



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudios geofísicos para la
caracterización del subsuelo
en la unidad habitacional
CRISA**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Saúl Godínez Zambrano

DIRECTOR DE TESIS

M.C. David Escobedo Zenil



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL

(Titulación con trabajo escrito)



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ESTUDIOS GEOFISICOS PARA LA CARACTERIZACION DEL SUBSUELO EN LA UNIDAD HABITACIONAL CRISA.

que presenté para obtener el título de INGENIERO GEOFÍSICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

SAUL GODINEZ ZAMBRANO

Número de cuenta: 313106028

Índice

1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- UBICACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO	2
2.1 Ubicación del sitio	2
2.2 Geología del sitio.....	3
3. MARCO TEÓRICO.....	7
3.1 Radar de Penetración Terrestre (GPR)	7
3.1.1 Ecuaciones de Maxwell.....	9
3.1.2 Ecuaciones constitutivas	9
3.1.3 Ecuación de onda y propiedades de la onda electromagnética.....	10
3.2 Tomografía de resistividad eléctrica	12
3.2.1 Resistividad.....	13
3.2.2 Ecuaciones Generales	13
3.2.3 Resistividad Aparente.....	15
3.2.4 Arreglo en 2D	16
3.3 Métodos Sísmicos.....	18
3.3.1 Tendido de refracción sísmica.....	18
3.3.2 Método de cocientes espectrales (HVSr).....	23
4. METODOLOGÍA DEL TRABAJO	26
4.1 Radar de Penetración Terrestre (GPR)	27
4.1.1 Equipo utilizado	27
4.1.2 Diseño de adquisición GPR	28
4.1.3 Adquisición en campo GPR	29
4.1.4 Procesamiento de los datos.....	30
4.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)	32
4.2.1 Equipo utilizado	32
4.2.2 Diseño de adquisición TRE 2D	33
4.2.3 Adquisición en Campo TRE.....	34
4.2.4 Procesamiento de los datos.....	36
4.3 Tendido de Refracción Sísmica (TRS)	37
4.3.1 Equipo utilizado	37
4.3.2 Diseño de adquisición TRS.....	37
4.3.3 Adquisición en Campo TRS.....	38
4.3.4 Procesamiento de los datos.....	40
4.4 Método de cocientes espectrales (HVSr)	41

4.4.1 Equipo utilizado	41
4.4.2 Adquisición de Puntos de Vibración Ambiental.....	42
4.4.3 Procesamiento de los datos.....	44
5. RESULTADOS.....	45
5.1 Resultados del método GPR	45
5.1.1 Zona 1 al N del polígono de estudio.	46
5.1.2 Zona 2 al NW del polígono de estudio.....	48
5.1.3 Zona 3 al NE del polígono de estudio.....	50
5.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)	55
5.2.1 Línea 1 al NE del polígono de estudio.....	55
5.2.2 Línea 2 al NW del polígono de estudio.....	56
5.3 Tendido de Refracción Sísmica (TRS)	57
5.3.1 Línea 1 al NE del polígono de estudio	57
5.3.2 Línea 2 al NW del polígono de estudio	59
5.4 Método de Cocientes Espectrales (HVSr).....	60
5.4.1 PVA 1	60
5.4.2 PVA 2.....	61
5.4.3 PVA 3.....	62
5.4.4 PVA 4.....	63
5.4.5 PVA 5.....	64
5.4.6 PVA 6.....	65
5.4.7 PVA 7.....	66
5.4.8 PVA 8.....	67
5.4.9 PVA 9.....	69
6. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS.....	71
6.1 Integración Zona 1	73
6.2 Integración Zona 2	75
6.3 Integración Zona 3	78
6.4 Cocientes Espectrales (HVSr).....	81
7. CONCLUSIONES.....	83
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
9. ANEXO FOTOGRÁFICO	87
9.1 Anexo de líneas de Radar.....	87
9.1.1 Líneas de radar de la zona 1 a partir de 3- 19.	87

9.1.2 Líneas de radar de la zona 2 a partir de 3- 14.	93
9.1.3 Líneas y picado del Tendido de Refracción Sísmica (TRS).....	97

Índice de Figuras

Figura 1. Unidad CRISA y delimitación en polígono rojo de la zona de trabajo.	2
Figura 2. Mapa esquemático que muestra la extensión de los flujos de lava que emanaron del Volcán Xitle y conforman El Pedregal tomada de (Siebe, 2009).	4
Figura 3. Trayectoria del río Magdalena por las delegaciones de la CDMX.....	5
Figura 4. Zona que tiende a inundarse en épocas de lluvias.....	6
Figura 5. A) diagrama de cómo está constituido el sistema de radar. B) Sección interpretada y C) la visualización del radargrama. Imagen modificada de Reynolds, 2011.	8
Figura 6. Principio del método resistivo. Modificado de (Okpoli, 2013).	12
Figura 7. Flujo de corriente para una fuente puntual y la forma de distribución del potencial. Modificada de (Loke, 2004).	15
Figura 8. Arreglo y pseudosección Wenner-Schlumberger. Modificado de (Loke, 2004).	17
Figura 9. A) Muestra la trayectoria de los rayos directos, reflejados y refractados (modificado de Reynolds, 2011). B) Ejemplo de un sismograma mostrando el picado de los primeros arribos tomado de (Reynolds, 2011). C) Tiempo de arribo mostrado en un gráfico tiempo-distancia modificado de (Reynolds, 2011).....	21
Figura 10. Ruta de rayos simple para una estructura de dos capas tomada de (Reynolds, 2011).....	22
Figura 11. Diagrama del flujo de trabajo.	26
Figura 12. Mapa de adquisición GPR unidad CRISA.	28
Figura 13. Secuencia de procesamiento modificada de Reynolds (2011).....	30
Figura 14. Procesado de GPR mediante el lenguaje de programación MATLAB con el programa MATGPR.	31
Figura 15. Mapa de adquisición de la tomografía de resistividad eléctrica.	33
Figura 16. Diagrama de flujo del tratamiento del método TRE con el software Prosys II (v. 3.14.00 IRIS Instruments ResIPy (v. 3.4.2).....	36
Figura 17. Mapa de adquisición de datos para el Tendido de Refracción Sísmica (TRS).	38
Figura 18. Diagrama de flujo del tratamiento del Tendido de Refracción Sísmica (TRS) mediante el software ZondST2D.....	40
Figura 19. Ubicación de las mediciones de PVA en la zona de estudio.	42
Figura 20. Diagrama de flujo del procesamiento de datos para PVA (Cruz, 2019).....	44
Figura 21. Líneas correspondientes a la zona 1 de GPR.	46
Figura 22. Línea 1 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	47
Figura 23. Línea 2 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	47
Figura 24. Líneas correspondientes a la zona 2 de GPR.	48
Figura 25. Línea 1 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	49
Figura 26. Línea 2 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	49
Figura 27. Líneas correspondientes a la zona 3 de GPR.	50
Figura 28. Línea 1, 2, 3 y 4 correspondiente a la zona 3 del método GPR orientadas del SW al NE.....	52
Figura 29. Línea 5, 6, 7, 8 y 9 correspondiente a la zona 3 del método GPR orientadas de W al E de la zona.	54
Figura 30. Línea 1 correspondiente al método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).....	55
Figura 31. Línea 2 correspondiente al método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).....	56
Figura 32. Línea 1 correspondiente al método de Tendido de Refracción Sísmica (TRS).	59
Figura 33. Línea 2 correspondiente al método de Tendido de Refracción Sísmica (TRS).	60
Figura 34. Resultados del PV1. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.	61

Figura 35. Resultados del PV2. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.	62
Figura 36. Resultados del PV3. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.	63
Figura 37. Resultados del PV4. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.	64
Figura 38. Resultados del PV5. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.	65
Figura 39. Resultados del PV6. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.	66
Figura 40. Resultados del PV7. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.	67
Figura 41. Resultados del PV8. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.	68
Figura 42. Resultados del PV9. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.	69
Figura 43. Mapa de adquisición de los 4 métodos utilizados para la zona 1.....	73
Figura 44. Sección de Velocidades y Resistividades correspondientes a los métodos TRS y TRE respectivamente limitado para la zona 1.....	74
Figura 45. Mapa de adquisición de los 4 métodos utilizados para la zona 2.....	75
Figura 46. Sección de Velocidades y Resistividades correspondientes a los métodos TRS y TRE respectivamente limitado para la zona 2.....	77
Figura 47. Mapa de adquisición de los 4 métodos utilizados para la zona 3.....	78
Figura 48. Sección de Velocidades y Resistividades correspondientes a los métodos TRS y TRE respectivamente limitado para la zona 3.....	80
Figura 49. Valores de la frecuencia fundamental para cada PVA adquirida.	81

Índice de Tablas

Tabla 1. Equipo utilizado para la prospección electromagnética.	27
Tabla 2. Equipo utilizado para la realización de la prospección eléctrica (TRE).	32
Tabla 3. Distancia entre electrodos.	34
Tabla 4. Tipos de arreglos usados.	35
Tabla 5. Equipo utilizado para la prospección sísmica (TRS).	37
Tabla 6. Material para los cocientes espectrales (HVSr).	41
Tabla 7. Sensores utilizados y tiempos de medición para los PVA.	43
Tabla 8. Tipos de terreno de acuerdo con las velocidades. Modificado de (CFE 2015).	57
Tabla 9. Valores de Frecuencia Fundamental y Amplitud para cada PVA.	70
Tabla 10. Velocidades de onda P para el método de sísmica de refracción modificado de International, 2011.	71
Tabla 11. Clasificación sísmica de suelos (IBC 2006) tomado de (Castillo 2012).	72
Tabla 12. Resistividades para distintas rocas y minerales. Tomado de (Loke, 2004).	72

Índice de Figuras del apartado de Anexos

Figura A 1. Línea 3 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	87
Figura A 2. Línea 4 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	87
Figura A 3. Línea 5 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	88
Figura A 4. Línea 6 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	88
Figura A 5. Línea 7 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	88
Figura A 6. Línea 8 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	89
Figura A 7. Línea 9 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	89
Figura A 8. Línea 10 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	89
Figura A 9. Línea 11 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	90
Figura A 10. Línea 12 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	90
Figura A 11. Línea 13 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	90
Figura A 12. Línea 14 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	91
Figura A 13. Línea 15 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	91
Figura A 14. Línea 16 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	91
Figura A 15. Línea 17 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	92
Figura A 16. Línea 18 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	92
Figura A 17. Línea 19 correspondiente a la zona 1 del método GPR.	92
Figura A 18. Línea 3 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	93
Figura A 19. Línea 4 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	93
Figura A 20. Línea 5 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	93
Figura A 21. Línea 6 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	94
Figura A 22. Línea 7 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	94
Figura A 23. Línea 8 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	94
Figura A 24. Línea 9 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	95
Figura A 25. Línea 10 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	95
Figura A 26. Línea 11 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	95
Figura A 27. Línea 12 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	96
Figura A 28. Línea 13 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	96
Figura A 29. Línea 14 correspondiente a la zona 2 del método GPR.	96
Figura A 30. Picado de la primera fuente correspondiente a la línea 1.	97
Figura A 31. Picado de la segunda fuente correspondiente a la línea 1.	98
Figura A 32. Picado de la tercera fuente correspondiente a la línea 1.	98
Figura A 33. Picado de la cuarta fuente correspondiente a la línea 1.	99
Figura A 34. Picado de la quinta fuente correspondiente a la línea 1.	99

Figura A 35. Línea 1 del Tendido de Refracción Sísmica procesada y con dromocronas.	100
Figura A 36. Picado de la primera fuente correspondiente a la línea 2.	101
Figura A 37. Picado de la segunda fuente correspondiente a la línea 2.	102
Figura A 38. Picado de la tercera fuente correspondiente a la línea 2.	102
Figura A 39. Picado de la cuarta fuente correspondiente a la línea 2.	103
Figura A 40. Picado de la quinta fuente correspondiente a la línea 2.	103
Figura A 41. Línea 2 del Tendido de Refracción Sísmica procesada y con dromocronas.	104

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme recibido y verme crecer desde los años de preparatoria y universitarios, a la Facultad de Ingeniería por ser mi casa académica y a mis profesores por toda la enseñanza que me brindaron junto con todas las herramientas necesarias para poder convertirme en profesional y ejercer de la mejor manera.

Agradezco de manera especial al M.C. David Escobedo Zenil quien es parte fundamental en la elaboración de esta tesis, le agradezco por todo el apoyo brindado (información, libros, artículos) para ampliar mi conocimiento y aplicarlo de la mejor manera a la tesis. Le agradezco por todo el tiempo que se tomó en resolver las dudas dentro y fuera de lo académico. Le agradezco desde el momento que fue mi profesor, mi asesor en el servicio social y por último mi asesor de tesis, en verdad, gracias.

A mi madre Magdalena, Maida, que me enseñaste el valor de estudiar y siempre estuviste a mi lado apoyándome, este logro es dedicado para ti debido a todo el sacrificio que hiciste para que pudiera salir adelante, me enseñaste todo para que lograra todo lo que me proponga, espero sepas que te amo, te extraño y te agradezco.

A mi padre Teodoro, quien tuvo mucha paciencia durante mi vida académica, tu apoyo me ha ayudado demasiado en mi desempeño tanto personal como académico.

A Alexis, Ana, Javier, Xochil, Richi, Lalo, Jhony, Kevin, Nahui y Víctor, por todos los buenos momentos, han estado presentes dentro y fuera de las aulas haciendo que mis días fueran divertidos, incluso en los peores momentos. Resumir mucho tiempo juntos en pocas palabras es complicado, pero quiero que sepan que me ayudó mucho su compañía y sus palabras, gracias por su amistad tan genuina, espero haber estado a la altura en todo este tiempo.

A mi familia: hermanos y mi primo Jairo por siempre demostrar su apoyo y paciencia en momentos difíciles que pasé durante mi carrera universitaria, lo aprecio en verdad. La imagen de estudiar y acabar una carrera fue gracias a ustedes, siempre me ayudaron a resolver mis dudas y me prepararon para la vida universitaria.

RESUMEN

La unidad habitacional CRISA ubicada en la alcaldía Coyoacán presenta problemas de inundación en época de lluvias, ocasionando que en la parte N-E de la unidad se acumule el agua provocando daños estructurales en el edificio que se encuentra en esa zona. Este trabajo de tesis tiene como objetivo que mediante los métodos geofísicos se pueda caracterizar el subsuelo que se encuentra en la unidad ubicando las anomalías, las prospecciones que se emplearon fueron sísmicas, eléctricas y electromagnéticas. La geología indica que la unidad está construida sobre roca basáltica que fue consecuencia del derrame del volcán Xitle y su hidrografía indica que cerca de ahí pasa el río Magdalena en su parte entubada.

La adquisición se dividió en 3 partes, rodeando un edificio y abarcando en su mayor parte el estacionamiento al final de la unidad impidiendo el paso de personas o automóviles para no alterar los datos. La zona 1 presentó más anomalías debido a que se comienza la adquisición en el cárcamo, donde se presentó la frecuencia más alta, velocidades y resistividades altas junto con anomalías marcadas en los radargramas del método GPR.

Debido a las inundaciones ocasiona filtraciones en el terreno provocando saturación en el material de relleno y las fracturas de la roca resistente, junto con daños estructurales en el edificio cercano por lo que se recomienda una ampliación en su sistema de drenaje para evitar la acumulación de agua en esa zona.

1.- INTRODUCCIÓN

La unidad habitacional CRISA está ubicada al sur de la CDMX entre las calles de eje 10, Copilco e Insurgente, fue construida en la época de los años 60 sobre un basamento de rocas volcánicas provenientes de las diferentes etapas eruptivas del volcán del Xitle y rellenos que la constructora realizó para la construcción de los edificios. En esta unidad, sufren inundaciones en temporada de lluvias, principalmente hacia el extremo norte-oeste, con alturas de hasta unos 75 cm, afectando el tránsito y la movilidad de los vecinos. Las diferentes administraciones de la unidad optaron por construir un cárcamo de captación de agua y también por ampliar el grosor de la tubería del desagüe, sin embargo, la medida no ha sido suficiente y el problema persiste. Respecto este fenómeno surgen las incógnitas de:

- ¿Existe un atrapamiento de agua por algún factor geológico o estructural del subsuelo?
- ¿Qué afectaciones puede sufrir el subsuelo debajo del edificio más cercano a esta zona?

A partir de estas incógnitas, se proponen el siguiente objetivo general y los siguientes objetivos específicos:

Objetivo General

Realizar un estudio geofísico para caracterizar el subsuelo en la parte N-E de la Unidad CRISA en Coyoacán, CDMX.

Objetivos Específicos

Realizar perfiles de Radar de Penetración Terrestre (GPR) para determinar diferencias estructurales en el subsuelo.

Realizar Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) para identificar las resistividades y el nivel de saturación de los diferentes materiales del subsuelo.

Realizar Tendidos de Refracción Sísmica (TRS) para identificar contactos y características de velocidades sísmicas de los diferentes materiales del subsuelo.

Realizar el método de Cocientes Espectrales (HVSr) para determinar las frecuencias fundamentales en distintos puntos del sitio.

2.- UBICACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO

2.1 Ubicación del sitio

El estudio se realizó a los costados del último edificio de la unidad CRISA, cerca de Ciudad Universitaria, al sur de la Ciudad de México, alcaldía Coyoacán, colindando al sur de la alcaldía Benito Juárez, al norte de la alcaldía Tlalpan, al noreste de Alvaro Obregón y al noroeste de Iztapalapa.

La unidad está ubicada en la calle eje 10 sur dirección periférico al costado de las oficinas de CONAGUA, al noroeste del metro Copilco (Figura 1).

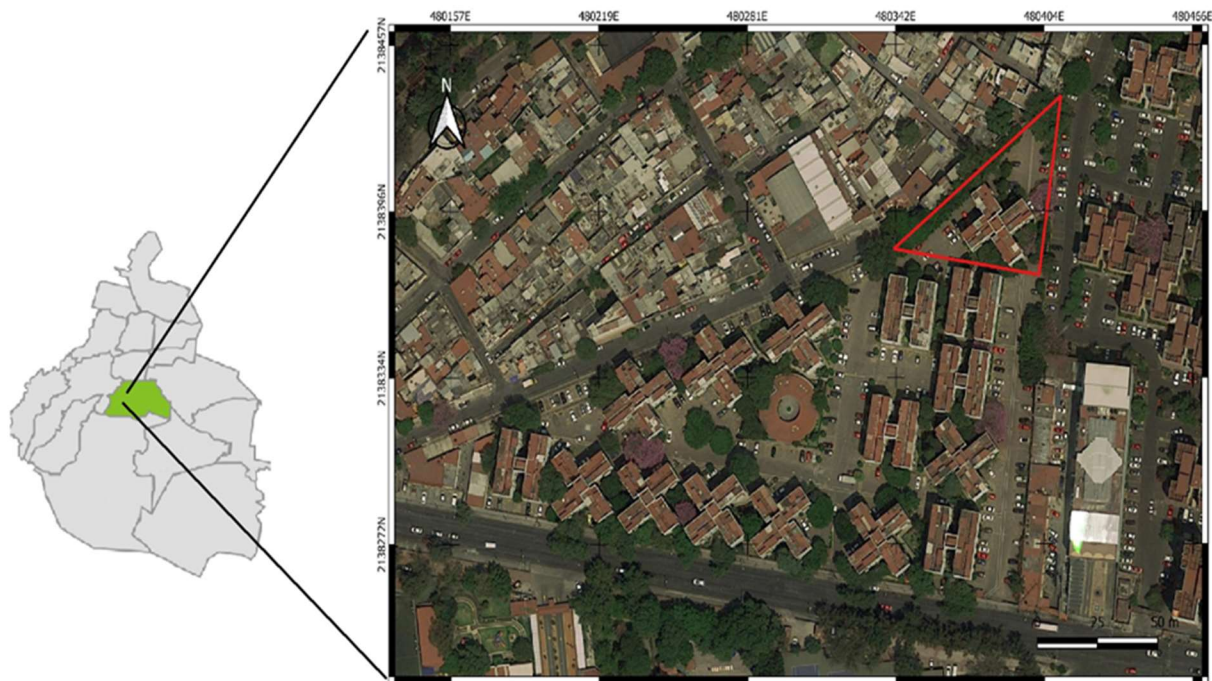


Figura 1. Unidad CRISA y delimitación en polígono rojo de la zona de trabajo.

2.2 Geología del sitio

La última actividad volcánica en el Valle de México fue en tiempos históricos 2400 años antes del presente y está representada por el derrame de composición basáltica conocida con el nombre de Pedregal de San Ángel; tuvo su origen en la pendiente norte de la Sierra de Chichinautzin y se extiende aproximadamente 13 o 14 km. hacia el norte (figura 2).

La Sierra Chichinautzin es un campo volcánico que alberga más de 200 edificios y forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) que atraviesa la República Mexicana en dirección E-O. El Xitle es el volcán más joven de la Sierra Chichinautzin y el más importante en cuanto a la composición geológica del Valle de México, específicamente al sur de la Ciudad de México. (Cruz, 2019) El volcán Xitle produjo las oscuras lavas basálticas del Pedregal, que tienen una apariencia fresca, sin mayor cobertura de suelo y poca vegetación. Estas características apuntan hacia una corta edad, en términos geológicos.

La alta temperatura de las lavas debió producir numerosos incendios forestales que destruyeron la vegetación en un área mayor que el ocupado por los productos volcánicos propiamente. La velocidad y dirección del avance de la lava que fluía por gravedad estuvieron controladas por la topografía (drenaje fluvial e inclinación de la pendiente). Por ello las lavas fueron emplazadas hacia el N y el NE, bajando por los valles que drenan el Ajusco hasta llegar a las planicies de la cuenca lacustre donde invadieron zonas pantanosas cuyas riberas eran habitadas por humanos (Figura 2) (Siebe, 2009). Con el tiempo, el viento depositó materiales finos (arcilla y limo) que se fueron acumulando en las hondonadas de la superficie del Pedregal. Con ello las primeras especies de plantas pioneras comenzaron a repoblar la zona fijando compuestos de nitrógeno en el suelo y así permitiendo también el ingreso y crecimiento de otras especies. Aun así, el área cubierta por las lavas jamás logró ser de utilidad para la agricultura, cuando esta actividad humana se extendió por toda la cuenca de México (Siebe, 2009).

El Xitle no es un volcán aislado, sino que forma parte de un conjunto de más de 200 pequeños volcanes que conforman el Campo Volcánico de la Sierra Chichinautzin. Esta sierra separa al Valle de México de los valles de Cuernavaca y Cuautla y las rocas volcánicas que la conforman son casi en su totalidad de edad cuaternaria, es decir geológicamente muy jóvenes. La unidad CRISA fue construida sobre un derrame lávico. La parte sur está dominada por la Sierra del Chichinautzin (Badilla-Cruz, 1977), donde se localizan las características fisiográficas del Ajusco,

que es el campo volcánico más importante en cuanto a la composición geológica del Pedregal de San Ángel, asociado al derrame del volcán Xitle.



Figura 2. Mapa esquemático que muestra la extensión de los flujos de lava que emanaron del Volcán Xitle y conforman El Pedregal tomada de (Siebe, 2009).

Cerca de la unidad pasa el río Magdalena que actualmente se considera como el último río vivo de la Ciudad de México. Tiene una longitud de 28.2 km, nace cerca del Cerro de la Palma ubicado en la Sierra de las Cruces, dentro de la alcaldía Magdalena Contreras, el río llega a una presa ubicada en Álvaro Obregón y su función es ser un regulador para las inundaciones en épocas de lluvias, desde este punto gran parte del agua del río es arrojada por el interceptor poniente, mientras que la demás sigue su curso en la parte entubada del río bajo la Avenida Río Magdalena-Eje 10 Sur, hasta su cruce con Av. Insurgentes y finalizando hasta circuito interior para incorporarse al río Churubusco y al sistema de drenaje de la ciudad. La unidad CRISA se ve afectada por inundaciones debido a que el sistema que se tiene para regular el paso del río en la parte entubada se está viendo superado a las intensas lluvias ocasionando que calles principales como la Av. Insurgentes y Eje 10 Sur se inunden en cada ocasión. En la figura 3 se muestra la trayectoria del río Magdalena atravesando las alcaldías mencionadas previamente, se muestra también su parte entubada del río.

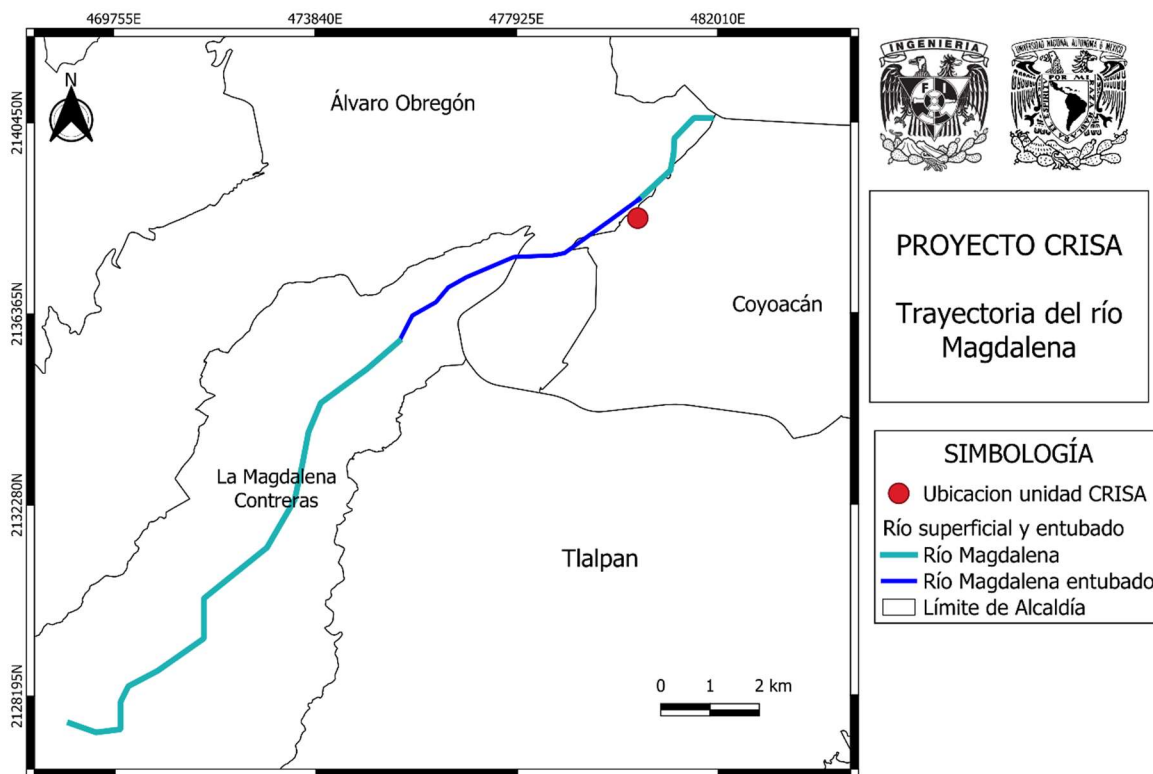


Figura 3. Trayectoria del río Magdalena por las delegaciones de la CDMX.

La Figura 4 muestra la parte afectada de la unidad habitacional donde en épocas de lluvias el agua queda depositada mayormente en esa zona, ocasionando los problemas estructurales y en el subsuelo. La altura que llega a alcanzar el agua en el sitio es alrededor de 30 cm por lo que la disipación del agua tiende a tardar más de lo normal.

Toda la parte del edificio que colinda con la zona inundada se está viendo afectada, humedeciendo la estructura, junto con el daño al estacionamiento, ocasionando que la persona que lo habita realice rampas para evitar que su vehículo se vea afectado.



Figura 4. Zona que tiende a inundarse en épocas de lluvias.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Radar de Penetración Terrestre (GPR)

El Radar de Penetración Terrestre (GPR) utiliza los campos electromagnéticos para sondear materiales dieléctricos con pérdidas, detectando estructuras y cambios en las propiedades del material, con este método los campos electromagnéticos se propagan esencialmente como ondas no dispersivas. La señal emitida viaja a través del material y es reflejada y/o dispersada por cambios de impedancia, dando lugar a eventos que son similares a la señal emitida, para GPR las propiedades eléctricas y magnéticas en un campo varían junto con el tiempo (Butler, 2005).

El sistema de radar permite que la antena del transmisor (Tx) genere una serie de ondas que se propagan ampliamente a altas velocidades. El tiempo de viaje de una onda, del transmisor hasta su regreso a la antena receptora (Rx), es de nanosegundos (ns) por lo que el método de radar requiere de una instrumentación precisa para captar el instante de arribo de la onda.

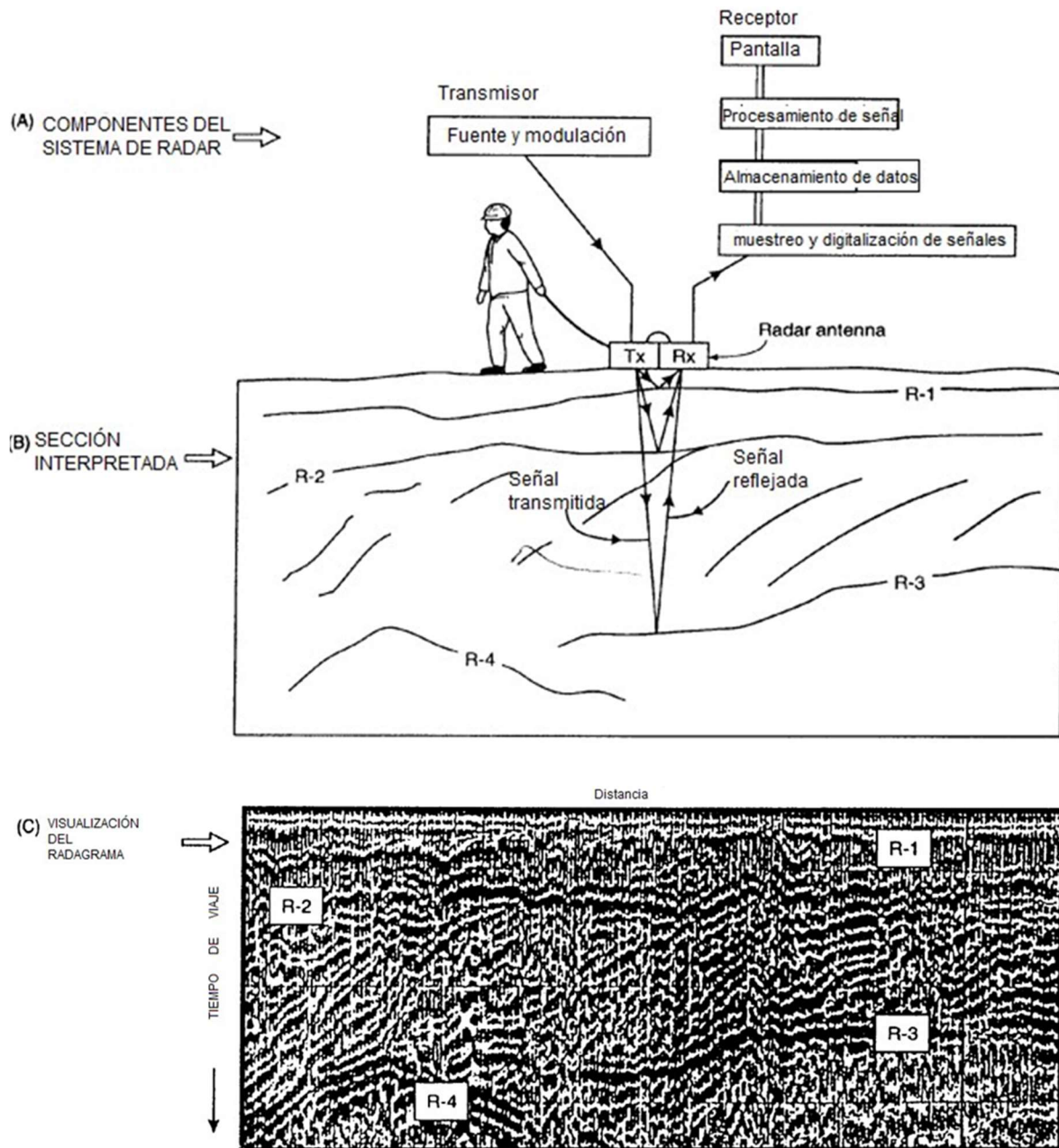


Figura 5. A) diagrama de cómo está constituido el sistema de radar. B) Sección interpretada y C) la visualización del radargrama. Imagen modificada de Reynolds, 2011.

Para describir las señales de GPR es necesario hablar de las ecuaciones de Maxwell, que describen matemáticamente la física de los campos electromagnéticos y de las relaciones constitutivas que cuantifican las propiedades materiales.

