOCIDAD Vp - Vs DE LA LÍNEA- 02

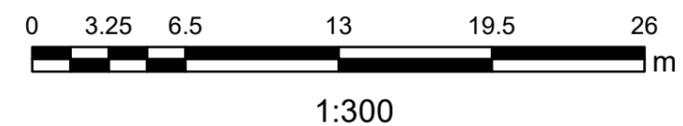
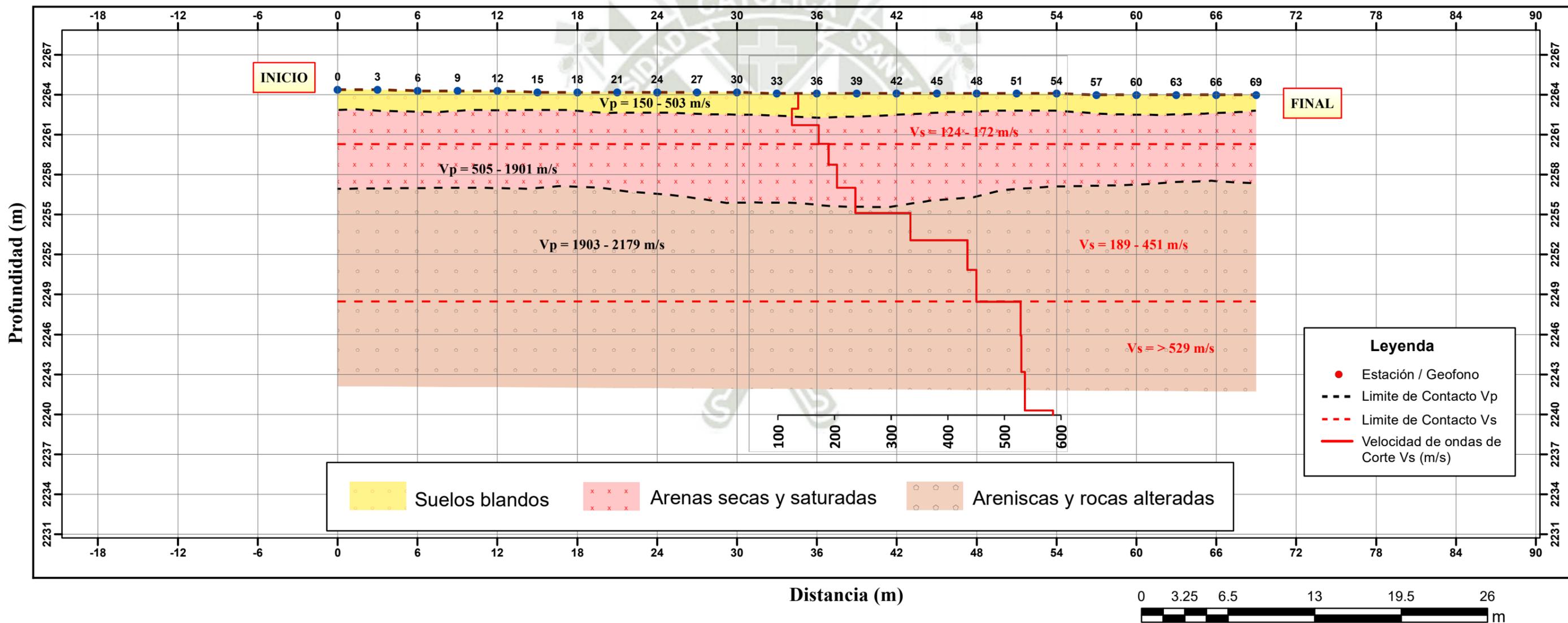
1:300