3.1.1 Ecuaciones de Maxwell

Los campos electromagnéticos y las propiedades que se relacionan se expresan de la siguiente manera:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1) \qquad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3) \qquad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

Donde:

ρ = densidad de carga eléctrica (C/m^2) \vec{H} = campo magnético (A/m)

\vec{B} = vector de densidad de flujo magnético (T) t = tiempo (s)

\vec{D} = vector de desplazamiento eléctrico (C/m^2) \vec{E} = campo eléctrico (V/m)

\vec{J} = vector de densidad de corriente eléctrica (A/m^2)

3.1.2 Ecuaciones constitutivas

Las relaciones constitutivas relacionan las propiedades físicas de los materiales a los campos electromagnéticos. Proporcionan una descripción de cómo las moléculas, átomos, etc., responden a la masa de la aplicación de un campo, para el método de radar se deben utilizar 3 cantidades:

1. La **conductividad eléctrica** describe cómo fluyen las cargas libres para formar una corriente cuando un campo eléctrico está presente.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

2. La **permitividad dieléctrica** es la capacidad de un cuerpo para polarizarse ante la presencia de un campo eléctrico.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (6)$$

3. La **permitividad magnética** es la disposición que tiene un cuerpo que permite el paso de las líneas del campo magnético.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (7)$$

Donde:

μ = Permeabilidad magnética ε = Constante dieléctrica o permitividad eléctrica

3.1.3 Ecuación de onda y propiedades de la onda electromagnética

Combinando las ecuaciones de Maxwell (1 y 4) más las relaciones constitutivas se obtiene la ecuación de onda vectorial transversal. Si tenemos un medio lineal, homogéneo e isótropo en ausencia de fuente, la ecuación de onda es:

$$\nabla^2 \times \bar{E} - \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (8)$$

$$\nabla^2 \times \bar{B} - \mu\sigma \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

Resolviendo la ecuación de onda para el campo eléctrico tenemos

$$\bar{E} = E_0 e^{-i\gamma z} \bar{t} \quad (10)$$

Donde z = impedancia y γ =constante de propagación, donde el vector de propagación es expresado como $\gamma = a - ib$ donde:

a : es la constante de fase la cual es la encargada de ir retrasando a la onda electromagnética cuando ésta se desplaza en un medio y es expresada como:

$$a = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2} [\sqrt{\sigma^2 + \varepsilon^2\omega^2} + \varepsilon\omega]} \quad (11)$$

b es la constante de atenuación y se expresa como:

$$b = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2} [\sqrt{\sigma^2 + \varepsilon^2\omega^2} - \varepsilon\omega]} \quad (12)$$

El Skin depth es la profundidad de penetración de la onda electromagnética, es decir, es la distancia que recorre una onda electromagnética para atenuar su amplitud en e y se expresa:

$$\delta = \frac{1}{b} \quad (13)$$

La impedancia es la relación entre los campos E y H para una onda electromagnética transversal en un medio no limitado, conocida también como impedancia intrínseca expresada como:

$$Z = \frac{E}{H} \quad (14)$$

Para el caso donde la división tome una componente del campo magnético H en el mismo punto la onda se conoce como impedancia de onda y es expresado como:

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} \quad (15)$$

La velocidad de fase es la velocidad que debe moverse la onda para que todos los puntos en un mismo plano se encuentren en la misma fase expresado de la siguiente manera:

$$v = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{\mu\omega}{2}[\sqrt{\sigma^2 + \varepsilon^2\omega^2} + \varepsilon\omega]}} \quad (16)$$

La longitud de onda electromagnética es directamente proporcional a la velocidad de propagación e inversamente proporcional a la frecuencia expresado como:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1}{f \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}[\sqrt{(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega})^2 + 1} + 1]}} \quad (17)$$

3.2 Tomografía de resistividad eléctrica

El método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) es creado para estudiar la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo proporcionadas en imágenes 2D o 3D. Esta técnica consiste en designar dos electrodos de corriente y dos de potencial, que miden la diferencia del potencial creado, obteniendo así los valores de resistividad aparente del subsuelo.

Para la obtención de la resistividad aparente se utilizan los cuatro electrodos (dos de corriente y dos de potencial) con un espaciado que, una vez que se ha escaneado toda la matriz, va desplazándose lateralmente por lo que la separación de los electrodos se incrementa, repitiendo el método hasta haber adquirido los datos de resistividad aparente dando como resultado una pseudosección de la zona estudiada. Al cambiar el espacio entre electrodos se especifican las resoluciones vertical y horizontal, donde esta última es definida por el espaciado de electrodos (a) y la vertical por la mitad del espaciado como se muestra en la Figura 6 (Reynolds, 2011).

Con la obtención de la pseudosección se tiene un acercamiento a la distribución del suelo, pero es necesario un procesamiento e inversión de los datos para poder interpretar. Como se menciona, este método toma los cambios de resistividad de forma horizontal y vertical haciéndola efectiva para fines geotécnicos, hidrogeológicos, ambientales, entre otros.

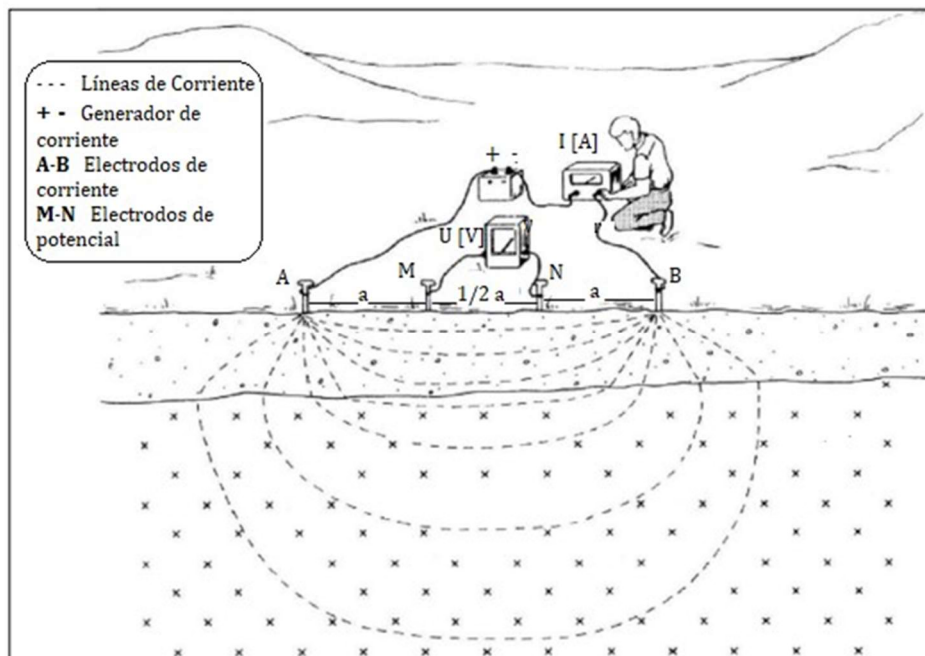


Figura 6. Principio del método resistivo. Modificado de (Okpoli, 2013).

3.2.1 Resistividad

La resistividad es una medida de la dificultad con la que las rocas permiten el flujo de la corriente eléctrica. Esta propiedad es una función con algunas de las propiedades de las rocas (porosidad, permeabilidad, temperatura, entre otras). El concepto de conductividad puede considerarse como la facilidad del paso de corriente eléctrica, entonces será el inverso de la resistividad (Orellana, 1982).

La resistividad y conductividad se expresan:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad [\Omega \cdot m] \quad (18)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad [ds \cdot m] \quad (19)$$

Donde:

R: resistencia del material (V / I) ρ : resistividad eléctrica

A: área del material l: longitud del material

σ : conductividad

Para determinar los valores de resistividad de las estructuras geológicas se debe tener conocimiento de la propiedad física de ésta, a los materiales que se pueden encontrar en el subsuelo. Podemos decir que la resistividad disminuye debido al grado de fracturación, porosidad y porcentaje de fluido que se encuentran en las rocas.

El principio físico se basa en la conocida ley de Ohm. A través de dos pares de electrodos puntuales (A y B) Se inyecta una corriente al subsuelo, mientras que otro par de electrodos puntuales (M y N) medirán la diferencia de potencial como se muestra en la Figura 6.

3.2.2 Ecuaciones Generales

Partimos de las ya mencionadas ecuaciones de Maxwell para describir al método:

Ley de Faraday (ecuación 1) y Ley de Ampere (ecuación 2). Para la prospección eléctrica se considera el campo estacionario, es decir, que no varía la magnitud ni dirección respecto al tiempo, entonces las derivadas temporales se anulan, quedando de la siguiente manera:

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = 0 \quad (20)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_I + \vec{J}_C \quad (21)$$

Donde \vec{J}_I se conoce como la densidad de corrientes impresas y \vec{J}_C es la densidad de corriente de conducción las cuales obedecen a la Ley de Ohm. La ecuación 20 nos dice que el campo eléctrico E es conservativo e irrotacional, por lo que proviene de un potencial escalar. La relación entre el potencial eléctrico U y el campo de intensidad eléctrico está dado por (Loke, 2004):

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla U(\vec{r}) \quad (22)$$

De la ecuación (5) expresada en el método de GPR, representa a la ley de Ohm y ésta relaciona el campo eléctrico \vec{E} y \vec{J} . Lo que se mide en la práctica del método eléctrico es el potencial del campo eléctrico, combinando (5) y (22) tenemos:

$$\vec{J}(\vec{r}) = -\sigma \nabla U(\vec{r}) \quad (23)$$

En todos los puntos se cumplirá la siguiente ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}) = 0 \quad (24)$$

Que no ser un medio estacionario, la densidad de corriente \vec{J} se reducirá a

$$\nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}) = 0 \quad (25)$$

Sustituyendo \vec{J} de la ecuación (24)

$$\nabla^2 U(\vec{r}) = \frac{-\nabla \sigma \cdot \nabla U}{\sigma} \quad (26)$$

Despejando nos queda

$$\nabla \sigma \cdot \nabla U(\vec{r}) + \sigma \nabla^2 U(\vec{r}) = 0 \quad (27)$$

Esta ecuación será válida en todo el semiespacio conductor, pero no en los electrodos, ni en las superficies de discontinuidad de la resistividad (Orellana, 1982).

3.2.3 Resistividad Aparente

Para un medio homogéneo y una fuente puntual colocada en su superficie la corriente fluye radialmente alejándose de la fuente mientras que el potencial varía inversamente con la distancia a la fuente de corriente. Las superficies equipotenciales tienen forma esférica y el flujo de corriente es perpendicular a las superficies equipotenciales (Loke, 2004). El potencial está dado por:

$$\varphi = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (28)$$

Donde r es la distancia de un punto en el medio al electrodo. En el sitio se utilizan como mínimo dos electrodos de corriente uno de corriente positiva y uno de corriente negativa.

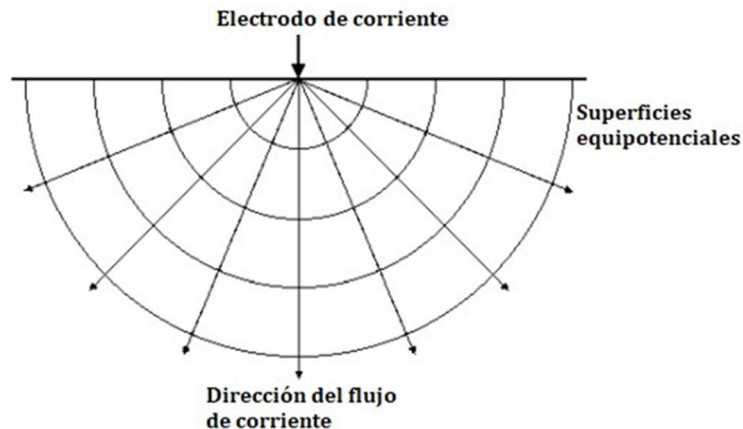


Figura 7. Flujo de corriente para una fuente puntual y la forma de distribución del potencial. Modificada de (Loke, 2004).

El arreglo típico de 4 electrodos donde r representará el espaciamento entre electrodos dándonos como resultado el potencial que puede ser medido en un semiespacio homogéneo expresado como:

$$\Delta\varphi = \rho I \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P2}} - \frac{1}{r_{C3P3}} + \frac{1}{r_{C4P4}} \right) \right] \quad (29)$$

Donde r_{C1P1} será el espacio que se encuentra entre los electrodos de corriente y de potencial. Para la resistividad aparente es necesario despejar a ρ y los valores dentro del corchete lo reemplazamos como $1/k$ la ecuación es simplificada es:

$$\rho = k \frac{\Delta\varphi}{I} \quad (30)$$

$$\text{donde} \quad k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{C1P1}} + \frac{1}{r_{C2P2}} + \frac{1}{r_{C3P3}} + \frac{1}{r_{C4P4}}\right)}$$

Conocido como factor geométrico que depende de los arreglos de los 4 electrodos. Normalmente los instrumentos de medición de resistividad dan un valor de resistencia $R = \Delta\varphi/I$ por lo tanto en el sitio los valores de resistividad aparente son calculados por

$$\rho_a = kR \quad (31)$$

El valor de resistividad aparente no es el verdadero valor de la resistividad del subsuelo; este valor expresa la resistividad en el centro del arreglo (punto de atribución). Para obtener valores de resistividad verdadera del subsuelo, es necesario realizar una inversión.

3.2.4 Arreglo en 2D

Wenner-Schlumberger

Es el conjunto de los arreglos Wenner y Schlumberger (Pazdirek y Blaha 1996). El factor "n" para esta matriz es la relación entre la distancia entre los electrodos C1-P1 (o P2-C2) y el espacio "a" entre el par de potencial P1-P2 ("a" que será constante).

El área de mayor sensibilidad positiva se vuelve más concentrada debajo de los electrodos de potencia, a medida que aumenta el factor "n". La profundidad media de investigación para este conjunto es aproximadamente un 10% mayor que la del conjunto Wenner para la misma distancia entre los electrodos externos (C1 y C2) para valores "n" mayores que 3. La intensidad de la señal para este conjunto es aproximadamente inversa proporcional al cuadrado del valor "n".

El factor geométrico para este arreglo está expresado como:

$$k = \pi n(n + 1)a \quad (32)$$

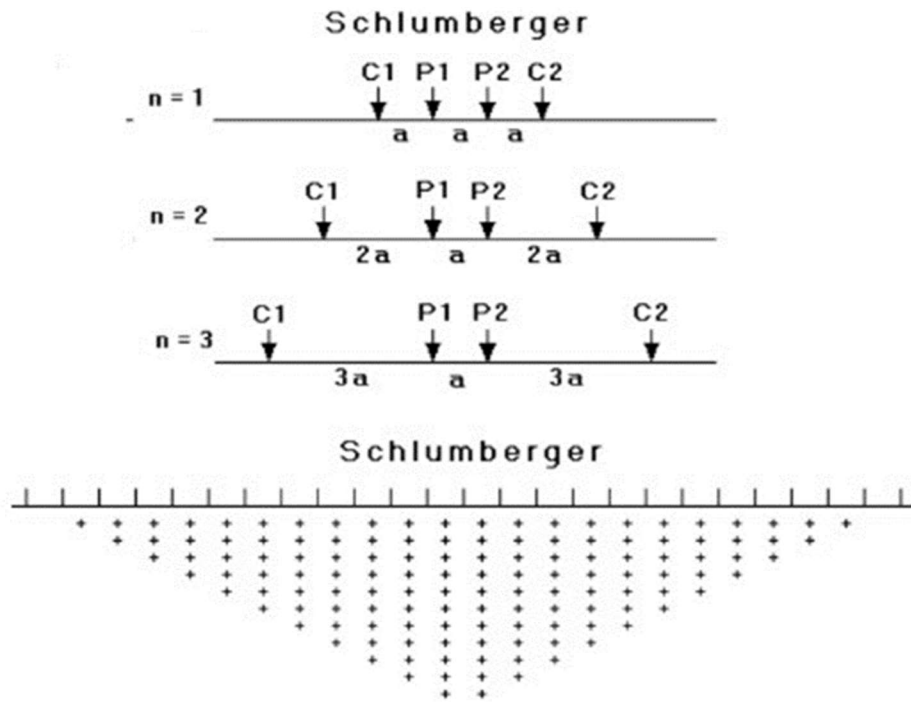


Figura 8. Arreglo y pseudosección Wenner-Schlumberger. Modificado de (Loke, 2004).

3.3 Métodos Sísmicos

Los métodos sísmicos implican la generación y registro de ondas sísmicas con el objetivo de poder caracterizar el subsuelo. Los métodos son basados en la propagación de ondas mediante una fuente y un conjunto de receptores que posteriormente pasa por un análisis de un campo de ondas registrado correlacionando con las propiedades del subsuelo. La investigación de los métodos sísmicos varía dependiendo la separación de fuente-receptor dando como consecuencia el resultado de la profundidad aproximada del método, dominando la investigación cercana a la superficie.

3.3.1 Tendido de refracción sísmica

El método refracción sísmica es utilizado para caracterizar la geometría de las interfaces geológicas poco profundas, se centra en que un medio poco profundo separa material superficial a partir de un material subyacente de propiedades físicas contrastantes. Si la velocidad de la capa superficial es menor a la de la capa subyacente la primera onda que llegue a la interfaz poco profunda será una “head wave” o frente de ondas. Los tiempos de llegada de la onda P a los receptores suelen proporcionar datos adecuados para estimar la profundidad del lecho rocoso.

La teoría del método de refracción se basa en el rastreo de los rayos incidentes que está estrechamente relacionado con la ley de Snell que consiste en que cuando una onda incide sobre el límite entre dos medios, parte de la energía se refleja y otra parte incide en el segundo medio cambiando de dirección y formando un ángulo con la superficie. Las fórmulas que definen la ley de Snell son las siguientes:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{refracción general} \quad (33)$$

$$\sin i_c = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{refracción crítica} \quad (34)$$

Donde es el ángulo que se produce en la refracción crítica y V_2 es mayor a V_1 . Estas últimas representan a las velocidades de la capa superior e inferior, i y r son los ángulos de incidencia y de refracción (Reynolds, 2011) (Figura 9).

El tendido de refracción sísmica ocurre cuando una onda sísmica (onda P) incide sobre un límite a través del cual hay un contraste de velocidad, entonces la dirección de la onda cambia al entrar

en un nuevo medio. El contraste de la velocidad sísmica a través del límite de acuerdo con la ley de Snell varía la cantidad de cambio de dirección de la onda.

El método supone que cada capa encontrada es mayor a la longitud de onda de la energía incidente y que la capa sucesiva tiene mayor espesor que la anterior. Para generar las ondas P se utiliza una fuente como un mazo sobre una placa o explosivos entre otros, las ondas generadas por la fuente viajan de formas diferentes: a lo largo de la superficie (onda directa), por reflexión desde la parte superior del refractor y por refracción a lo largo de la parte superior de los refractores (Figura 9). La llegada de las ondas es detectada por un conjunto de geófonos y se registra en un sismógrafo mostrando una sola traza el conjunto de ellas es llamada sismograma (Figura 9 B)), se identifica el inicio de cada llegada de la onda P para cada geófono y el tiempo mostrado en un gráfico tiempo-distancia llamadas dromocronas. La distancia es el desplazamiento en que el ángulo de reflexión es igual al ángulo crítico y en el tiempo solo se consideran los de llegada directos y refractados.

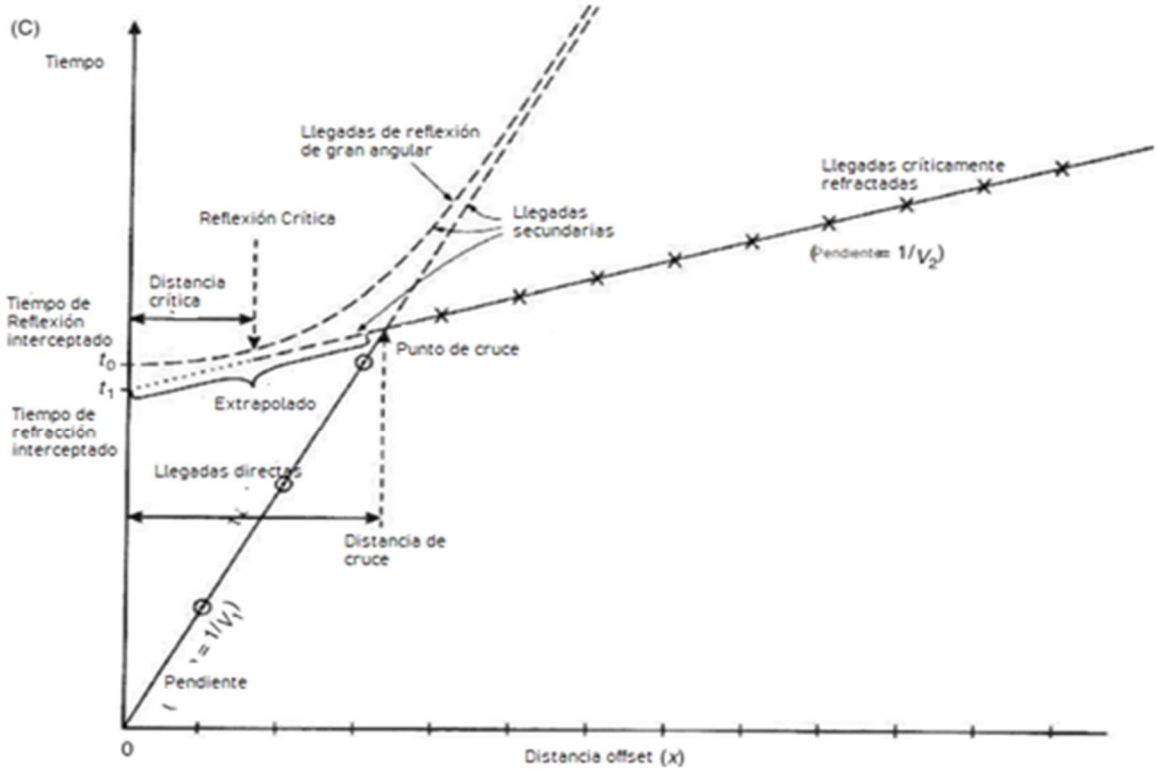
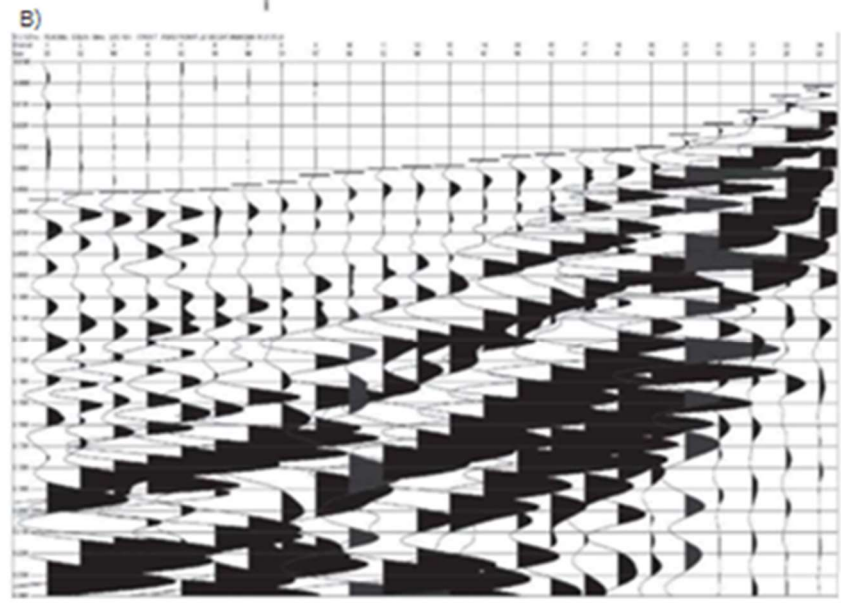
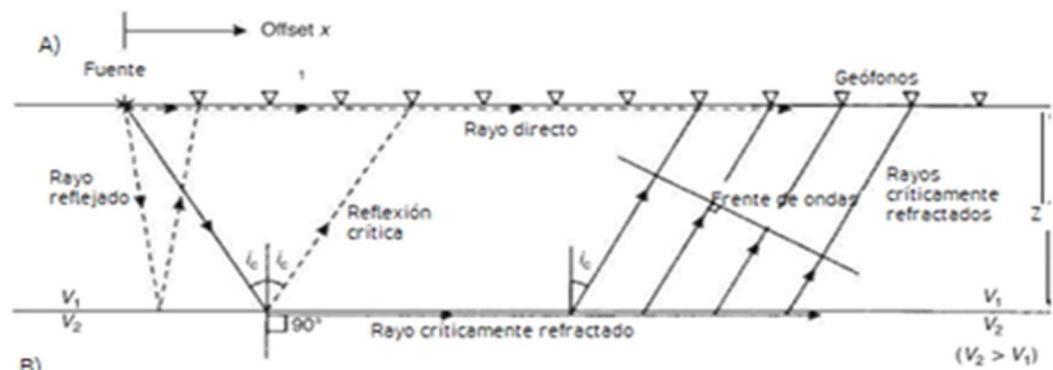


Figura 9. A) Muestra la trayectoria de los rayos directos, reflejados y refractados (modificado de Reynolds, 2011). B) Ejemplo de un sismograma mostrando el picado de los primeros arribos tomado de (Reynolds, 2011). C) Tiempo de arribo mostrado en un gráfico tiempo-distancia modificado de (Reynolds, 2011).

Al aplicar la fuente en el punto S (Figura 10) las ondas viajan hacia A donde pasa por un proceso crítico de rayos refractados y finalmente llega a B. El frente de onda que se origina en B viaja a través de la capa 1 que es detectado por un geófono en G el cual está desplazado a una distancia "x" del tiro S (Reynolds, 2011). El tiempo total de viaje es la suma de los tres tiempos de viaje expresados a continuación explicado con la Figura 9 y Figura 10 junto con el gráfico de tiempo-distancia para el caso de 2 capas y consiste en:

$$\text{El tiempo total de viaje es } T_{SG} = T_{SA} + T_{AB} + T_{BG} \quad (35)$$

donde:

$$T_{SA} \text{ (tiempo total de S a A)} = T_{BG} = z/(V_1 \cos i_c) \quad (36)$$

$$T_{AB} \text{ (tiempo total de A a B)} = (x - 2z \tan i_c)/V_2 \quad (37)$$

$$T_{BG} \text{ (tiempo total de B a G)} = z/(V_1 \cos i_c) \quad (38)$$

Sustituyendo las expresiones (36) y (37) en (38) obtenemos V_1

$$T_{SG} = \frac{z}{V_1 \cos i_c} + \frac{x - 2z \tan i_c}{V_2} + \frac{z}{V_1 \cos i_c} \quad (39)$$

$$\text{Simplificado es } T_{SG} = \left(\frac{1}{V_2}\right)x + \frac{2z \cos i_c}{V_1} \quad (40)$$

Donde la ecuación 40 es la ecuación general de la línea recta $y = mx + c$ donde m es el gradiente y c es el intercepto en el eje y en la gráfica tiempo-distancia. En esta ecuación el gradiente es $\left(\frac{1}{V_2}\right)$ y c es el tiempo de refracción interceptado t_i (Figura 9) entonces $t_i = \frac{2z \cos i_c}{V_1}$

Recordando de la ley de Snell $\sin i_c = \frac{V_1}{V_2}$ por lo tanto:

$$\cos i_c = \left(1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}\right)^{1/2} \text{ de } \sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad (41)$$

Una alternativa de la ecuación (41) es:

$$T_{SG} = \frac{x(\sin i_c)}{V_1} + \frac{2z \cos i_c}{V_1} \quad (42)$$

o $T_{SG} = \frac{x}{V_2} + t_i \quad (43)$

Donde $t_i = \frac{2z(V_2^2 - V_1^2)}{V_1 V_2} \quad (44)$

Despejando z tenemos el cálculo del espesor para la capa

$$z = t_i V_1 V_2 / 2(V_2^2 - V_1^2)^{\frac{1}{2}} \quad (45)$$

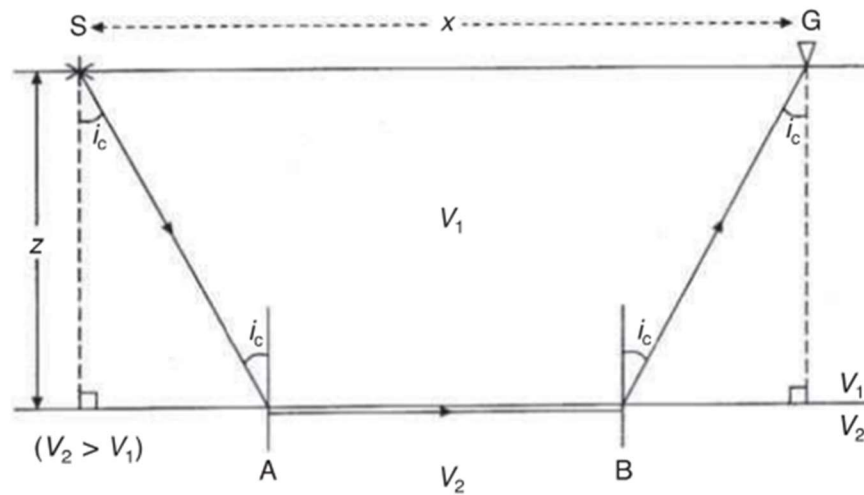


Figura 10. Ruta de rayos simple para una estructura de dos capas tomada de (Reynolds, 2011).

3.3.2 Método de cocientes espectrales (HVSR)

El método de Nakamura (1989) sirve para estimar la frecuencia de resonancia y la amplificación de los movimientos del suelo provocados por una capa superficial mediante mediciones de una sola estación realizadas en la superficie. Consiste en una adquisición del movimiento provocado del suelo de tres componentes y consiste en dividir el espectro de Fourier horizontal y vertical (H/V) o (HVSR). Esta relación se denomina curva donde la relación se calcula utilizando los espectros de velocidad del movimiento del suelo, aunque se pueden utilizar los espectros de desplazamiento o aceleración.

Para limitar las propiedades sísmicas del subsuelo es necesario utilizar en su totalidad la curva H/V por lo que un modelo teórico tendrá que vincular el patrón de la curva con las propiedades mecánicas de los cuerpos geológicos en la zona de medición. Como el método se refiere a las vibraciones ambientales, cualquier modelo de la curva H/V será también un modelo de campo de ondas de vibración ambiental, por lo tanto, tendrá coherencia con los hallazgos sobre el campo de ondas de vibración ambiental y no solo proporciona una forma aceptable de reproducir la curva H/V.

Las características de las componentes horizontales y verticales cambian dependiendo del medio donde sea adquirido, esto depende si el medio es un suelo blando o duro. La componente horizontal es mayor que la vertical en un suelo blando, mientras que la componente horizontal y vertical son casi iguales al igual que sus formas de onda en un suelo duro. La relación H/V del valor máximo en sitios de suelo blando (fill site o "f" (Nakamura, 2019)), H_{fmax}/V_{fmax} es similar a la relación entre el valor máximo horizontal de suelo blando y el valor máximo horizontal de sitios de suelo duro (bedrock, o "b" (Nakamura, 2019)), H_{fmax}/H_{bmax} que es el factor de amplificación. El máximo horizontal y vertical son casi lo mismo en un suelo duro $H_b/V_b \approx 1$ lo que significa que hay poca amplificación (Nakamura, 2019).

El cálculo del cociente H/V se muestra en la Figura 20 donde se realizan los siguientes pasos:

1. Leer la señal del ruido ambiental por cada componente.
2. Seleccionar las ventanas de tiempo.
3. Calcular y suavizar el espectro de Fourier de cada componente.

4. Obtención de media cuadrática de las componentes horizontales (se calcula el espectro H promediando ambos espectros horizontales en cada ventana) la fórmula que se utiliza es la siguiente.

$$H(i) = \sqrt{\frac{H_N^2(i) + H_E^2(i)}{2}} \quad (46)$$

5. Calcular la relación H/V para cada ventana.

$$\left[\frac{H}{V}\right](i) = \frac{H(i)}{Z(i)} \quad (47)$$

Donde i es el número de ventana calculada.

6. Se calcula el promedio de la relación H/V.

$$\frac{H}{V} = \frac{1}{n} \sum_1^n \left[\frac{H}{V}\right] \quad (48)$$

Donde n es el número de la ventana calculada.

El fenómeno que ocasionan las ondas Rayleigh consiste en que las características de amplificación de los movimientos horizontales por la capa superficial son estimadas a partir de la relación de los espectros de movimiento horizontal medidos en sitios de relleno blando y de lecho rocoso: H_f / H_b (Nakamura, 2019).

Para los micro temblores es difícil determinar la frecuencia de resonancia correspondiente a la capa superficial debido a que puede presentar varios picos, también se distingue la amplificación causada por múltiples reflejos de la onda SH en estos.

El componente vertical del movimiento se estima que sea grande para las ondas Rayleigh donde se reduce la influencia de estas utilizando la relación del movimiento vertical en sitios blandos y duros: V_f / V_b (Nakamura, 2019). Los efectos de múltiples reflexiones de onda de corte (SH) de polarización horizontal y picos reducidos ocasionados por la onda Rayleigh dividiendo el espectro de transferencia horizontal H_f / H_b por la relación de los movimientos verticales V_f / V_b . La proporción de movimientos verticales entre un sitio blando y duro sea 1 en el rango de frecuencia que contiene el pico primario de la onda de corte (SH). Si predominan las ondas Rayleigh el pico predominante del movimiento vertical está aproximadamente al doble de la frecuencia de onda SH, entonces el procedimiento de división por V_f / V_b pueden reducir los picos causados por estas ondas sin afectar la medición de amplificación de ondas de corte (SH).

Con este procedimiento se puede estimar la frecuencia de resonancia y el factor de amplificación causados por múltiples reflexiones de ondas de corte (SH) utilizando registros de movimientos de microtemblores (Nakamura, 2019). La relación de amplitud espectral se convierte en la relación entre la relación espectral de la superficie del suelo H_f / V_f y la relación espectral de la base H_b / V_b . La relación espectral del movimiento horizontal a vertical de suelo duro H_b / V_b es casi 1 para un amplio rango de frecuencia.

Si la forma H_b/V_b en el sitio es considerado el terreno base no es ampliamente 1 y plana si no que tiene picos, significa que el sitio observado no está en el terreno base, por lo tanto, estimar el factor de amplificación en un sitio basándose en el sitio considerando el terreno base, es necesario dividir H_f / V_f del sitio objetivo por H_b / V_b del sitio considerando el terreno base (Nakamura, 2019).

4. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

La metodología de trabajo se puede ejemplificar en el diagrama de flujo que se observa en la Figura 11.

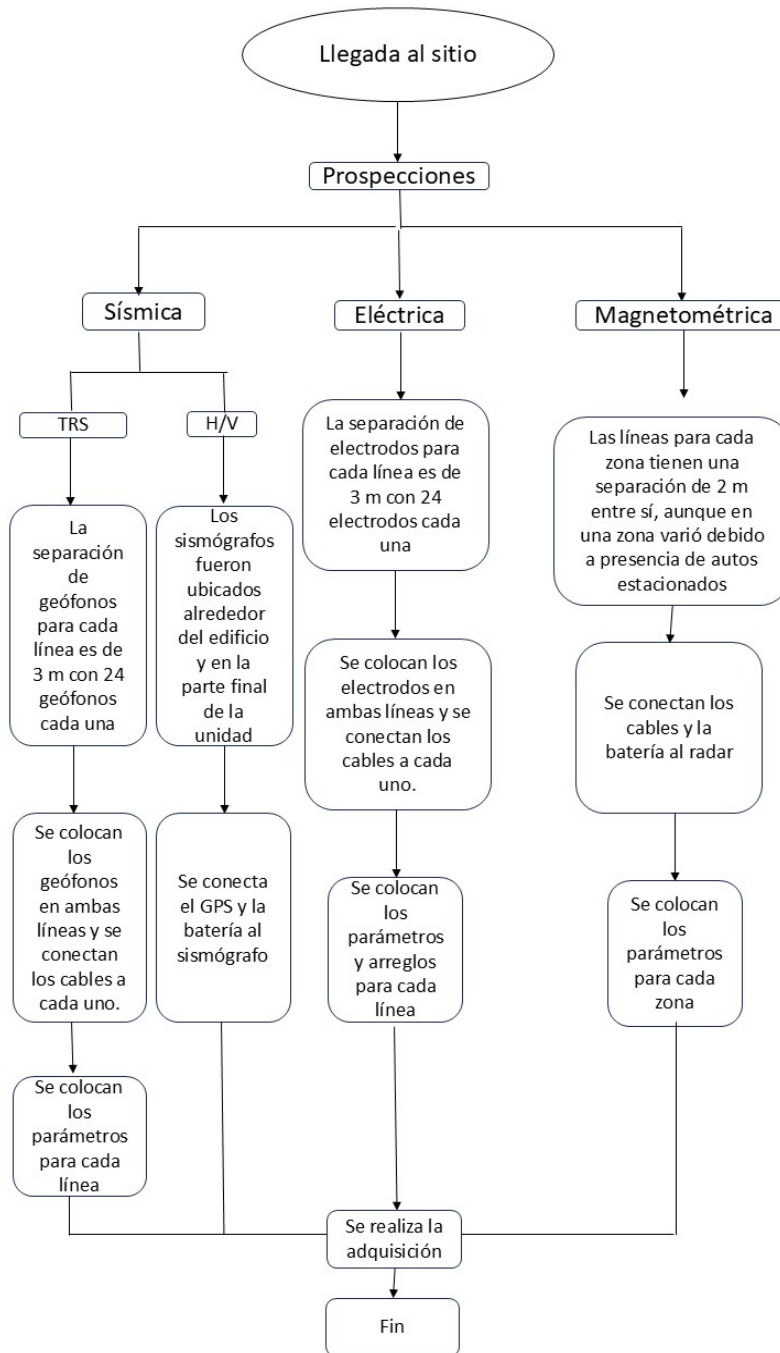


Figura 11. Diagrama del flujo de trabajo.

4.1 Radar de Penetración Terrestre (GPR)

4.1.1 Equipo utilizado

El equipo utilizado para el método de Radar de Penetración Terrestre es un equipo de origen sueco, cuyas especificaciones se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Equipo utilizado para la prospección electromagnética.

Instrumentos	Descripción
Antena MALA® 1 unidad	<ul style="list-style-type: none">• Antena y receptor de 250 [MHz] blindada• Dimensiones de 74 x 44x16 [cm]
XV monitor MALA® 1 unidad	Batería de iones de litio de 12 [V] para un funcionamiento de 5 [h].
MALA® Professional Explorer (ProEx) 1 unidad	<ul style="list-style-type: none">• Frecuencia de 100 a 200 [kHz].• Muestreo de 128 a 2048.• Apilamiento de 2>400 [GHz]• Velocidad de 100 [Mbit/s]
Cinta métrica 1 unidad	50 [m]
Baterías 2 unidades	Baterías de 1.6 [V]
GPSMAP 64s GARMIN 1 unidad	

4.1.2 Diseño de adquisición GPR

Para el método de Radar de Penetración Terrestre se pretende rodear el edificio con el fin de adquirir los datos en 3 zonas diferentes (Figura 12). Cada una de las zonas se componen por líneas de diferente longitud con el propósito de abarcar la mayor zona de estudio.

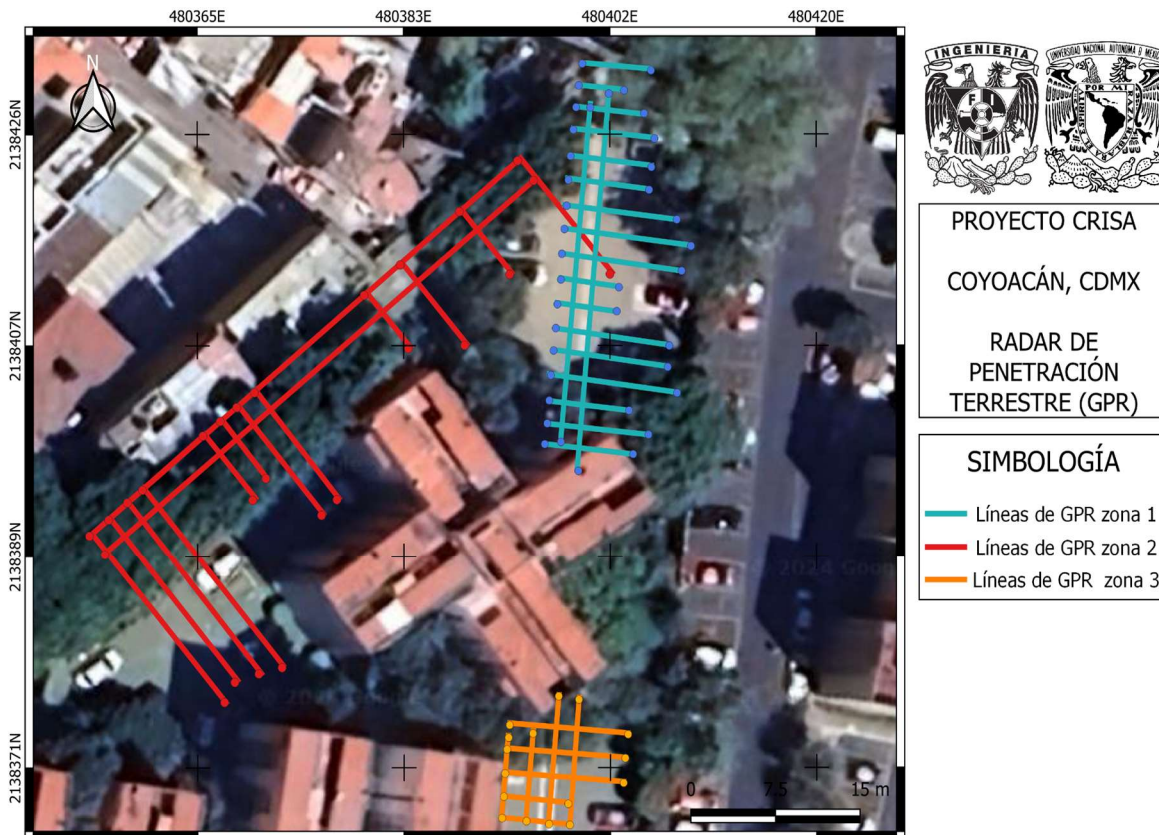


Figura 12. Mapa de adquisición GPR unidad CRISA.

La zona 1 abarcará la parte NE del edificio y contará con líneas las cuales 2 serán en dirección S-N contando con la mayor longitud, las líneas restantes serán en dirección W-E que van desde un extremo del edificio hasta el final de la unidad.

La zona 2 abarcará la parte NW del edificio y contará con el número de líneas donde la última se empalma con la zona 1 pero con diferente longitud, 2 de las líneas tendrán una longitud de 50 m con dirección W-E y las restantes serán en dirección S-N rodeando la mayor parte del edificio.

La zona 3 abarcará la parte S-E del edificio, siendo la más pequeña contará con un número pequeño de líneas, las cuales unas serán en dirección S-N y otras en dirección W-E que acabará

de rodear el edificio. Los espacios restantes son ocupados por jardineras que impiden el paso para la adquisición de datos con este método.

4.1.3 Adquisición en campo GPR

Cada una de las zonas fueron orientadas y medidas haciendo una malla para cada una, así se comenzaba desde un nuevo origen para cada una orientando la antena a cada línea que se deseaba adquirir, teniendo un orden en las distancias y forma para cada zona.

Para la zona 1 la malla que se decidió para esta zona fue de 29 m dirección norte y lo que se pudiera abarcar en dirección este, los 29 m se dividieron cada 2 m para hacer las líneas dirección este partiendo 1 m antes de la línea dirección norte para abarcar más zona. Debido a las jardineras en esta zona algunas mediciones de las líneas comenzaban antes de la malla ya hecha, es decir, el origen comenzaba negativo para obtener una mejor señal y abarcar lo mayor posible.

A lo largo de cada línea de esta zona se encontró con una línea de tubería o coladeras anotando las distancias de cada una para que al momento del procesamiento se tenga en cuenta la presencia de estas e identificar las anomalías para evitar ser confundidas y ser interpretadas de diferente manera.

Para la zona 2 la malla fue de 50 m dirección norte, en esta zona fue posible realizar 2 líneas de la misma longitud, en dirección este se adquirieron los datos hasta donde se pudo abarcar debido a la presencia de automóviles estacionados o del mismo edificio teniendo como origen la primera línea de 50 m con un espaciamiento de cada 2 m para cada línea en dirección este.

Las líneas más largas se encontraron con drenajes o tomas de agua anotando las distancias donde se identificaron cada una, para las líneas cortas en dirección este fueron pocas las líneas que pasaban por un drenaje o coladeras.

Para la zona 3 la malla fue de 7 m dirección norte y lo que se podía abarcar en dirección este ya que se encontraban coches estacionados o la presencia de jardineras, teniendo como origen la primera línea en dirección norte y con un espaciamiento de 2 m para cada línea en dirección este.

Las mediciones de las líneas para esta zona fueron alrededor de una tubería, anotando la distancia en la que se encontraba esta, así como la presencia de drenajes en algunas en dirección norte.

Los parámetros de adquisición para este método fueron los siguientes:

- Antena: 250 Hz
- Velocidad de onda: 120 m/ns
- Tiempo de Ventaneo: 64 ns (4 m de profundidad)
- Punto de intervalo: 0.050 m

4.1.4 Procesamiento de los datos

El procesamiento de los datos consiste en la siguiente secuencia de pasos, que también se observa en la Figura 13:

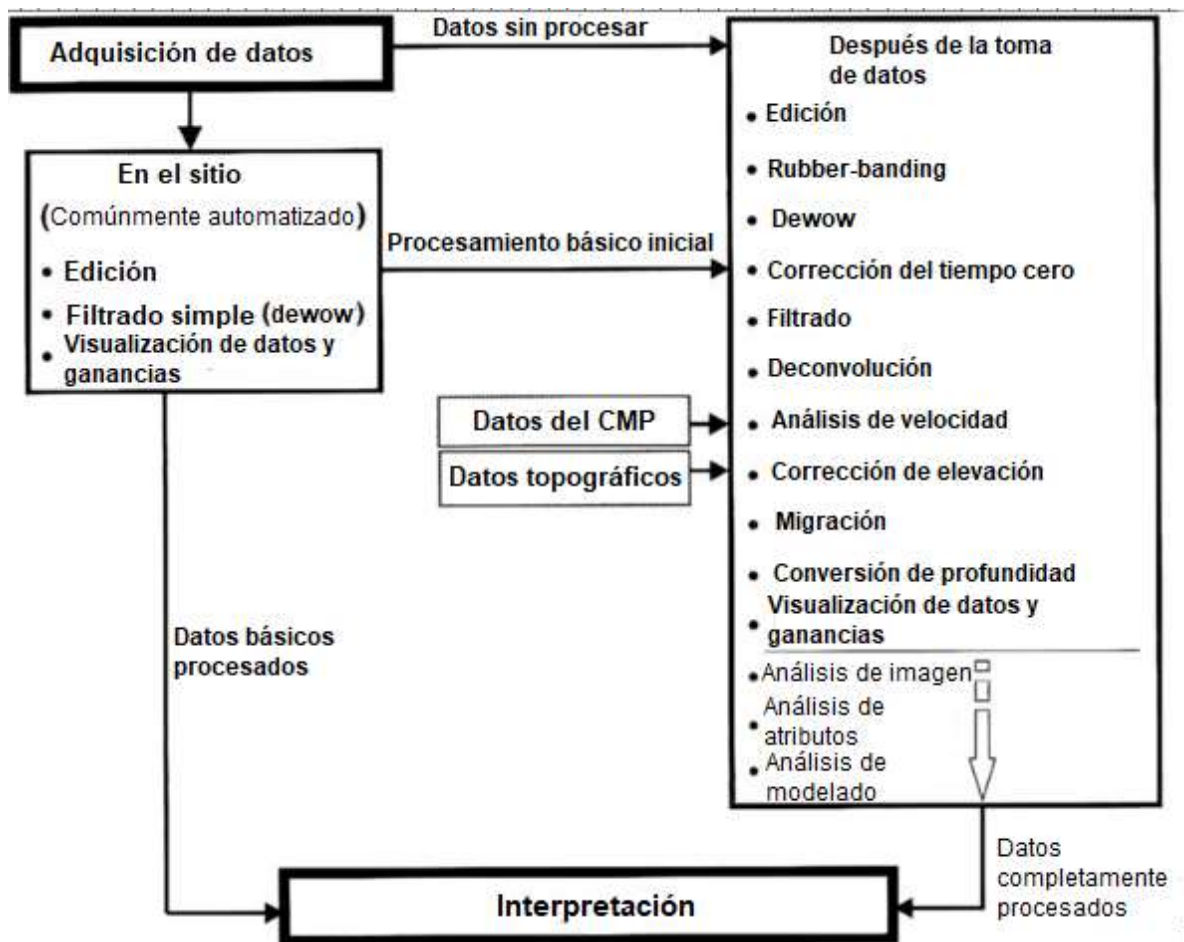


Figura 13. Secuencia de procesamiento modificada de Reynolds (2011).

Para el procesamiento de todas las líneas del método de GPR fueron realizados los siguientes pasos:

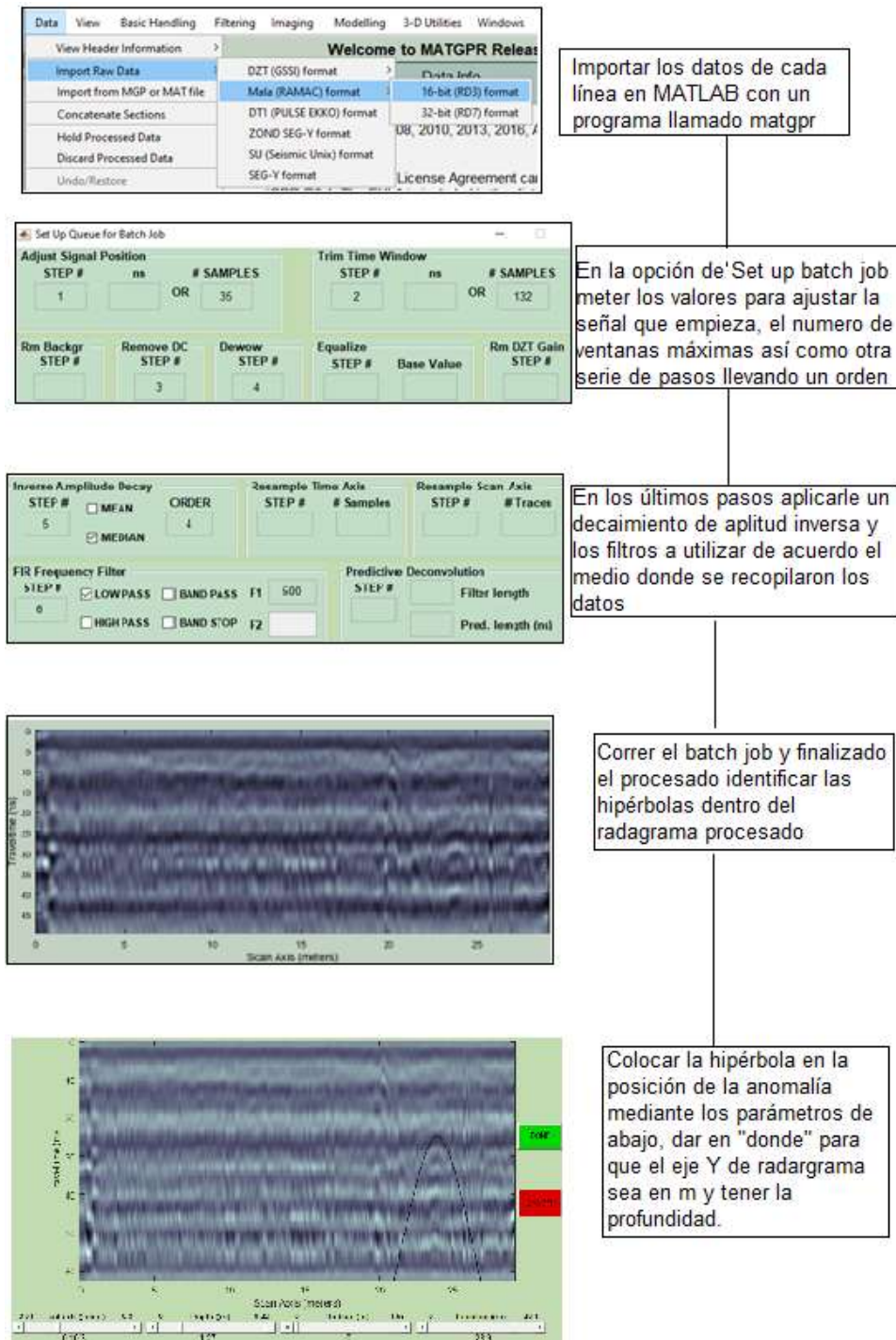


Figura 14. Procesado de GPR mediante el lenguaje de programación MATLAB con el programa MATGPR.

El filtro de pasa bajas solo fue utilizado para las líneas largas que se encuentran en la zona 1 y zona 2 del sitio de adquisición, mientras que para las demás líneas se realizó hasta el paso 5.

4.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

4.2.1 Equipo utilizado

El equipo utilizado para la prospección eléctrica es un equipo de origen francés, de marca IRIS Instruments, sus características se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Equipo utilizado para la realización de la prospección eléctrica (TRE).

Instrumentos	Descripción
IRIS Instruments Syscal Pro 1 unidad	<ul style="list-style-type: none">● Voltaje de inyección: 1,000V en modo manual.● Corriente máxima: 2.5A, 0.2% 250W.● Tiempos de inyección: 0.2s, 0s, 1s, 2s, 4s y 8s.● Número de canales: 10.● Impedancia: 100 Mohm.● Memoria: 44,800 lecturas.● Entrada GPS para coordenadas.● Batería: Posee una interna de 12V, así mismo se le puede conectar una batería externa de 12V.
Cable multinúcleo 2 unidades	Cable de 24 nodos con espaciamento de 5 m.
Electrodos 48 unidades	Electrodos de acero de 1 m de largo.
Cables caimán-caimán 48 unidades	Cables con cubierta de cobre tipo pinza en cada extremo
Batería (12V) 1 unidad	Batería de litio
GPSMAP 64s GARMIN 1 unidad	
Marro 4 unidades	Marro con mango de madera y cabeza de metal
Cinta métrica 2 unidades	
Bidón 1 unidad	Recipiente de plástico

4.2.2 Diseño de adquisición TRE 2D

Para la Tomografía de Resistividad Eléctrica se planea realizar dos líneas con una magnitud de 69 m cada una, la primera en dirección NE- SW y la segunda en dirección NE-SW (Figura 15). Cada línea estará conformada de 24 electrodos, dando en total 48 electrodos con un espaciamiento de 3 m tratando de llegar al final de la unidad y a los extremos del edificio.

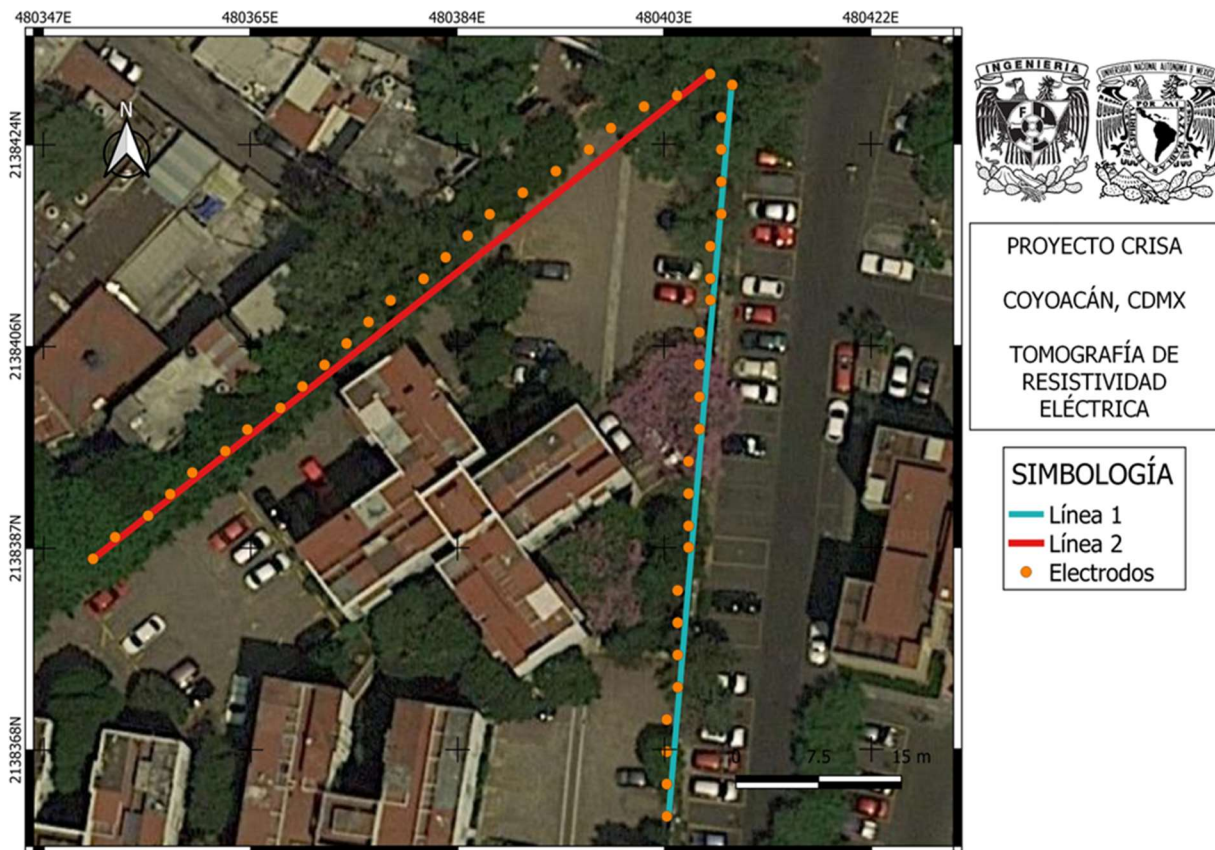


Figura 15. Mapa de adquisición de la tomografía de resistividad eléctrica.

La primera línea se ubicará en la parte este del edificio, se colocarán los electrodos a lo largo del camino empedrado y de las jardineras con el espaciamiento de 3 m y no obstruir el paso para el estacionamiento que requiera algún automóvil. La segunda línea será en la parte noroeste del edificio y serán colocados los electrodos en el empedrado puesto que no hay presencia de jardineras en esa zona. Ambas líneas serán pegadas a la barda que marcan los límites de la unidad para evitar obstruir el paso.

4.2.3 Adquisición en Campo TRE

Para obtener los datos de ambas líneas se tuvieron que cambiar las distancias entre electrodos debido al empedrado que en algunas distancias impedía que se clavaran los electrodos donde correspondía por lo que se optó por clavarlos lo más cerca posible de la distancia correspondiente. Para la línea 1 la mayoría de los electrodos no cambiaron de posición debido a que se encontraban las jardineras, facilitando clavar cada uno de los electrodos que coincidían en esa posición. En la línea dos cada uno de los electrodos fue variando de ubicación y distancia debido a que a lo largo de esta línea solo es el camino de empedrado. Las alineaciones de los electrodos quedaron de la siguiente manera:

Tabla 3. Distancia entre electrodos.

# de electrodos	Distancia (m)	# de electrodos	Distancia (m)
1 a 2	2.75	25 a 26	3
2 a 3	2.9	26 a 27	2.98
3 a 4	3.2	27 a 28	3.23
4 a 5	3.2	28 a 29	2.75
5 a 6	2.8	29 a 30	3
6 a 7	3.2	30 a 31	2.98
7 a 8	3	31 a 32	2.93
8 a 9	3.77	32 a 33	3.14
9 a 10	2.2	33 a 34	3
10 a 11	3.1	34 a 35	2.9
11 a 12	2.8	35 a 36	3
12 a 13	3.2	36 a 37	3.1
13 a 14	2.9	37 a 38	2.8
14 a 15	3	38 a 39	3.2
15 a 16	3	39 a 40	2.9
16 a 17	3.5	40 a 41	3
17 a 18	2.3	41 a 42	3
18 a 19	3	42 a 43	2.8
19 a 20	3.2	43 a 44	3.1
20 a 21	3.2	44 a 45	3
21 a 22	2.95	45 a 46	3.1
22 a 23	3.15	46 a 47	3.1
23 a 24	3	47 a 48	2.85

Al momento de calibrar el equipo se encontraba que algunos electrodos no registraban un valor de la resistencia de contacto por lo que se optó por humedecer el suelo para dar comienzo con la adquisición.

Para la adquisición de los datos los arreglos que se ocuparon para ambas líneas fueron los mismos, así como la duración de éstos. La siguiente tabla especifica el tipo y duración del arreglo.

Tabla 4. Tipos de arreglos usados.

Arreglo	Duración (min)
Wenner-Schlumberger 1-24	14
Wenner-Schlumberger 25-48	14

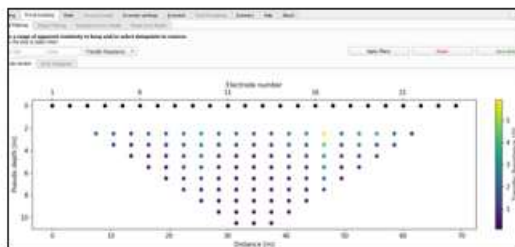
Parámetros utilizados para todos los arreglos:

- Stack:
 1. Mínimo: 3
 2. Máximo: 6
- Error Máximo: 5%
- Se le asigna un signo al voltaje
- Espaciado en metros
- Tx Parámetros:
 - Tiempo de 1s
 - Vp 200 mV
 - Vab máximo: 400
- Número de Canales: 1

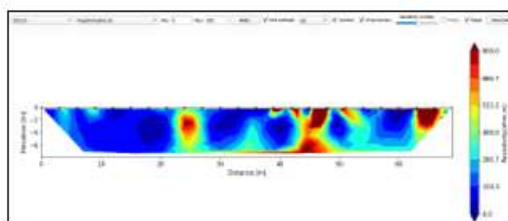
4.2.4 Procesamiento de los datos

Date	Re-Check	Lat (D)	Lon (D)	Lat (D)	Lon (D)	Latitude	Longitude	UTM (MGRS)	Name
3	0.838	88	12	0.800					WS124
3	0.794	229	32	0.790					WS124
3	0.741	73	7	0.777					WS124
3	0.802	68	8	0.589					WS124
3	0.638	43	3	0.588					WS124
3	0.432	49	3	0.856					WS124
3	0.432	80	8	0.837					WS124
3	0.638	57	5	0.605					WS124
3	0.822	44	4	0.447					WS124
3	0.707	31	12	0.698					WS124
3	0.501	48	3	0.691					WS124

RE	AT	AT2	AT4	AT	AT2	AT4	AT	AT2	AT4	Name
0.744	159	32	0.79	0	0	0	0	0	0	WS124
0.741	73	7	0.777	0	0	0	0	0	0	WS124
0.802	68	8	0.589	0	0	0	0	0	0	WS124
0.638	43	3	0.588	0	0	0	0	0	0	WS124
0.432	49	3	0.856	0	0	0	0	0	0	WS124
0.432	80	8	0.837	0	0	0	0	0	0	WS124
0.638	57	5	0.605	0	0	0	0	0	0	WS124
0.822	44	4	0.447	0	0	0	0	0	0	WS124
0.707	31	12	0.698	0	0	0	0	0	0	WS124
0.501	48	3	0.691	0	0	0	0	0	0	WS124



Importing	Pre-processing	Mesh	Forward model	Inversion settings	Inversion
Advanced					
Inversion type:	Regularized Inversion with Linear Filtering [1]				
Target decrease:	0				
Data type:	Logarithmic [1]				
Regularization mode:	Normal regularization [0]				
Value for tolerance:	1.0				
Maximum number of iterations:	10				
λ_{min} :	0.01				
λ_{max} :	0.02				
Minimum apparent resistivity:	10e-10				
Maximum apparent resistivity:	10e-10				



Importar el archivo a Prosys para poderlo guardar en archivo de Excel, ubicando los arreglos que se usarán para el procesamiento.

Importar el archivo de Prosys a Excel únicamente con los datos del arreglo a procesar y guardarlo como .csv

Importar el archivo a Res IPy seleccionando el apartado de archivo syscal y realizado un pre-procesado; descartando los valores negativos en nuestra pseudo-sección.

Elegir los parámetros para realizar la inversión, así como el número de iteraciones a realizar para los datos seleccionados.

Realizar la inversión y determinar el rango de resistividad para determinar las anomalías escogiendo la escala de colores adecuada para resaltar dichas anomalías.

Figura 16. Diagrama de flujo del tratamiento del método TRE con el software Prosys II (v. 3.14.00 IRIS Instruments ResIPy (v. 3.4.2)

4.3 Tendido de Refracción Sísmica (TRS)

4.3.1 Equipo utilizado

El equipo utilizado para la prospección sísmica es el siguiente:

Tabla 5. Equipo utilizado para la prospección sísmica (TRS).

Instrumentos	Descripción
Cable sísmico multicanal	<ul style="list-style-type: none">• 2 Cables de 24 nodos con espaciamiento de 5 m.
Geode	<ul style="list-style-type: none">• muestreo de 8 a 0,02 ms)• baja distorsión (0,0005%)<ul style="list-style-type: none">• bajo ruido (0,2 uV)• precisión de apilamiento (1/32 de intervalo de muestra)
Computadora	Computadora de campo PANASONIC
Accesorios varios	Placa de hierro, cinta métrica, marro 12 lb, <i>trigger</i>
Trípode, Nivel y estadal	Nivel óptico Leica
Geófono	48 geófonos verticales con una frecuencia de 4.5 Hz
GPS	GPS de mano MAP 64s GARMIN

4.3.2 Diseño de adquisición TRS

Para el método de refracción se planea realizar 2 líneas las cuales tendrán una longitud de 69 m (Figura 17), colocando en cada línea 24 geófonos espaciados cada 3 m en los lados opuestos del edificio, tratando de abarcar la mayor zona de este y de la parte final de la unidad con la finalidad de realizarlas en el mismo sitio que la prospección eléctrica para que puedan coincidir los resultados. La primera línea será definida por NE-SW colocando los geófonos a lo largo de la jardinera ubicada en esa zona evitando colocarlas en zonas donde los automóviles puedan estacionarse. La segunda línea será definida por NE-SW colocando los geófonos en el camino debido a que no hay presencia de jardineras. Ambas líneas tendrán que ser de manera que no haya presencia de automóviles en movimiento debido a que puede perturbar los resultados evitando lograr el objetivo.