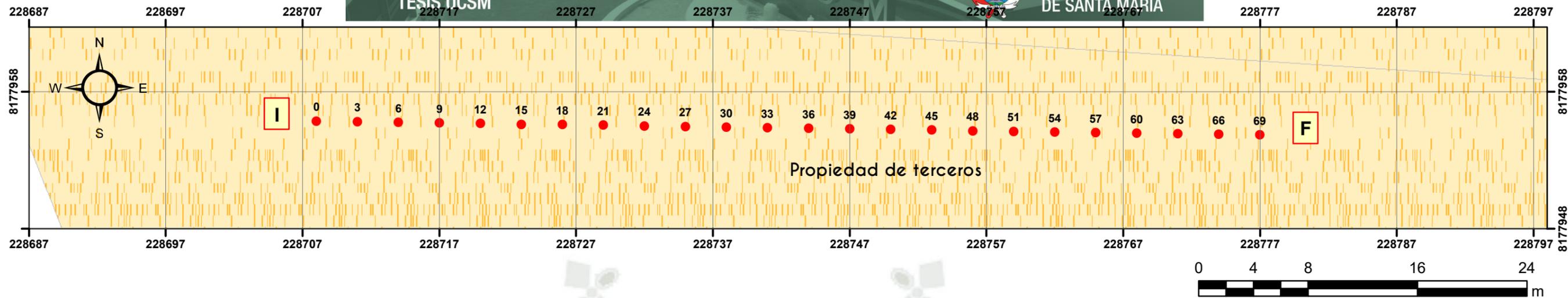




MODELO DE SECCIÓN DE VELOCIDAD  $V_p$  -  $V_s$  DE LA LÍNEA- 03

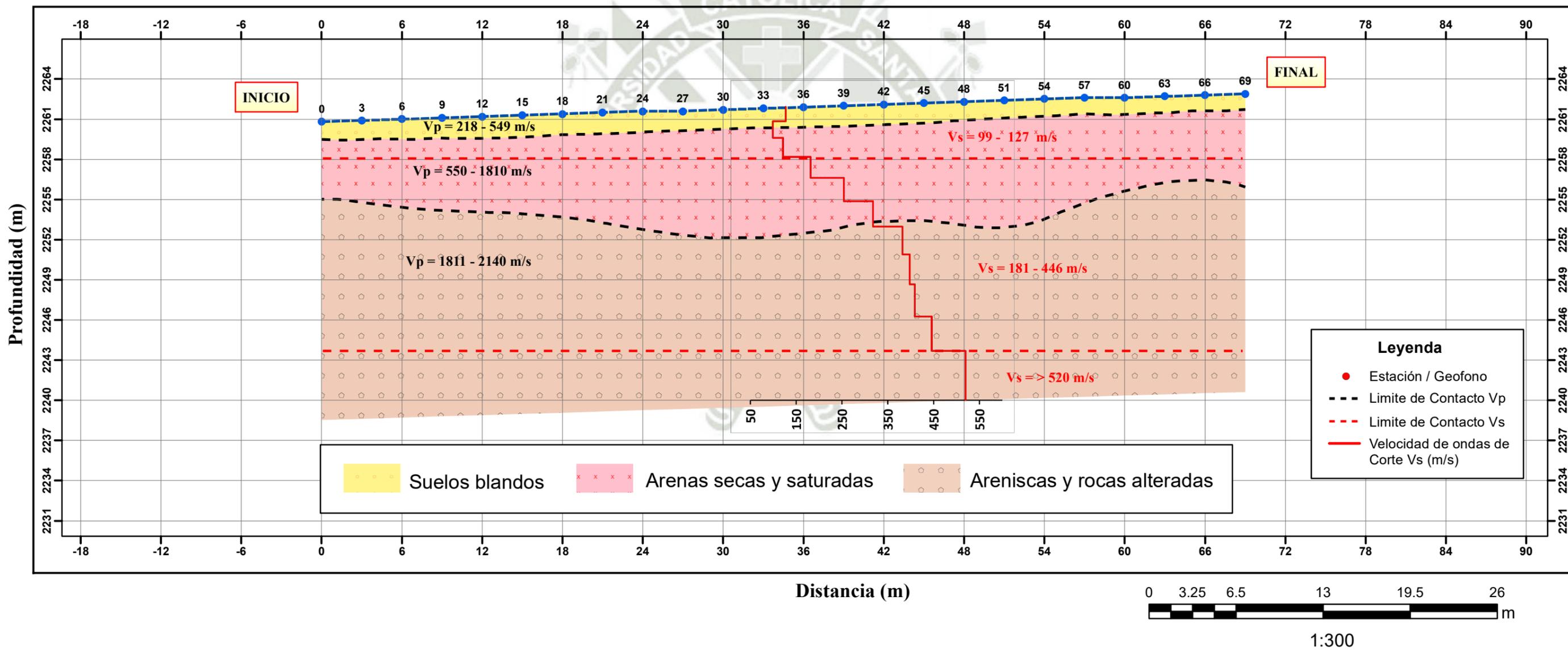
1:300

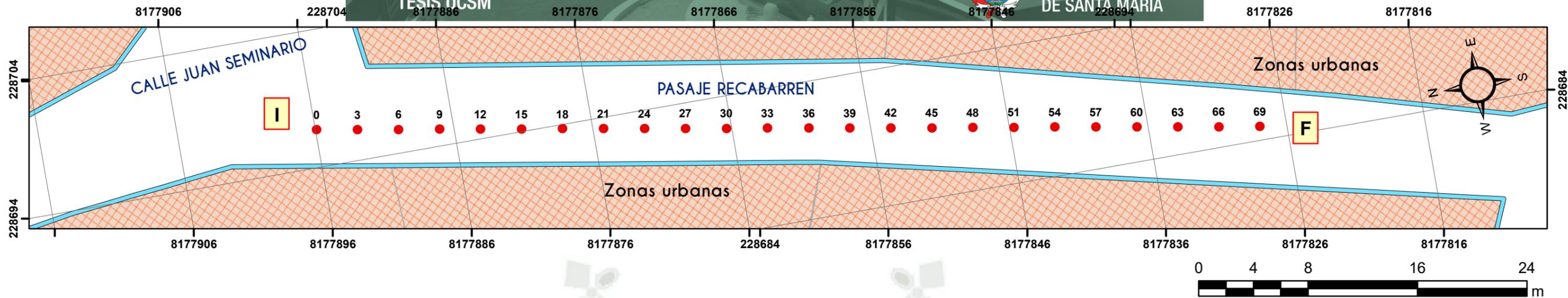




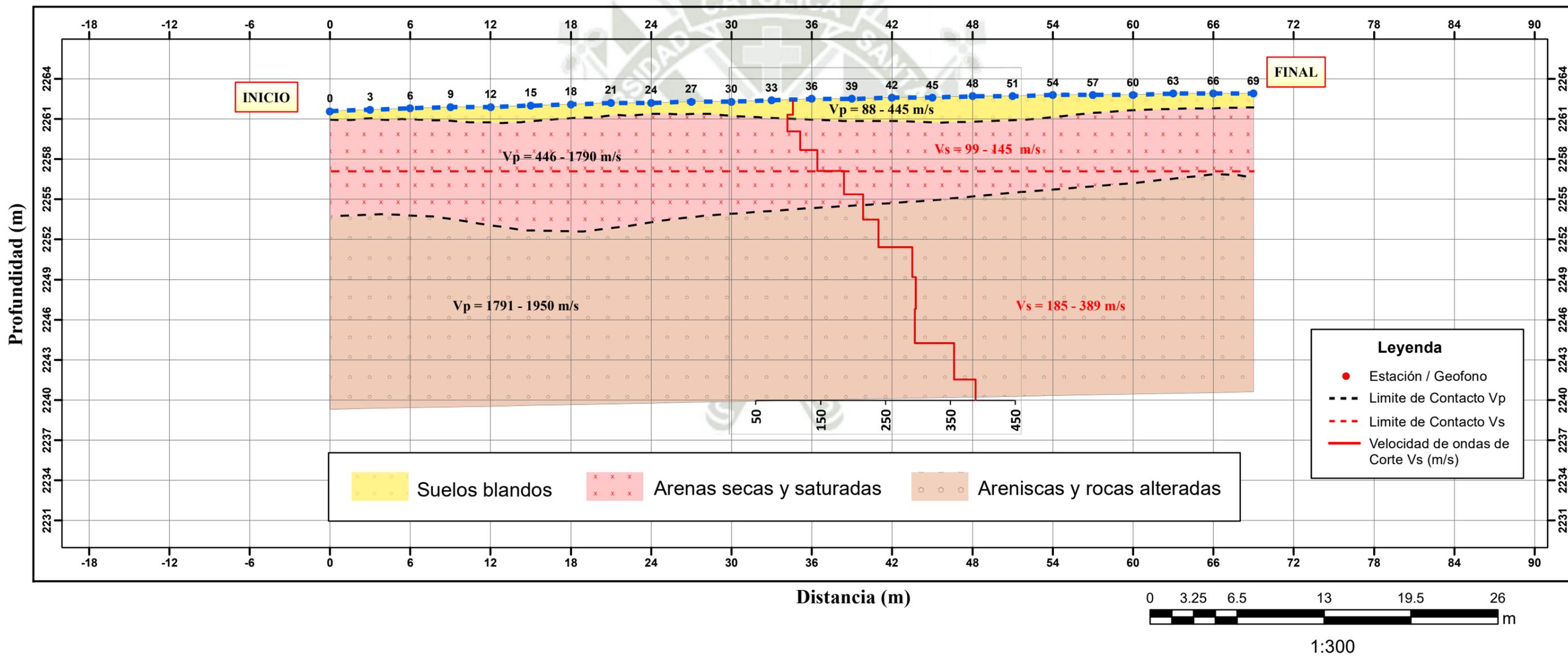
**MODELO DE SECCIÓN DE VELOCIDAD Vp - Vs DE LA LÍNEA- 04**