En ambas líneas se tendrá un offset de 1 m en el inicio y de 1 m al final, se distribuirán 5 fuentes con 3 golpes cada una a lo largo de cada línea con un espaciamiento de 18 m, es decir, cada 6 geófonos se realizará una nueva fuente. La distancia de la placa al geófono tendrá que ser de 1

m para realizar cada fuente en la distancia correspondiente. Al mismo tiempo que se realizan las fuentes en los lugares correspondientes se tendrá que tomar la topografía para cada geófono correspondiente a cada línea sin aplicar perturbaciones en la toma de datos.



Figura 17. Mapa de adquisición de datos para el Tendido de Refracción Sísmica (TRS).

4.3.3 Adquisición en Campo TRS

Se realizaron dos líneas con 24 geófonos cada una a un espaciamiento de 3 m como se muestra en la Figura 17.

Para la línea 1 que se realizó en la parte derecha del edificio, dirección NE-SW, se colocaron los geófonos con espaciamiento de 3 metros aun con la presencia de las jardineras y automóviles estacionados cuidando que el cableado no fuera afectado ni que impidiera el paso, la posición de la placa para cada fuente fue diferente debido a que el camino era empedrado y otra parte eran las jardineras, provocando una ligera complicación al momento de recopilar los datos lo que provocó que se repitiera en varias ocasiones los golpes en la fuente en una misma distancia.

Las distancias de la placa en cada fuente fueron variando debido a que el espacio con el que se contaba era menor, provocando que unas fueran más cerca, estando cada una en un rango de 65 cm a 1 m.

Para la línea 2 dirección NE-SW ubicada en la parte izquierda del edificio comenzó cerca de la parte final de la línea 1 teniendo un offset de 1 m aproximadamente, las siguientes fuentes se realizaron en el empedrado, al igual que en la línea 1, se tuvieron que repetir varias veces las fuentes en la misma distancia hasta obtener una con mejor lectura de las señales.

La zona en donde se realizó esta línea fue transitada en diferentes ocasiones por automóviles provocando el paro momentáneo de la adquisición de datos lo que tomó más tiempo realizar esta línea. La colocación de la placa para cada fuente fue variando poco debido a que se contaba con mayor espacio que la línea 1, tratando de mantener siempre a 1 m del geófono correspondiente.

Los parámetros utilizados para la adquisición de ambas líneas fueron las siguientes:

- Separación entre geófonos: 3 m
- Fuentes: cada 6 geófonos (18 m)
- Stacking: 3
- Intervalo de muestreo: 125 ms
- Intervalo de medición: 1 segundo

4.3.4 Procesamiento de los datos

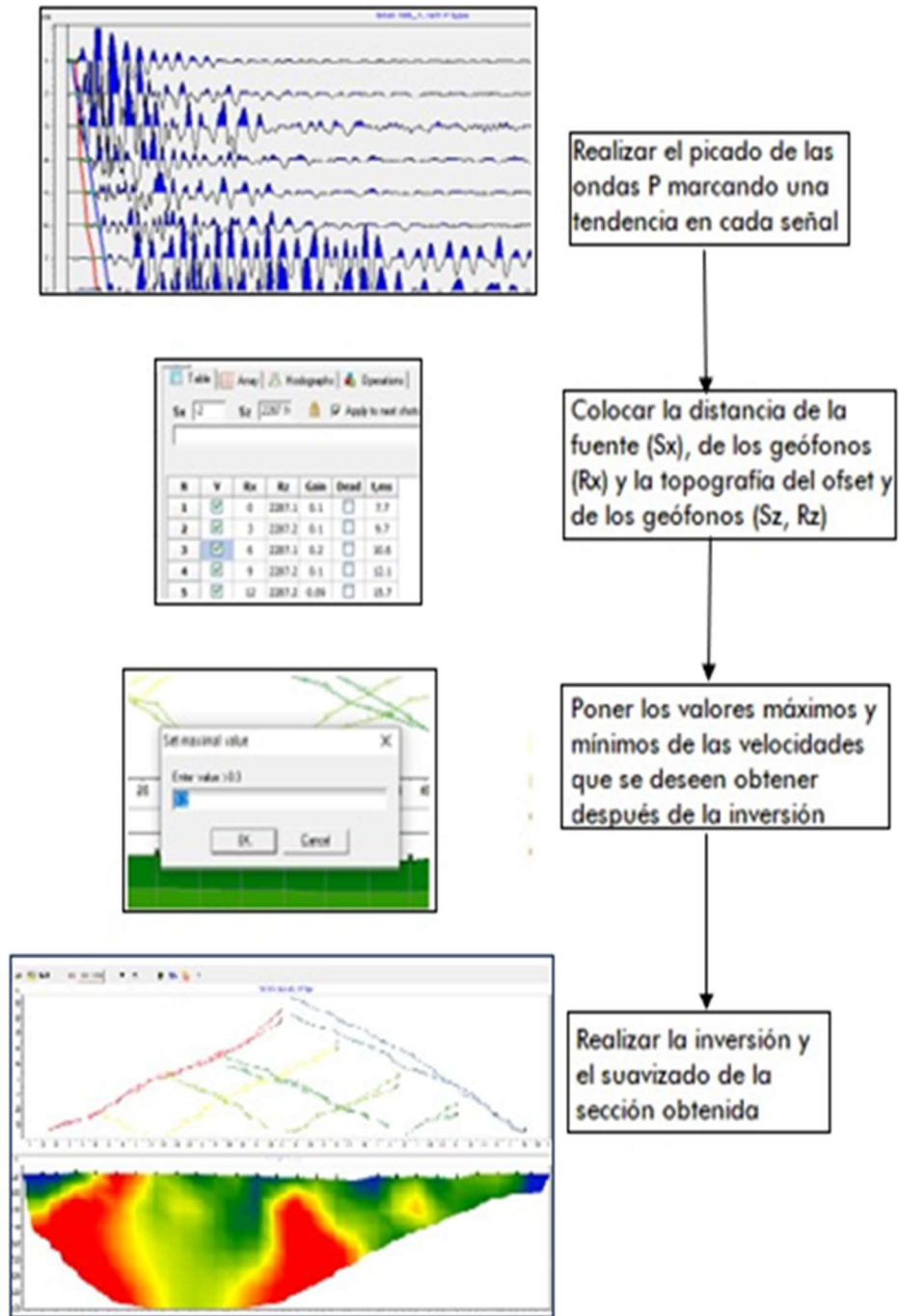


Figura 18. Diagrama de flujo del tratamiento del Tendido de Refracción Sísmica (TRS) mediante el software ZondST2D.

4.4 Método de cocientes espectrales (HVSR)

4.4.1 Equipo utilizado

El equipo que se usó para realizar las mediciones de los Puntos de Vibración Ambiental (PVA) es el siguiente:

Tabla 6. Material para los cocientes espectrales (HVSR).

INSTRUMENTOS	DESCRIPCIÓN
Sismógrafo	<ul style="list-style-type: none">● 4 sismógrafos Güralp, de banda ancha y triaxial (Z, NS, EW)
Baterías	<ul style="list-style-type: none">● 4 Baterías pequeñas de 12 volts
GPS	<ul style="list-style-type: none">● 4 Sensor GPS con antena de amplificación tipo estaca.
Juegos de cables 4 (uno para cada sensor)	<ul style="list-style-type: none">● Cable para conectar a la computadora● Cable para la batería con caimanes● Cable para el GPS● Cable para el Güralp

4.4.2 Adquisición de Puntos de Vibración Ambiental

Para la aplicación del Método de Cocientes Espectrales (HVSR) se realizaron las mediciones de los Puntos de Vibración Ambiental (PVA), los cuales se colocaron sensores alrededor del edificio y al final de la unidad. Cada uno de los puntos adquiridos (Figura 19) se programó para una medición de 30 minutos, contando con 4 sensores se comenzará en el lado NW del edificio, pasando al lado NE del edificio y terminando en la parte sur del mismo.

Al final, se registraron nueve puntos de vibración ambiental (PVA) que se pueden observar en la Figura 19. Asimismo, en la Tabla 7, se detalla la relación de sensores utilizados para cada PVA y los tiempos finales de medición de cada uno.

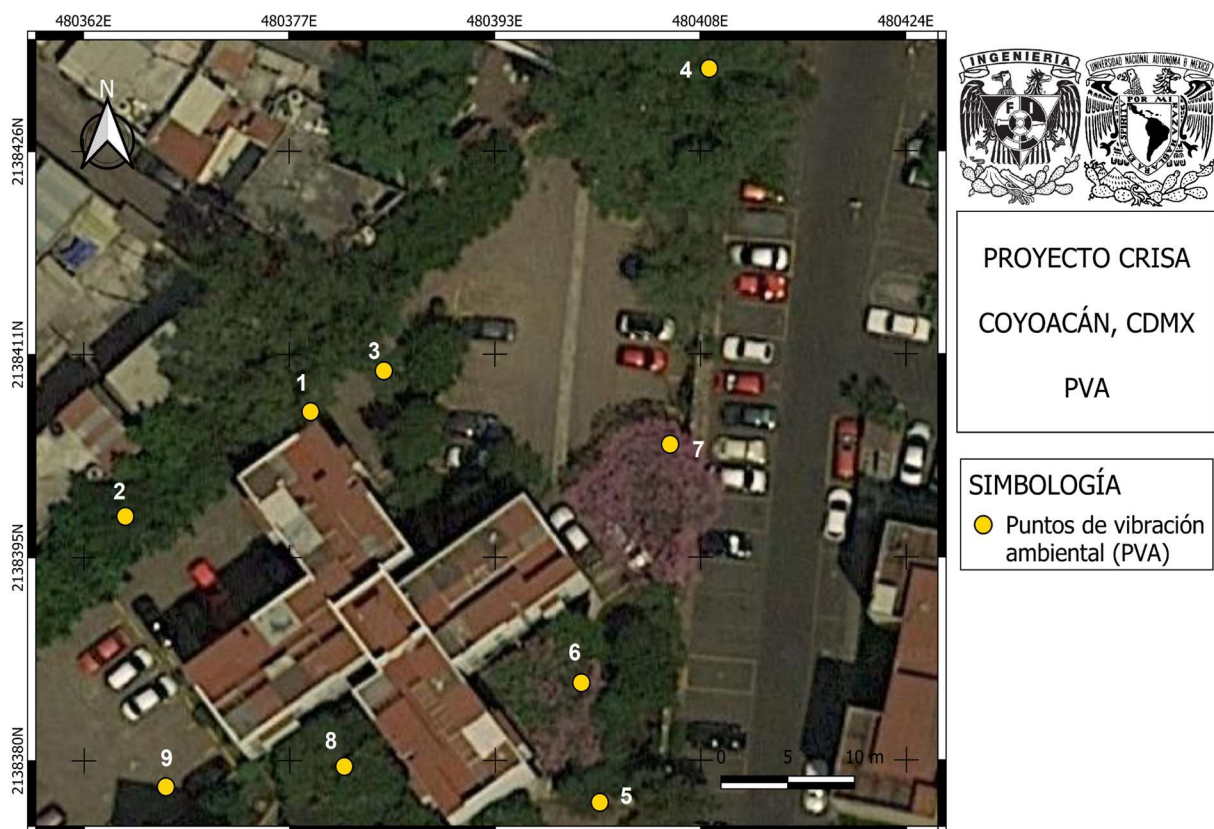


Figura 19. Ubicación de las mediciones de PVA en la zona de estudio.

Tabla 7. Sensores utilizados y tiempos de medición para los PVA.

Sensor Güralp	Adquisición	Duración (minutos)	No. de punto de adquisición
T6631	20230830_1737	22	PVA 1
T6686	20230830_2027	32	PVA 2
T6952	20230830_1737	22	PVA 3
T6630	20230830_1800	35	PVA 4
T6952	20230830_1829	30	PVA 5
T6631	20230830_1832	27	PVA 6
T6952	20230830_1800	20	PVA 7
T6631	20230830_1916	43	PVA 8
T6952	20230830_1910	45	PVA 9

4.4.3 Procesamiento de los datos

El procesamiento de los datos adquiridos de PVA se realizó con el software libre GEOPSY, (Geopsy, 2008)

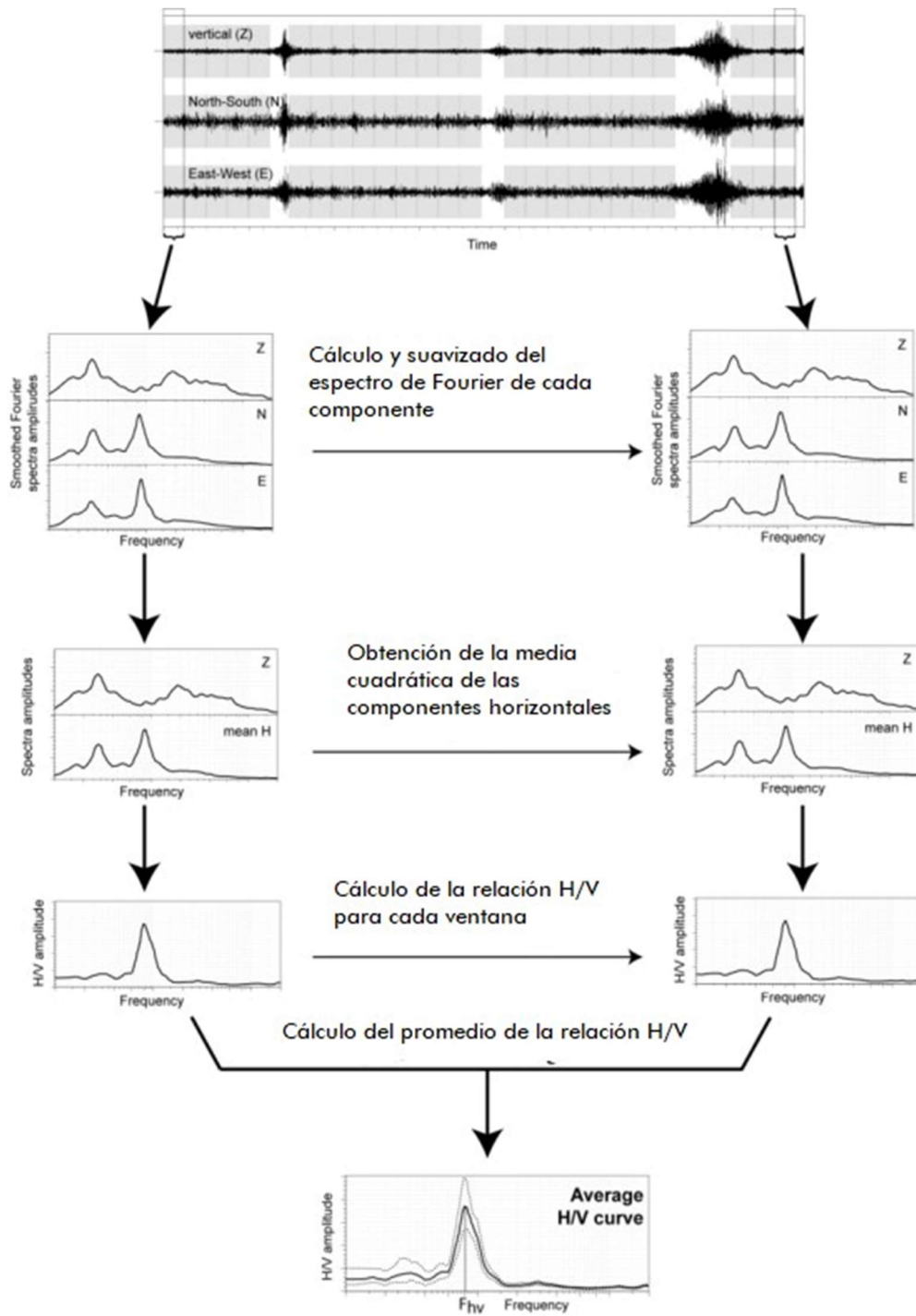


Figura 20. Diagrama de flujo del procesado de datos para PVA (Cruz, 2019).

5. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con los diferentes métodos aplicados, que se han descrito en los capítulos anteriores.

5.1 Resultados del método GPR

En el capítulo anterior, se presenta en la Figura 12, la disposición del diseño de adquisición para el método GPR, en este diseño se agrupa en tres zonas generales, Zona 1 al N del polígono de estudio, Zona 2 al NW, y Zona 3 al SE. A continuación, se presentan los resultados para cada zona.

Las anomalías encontradas en cada una de las líneas por zonas se dividieron en dos maneras:

- 1) Tipo 1: Las anomalías de color amarillo son asociadas a las alcantarillas o tomas de agua que se encontraron y anotaron en la bitácora durante la adquisición de los datos, corroborando de esta manera el tipo de anomalía que se encontraron a estas distancias.
- 2) Tipo 2: Las anomalías de color rojo pueden ser asociadas de dos maneras diferentes:
 - Al material de relleno saturado debido a las inundaciones.
 - A las fracturas o grietas en la roca basáltica que se encuentra después del material de relleno.

5.1.1 Zona 1 al N del polígono de estudio.

Los resultados para la Zona 1 se organizan con la nomenclatura que se observa en la Figura 21:

- Las primeras dos líneas de mayor longitud que van de 29 a 32 m y se orientan del SE al NW representadas como L1Z1 y L2Z1.
- Mientras que las demás líneas (L3Z1-L19Z1) varían de 5 a 12 m de longitud con orientación de W a E.



Figura 21. Líneas correspondientes a la zona 1 de GPR.

Para la zona 1 se marcaron en los radargramas dos tipos de anomalías de acuerdo con la descripción mencionada líneas arriba: Tipo 1 y Tipo 2.

En los radargramas de las líneas 1 y 2 (Figuras 22 y 23) se observan tres capas que van de 0 a 1.5 m aproximadamente, lo cual asociamos al material de relleno que se utilizó al momento de la construcción de la unidad habitacional. Es en este rango que se observa las anomalías de color rojo (Tipo 2) que pueden ser asociadas a las fracturas que se encuentran en las líneas 1, 5 y 19, las anomalías que se encuentran después de la profundidad del material de relleno son asociadas

a fracturas que se encuentran en los basaltos o suelo competente donde se construyó la unidad habitacional.

Para las anomalías que se encuentran cerca de la superficie ubicadas en las líneas 1, 2, 6 y 13 se asocian al material de relleno saturado, debido a que se conoce que en esa parte de la unidad habitacional tiende a sufrir inundaciones en temporadas de lluvia.

Las líneas que más resaltan las anomalías de esta zona son la 1 y 2, a partir de la 3 a la 19 (que se encuentran en el apartado de anexos 9.1.1) transversales a las primeras líneas, muestran la misma tendencia de espesor que las primeras dos líneas.

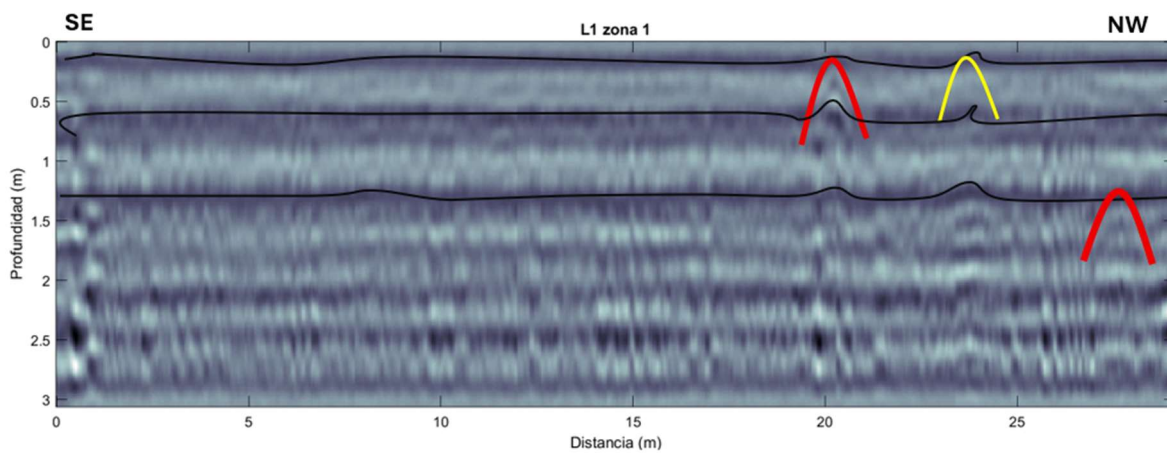


Figura 22. Línea 1 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

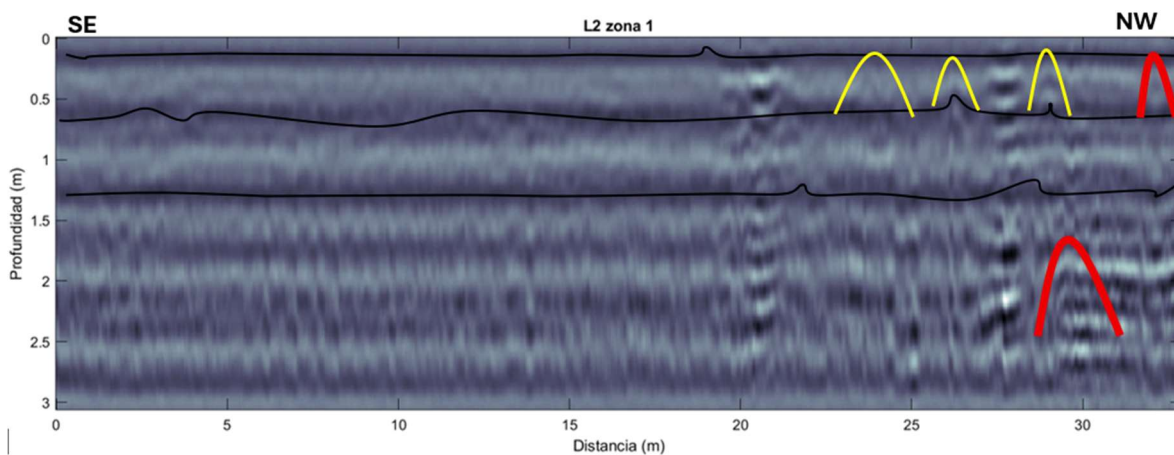


Figura 23. Línea 2 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

5.1.2 Zona 2 al NW del polígono de estudio.

Los resultados para la Zona 2 se organizan con la nomenclatura que se observa en la Figura 24:

- Las primeras dos líneas de mayor longitud que son alrededor de 50 m y se orientan del SE al NW representadas como L1Z2 y L2Z2.
- Mientras que las demás líneas (L3Z2-L14Z2) varían de 5 a 19 m de longitud con orientación de W a E ubicadas en el apartado de anexos.

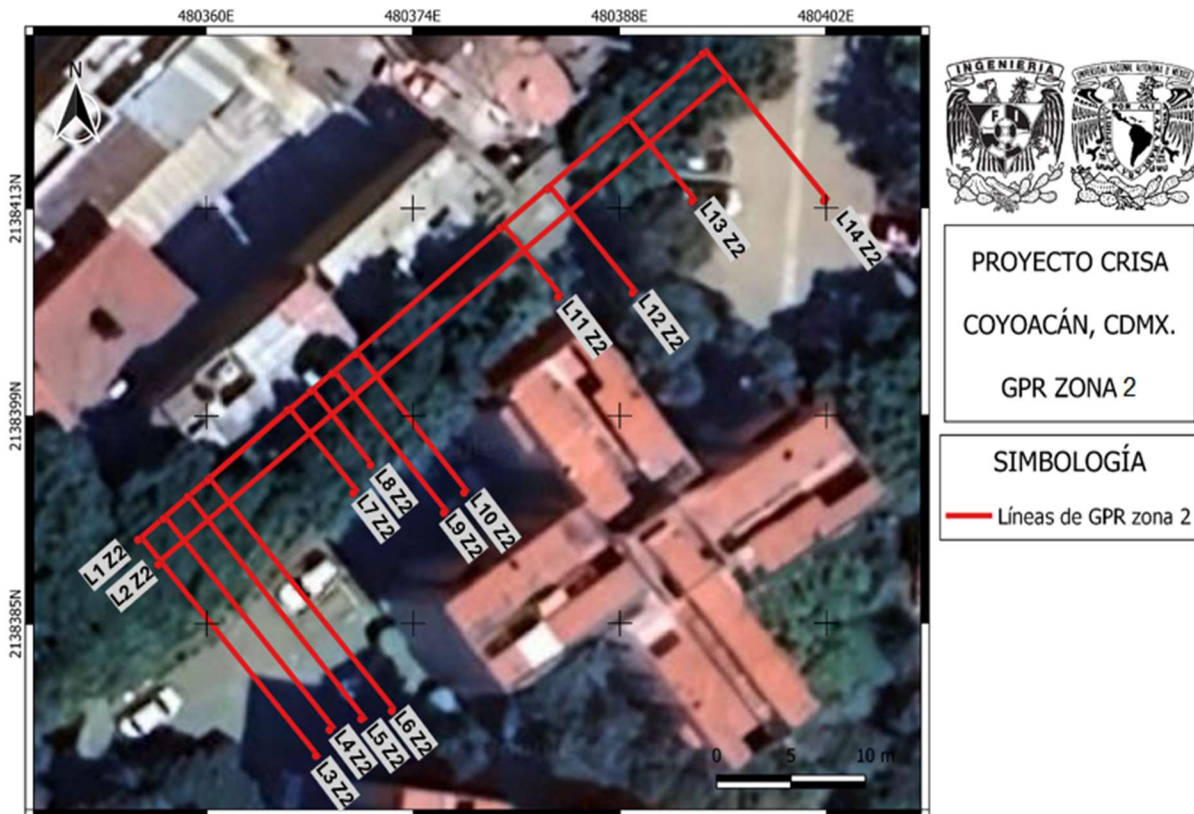


Figura 24. Líneas correspondientes a la zona 2 de GPR.

De igual manera que para la línea 1, para la zona 2 se marcaron en los radargramas dos tipos de anomalías; Las anomalías de color rojo pueden ser asociadas a fracturas (Tipo 2) identificadas en las líneas 1 y 8 que varían de profundidad pero que se encuentran alrededor de 1.5 m hasta la máxima profundidad registrada para la línea. Para las anomalías que se encuentran cerca de la superficie ubicadas en las líneas 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 12, 13 y 14 se asocian al material de relleno saturado (Tipo 2), debido a que se conoce que en esa parte de la unidad habitacional tiende a sufrir inundaciones en temporadas de lluvia.

Las líneas que más resaltan las anomalías de esta zona son la 1 y 2, a partir de la 3 a la 14 (que se encuentran en el apartado de anexos 9.1.2) transversales a las primeras líneas, muestran la misma tendencia de espesor que las primeras dos líneas.

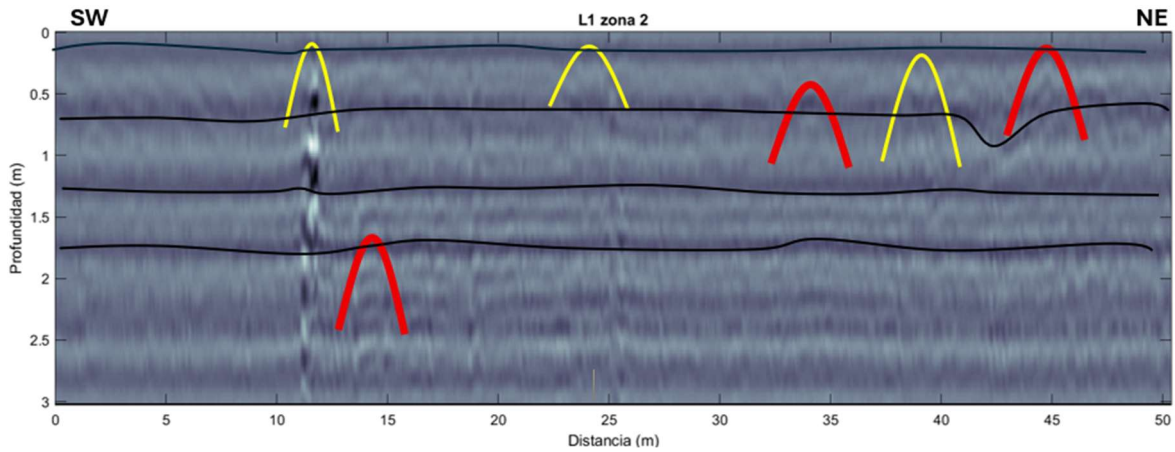


Figura 25. Línea 1 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

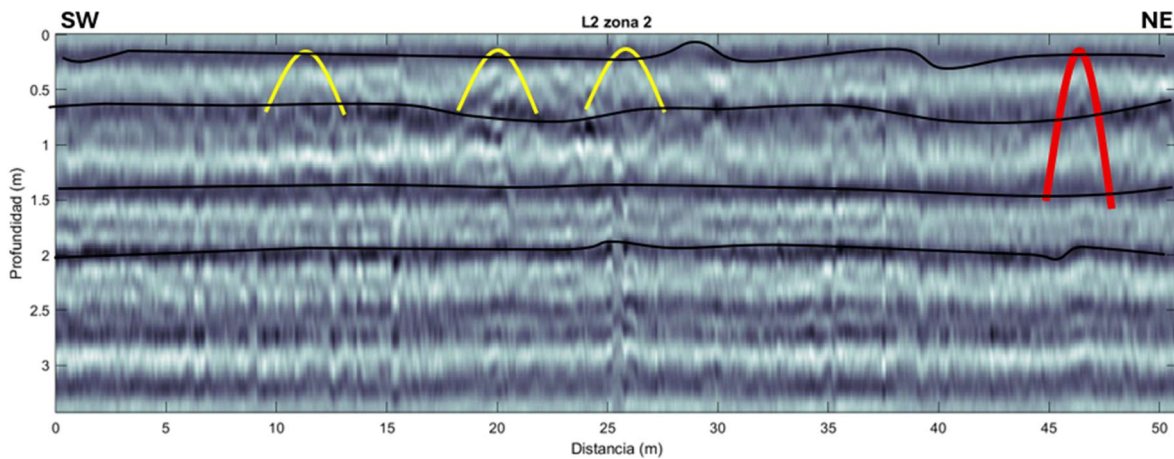


Figura 26. Línea 2 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

5.1.3 Zona 3 al NE del polígono de estudio.

Los resultados para la Zona 3 se organizan con la nomenclatura que se observa en la Figura 27:

- Las primeras 4 líneas (L1Z3-L4Z3) varían de 7 a 11 m de longitud con orientación de SW a NE.
- Mientras que las demás líneas (L5Z3-L9Z3) varían de 6 a 11 m de longitud con orientación de W a E.

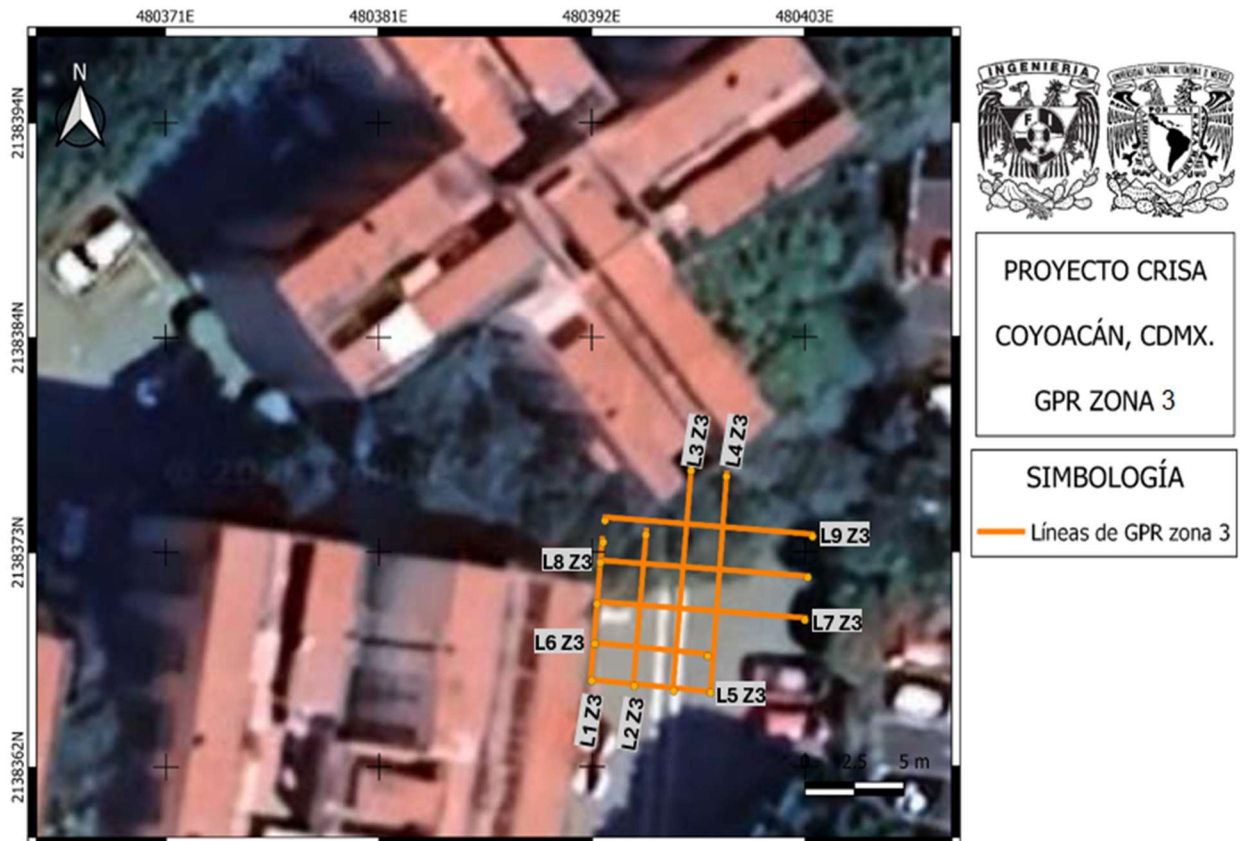


Figura 27. Líneas correspondientes a la zona 3 de GPR.

Para la zona 3 se marcaron en los radargramas los dos tipos de anomalías mencionadas líneas arriba, y, es esta zona también se observan tres capas que van de 0 a 1.2 m aproximadamente, lo cual igualmente asociamos al material de relleno que se utilizó al momento de la construcción de la unidad habitacional.

De igual manera que para las Zonas 1 y 2, las anomalías de color rojo pueden ser asociadas al material de relleno que se utilizó al momento de la construcción de la unidad habitacional con saturación, y entonces, las anomalías que se encuentran después de la profundidad del material de relleno están asociadas a las fracturas o grietas que se encuentran en los basaltos o el basamento consolidado.

Para las anomalías que se encuentran cerca de la superficie ubicadas en las líneas 3, 4 y 7 se asocian al material de relleno saturado, debido a que se conoce que en esa parte de la unidad habitacional tiende a sufrir inundaciones en temporadas de lluvia.

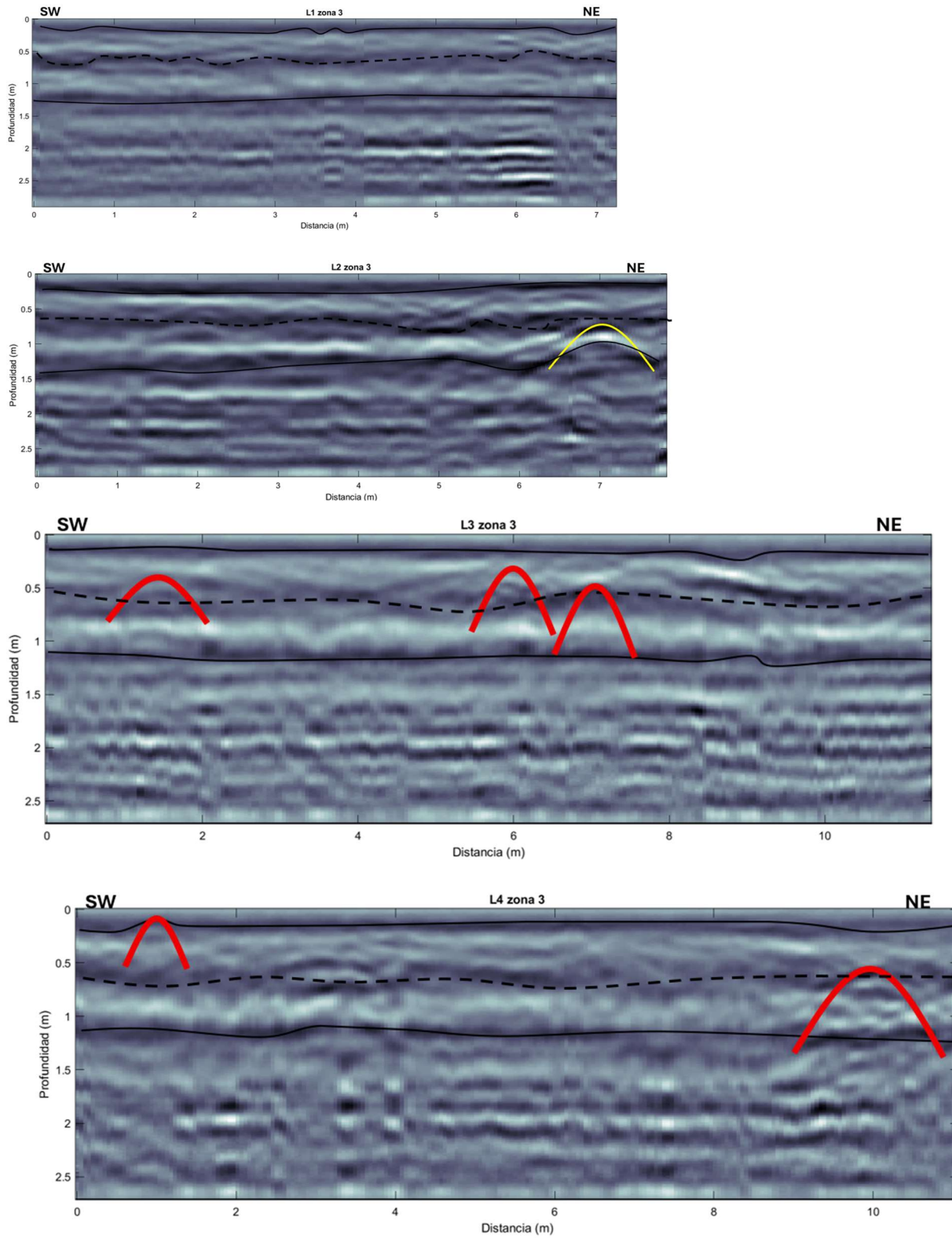
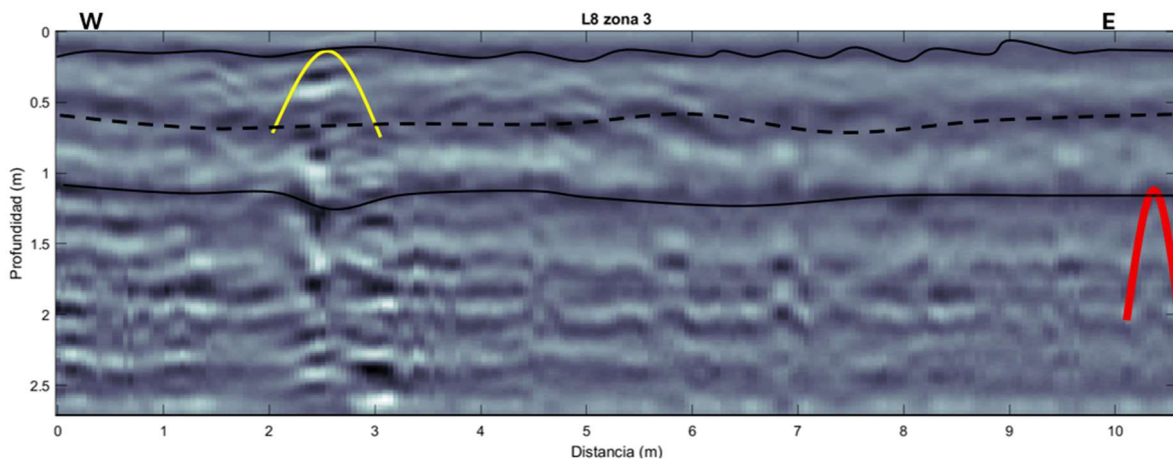
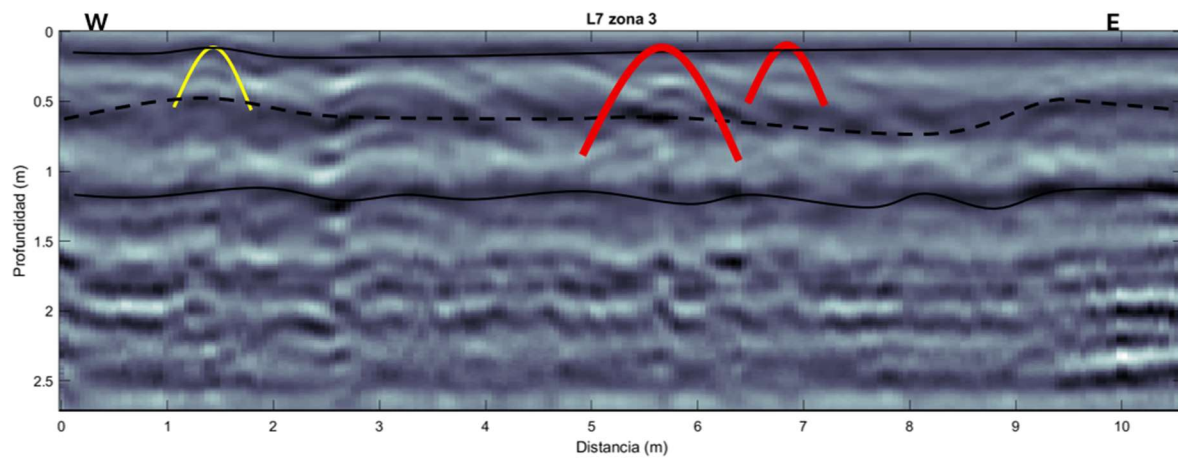
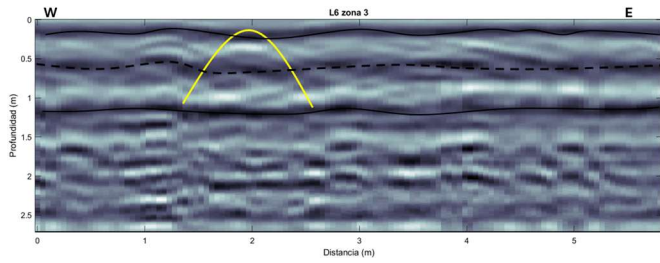
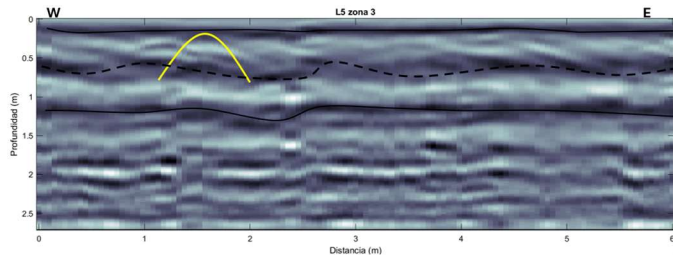


Figura 28. Línea 1, 2, 3 y 4 correspondiente a la zona 3 del método GPR orientadas del SW al NE.



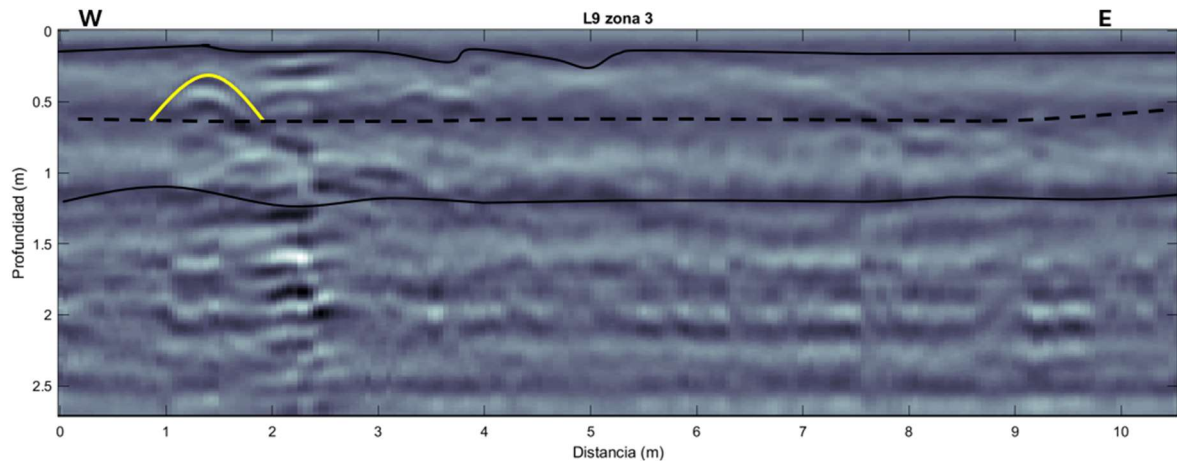


Figura 29. Línea 5, 6, 7, 8 y 9 correspondiente a la zona 3 del método GPR orientadas de W al E de la zona.

5.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

5.2.1 Línea 1 al NE del polígono de estudio.

De acuerdo con la figura 15 se tiene la adquisición respecto a la Tomografía de Resistividad Eléctrica, la cual la línea 1 con una longitud de 69 m y una dirección de NE a SW corresponde a la línea de la derecha y la línea 2 con una longitud también de 69 m y esta tiene una dirección de NE a SW y se encuentra a la izquierda.

En la figura 30 muestra la línea 1 de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) con orientación de NE-SW, se realizó un arreglo Wenner-Schlumberger donde al procesar los datos se encuentran dos unidades geoelectricas las asociamos de la siguiente manera:

- Unidad Geoelectrica 1 (UG1): Esta unidad parte del intervalo de 1 a 200 Ohm•m (su escala de colores va de azul oscuro a azul claro) y es asociado al material de relleno saturado abarcando la mayoría de la sección, partiendo de la superficie hasta la máxima profundidad que es 7 m.
- Unidad Geoelectrica 2 (UG2): Esta unidad parte del intervalo de 200 a 400 Ohm•m (su escala de colores va de amarillo a rojo oscuro) y es asociado a un terreno que es mezcla de roca y material resistivo, esta unidad geoelectrica también parte de la superficie hasta la profundidad máxima alcanzada de la sección de 7 m.

En la figura 30 también se muestra lo que se encuentra en la superficie en las distancias correspondientes, asociando las anomalías y las unidades geoelectricas a cada uno de los materiales encontrados a lo largo de los 69 m que mide la sección. La ubicación de la línea fue en la parte del jardín cerca de un estacionamiento (véase en la figura 15).

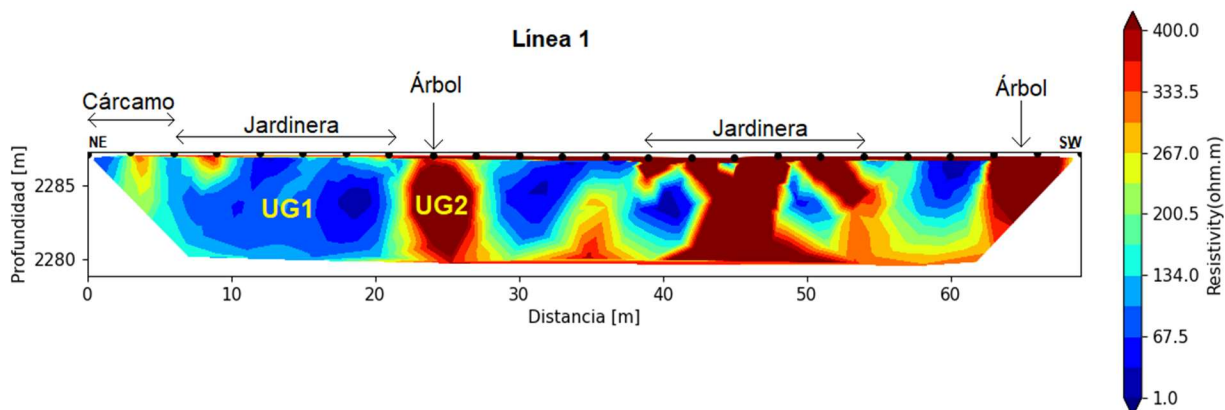


Figura 30. Línea 1 correspondiente al método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).

5.2.2 Línea 2 al NW del polígono de estudio.

En la figura 31 muestra la línea 2 de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) con orientación de NE-SW ubicada en la parte superior del edificio, sobre una bajada para llegar al estacionamiento (véase figura 15), en este caso la línea empieza del lado derecho, donde se encuentra el cárcamo que es donde se colocó la consola, se realizó un arreglo Wenner-Schlumberger donde al procesar los datos se encuentran dos unidades geoelectricas las asociamos de la siguiente manera:

- Unidad Geoelectrica 1 (UG1): Esta unidad parte del intervalo de 1 a 125 Ohm•m (su escala de colores va de azul oscuro a verde) y es asociado al material de relleno saturado abarcando la mayoría de la sección, partiendo de la superficie hasta la máxima profundidad que es 7.5 m.
- Unidad Geoelectrica 2 (UG2): Esta unidad parte del intervalo de 130 a 200 Ohm•m (su escala de colores va de amarillo a rojo oscuro) y es asociado a un terreno que es mezcla de roca y material resistivo, esta unidad geoelectrica solo se encuentra en la superficie de la sección, en la segunda mitad del tendido donde se ubican una serie de árboles.

En la figura 31 también se muestra lo que se encuentra en la superficie en las distancias correspondientes, asociando las anomalías y las unidades geoelectricas a cada uno de los materiales encontrados a lo largo de los 69 m que mide la sección.

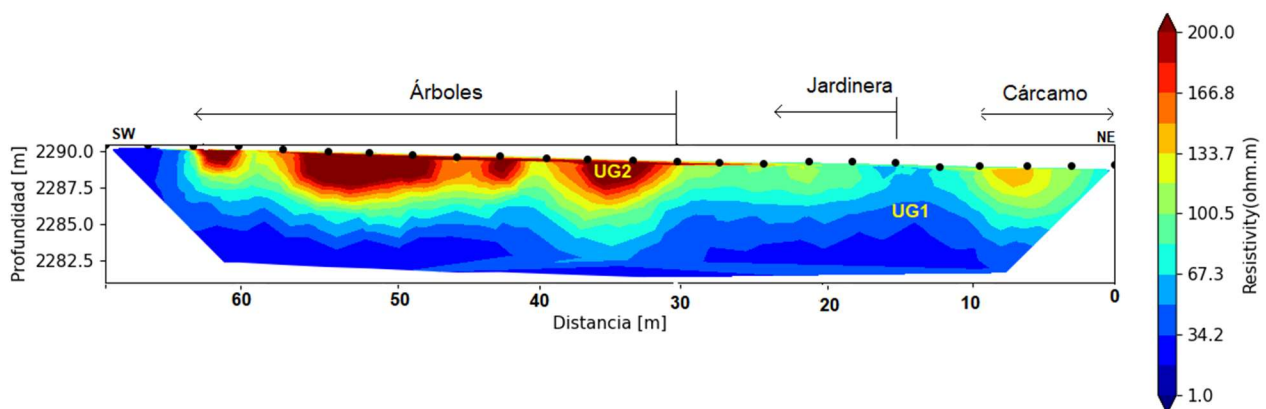


Figura 31. Línea 2 correspondiente al método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).

5.3 Tendido de Refracción Sísmica (TRS)

5.3.1 Línea 1 al NE del polígono de estudio

De acuerdo con la tabla 10 y 11 correspondientes a rangos de velocidades de distintos materiales podemos relacionar los valores obtenidos a un material. Para la tabla 10 muestra valores de la onda S, sabemos que para poder convertir el valor de velocidad de la onda S a la onda P es necesario realizar el siguiente cálculo:

$$V_s * 1.73 = V_p \quad (49)$$

La tabla muestra los tipos de suelo dependiendo las velocidades encontradas y al material que se puede asociar, con base en el Manual de CFE de 2015, los cuales pueden ser utilizados como base para cálculos ingenieriles para el diseño sísmico, que son necesarios para las diferentes estructuras que se realizan de acuerdo con el manual de diseño de obras civiles. En la tabla 8 se muestra a lo que se asocia cada tipo de terreno según el manual de diseño de obras civiles emitido por la CFE de 2015.

Tabla 8. Tipos de terreno de acuerdo con las velocidades. Modificado de (CFE 2015).

Tipo	Característica	Velocidad (Vs)	Espesor (Hs)
Tipo I	Terreno firme o rocoso en que no se presentan amplificaciones dinámicas.	$V_s \geq 720$ m/s	$H_s \leq 2$ m
Tipo II	Terreno formado por suelos en que se presentan amplificaciones dinámicas intermedias.	$V_c \leq V_s < 720$ m/s	$H_s > 2$ m
Tipo III	terreno formado por suelos en que se presentan grandes amplificaciones dinámicas.	$V_s < V_c$ m/s	$2 < H_s \leq H_c$ m

Donde los valores de V_c y H_c son:

- $V_c = 360$ m/s
- $H_c = 30$ m

En la figura 32 muestra la línea 1 del Tendido de Refracción Sísmica (TRS) y cuenta con distintos rangos de velocidades que pueden dividirse de la siguiente manera:

- Unidad Sísmica 1: Va de los 200 a los 400 m/s (representada en color azul). Con una distribución heterogénea, pero principalmente en la superficie, a una profundidad máxima de 2 m. Esta unidad está asociada entre los tipos de suelo D y E (suelo rígido a suelo blando) y decimos que se trata de materiales de relleno como arcillas blandas.
- Unidad Sísmica 2: Va de 400 a 850 m/s representada en color verde) Con una distribución heterogénea predominando especialmente cerca de la superficie y alcanzando una profundidad máxima de 5.5 m. Este rango de velocidades está asociado a los tipos de suelo D y C (de suelo rígido a suelo muy denso) para la unidad lo asociamos al material de relleno saturado, posiblemente también sea arcilla, como la unidad anterior, pero con mayor grado de compactación o humedad.
- Unidad sísmica 3: Va de los 900 a los 1300 m/s (colores amarillos a rojos), este rango se encuentra en 4 zonas distintas de la sección:
 - La primera está cerca del cárcamo que se asocia a, de acuerdo con la tabla 10, a un suelo tipo C, es decir, a suelo muy denso o roca blanda, por encontrarse cerca de la superficie lo asociamos a suelo muy denso.
 - La segunda zona es donde se encuentra un árbol y de acuerdo con la tabla 10 también lo asociamos a suelo muy denso (material de relleno saturado) debido a la cercanía a la superficie.
 - La tercera zona es por debajo de la ubicación del árbol extendiéndose hasta el metro 38 y llega a la máxima profundidad alcanzada del tendido que es de 7 m, de acuerdo con la tabla 10 decimos que se trata de roca blanda (el basalto fracturado) debido a la ubicación de esta.
 - La última zona va del metro 60 al 69 y se encuentra un árbol en la superficie por lo que, de acuerdo con la tabla 10, lo asociamos a un suelo muy denso.

Los alcances de la línea 1 con los datos recopilados es de 7 m de profundidad y 69 m de longitud, la ubicación de la línea fue en la parte del jardín cerca de un estacionamiento (véase en la figura 17).

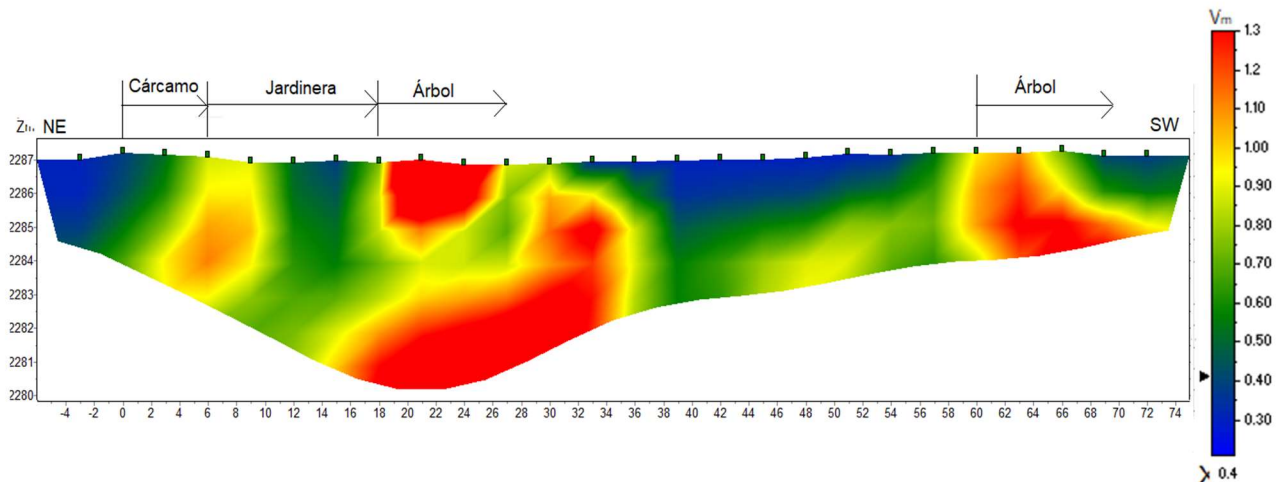


Figura 32. Línea 1 correspondiente al método de Tendido de Refracción Sísmica (TRS).

5.3.2 Línea 2 al NW del polígono de estudio

En la figura 33 muestra la línea 2 del Tendido de Refracción Sísmica (TRS), en este caso la línea empieza del lado derecho, donde se encuentra el cárcamo que es donde se colocó la consola y cuenta con distintos rangos de las velocidades que pueden dividirse de la siguiente manera:

- Unidad Sísmica 1: Va de 200 a 850 m/s (colores azules a verdes) predominando especialmente cerca de la superficie y alcanzando una profundidad máxima de 7 m. Este rango de velocidades está asociado a los tipos de suelo D y C dependiendo la profundidad y su compactación, decimos que se trata de material de relleno saturado prolongando en su totalidad la superficie de la sección.
- Unidad sísmica 2: Va de los 900 a los 1300 m/s (colores amarillos a rojos), este rango se encuentra en 2 zonas distintas de la sección, la primera se encuentra a una profundidad de 2 m hasta la profundidad máxima de 7 m, parte del metro 10 hasta el metro 30 y decimos que se trata del suelo tipo C roca blanda o suelo muy denso, asociado al basalto fracturado o material de relleno altamente saturado. La segunda zona donde se encuentra este rango de velocidades comienza a una profundidad de 1.5 hasta la profundidad máxima de 7 m y va del metro 36 al metro 54 también está asociado al suelo tipo C tratándose nuevamente del basalto o el material de relleno saturado.

Los alcances de la línea 2 con los datos recopilados es de 7 m de profundidad y 69 m de longitud, la ubicación de la línea fue en la parte del jardín cerca de un estacionamiento (véase en la figura 17).

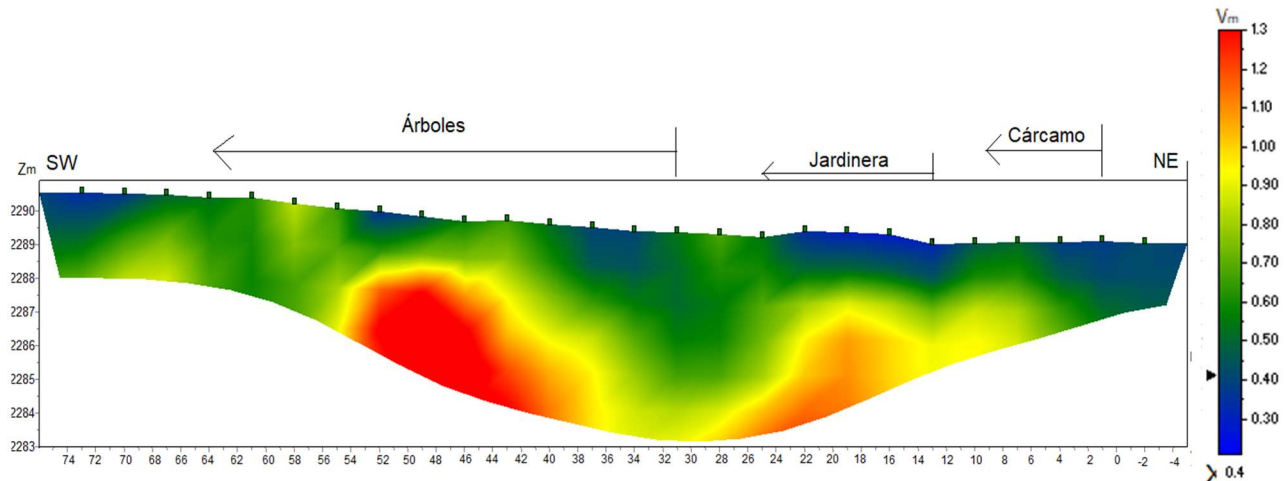


Figura 33. Línea 2 correspondiente al método de Tendido de Refracción Sísmica (TRS).

5.4 Método de Cocientes Espectrales (HVSr)

Como se mencionó anteriormente se realizaron mediciones de PVA en la zona de estudio, ver Figura 19 y se procesaron con el software libre GEOPSY, a continuación, se presentan los resultados y una breve descripción de cada HVSr determinado.

5.4.1 PVA 1

En la Figura 34 se muestran dos gráficos:

- En la primera gráfica se observa la curva HVSr, de la cual se puede determinar que la frecuencia fundamental es de 7.84 (7.02, 8.76) Hz y una amplitud relativa de A 1.52 (1.31, 1.76). De igual manera, se observa un pico secundario de 16 Hz.
- En la segunda figura se muestran los espectros de potencia de cada una de las componentes, en donde se observan dos picos o crestas de menor amplitud en las frecuencias de 2 y 10 Hz aproximadamente, las cuales no se reflejan un efecto en la curva HVSr.

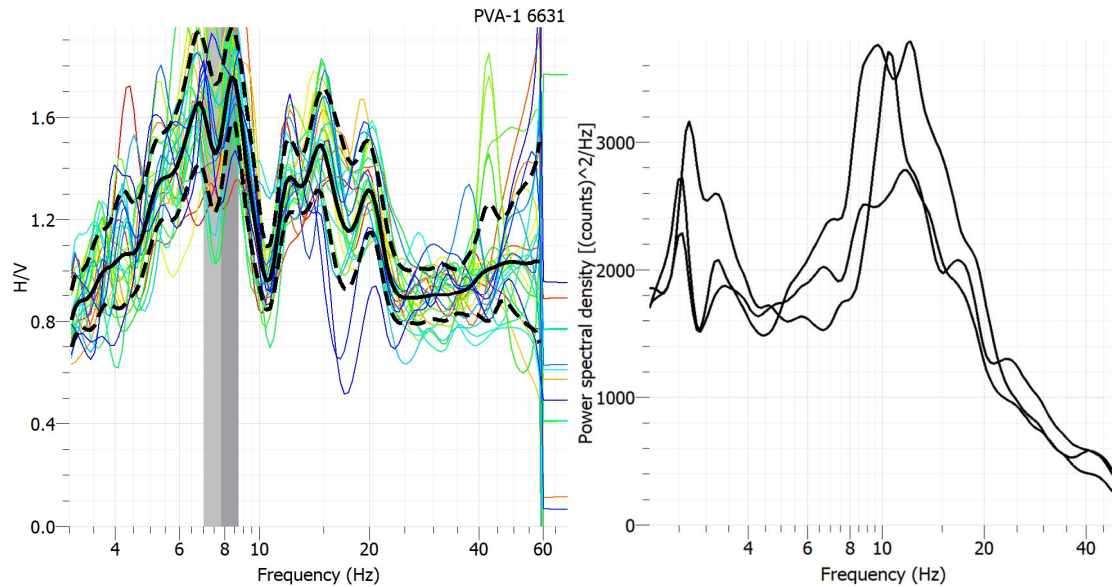


Figura 34. Resultados del PV1. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.

5.4.2 PVA 2

En la Figura 35 se muestran dos gráficos:

- En la primera gráfica se observa la curva HVSR, de la cual se puede determinar que la frecuencia fundamental es de 7.06 (6.64, 7.51) Hz y una amplitud relativa de A 2.45 (2.19, 2.75). De igual manera, se observa un pico secundario de 40 Hz.
- En la segunda figura se muestran los espectros de potencia de cada una de las componentes, en donde se observan dos picos o crestas de menor amplitud en las frecuencias de 4 y 40 Hz aproximadamente, las cuales no se reflejan un efecto en la curva HVSR.