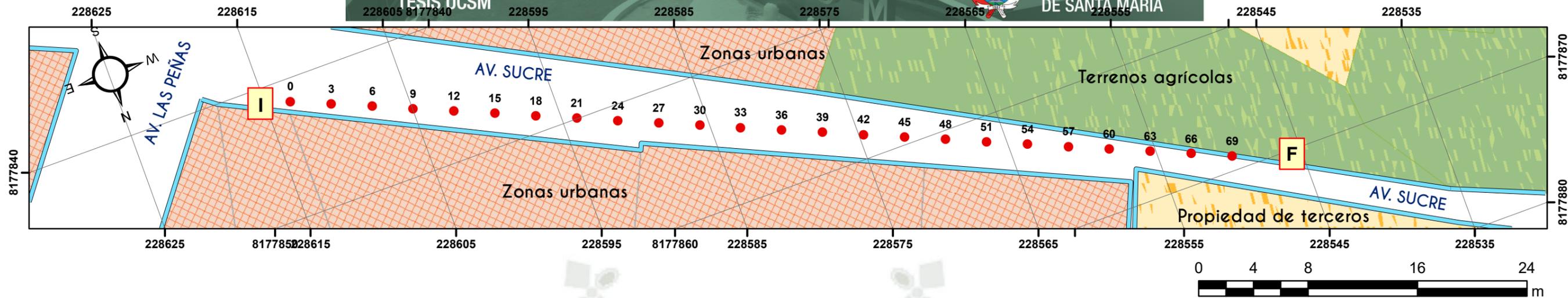
1:300





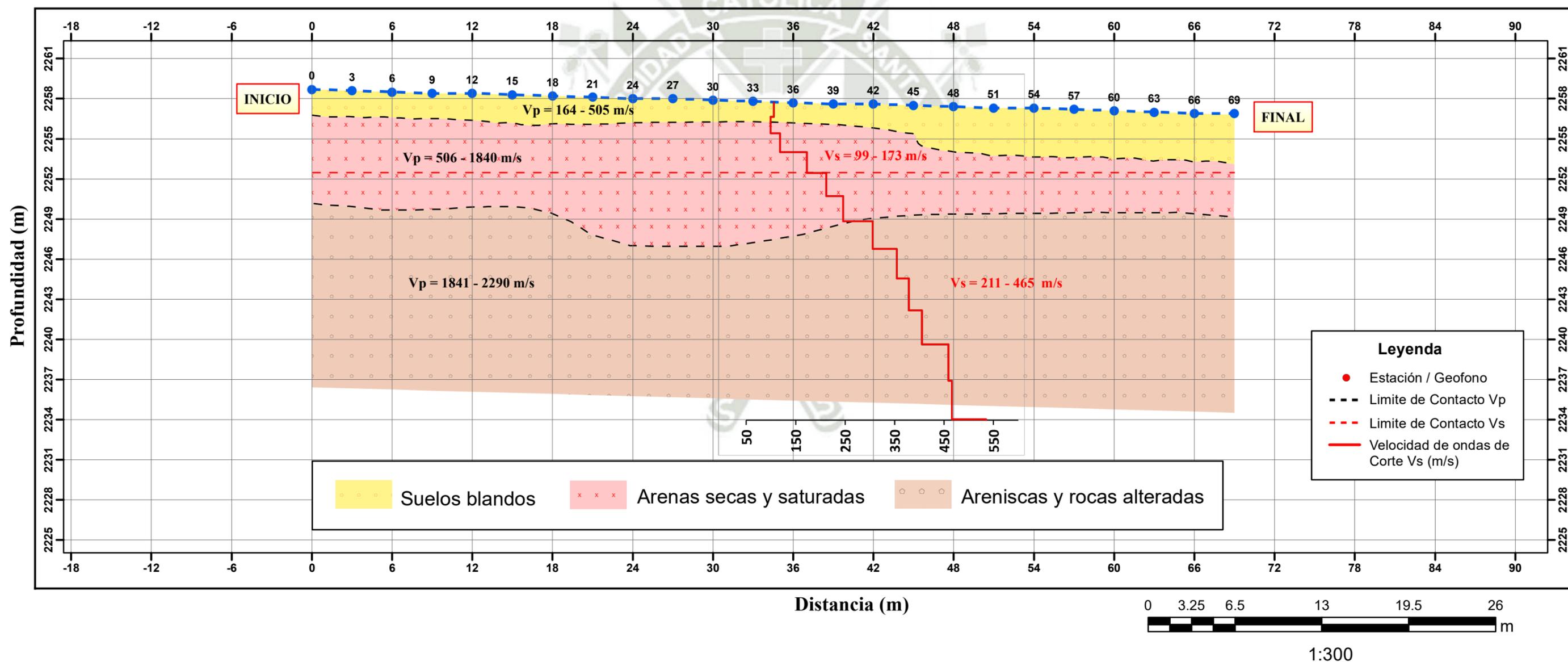
**MODELO DE SECCIÓN DE VELOCIDAD  $V_p$  -  $V_s$  DE LA LÍNEA- 05**





MODELO DE SECCIÓN DE VELOCIDAD Vp - Vs DE LA LÍNEA- 06

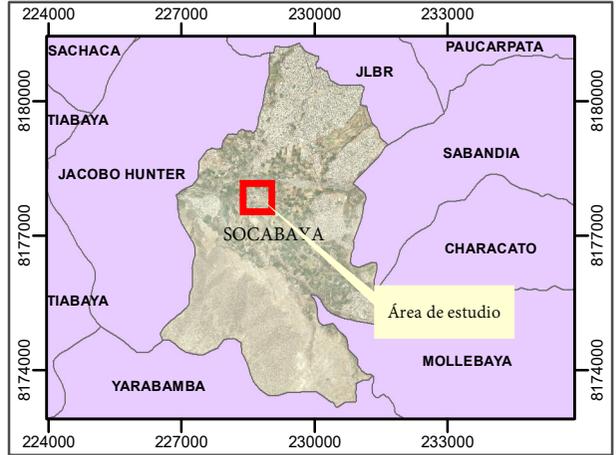
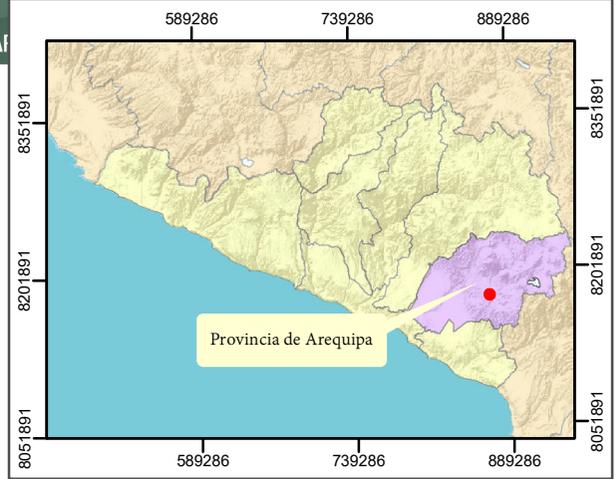
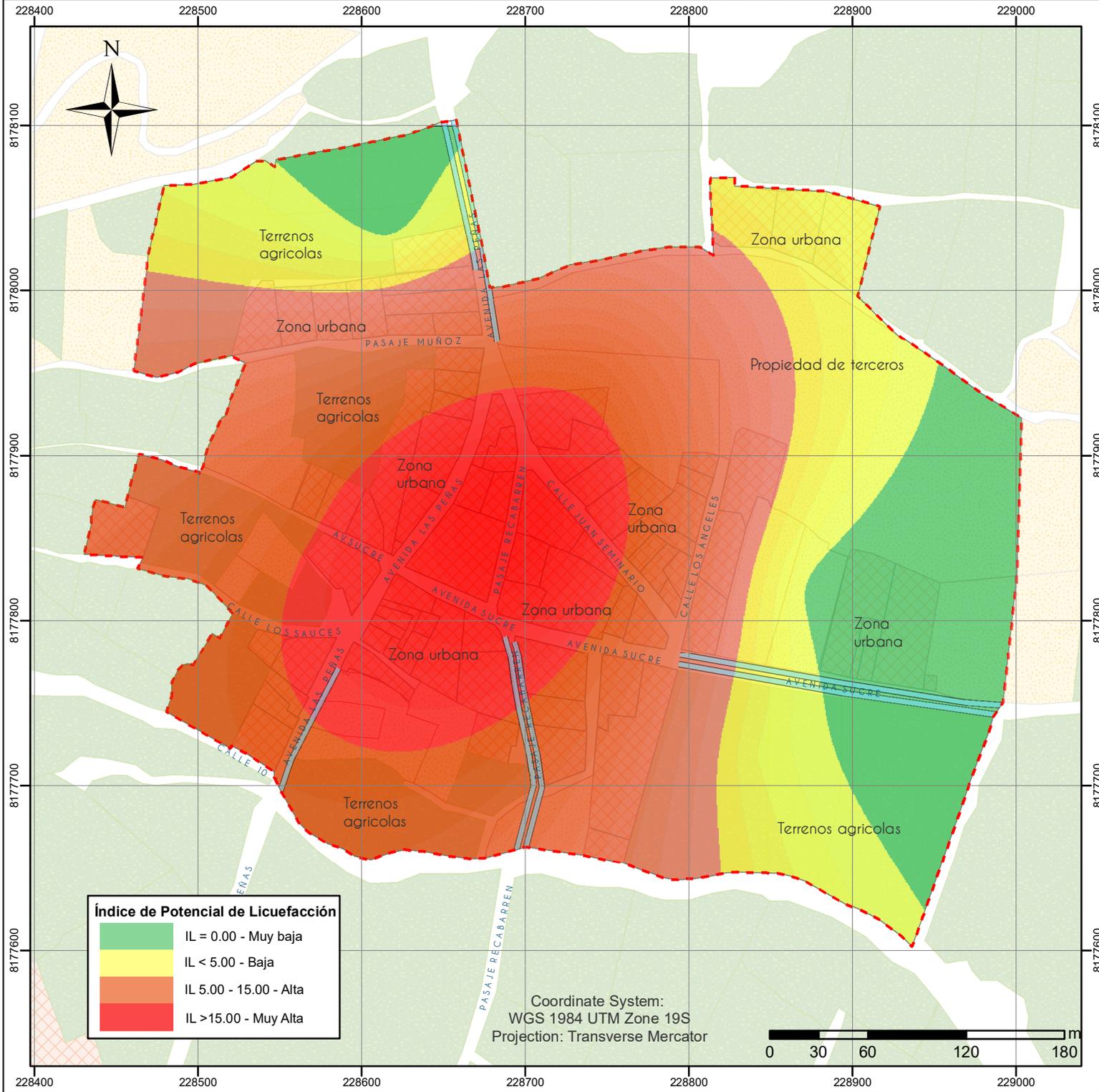
1:300