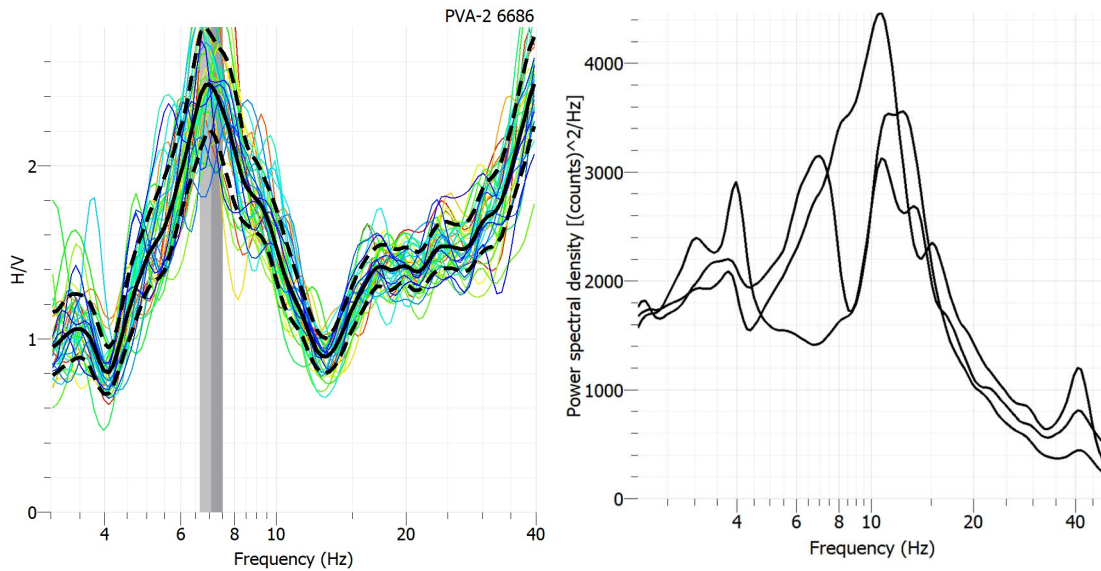


Figura 35. Resultados del PV2. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.

5.4.3 PVA 3

En la Figura 36 se muestran dos gráficos:

- En la primera gráfica se observa la curva HVSR, de la cual se puede determinar que la frecuencia fundamental es de 8.91 (8.03, 9.81) Hz y una amplitud relativa de A 2.45 (2.12, 2.84). De igual manera, se observa un pico secundario de 35 Hz.
- En la segunda figura se muestran los espectros de potencia de cada una de las componentes, en donde se observan dos picos o crestas de menor amplitud en las frecuencias de 3 y 40 Hz aproximadamente, las cuales no se reflejan un efecto en la curva HVSR.

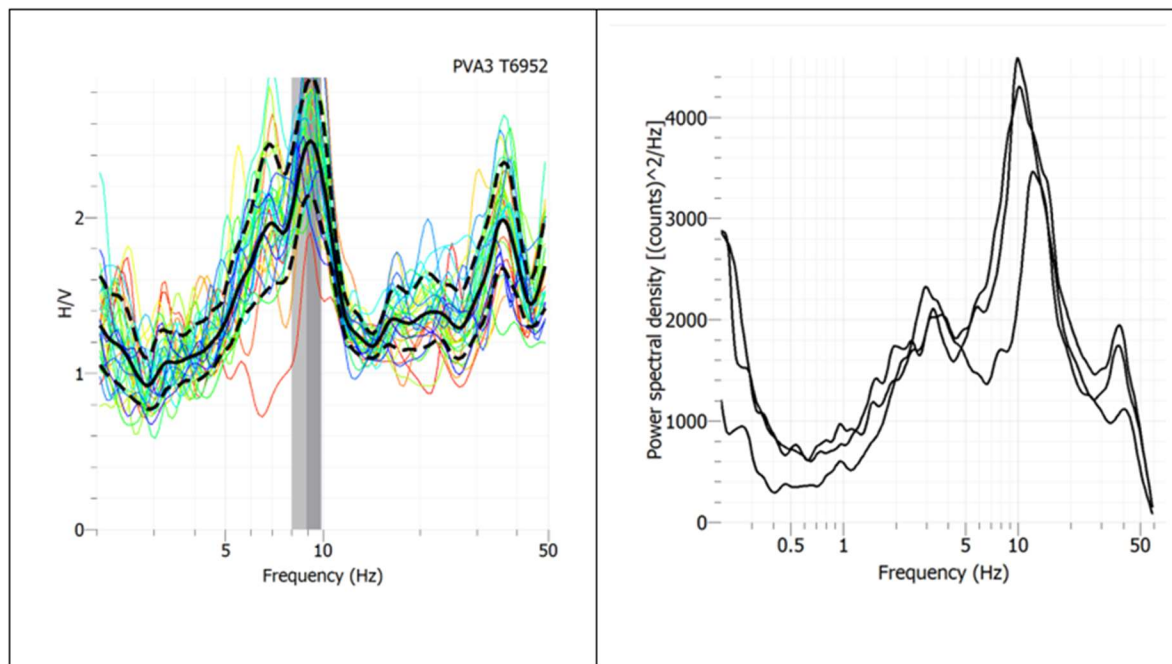


Figura 36. Resultados del PV3. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.

5.4.4 PVA 4

En la Figura 37 se muestran dos gráficos:

- En la primera gráfica se observa la curva HVSR, de la cual se puede determinar que la frecuencia fundamental es de 34.07 (33.09, 35.09) Hz y una amplitud relativa de A 2.87 (2.34, 2.51). De igual manera, se observan dos picos secundarios de 9, y 20 Hz.
- En la segunda figura se muestran los espectros de potencia de cada una de las componentes, en donde se observan dos picos o crestas de menor amplitud en las frecuencias de 13 y 19 Hz aproximadamente, las cuales no se reflejan un efecto en la curva HVSR.

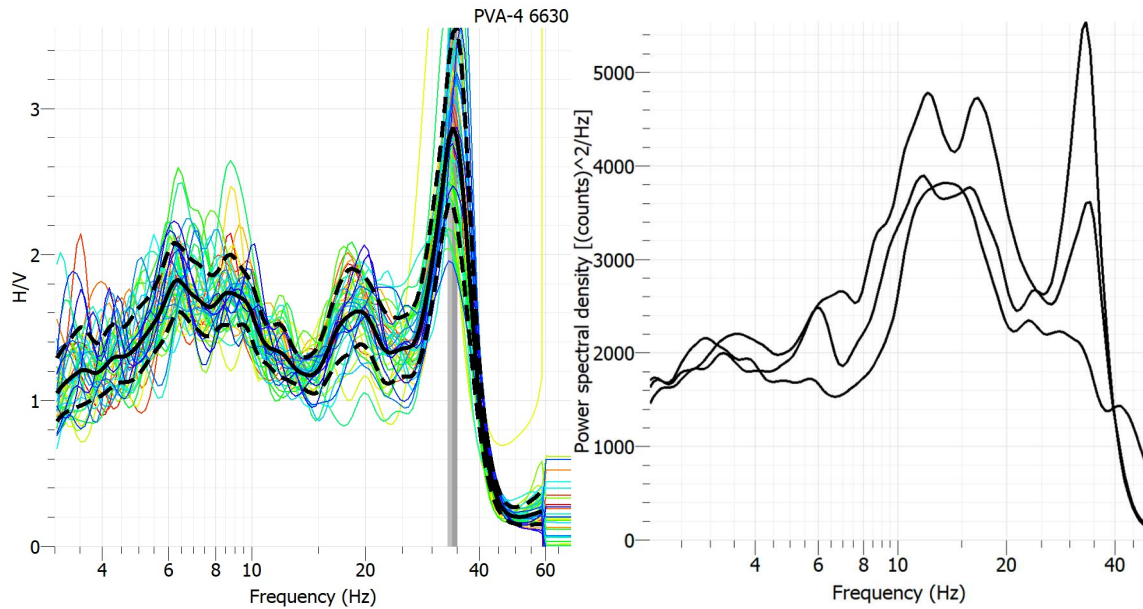


Figura 37. Resultados del PV4. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.

5.4.5 PVA 5

En la Figura 38 se muestran dos gráficos:

- En la primera gráfica se observa la curva HVSR, de la cual se puede determinar que la frecuencia fundamental es de 8.20 (7.07, 9.52) Hz y una amplitud relativa de A 1.9 (1.66, 2.18). De igual manera, se observa un pico secundario de 25 Hz.
- En la segunda figura se muestran los espectros de potencia de cada una de las componentes, en donde se observa un pico o cresta de menor amplitud en la frecuencia de 2.5 Hz aproximadamente, la cual no se refleja un efecto en la curva HVSR.

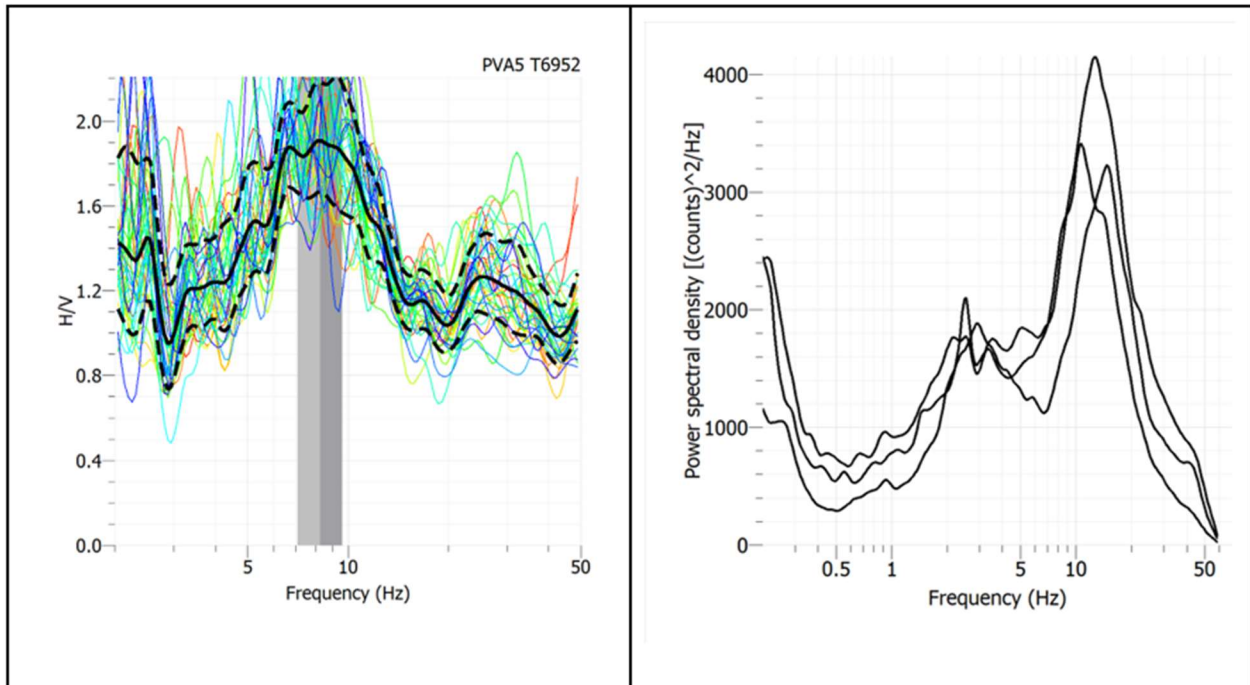


Figura 38. Resultados del PV5. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.

5.4.6 PVA 6

En la Figura 39 se muestran dos gráficos:

- a) En la primera gráfica se observa la curva HVSR, de la cual se puede determinar que la frecuencia fundamental es de 23.37 (22.41, 24.38) Hz y una amplitud relativa de A 2.61 (2.26, 3.02). De igual manera, se observa un pico secundario de 13 Hz.
- b) En la segunda figura se muestran los espectros de potencia de cada una de las componentes, en donde se observan dos picos o crestas de menor amplitud en las frecuencias de 2.5 y 15 Hz aproximadamente, las cuales no se reflejan un efecto en la curva HVSR.

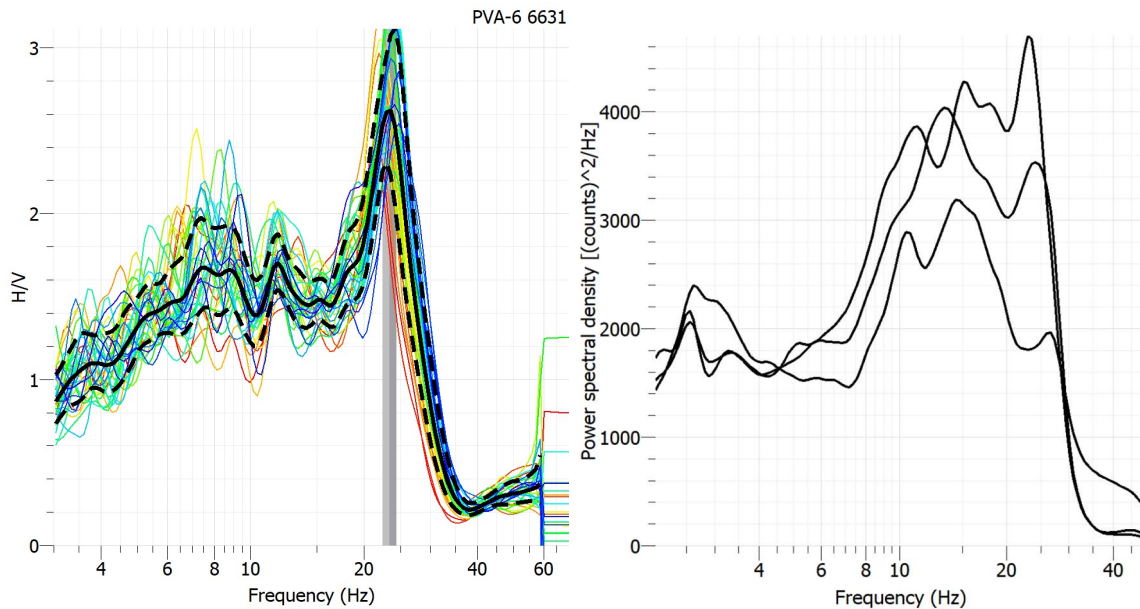


Figura 39. Resultados del PV6. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.

5.4.7 PVA 7

En la Figura 40 se muestran dos gráficos:

- En la primera gráfica se observa la curva HVSR, de la cual se puede determinar que la frecuencia fundamental es de 8.60 (7.73, 9.57) Hz y una amplitud relativa de A 2.36 (1.97, 2.83). De igual manera, se observa un pico secundario de 40 Hz.
- En la segunda figura se muestran los espectros de potencia de cada una de las componentes, en donde se observan dos picos o crestas de menor amplitud en las frecuencias de 3 y 40 Hz aproximadamente, las cuales no se reflejan un efecto en la curva HVSR.

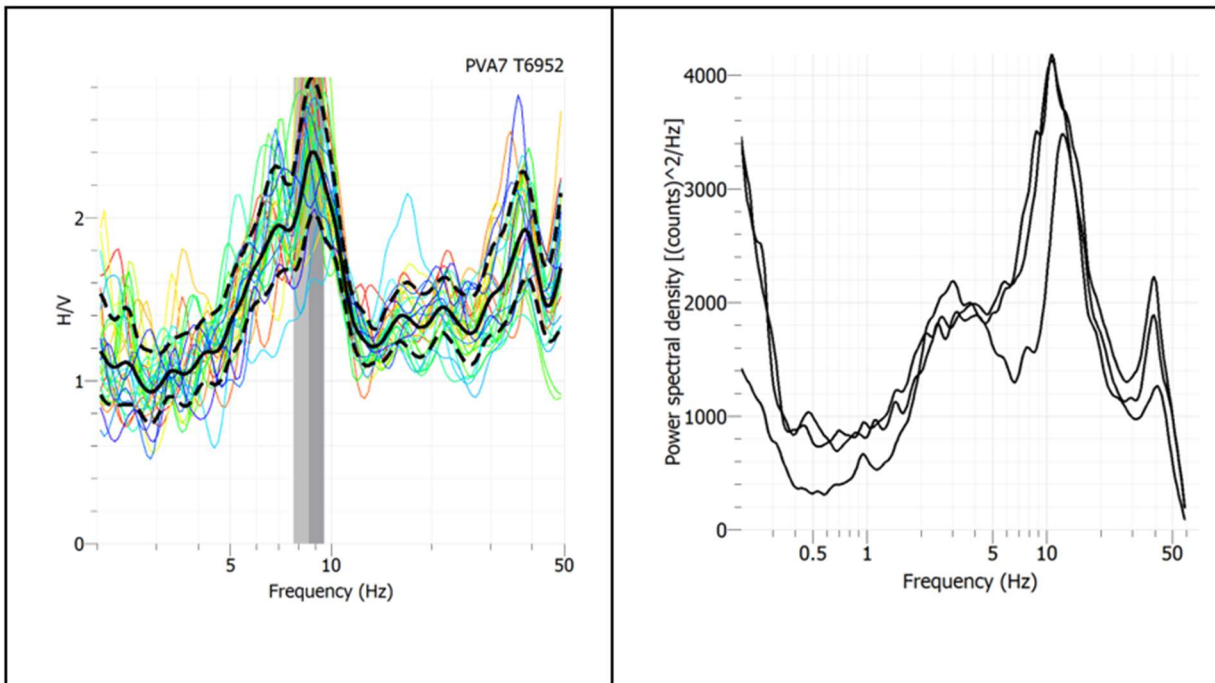


Figura 40. Resultados del PV7. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.

5.4.8 PVA 8

En la Figura 41 se muestran dos gráficos:

- a) En la primera gráfica se observa la curva HVSR, de la cual se puede determinar que la frecuencia fundamental es de 23.37 (22.41, 24.38) Hz y una amplitud relativa de A 2.45 (2.12, 2.84). De igual manera, se observan tres picos secundarios de 9, 13 y 16 Hz.
- b) En la segunda figura se muestran los espectros de potencia de cada una de las componentes, en donde se observan dos picos o crestas de menor amplitud en las frecuencias de 15 y 30 Hz aproximadamente, las cuales no se reflejan un efecto en la curva HVSR.

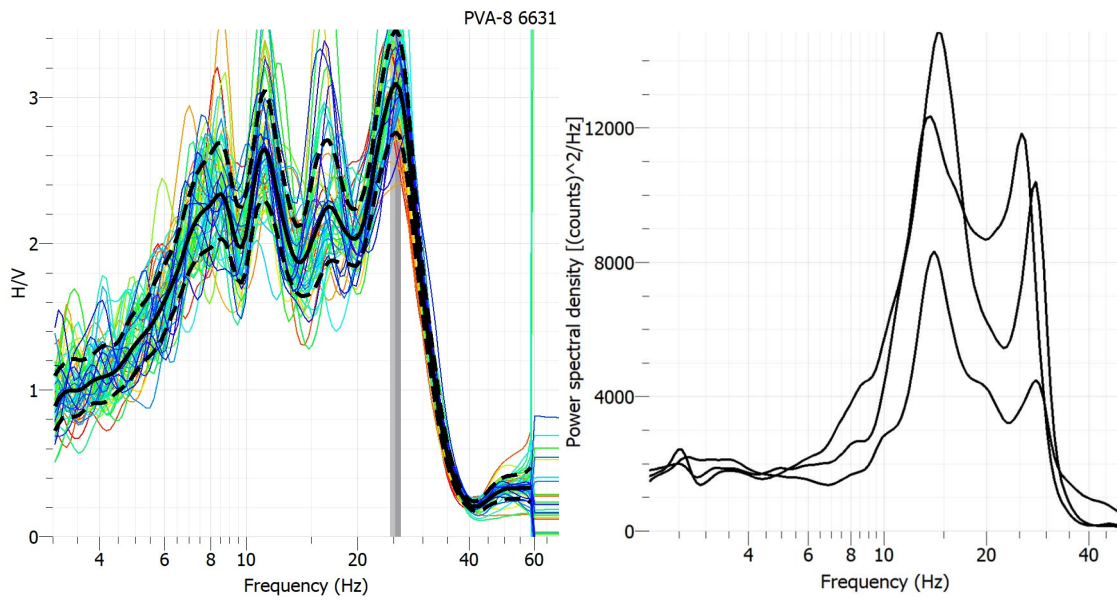


Figura 41. Resultados del PV8. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.

5.4.9 PVA 9

En la Figura 42 se muestran dos gráficos:

- En la primera gráfica se observa la curva HVSR, de la cual se puede determinar que la frecuencia fundamental es de 7.92 (7.39, 8.49) Hz y una amplitud relativa de A 2.8 (2.49, 3.15). De igual manera, se observan dos picos secundarios de 40 y 49 Hz.
- En la segunda figura se muestran los espectros de potencia de cada una de las componentes, en donde se observa dos picos o crestas de menor amplitud en las frecuencias de 3 y 45 Hz aproximadamente, las cuales no se reflejan un efecto en la curva HVSR.

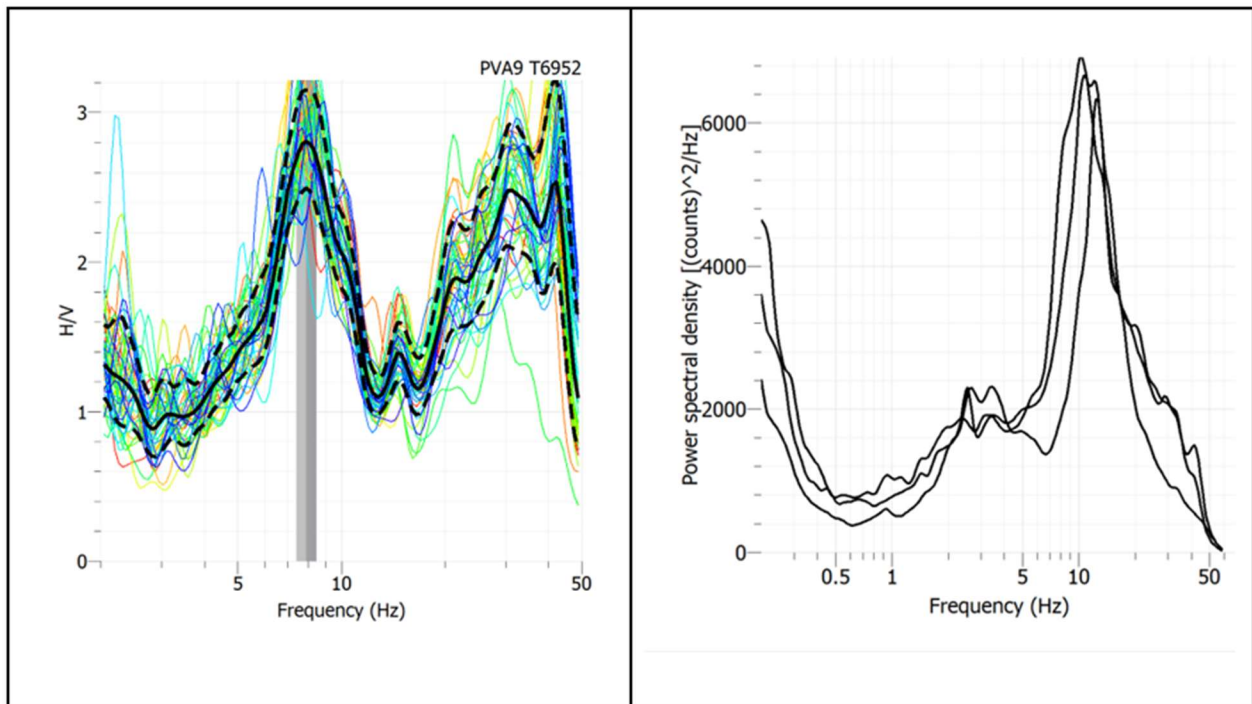


Figura 42. Resultados del PV9. Izquierda: curva HVSR en línea negra continua la media y discontinuas curvas de rms máximo y mínimo. Derecha, Espectros de potencia de las tres componentes, el de menor amplitud correspondiente a la componente Z.

En la Tabla 9 se concentran los resultados de las frecuencias fundamentales y las amplitudes relativas determinadas en los HVSR para cada PVA. De aquí podemos agrupar los resultados en dos grandes grupos:

- Grupo 1: Los HVSR con frecuencias fundamentales (f_0) entre 7.06 y 8.9 Hz.
 - PVA 1, PVA 2, PV 3, se encuentran al NW sobre el camino que va al estacionamiento que se encuentra al fondo del predio.
 - PVA 5, PVA 7 y PVA 9., se encuentran en zonas de orilla de estacionamientos SE, E, y SW respectivamente.
- Grupo 2: Los HVSR con frecuencias fundamentales (f_0) entre 23.37 a 34.07 Hz.
 - PVA 6 y PVA 8 se encuentran al sur del predio en zonas de jardín, en donde se observa únicamente relleno para jardinería.
 - PVA 4 se encuentra en la esquina más al NE de todo el predio, al lado de un cárcamo que sirve para conectar el drenaje de toda la unidad.

Tabla 9. Valores de Frecuencia Fundamental y Amplitud para cada PVA.

PVA	f_0	f_0 (min, max)	Ao	Ao (min, max)
PVA 1	7.84	(7.02,8.76)	1.52	(1.31,1.76)
PVA 2	7.06	(6.64,7.51)	2.45	(2.19,2.75)
PVA 3	8.91	(8.03, 9.81)	2.45	(2.12, 2.84)
PVA 4	34.07	(33.09,35.09)	2.87	(2.34,3.51)
PVA 5	8.20	(7.07, 9.62)	1.9	(1.66, 2.18)
PVA 6	23.37	(22.41,24.38)	2.61	(2.26,3.02)
PVA 7	8.60	(7.73, 9.57)	2.36	(1.97, 2.83)
PVA 8	23.37	(22.41,24.38)	2.61	(2.26,3.08)
PVA 9	7.92	(7.39, 8.49)	2.8	(2.49, 3.15)

6. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS

La integración de resultados se dividió por zonas, la zona 1 al NE del edificio, la zona 2 al NW del edificio y la zona 3 al SE de este.

Para los Tendidos de Refracción Sísmica (TRS) y para las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) se tienen sus escalas correspondientes para asociar los valores obtenidos en el procesamiento y la geología del sitio investigado previamente. Las tablas 10, 11 y 12, muestran los valores de velocidades y resistividades asociadas a materiales y rocas que utilizaremos para la integración.

Tabla 10. Velocidades de onda P para el método de sísmica de refracción modificado de International, 2011.

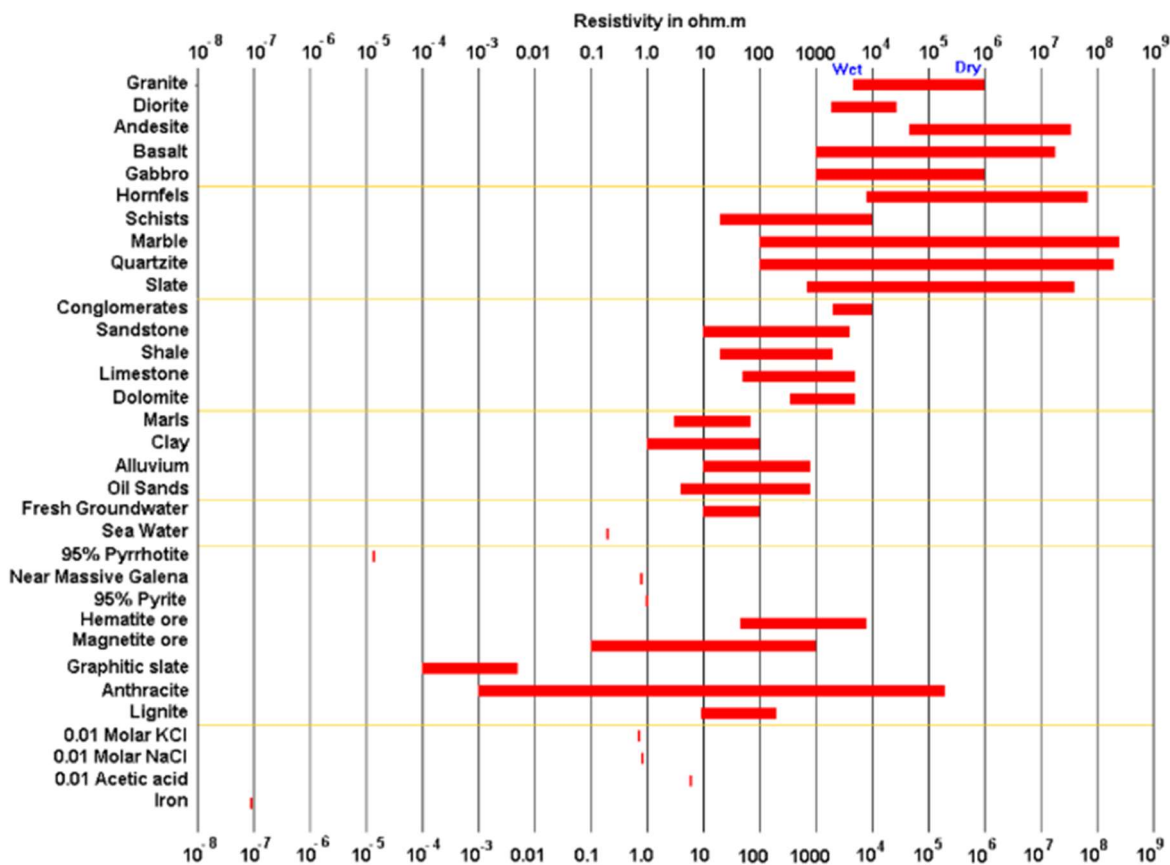
Materiales	Velocidad
Suelo natural y roca	m/s
Material superficial meteorizado	240-610
Grava o arena seca	460-915
Arena (saturada)	1220-1830
Arcilla (saturada)	915-2750
Agua	1430-1665
Agua de mar	1460-1525
Arenisca	1830-3960
Lutita	2750-4270
Tiza	1830-3960
Caliza	2134-6100
Granito	4575-5800
Roca metamórfica	3050-7000

La siguiente tabla es ocupada para la división del suelo dependiendo las velocidades encontradas en el sitio, de acuerdo con cada valor se le asigna un tipo de suelo. Suele ocuparse para el área de la Geotécnica, donde el propósito es encontrar suelo firme para comenzar una construcción.

Tabla 11. Clasificación sísmica de suelos (IBC 2006) tomado de (Castillo 2012).

Tipo	V_{S30} (m/s)	Descripción
A	< 1,500	Roca dura
B	760 - 1,500	Roca
C	360 - 760	Roca blanda y suelo muy denso
D	180 - 360	Suelo rígido
E	< 180	Suelo blando
F	Suelos especiales (licuables, colapsables, arcillas muy plásticas, suelos orgánicos)	

Tabla 12. Resistividades para distintas rocas y minerales. Tomado de (Loke, 2004).



6.1 Integración Zona 1

La zona 1 es compuesta por parte de la Línea 1 de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y parte del Tendido de Refracción Sísmica (TRS), ambas miden 69 m de longitud total, también se realizaron dos líneas de Radar de Penetración Terrestre (GPR) con una longitud alrededor de 30 m y líneas complementarias perpendiculares que van de los 4 a los 11 m de largo. Asimismo, en esta zona se realizaron dos Puntos de Vibración Ambiental (PVA) ver figura 43.

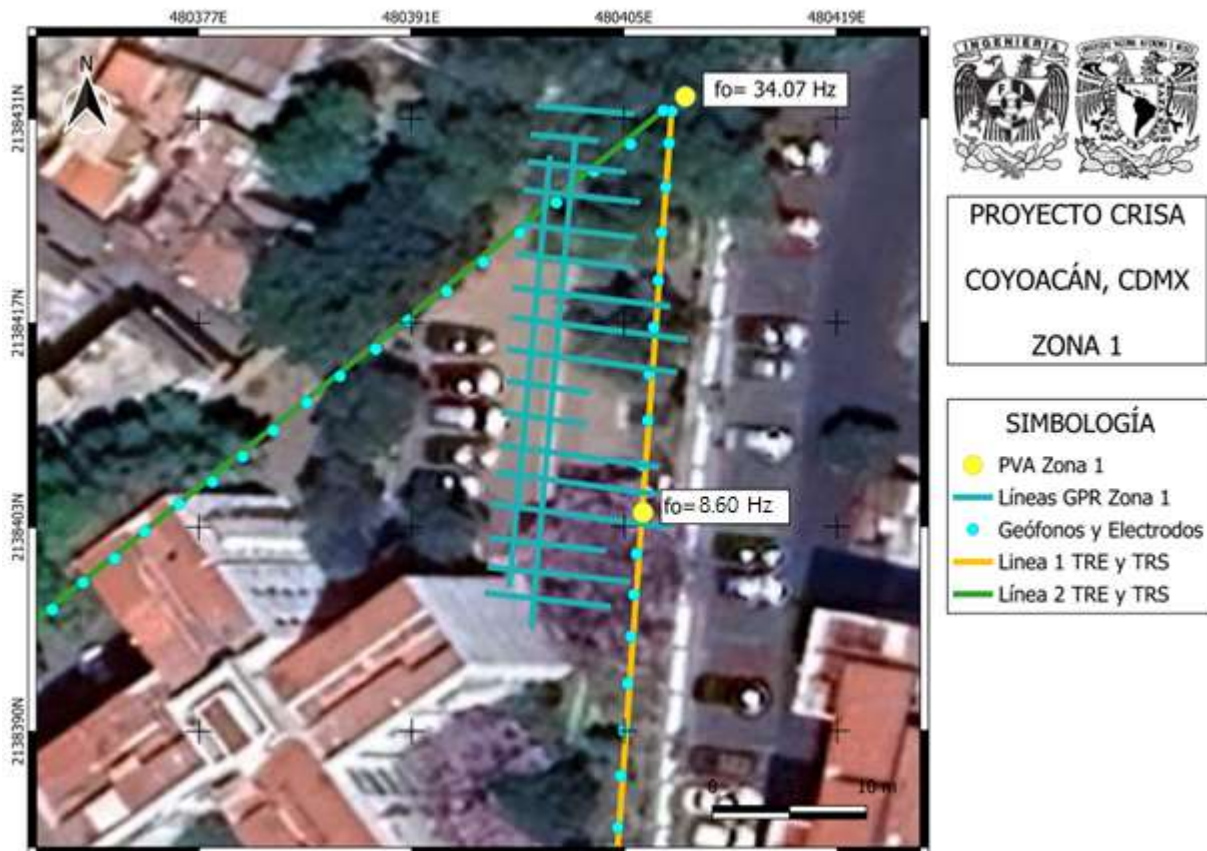


Figura 43. Mapa de adquisición de los 4 métodos utilizados para la zona 1.

De los estudios realizado podemos resaltar lo siguiente:

- GPR Observamos que el espesor del material de relleno tiene una profundidad de 1.5 m, las anomalías encontradas en este espesor son de Tipo 2, es decir, que se trata de material de relleno saturado, a mayor profundidad se observan anomalías asociadas a basaltos fracturados o suelo competente donde se empezó la construcción de la unidad habitacional, estas se presentan al final de la zona 1 cerca del cárcamo.

- Puntos de Vibración Ambiental (PVA), se obtuvieron los valores con una frecuencia fundamental alta (23.3 y 34.0), esto lo relacionamos con espesores pequeños de suelo, el último con la presencia del cárcamo que sirve para conectar los drenajes.
- Líneas de TRS y TRE, las cuales comienzan desde el cárcamo donde en ambos casos encontramos valores medios de resistividad y de velocidad respectivamente (400 a 950 m/s y 200 a 300 Ohm•m). Alrededor del metro 25 de ambos tendidos encontramos valores altos (1000 a 1300 m/s y 300 a 400 Ohm•m respectivamente), los valores se extienden hasta la profundidad excepto por una parte de la refracción que es dividido por medio metro de velocidades medias, después siguen los valores de velocidades altas hasta la profundidad alcanzada. De acuerdo con la tabla 10 y 11 de velocidades, la tabla 12 de resistividades y la geología regional del estudio, los valores altos a una profundidad mayor a los 1.5 m son asociados al basalto fracturado o al suelo competente (tipo C). Los valores de 400-950 m/s y 200-300 Ohm•m son relacionados al material de relleno saturado o suelo rígido (tipo D), de acuerdo con la tabla 10, y los valores de 1000-1300 m/s 300-400 Ohm•m que comienzan desde la superficie se debe a la presencia de árboles ubicados previamente. Ver figura 44.

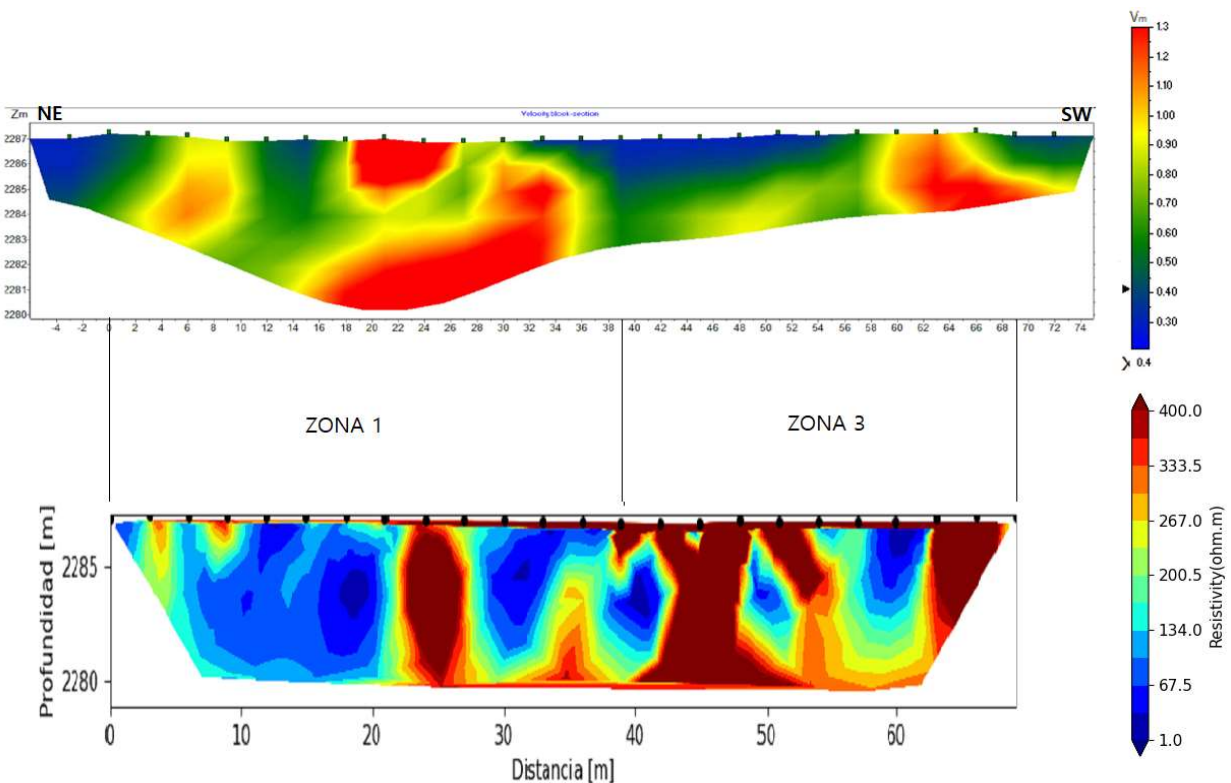


Figura 44. Sección de Velocidades y Resistividades correspondientes a los métodos TRS y TRE respectivamente limitado para la zona 1.

6.2 Integración Zona 2

La zona 2 es compuesta por parte de la Línea 2 de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y parte del Tendido de Refracción Sísmica (TRS), ambas miden 69 m de longitud total, también se realizaron dos líneas de Radar de Penetración Terrestre (GPR) con una longitud alrededor de 50 m y líneas complementarias perpendiculares que van de los 6 a los 18 m de largo. Asimismo, en esta zona se realizaron tres Puntos de Vibración Ambiental (PVA) ver figura 45.

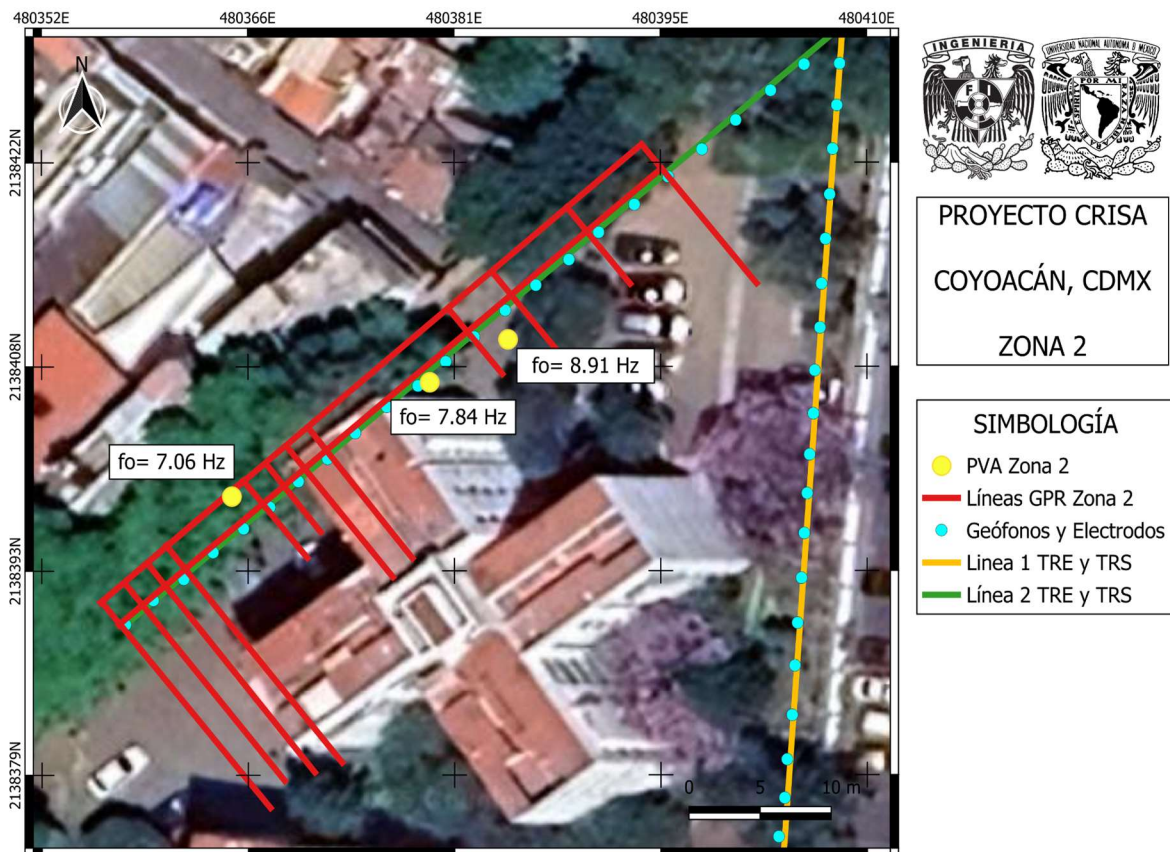


Figura 45. Mapa de adquisición de los 4 métodos utilizados para la zona 2.

De los estudios realizado podemos resaltar lo siguiente:

- GPR Observamos que el espesor del material de relleno tiene una profundidad de 1.5 m, las anomalías encontradas en este espesor son de Tipo 2, es decir, que se trata de material de relleno saturado, a mayor profundidad se observan anomalías asociadas a basaltos fracturados o suelo competente donde se empezó la construcción de la unidad habitacional, estas se presentan al SW de la zona 2.

- Puntos de Vibración Ambiental (PVA), se obtuvieron los valores con una frecuencia fundamental media (7.06, 7.84 y 8.91), esto lo relacionamos con espesores medios del suelo.
- Líneas de TRS y TRE, las cuales comienzan desde el cárcamo donde encontramos valores bajos de velocidad (400 a 650 m/s) y valores medios de resistividad (100 a 150 Ohm•m). Alrededor del metro 14 al 30 de refracción encontramos valores medios (700 a 1000 m/s). Alrededor del metro 30 en el tendido del TRE y del metro 34 de TRS encontramos valores altos (150 a 200 Ohm•m y 1000 a 1300 m/s respectivamente), los valores de la tomografía se extienden a lo largo del tendido en la superficie hasta una profundidad de 2 m, contrario a la refracción que estos valores aparecen a partir de 1.5 m de profundidad, después siguen los valores de velocidades altas hasta la profundidad alcanzada. De acuerdo con la tabla 10 y 11 de velocidades, la tabla 12 de resistividades y la geología regional del estudio, los valores altos a una profundidad mayor a los 1.5 m son asociados al basalto fracturado o al suelo competente (tipo C). Los valores de 400 a 650 m/s y 100-150 Ohm•m son relacionados al material de relleno saturado o suelo rígido (tipo D) y los valores de 1000-1300 m/s y 150-200 Ohm•m que comienzan desde la superficie se debe a la presencia de árboles ubicados previamente. Ver figura 46.

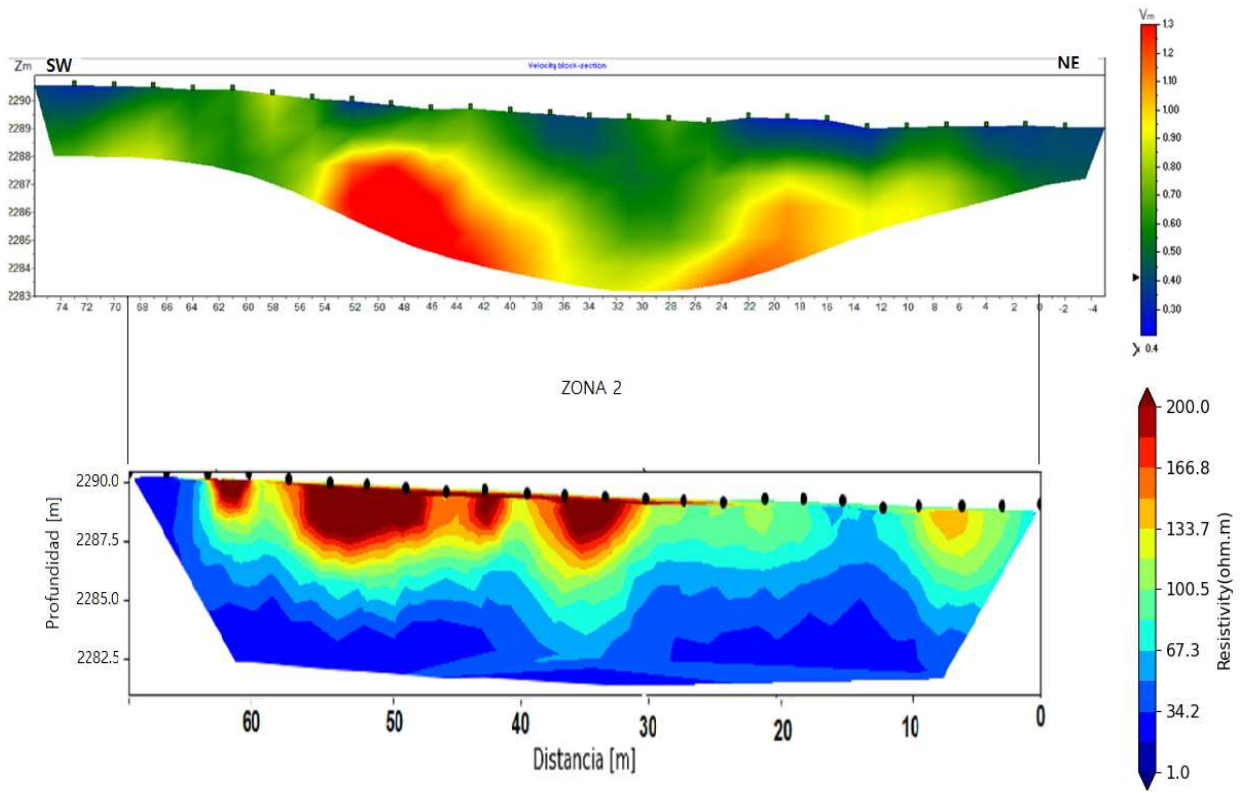


Figura 46. Sección de Velocidades y Resistividades correspondientes a los métodos TRS y TRE respectivamente limitado para la zona 2.

6.3 Integración Zona 3

La zona 3 es compuesta por parte de la Línea 1 de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y parte del Tendido de Refracción Sísmica (TRS), ambas miden 69 m de longitud total para esta zona es cubierta con 30 m, también se realizaron 9 líneas de Radar de Penetración Terrestre (GPR) cuatro líneas con una longitud que van de los 7 a 11 m de largo y cinco líneas complementarias perpendiculares que van de los 5 a los 11 m de largo. Asimismo, en esta zona se realizaron cuatro Puntos de Vibración Ambiental (PVA) ver figura 47.

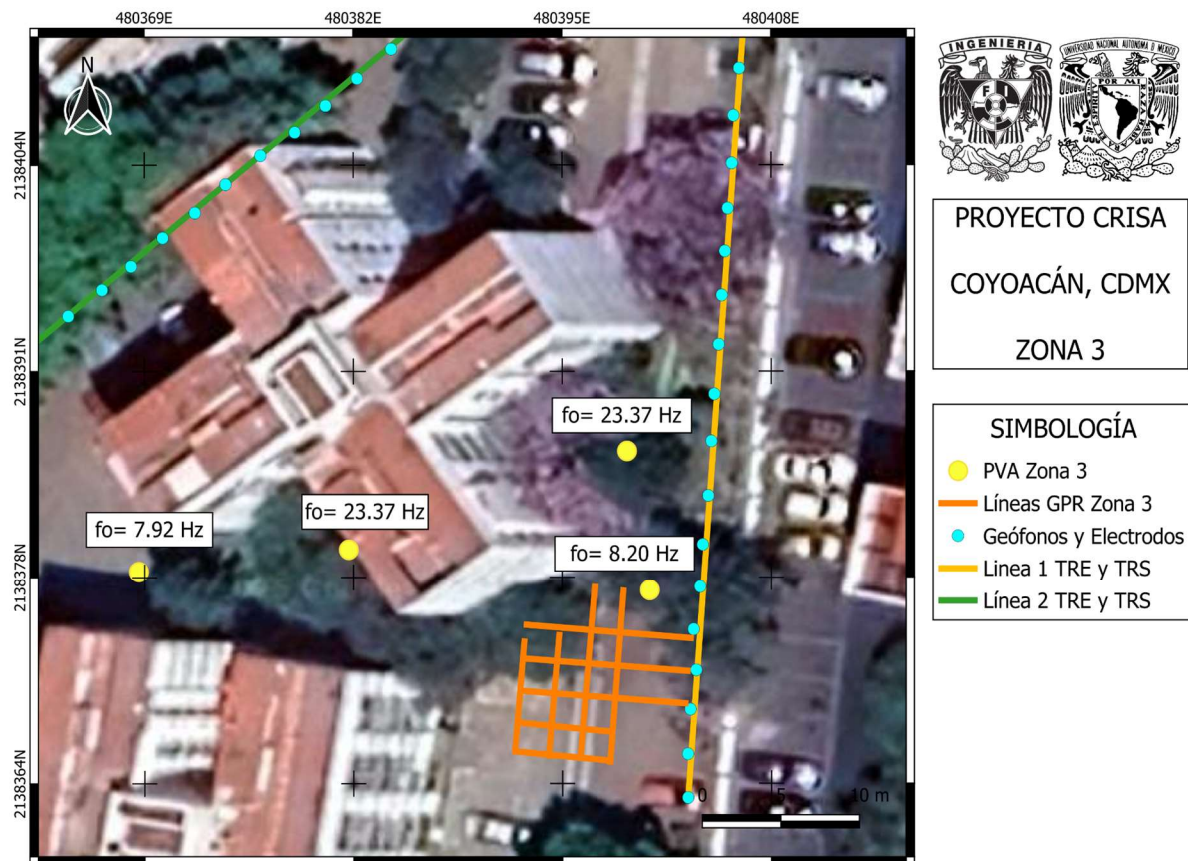


Figura 47. Mapa de adquisición de los 4 métodos utilizados para la zona 3.

De los estudios realizado podemos resaltar lo siguiente:

- GPR Observamos que el espesor del material de relleno tiene una profundidad de 1.5 m, las anomalías encontradas en este espesor son de Tipo 2, es decir, que se trata de material de relleno saturado, a mayor profundidad se observan anomalías asociadas a basaltos fracturados o suelo competente donde se empezó la construcción de la unidad habitacional, esta se presenta posiblemente en la línea 8 de la zona 3.

- Puntos de Vibración Ambiental (PVA), se obtuvieron los valores con una frecuencia fundamental altas y medias (23.37, 23.37, 7.92 y 8.20), esto lo relacionamos con espesores pequeños de suelo para las frecuencias altas y espesores medianos para las frecuencias medias, las frecuencias grandes fueron ubicados en las jardineras de la unidad que rodean al edificio.
- Líneas de TRS y TRE, las cuales abarcan la zona 3 a partir del metro 39 donde en la tomografía encontramos valores altos (300 a 400 Ohm•m) y valores medios de velocidad (400 a 800 m/s). Alrededor del metro 60 de ambos tendidos encontramos valores altos (1000 a 1300 m/s y 300 a 400 Ohm•m respectivamente), los valores se extienden hasta la profundidad alcanzada. De acuerdo con la tabla 10 y 11 de velocidades, la tabla 12 de resistividades y la geología regional del estudio, los valores altos a una profundidad mayor a los 1.5 m son asociados al basalto fracturado o al suelo competente (tipo C). Los valores de 400-800 m/s y 200-300 Ohm•m son relacionados al material de relleno saturado o suelo rígido (tipo D) y los valores de 1000-1300 m/s 300-400 Ohm•m que comienzan desde la superficie se debe a la presencia de árboles ubicados previamente. Ver figura 48.

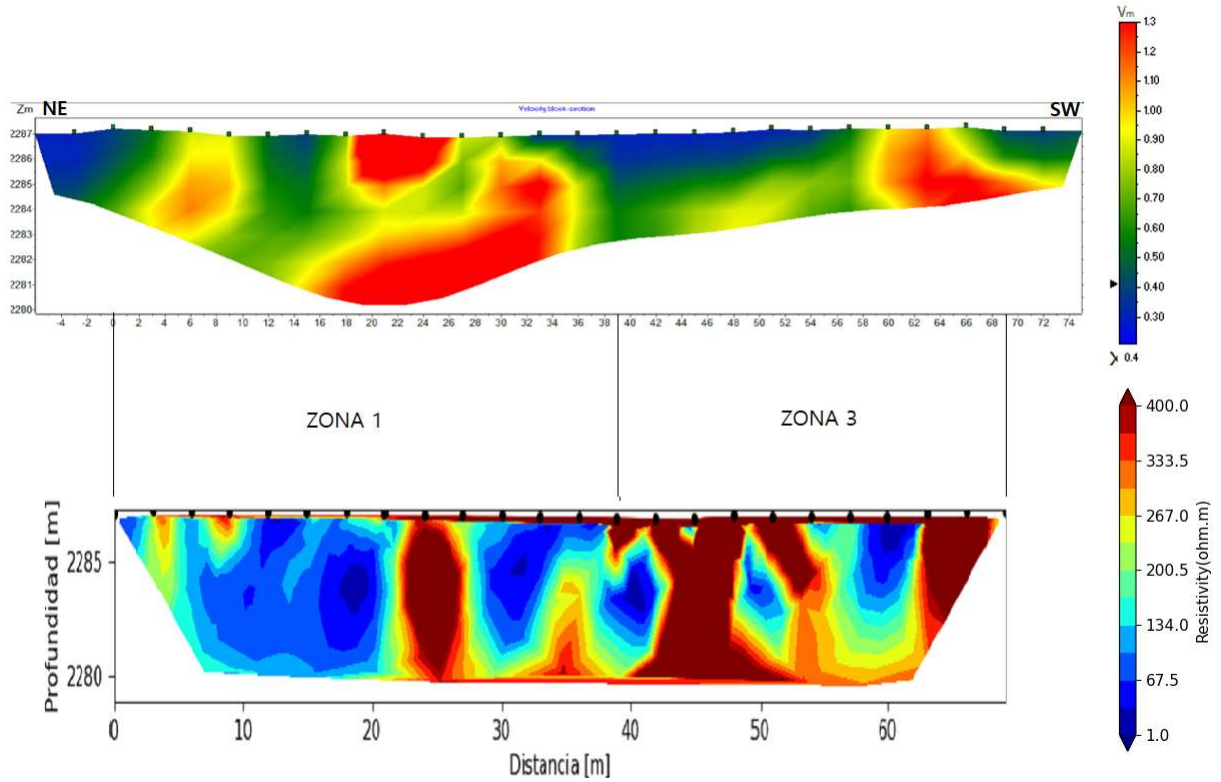


Figura 48. Sección de Velocidades y Resistividades correspondientes a los métodos TRS y TRE respectivamente limitado para la zona 3.

6.4 Cocientes Espectrales (HVSr)

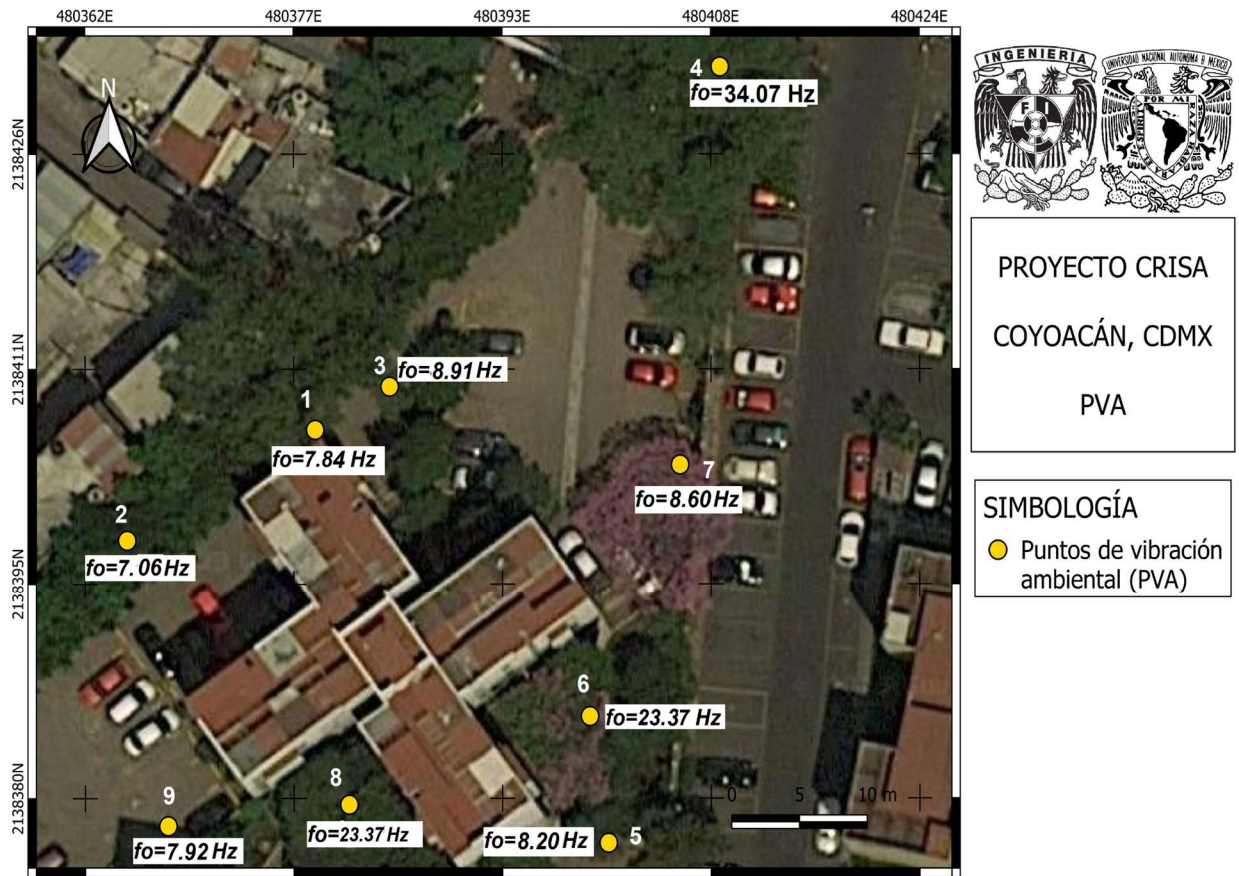


Figura 49. Valores de la frecuencia fundamental para cada PVA adquirida.

Sabemos que con la ecuación 49 se utiliza para encontrar las Vs, también mediante las frecuencias y las Vs podemos encontrar los espesores con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (50)$$

Donde T es el periodo que se obtiene $1/f_o$ y H es el espesor, despejando la ecuación quedaría:

$$\frac{T \cdot V_s}{4} = H \quad (51)$$

Para los siguientes puntos se encontraron los siguientes espesores, dependiendo la ubicación donde fue obtenido el punto de vibración, la Vp varía de acuerdo con las unidades sísmicas encontradas para la obtención de Vs.

- PVA 1: Se encuentra en la zona 2 y tiene un espesor de aproximadamente de 4 m, correlacionando con el método de refracción muestra que las velocidades son medias hasta la máxima profundidad alcanzada a la distancia de 37 m del tendido.
- PVA 2: Se encuentra en la zona 2 y tiene un espesor de aproximadamente de 4.55, correlacionando con el método de refracción muestra velocidades medias hasta la máxima profundidad alcanzada a la distancia de 57 m del tendido.
- PVA 3: Se encuentra en la zona 2 y tiene un espesor aproximadamente de 7.9 m, correlacionando el método de refracción muestra velocidades medias hasta la máxima profundidad alcanzada a la distancia de 34 m del tendido.
- PVA 4: Se encuentra en el cárcamo y tiene un espesor aproximado de 2.3 m, correlacionando con el método de refracción muestra velocidades medias a altas hasta la máxima profundidad alcanzada del tendido.
- PVA 5: Se encuentra en la zona 3 y tiene un espesor aproximado de 6.9 m, correlacionando con el método de refracción muestra velocidades de bajas a medias hasta la máxima profundidad alcanzada a la distancia de 55 m del tendido.
- PVA 6: Se encuentra en la zona 3 y tiene un espesor aproximado de 2.3 m, correlacionando con el método de refracción muestra velocidades de bajas a medias hasta la máxima profundidad alcanzada a la distancia de 46 m del tendido.
- PVA 7: Se encuentra en la zona 1 y tiene un espesor aproximado de 15 m, correlacionando con el método de refracción muestra velocidades de bajas a medias hasta la máxima profundidad alcanzada a la distancia de 27 m del tendido.

Para los puntos de vibración 8 y 9 se encuentran fuera de las líneas de refracción por lo que no se puede determinar los espesores, pero el PVA 9 se encuentra en zona de empedrado y el PVA 8 se encuentra en una jardinera, el PVA 4 y 6 también tienen frecuencias fundamentales altas ubicadas en el cárcamo y otra jardinera respectivamente.

7. CONCLUSIONES

La adquisición que se realizó en la unidad habitacional CRISA fue la indicada para poder caracterizar al subsuelo e identificar las anomalías encontradas. Todas las secuencias de adquisición utilizadas en este trabajo de tesis muestran información en cada zona de estudio, correlacionando una con otra.

Con los resultados obtenidos se muestra que la parte NE de la unidad sufre de inundación en temporada de lluvia indicando que el sistema de drenaje no es suficiente para desaguar rápidamente la zona ocasionando que el material que se encuentra en el subsuelo se vea afectado de la siguiente manera:

- El material de relleno con espesor de 1.5 m se encuentra muy saturado ocasionando que la resistencia al esfuerzo cortante se vea disminuido. Otra de las afectaciones que puede tener este material es que haya hundimientos significativos en el terreno, ocasionando daños estructurales en los edificios que se encuentran en la zona.
- El basalto que se encuentra debajo del material de relleno es fracturado ocasionando filtraciones de agua en el lecho rocoso, perdiendo así la resistencia de la roca ocasionando inestabilidad del terreno.
- Con los resultados obtenidos de la prospección eléctrica se determinaron 2 unidades geoelectricas:
 - Unidad Geoelectrica 1: Va del intervalo de 1 a 200 Ohm•m y es asociado al material de relleno saturado abarcando la mayor parte de la sección.
 - Unidad Geoelectrica 2: Va del intervalo de 200 a 400 Ohm•m y es asociado a un terreno que es mezcla de roca y material resistivo.
- Con los resultados de la sísmica de refracción se determinaron 3 unidades de suelo:
 - Unidad sísmica 1: Parte de 200 a 400 m/s y está asociada entre los tipos de suelo D y E (suelo rígido a blando) como material de relleno como arcillas blandas.
 - Unidad sísmica 2: Parte de 400 a 850 m/s y está asociado entre los tipos de suelo D y C como la arcilla de la unidad 1 pero con mayor compactación o humedad.
 - Unidad sísmica 3: Parte de los 900 a 1300 m/s y está asociado al suelo tipo C (suelo denso) en esta unidad decimos que las velocidades altas que se encuentran

cerca de la superficie se asocian al material de relleno saturado y al que se encuentra en la profundidad de la sección se asocia al basalto fracturado.

- El rango de la frecuencia fundamental que se adquirió en la zona empedrada del lugar de estudio va de $f_0=7.06$ a 8.91 Hz por lo tanto el rango del periodo fundamental va de $T_0=0.11$ a 0.14 s
- El rango de la frecuencia fundamental que se adquirió en la zona de las jardineras y el cárcamo es de $f_0=23.37$ a 34.07 por lo tanto el rango del periodo fundamental va de $T_0=0.02$ a 0.04 s.