## **Anexo 12:** **Mapas de Potencial de Licuefacción**

---



**Leyenda**

Propiedad de terceros	Área de estudio
Terrenos agrícolas	Vías
Zonas urbanas	

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA  
FACULTAD DE ARQUITECTURA E  
INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

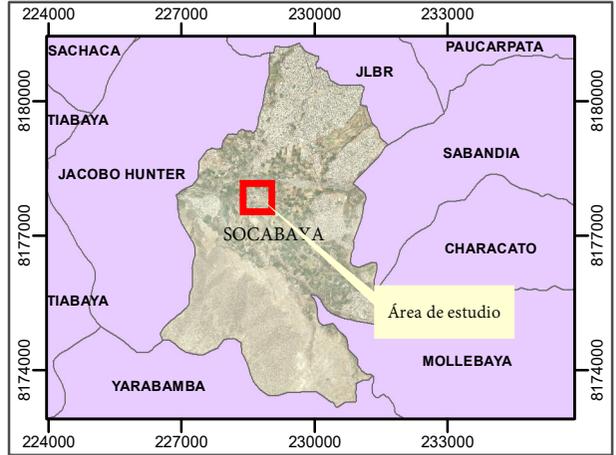
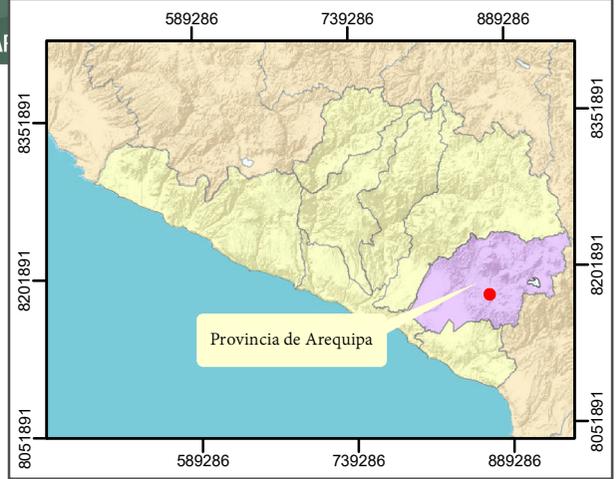
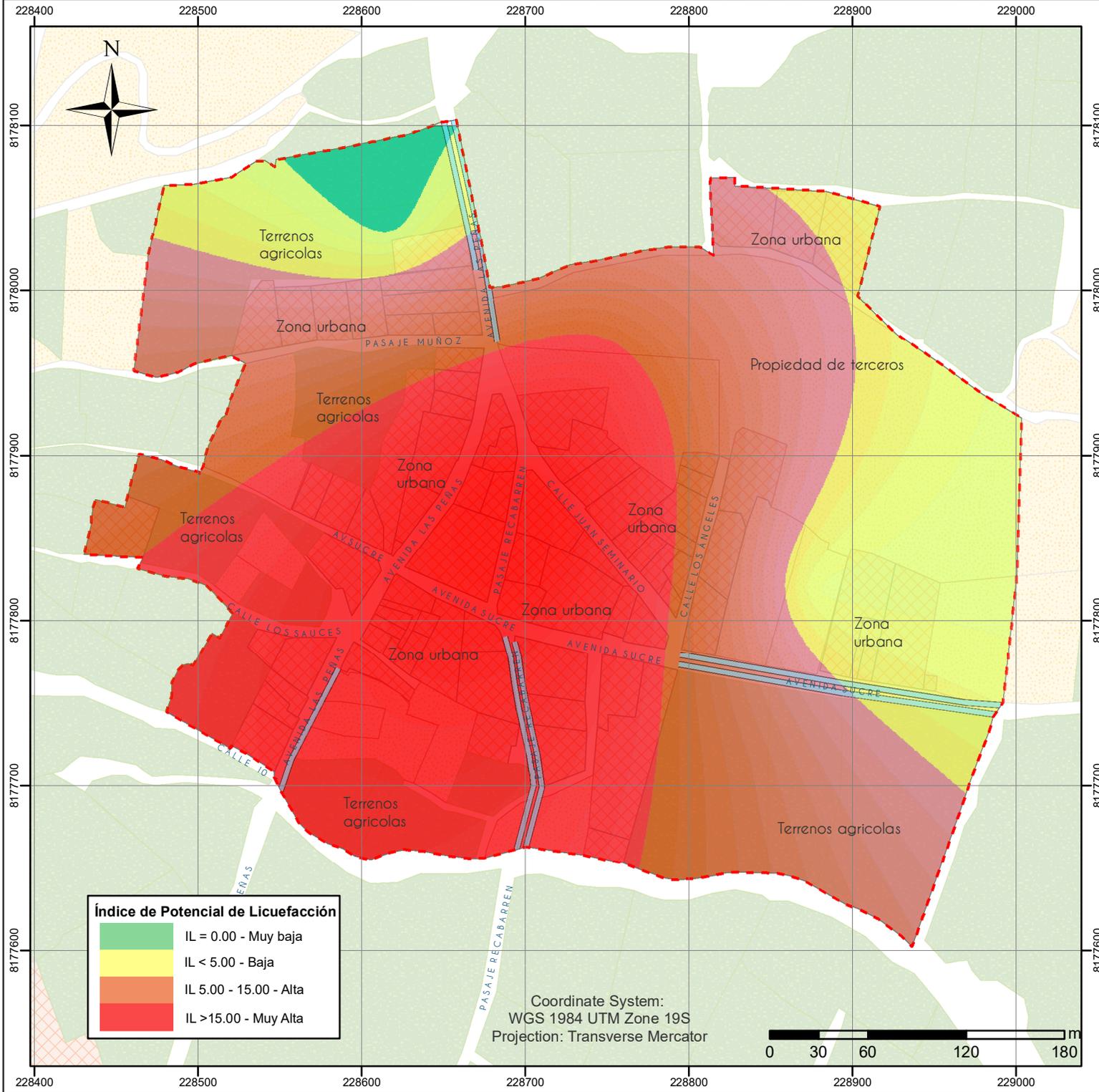
TESIS:  
"CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P.EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA"

PLANO:  
**POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN**  
**PARA UNA MAGNITUD SÍSMICA Mw=7.8**

ELABORADO POR: SHEYLA VIVEROS AGRAMONTE

ESCALA: 1:3,300      DATUM: DWGS84

Lámina N°:  
**32**



**Leyenda**

- Propiedad de terceros
- Terrenos agrícolas
- Zonas urbanas
- Área de estudio
- Vías

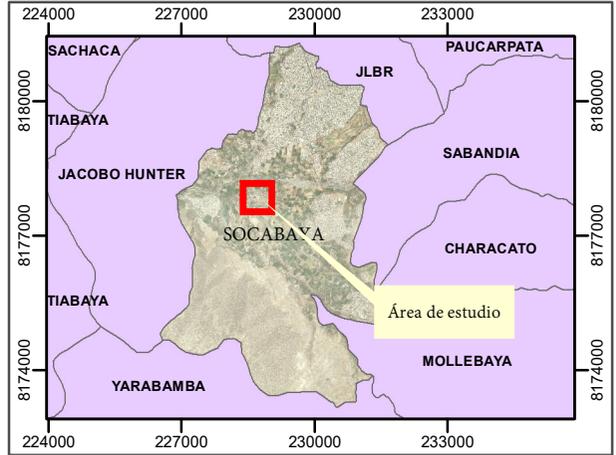
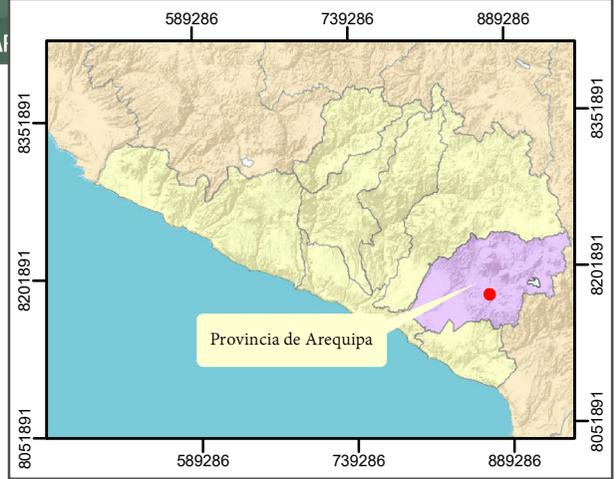
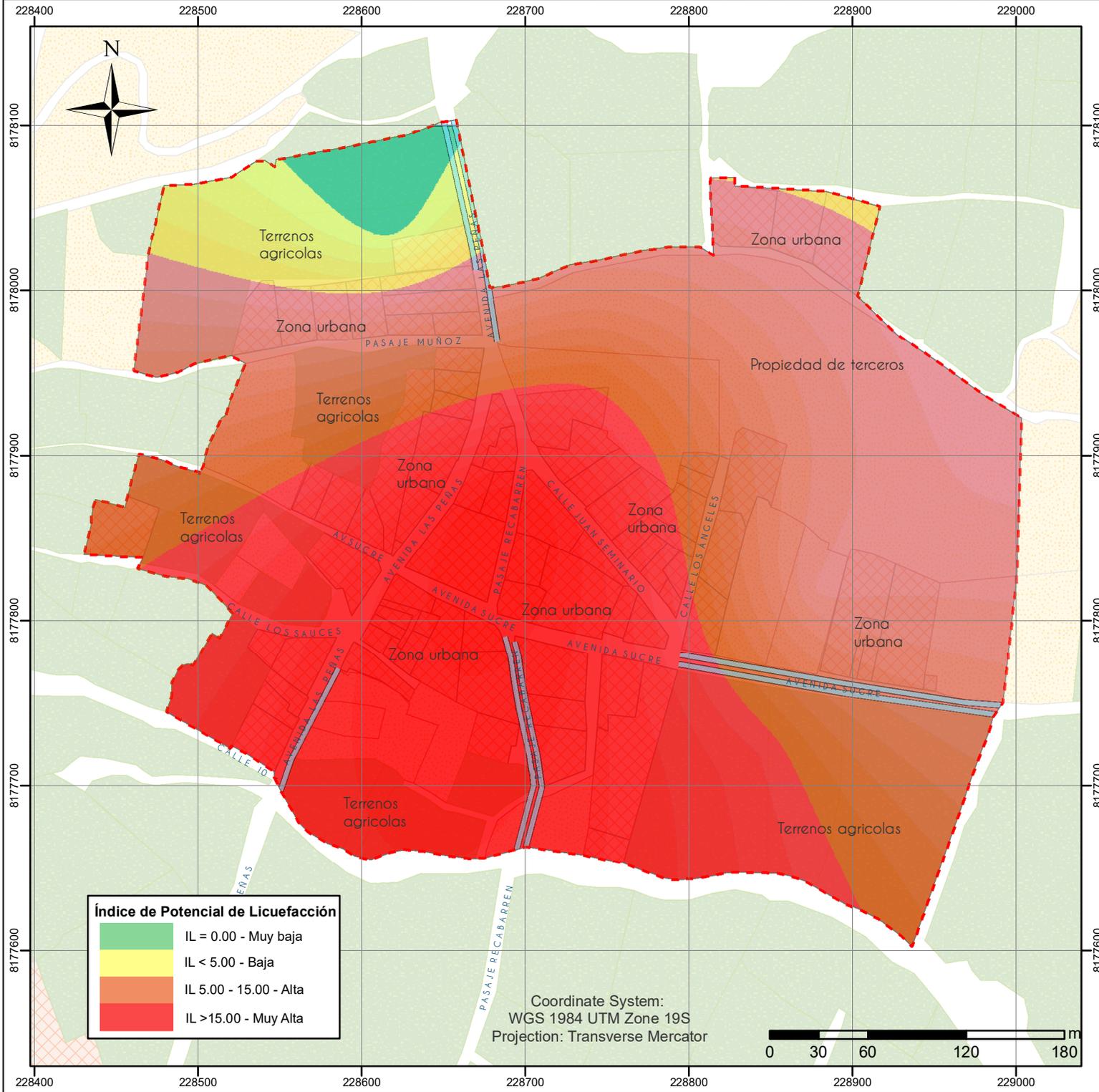
**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA**  
**FACULTAD DE ARQUITECTURA E**  
**INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS:**  
 "CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P.EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA"

**PLANO:**  
**POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN**  
**PARA UNA MAGNITUD SÍSMICA Mw=7.9**

ELABORADO POR: SHEYLA VIVEROS AGRAMONTE  
 ESCALA: 1:3,300      DATUM: DWGS84

Lámina N°:  
**33**



**Leyenda**

Propiedad de terceros	Área de estudio
Terrenos agrícolas	Vías
Zonas urbanas	

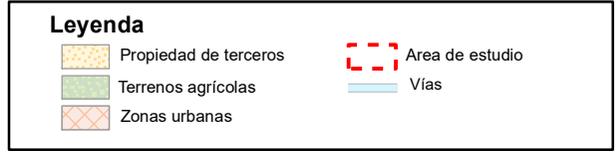
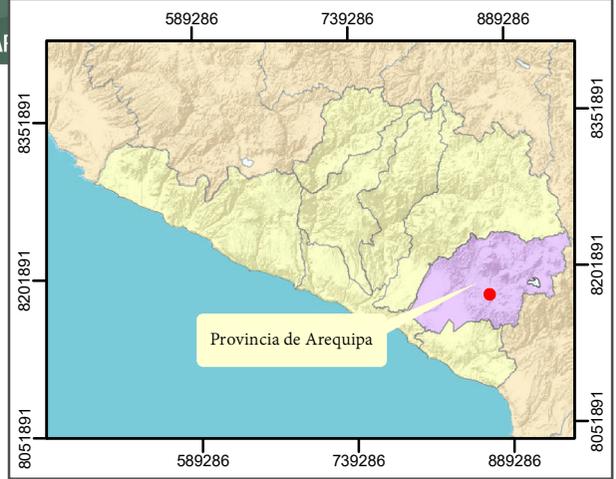
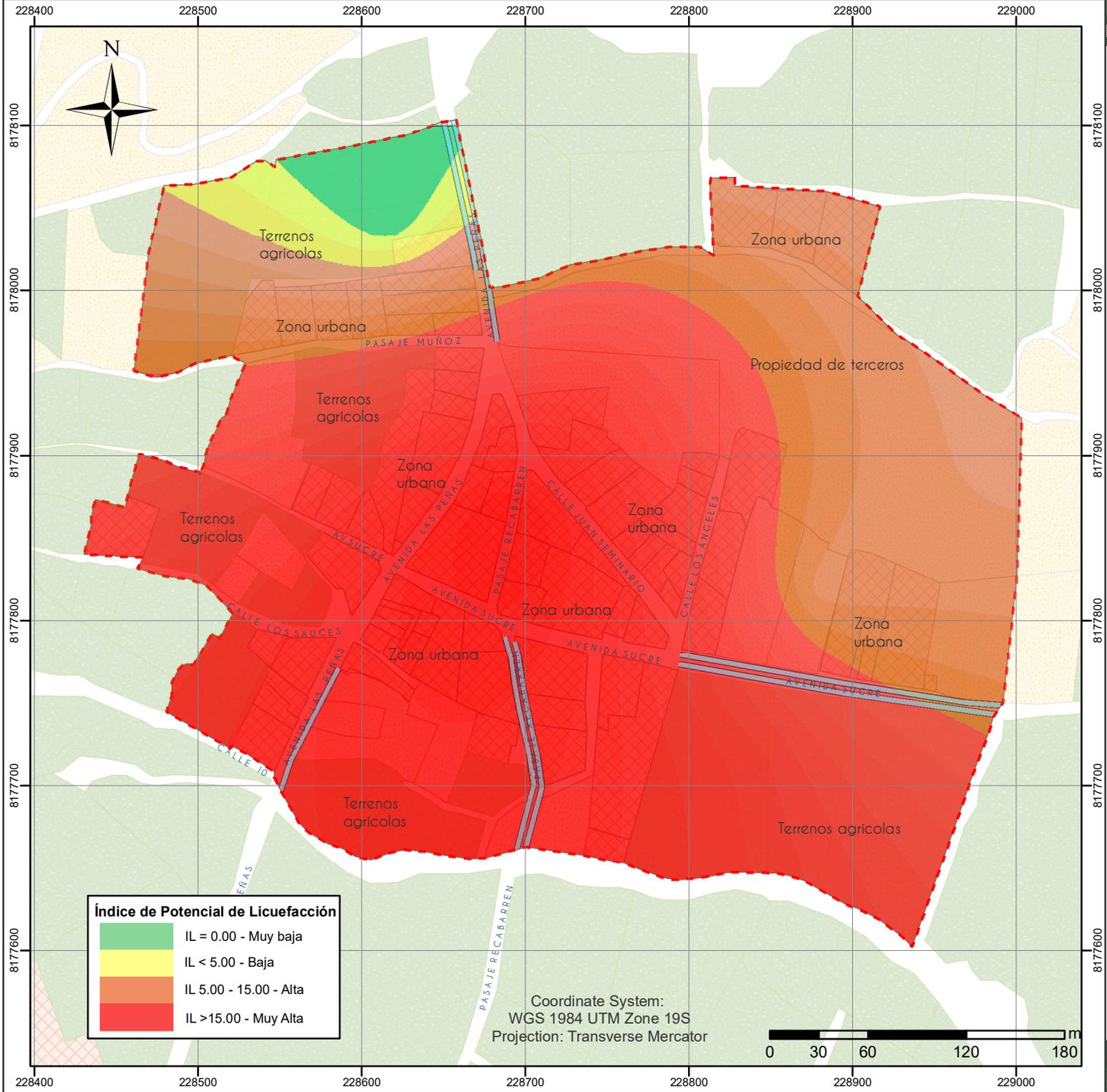

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA**  
 FACULTAD DE ARQUITECTURA E  
 INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE  
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**TESIS:**  
 "CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P.EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA"

**PLANO:**  
**POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN**  
**PARA UNA MAGNITUD SÍSMICA Mw=8.3**

ELABORADO POR: SHEYLA VIVEROS AGRAMONTE  
 ESCALA: 1:3,300      DATUM: DWGS84

Lámina N°:  
**34**



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA  
FACULTAD DE ARQUITECTURA E  
INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:  
"CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P.EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA"

PLANO:  
**POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN  
PARA UNA MAGNITUD SÍSMICA Mw=8.4**

ELABORADO POR: SHEYLA VIVEROS AGRAMONTE

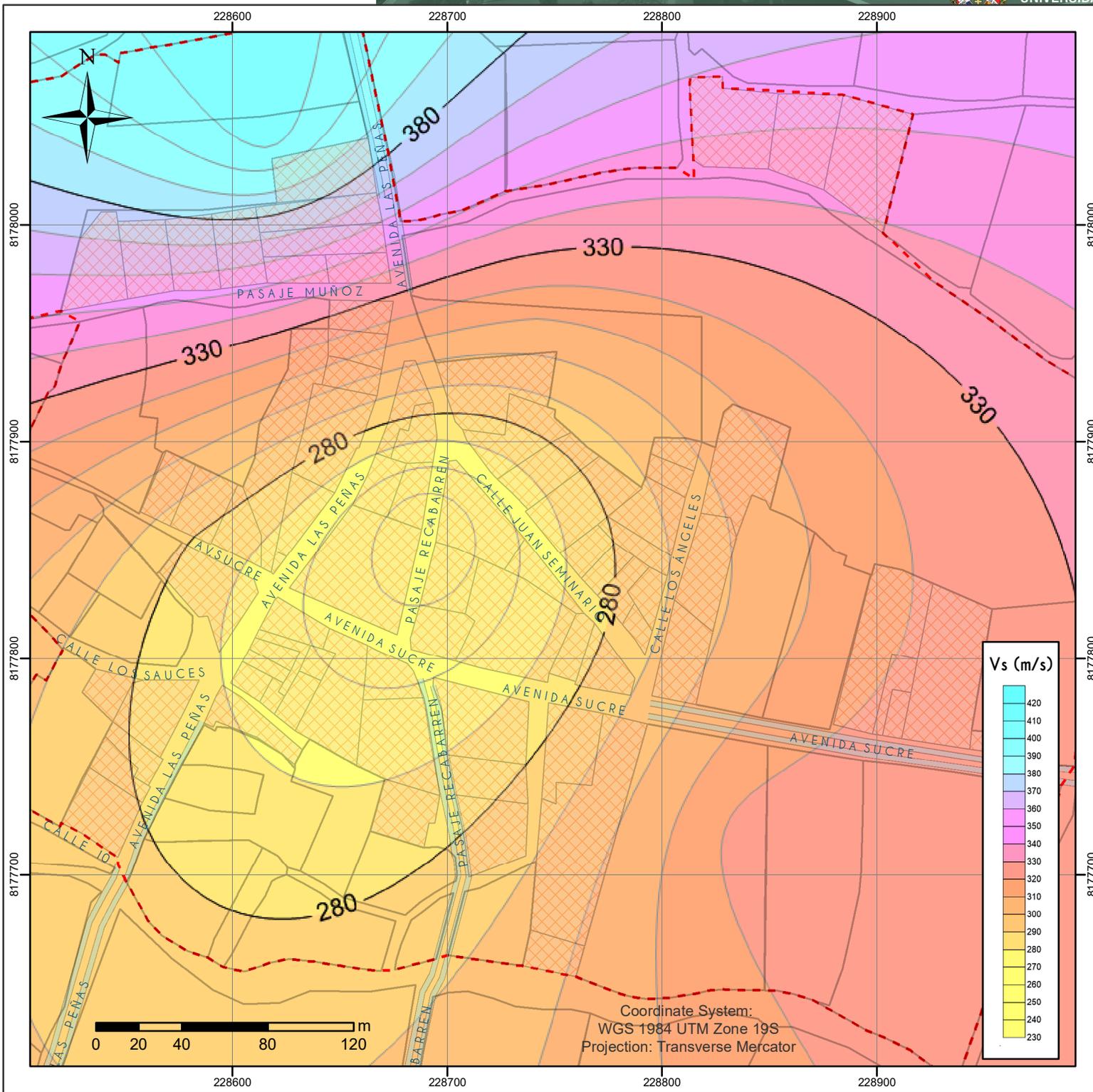
ESCALA: 1:3,300      DATUM: DWGS84

Lámina N°:  
**35**



**Anexo 13:**  
**Mapa de isovelocidades de onda de corte Vs30**

---

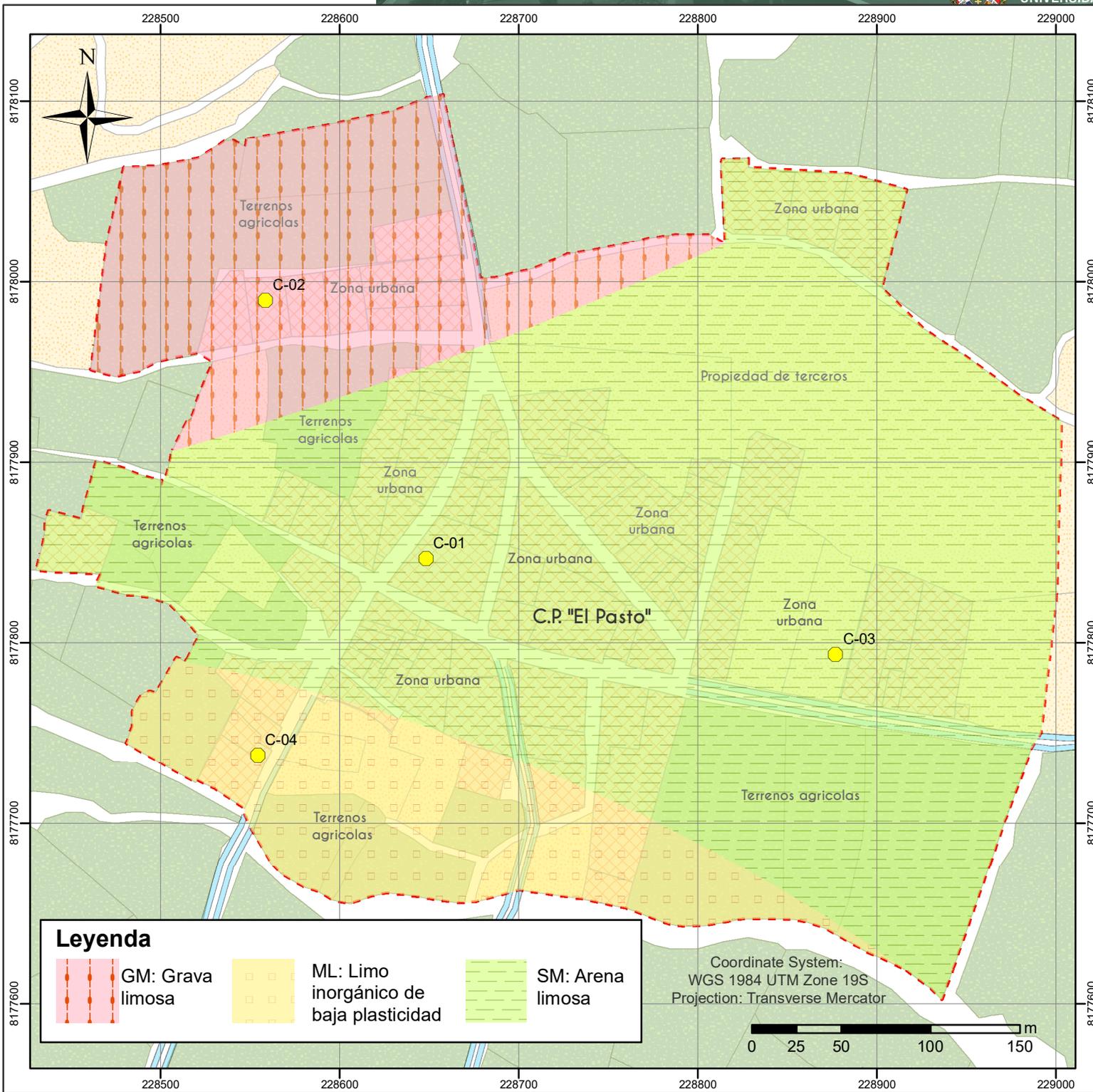


 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>	
<p><b>TESIS:</b> "CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P. EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA"</p>	
<p><b>PLANO:</b> <b>MAPA DE ISOVELOCIDADES <math>V_{s30}</math></b></p>	
Lámina N°	
<b>36</b>	
<p>ELABORADO POR: SHEYLA VIVEROS AGRAMONTE</p>	
ESCALA: 1:2,500	DATUM: DWGS84

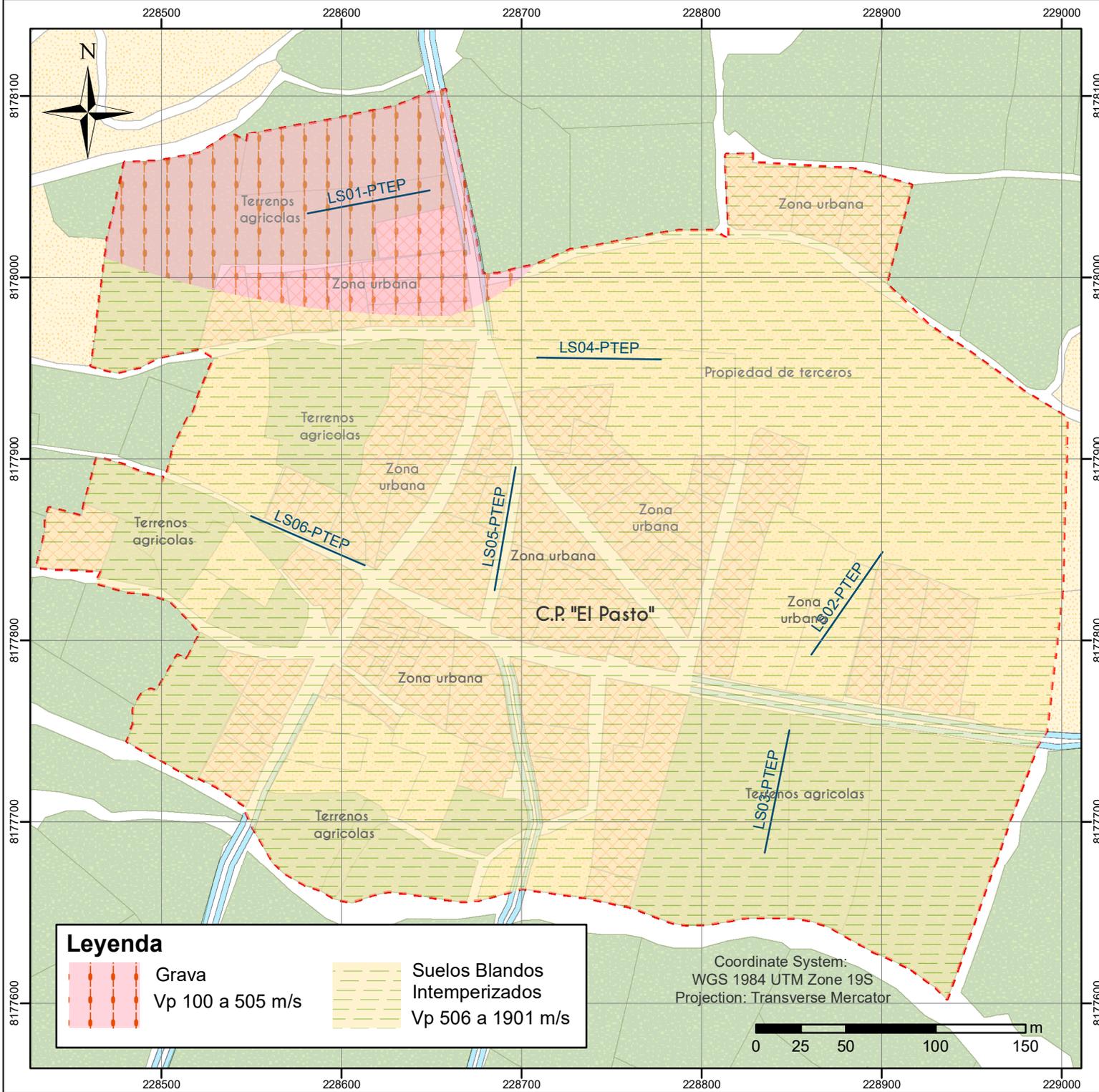
Coordinate System:  
WGS 1984 UTM Zone 19S  
Projection: Transverse Mercator



**Anexo 14:**  
**Clasificación del suelo según calicatas y métodos sísmicos**



 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>	
<p>TESIS: "CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. PEL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA"</p>	
<p>PLANO: <b>CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN CALICATAS PROF. 0.5M A 1.0M</b></p>	
<p>ELABORADO POR: SHEYLA VIVEROS AGRAMONTE</p>	
<p>ESCALA: 1:3,000</p>	<p>DATUM: DWGS84</p>
<p>Lámina N.º: <b>37</b></p>	



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA  
FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:  
"CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P. EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA"

PLANO:  
**CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN MÉTODOS SÍSMICOS PROF. 0.5M A 1.0M**

ELABORADO POR: SHEYLA VIVEROS AGRAMONTE

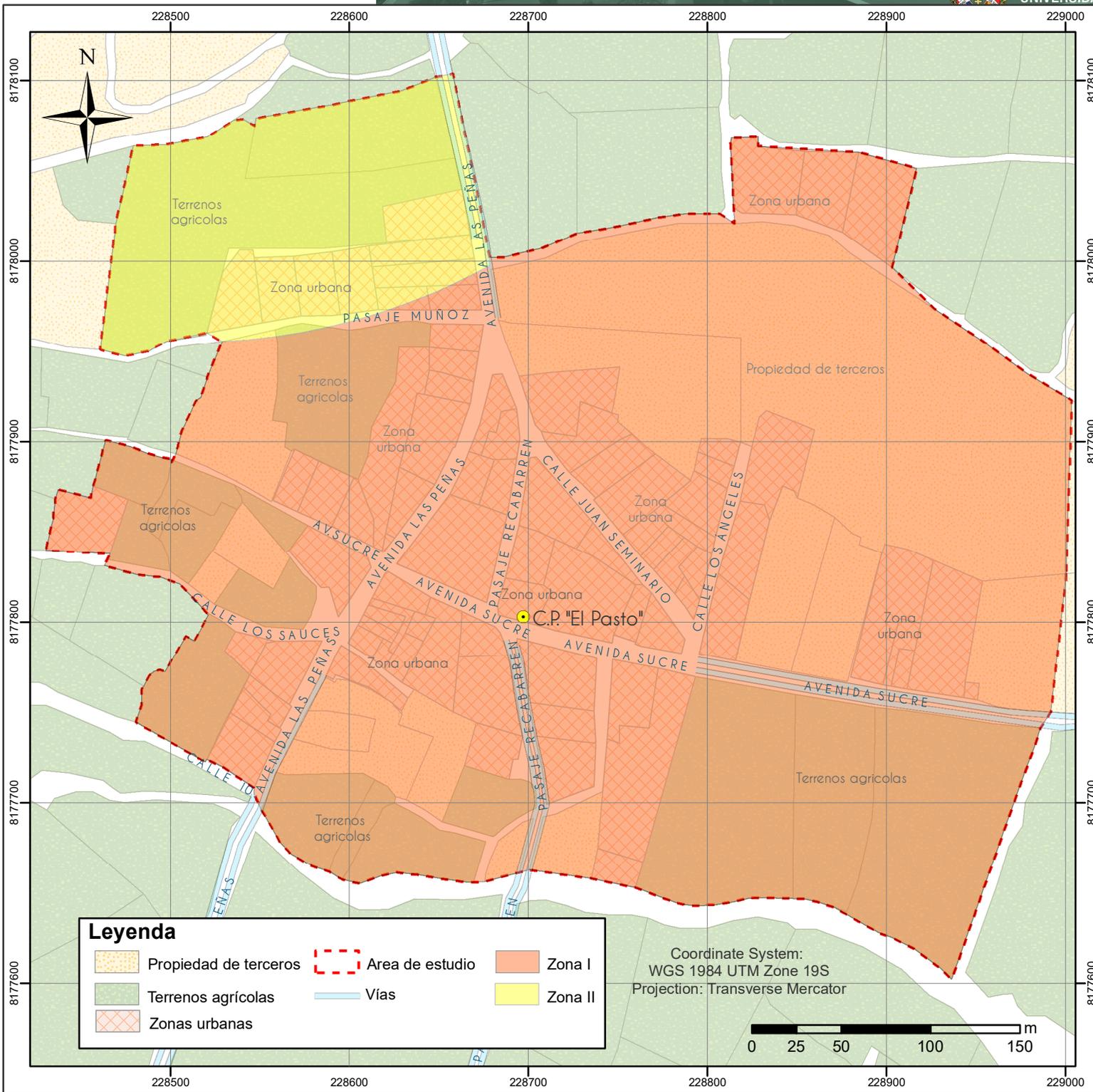
ESCALA: 1:3,000      DATUM: DWGS84

Lámina N.º: **38**



## **Anexo 15: Zonificación sísmica**

---



**Leyenda**

	Propiedad de terceros		Area de estudio		Zona I
	Terrenos agrícolas		Vías		Zona II
	Zonas urbanas				

Coordinate System:  
WGS 1984 UTM Zone 19S  
Projection: Transverse Mercator



 UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL Y DEL AMBIENTE ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL	
TESIS: "CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS SÍSMICOS EN EL C. P. EL PASTO, DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA"	
PLANO: <b>MAPA DE ZONIFICACIÓN SÍSMICA</b>	
Lámina N°	
<b>39</b>	
ELABORADO POR: SHEYLA VIVEROS AGRAMONTE	
ESCALA: 1:3,000	DATUM: DWGS84