Para evitar más hundimientos y daños estructurales al edificio que colinda con la zona propensa a inundación se recomienda:

- Verificar que el sistema de drenaje pluvial superficial funcione de manera independiente y que no contribuya a la saturación del subsuelo, al mismo tiempo ampliar el sistema de drenaje superficial, de esta forma la disipación de agua aumentará y reducirá la saturación,
- En caso del que el sistema de drenaje se siga viendo superado, se recomienda retirar el material de relleno saturado y sustituirlo por material como grava, bien compactada para que permita una adecuada disipación del agua.
- Para los daños estructurales en el edificio se recomienda una evaluación estructural para identificar daños asociados a asentamientos o pérdida de soporte, así como una medida para evitar el ingreso de humedad a la estructura que se encuentra en contacto con el terreno saturado.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aplicada, A. d. (s.f.). *Prospección Eléctrica*. Obtenido de https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/20130924_Prospeccion_electrica.pdf
- Butler, D. K. (2005). Ground-Penetrating Radar. En D. K. Butler, *Near-Surface Geophysics Part 1: Concepts and Fundamentals* (págs. 357-438). Oklahoma, USA: SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS.
- Castillo, S. L. (14 de Noviembre de 2012). Perfiles de velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico del suelo en el poniente de Guadalajara, Jal. *Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, págs. 1-8.
- Cevallos-Ferriz, S. R. S. (1993). "El volcán Xitle y su erupción". En: Geología de México. Instituto de Geología, UNAM.
- CFE. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles*. Ciudad de México: CFE.
- Cruz, R. S. (2019). *TÉCNICAS DE RUIDO SÍSMICO PARA LA OBTENCIÓN DE UN MODELO 3D DE VELOCIDAD DE ONDA "S" EN EL ANEXO DE INGENIERÍA, CIUDAD UNIVERSITARIA*. Ciudad de México.
- Espinoza, O. H. (2019). *Evaluación del efecto de sitio y zonificación sísmica en la alcaldía Coyoacán, Ciudad de México*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, D. V. (2015). *Arreglos no Convencionales de Tomografía de Resistividad Eléctrica 3D, tesis de licenciatura, Universidad*. ptolomeo unam.
- Geopsy. (21 de 10 de 2008). Obtenido de Geopsy: <https://www.geopsy.org>
- Hugo Delgado, R. M.-O.-S. (1998). GEOLOGY OF XITLE VOLCANO IN SOUTHERN MEXICO CITY- A 2000-YEAR-OLD MONOGENETIC VOLCANO IN AN URBAN AREA. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, págs. Volumen 15, número 2, 1998. p. 115-131.
- International, A. (2011). *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*. Estados Unidos: International ASTM.
- Loke, M. H. (2004). *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Geotomosoft.
- Nakamura, Y. (2019). Seismological Research Letters. En Y. Nakamura, *Seismological Research Letters* (págs. 1437-1443). Tokyo, Japan.
- Okpoli, C. C. (2013). Sensitivity and Resolution Capacity of Electrode Configurations. *International Journal of Geophysics*, 1-12.

- Orellana, E. (1982). *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua*. Madrid, España: Paraninfo.
- Pelton, J. R. (2005). Near-surface seismology: Surface-based methods. In Near-surface geophysics. . En J. R. Pelton, *Near-surface seismology: Surface-based methods. In Near-surface geophysics*. (págs. pp. 219-264). Idaho: Society of Exploration Geophysicists.
- Pelton, J. R. (s.f.). Chapter 8. En J. R. Pelton, *Near-Surface Seismology: Surface-Based Methods* (págs. 221-263). Boise, Idaho: Department of Geosciences.
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. UK: Wiley-Blackwell.
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Oxford, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Siebe, C. (2009). *La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670 +/-35 años AP y sus implicaciones*. Ciudad de México: Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica Universidad Nacional Autónoma de México.
- Silva y Mendoza. (2009). Evaluación geológica de los modelos para el truncamiento. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 165-176.
- Tejero-Andrade, A. (2015). L- and CORNER-arrays for 3D electric resistivity tomography: . *Near Surface Geophysics*, 14.
- UNAM, I. d. (2020). *ACTUALIZACIÓN DE LA ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO Y ÁREAS ALEDAÑAS-PARTE NORTE*. Ciudad de México: ISCDF/CEC-04/2020-13.

9. ANEXO FOTOGRAFICO

9.1 Anexo de líneas de Radar

9.1.1 Líneas de radar de la zona 1 a partir de 3- 19.

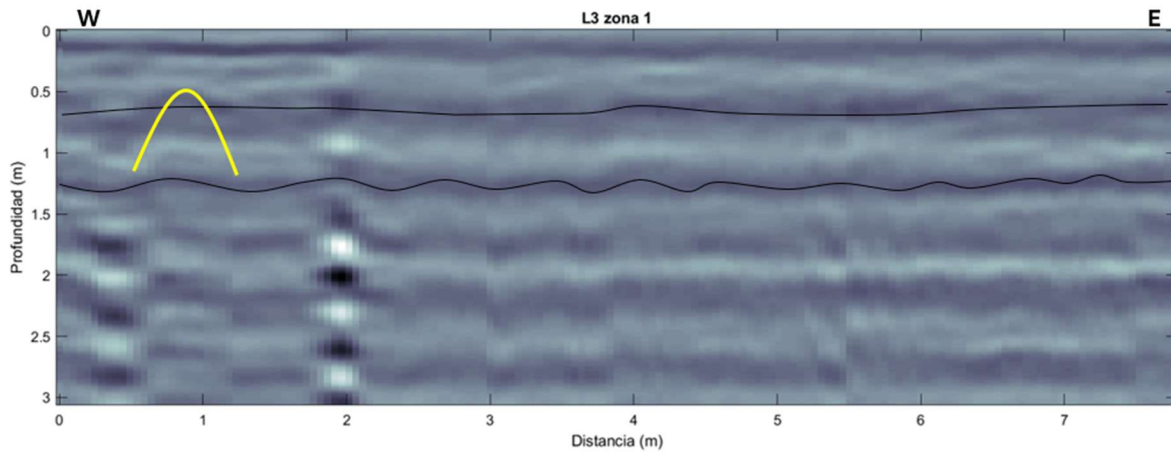


Figura A 1. Línea 3 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

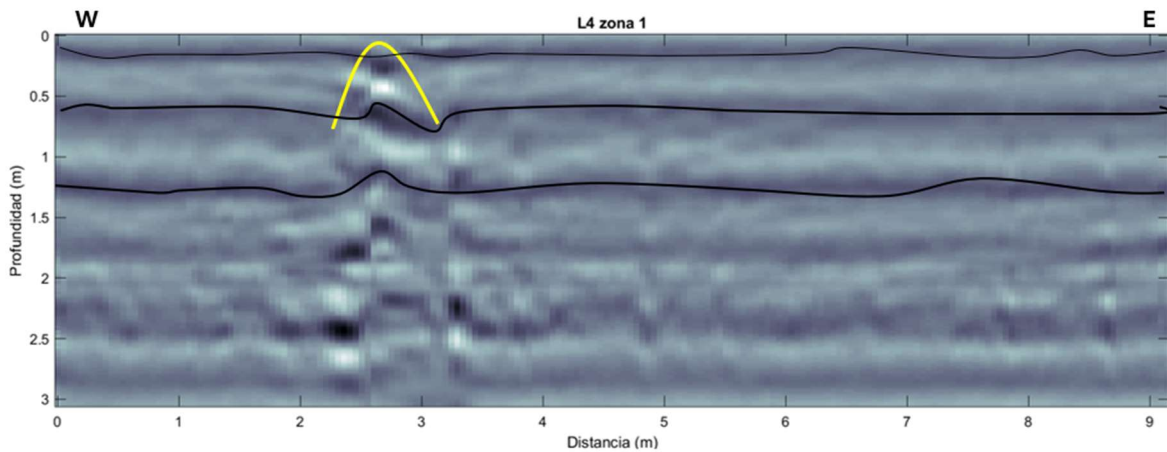


Figura A 2. Línea 4 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

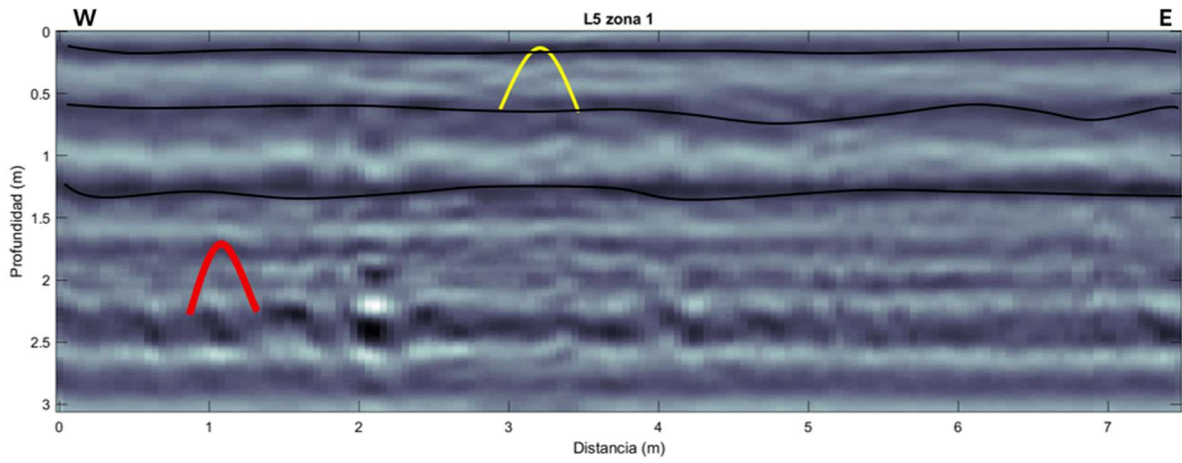


Figura A 3. Línea 5 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

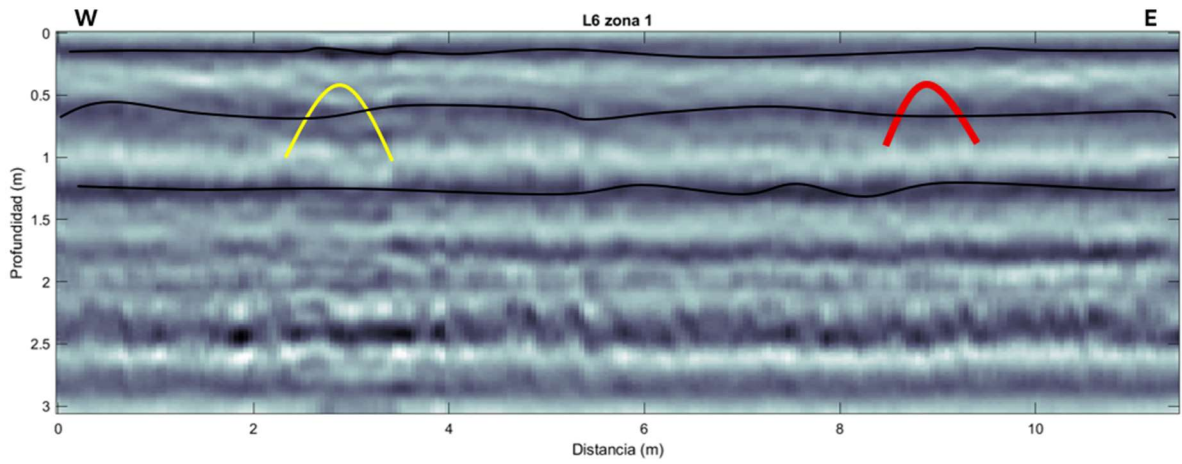


Figura A 4. Línea 6 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

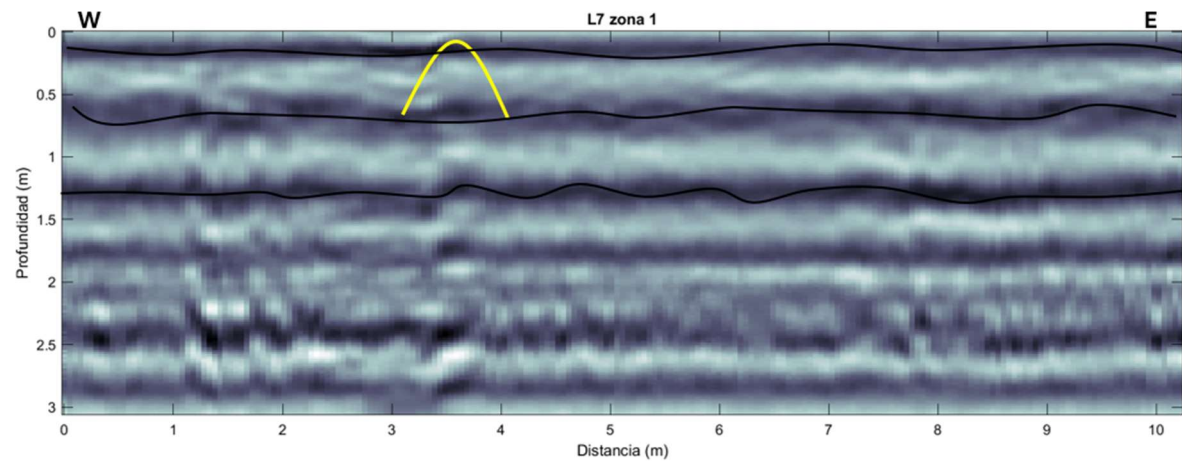


Figura A 5. Línea 7 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

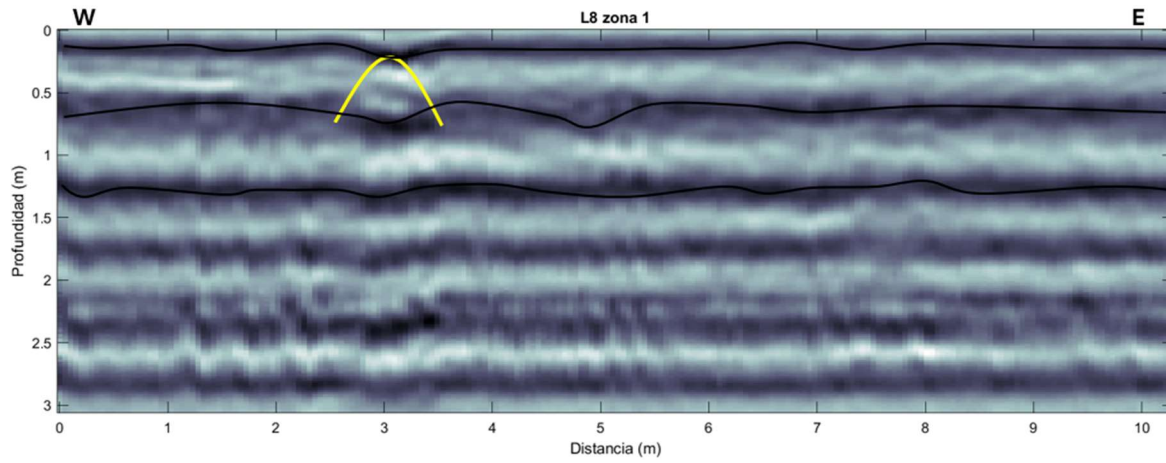


Figura A 6. Línea 8 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

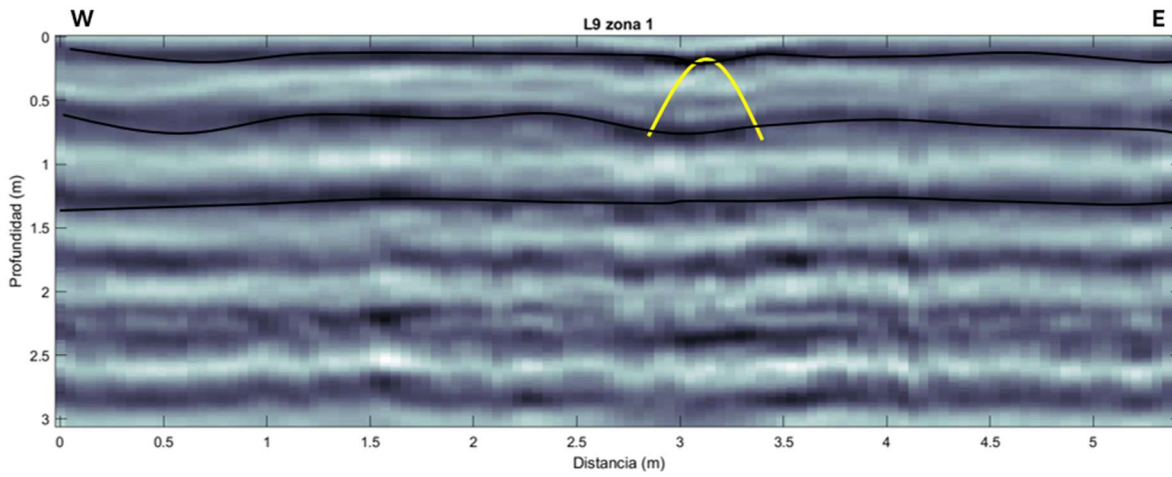


Figura A 7. Línea 9 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

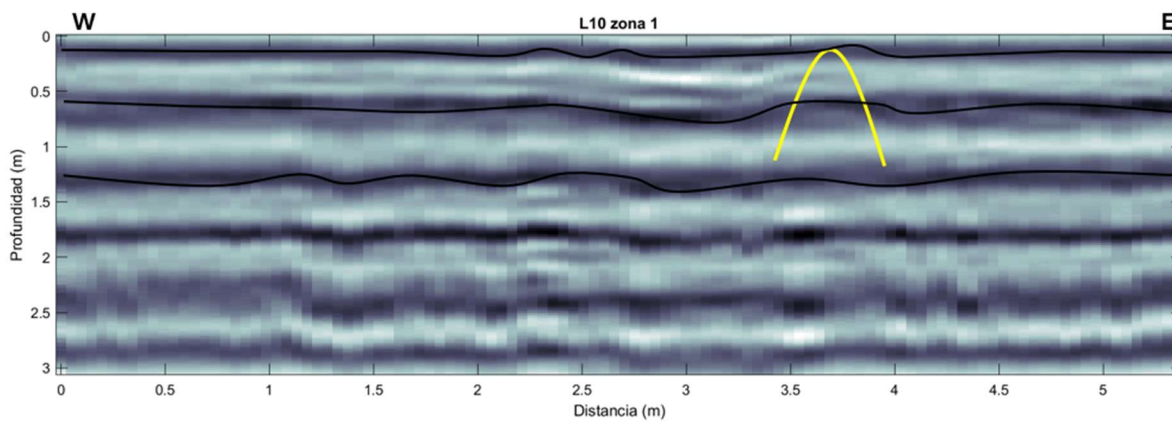


Figura A 8. Línea 10 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

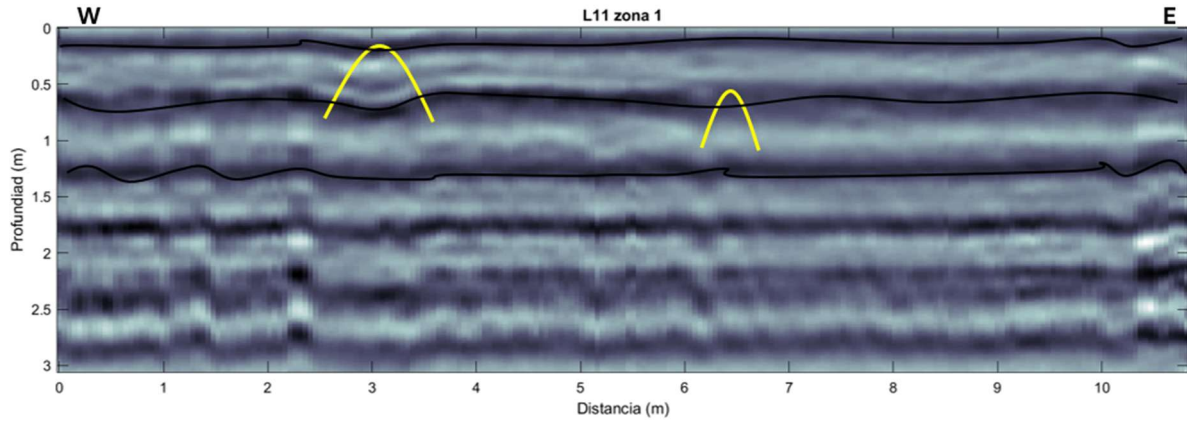


Figura A 9. Línea 11 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

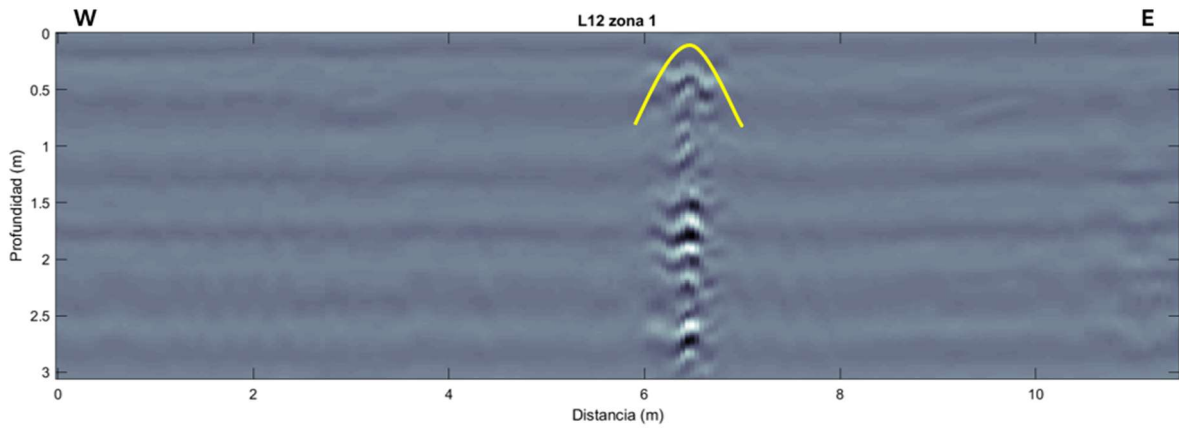


Figura A 10. Línea 12 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

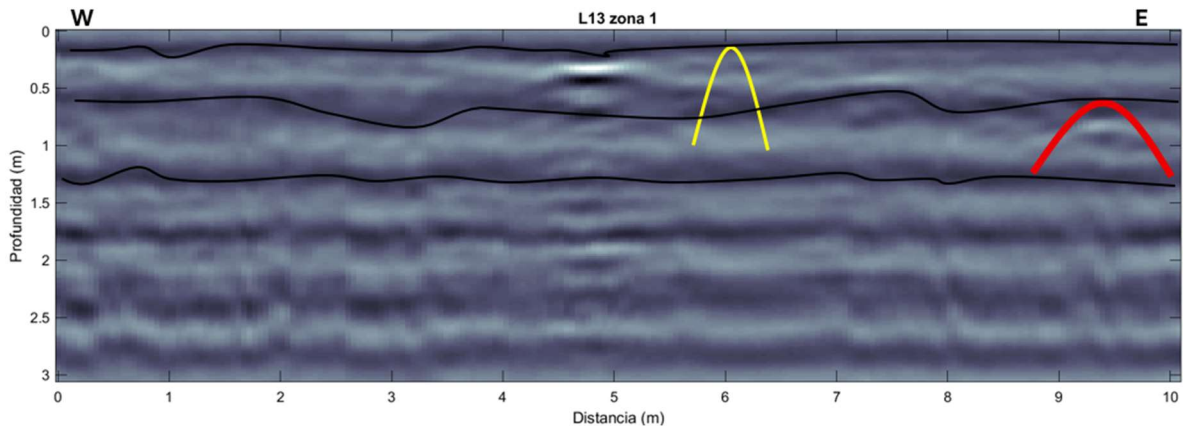


Figura A 11. Línea 13 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

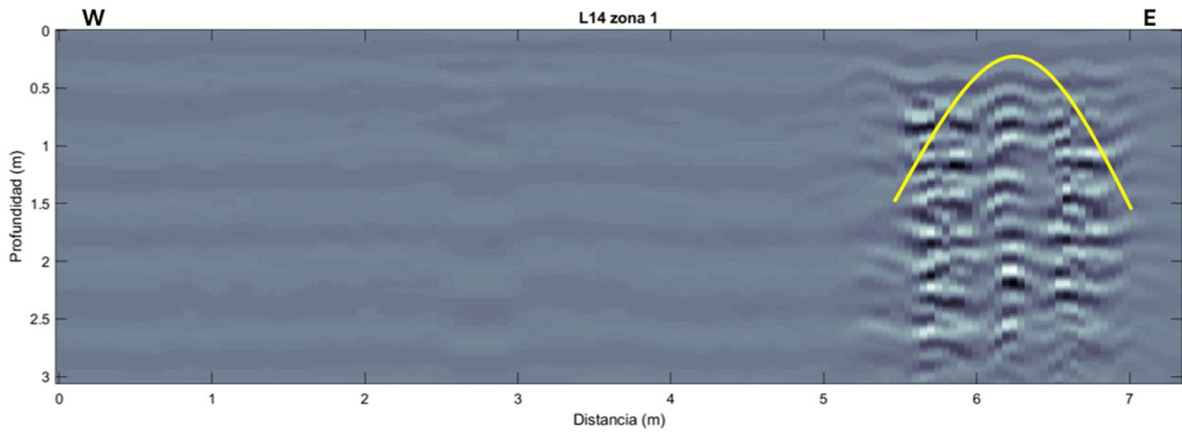


Figura A 12. Línea 14 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

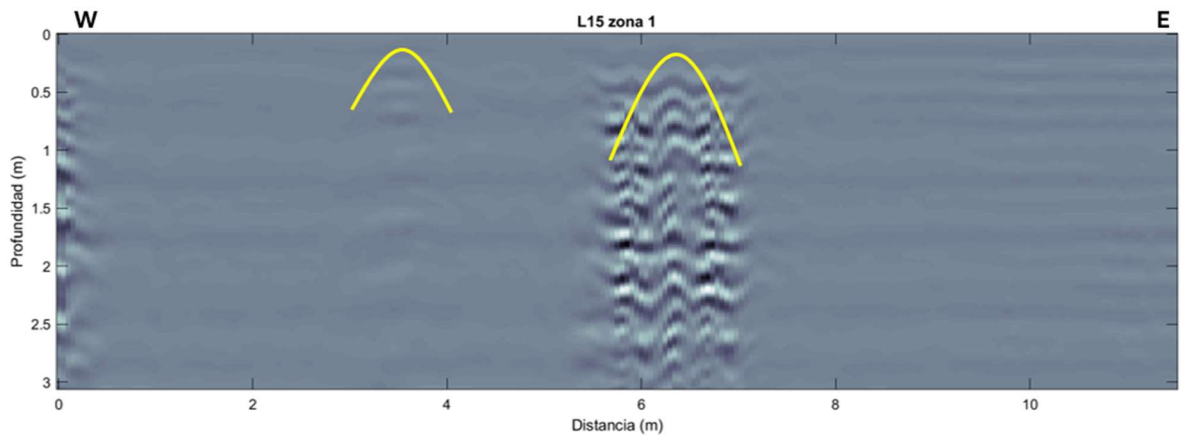


Figura A 13. Línea 15 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

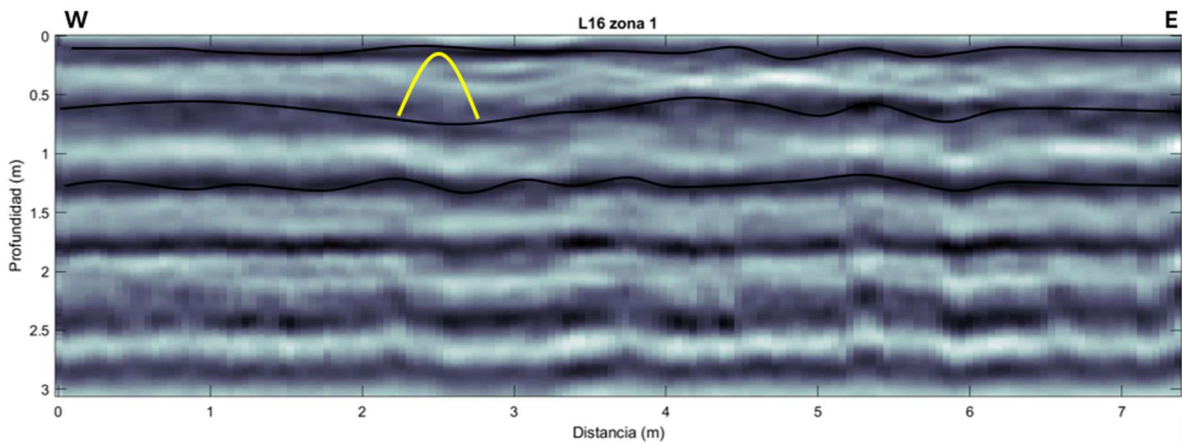


Figura A 14. Línea 16 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

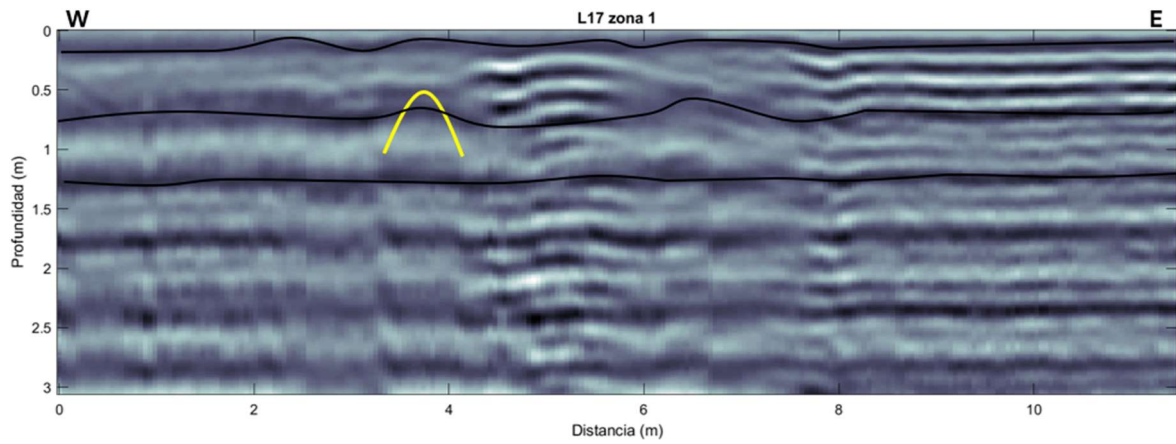


Figura A 15. Línea 17 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

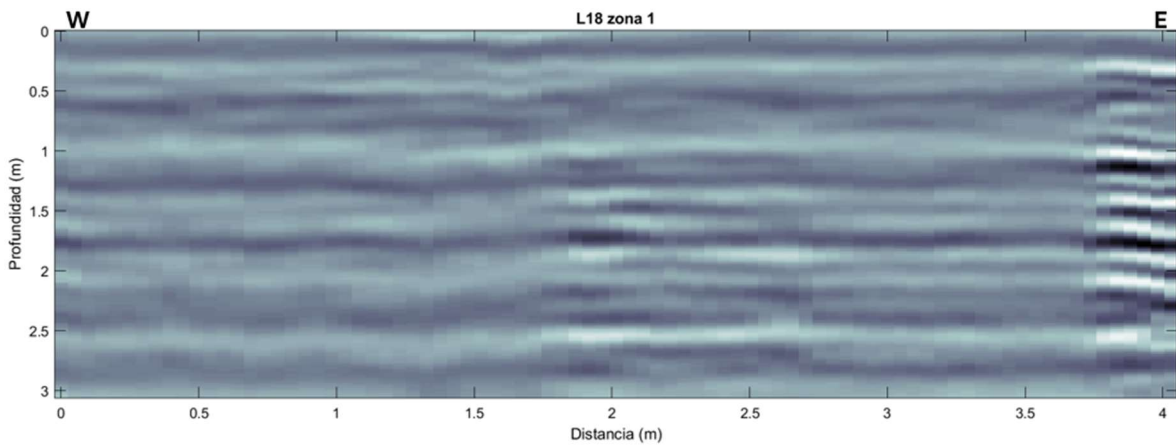


Figura A 16. Línea 18 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

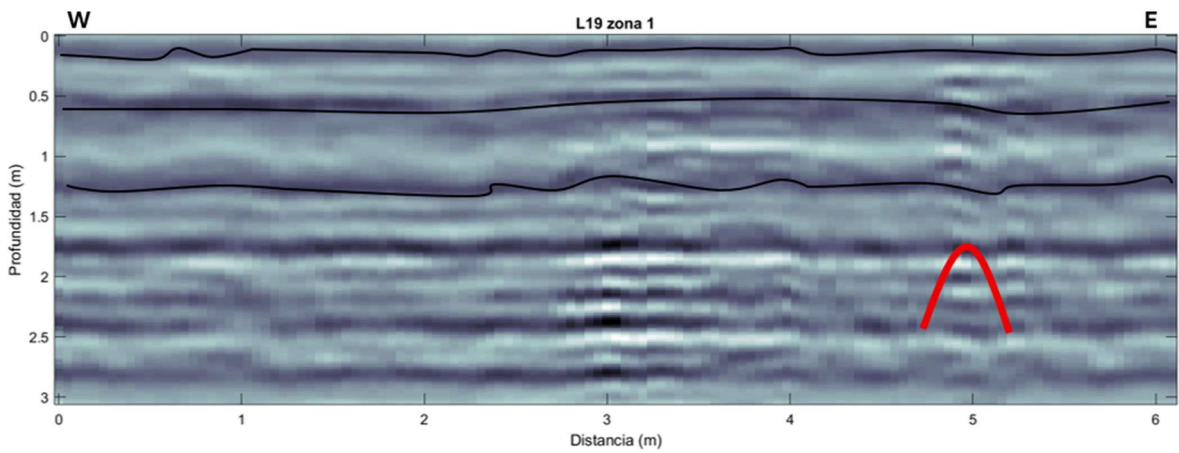


Figura A 17. Línea 19 correspondiente a la zona 1 del método GPR.

9.1.2 Líneas de radar de la zona 2 a partir de 3- 14.

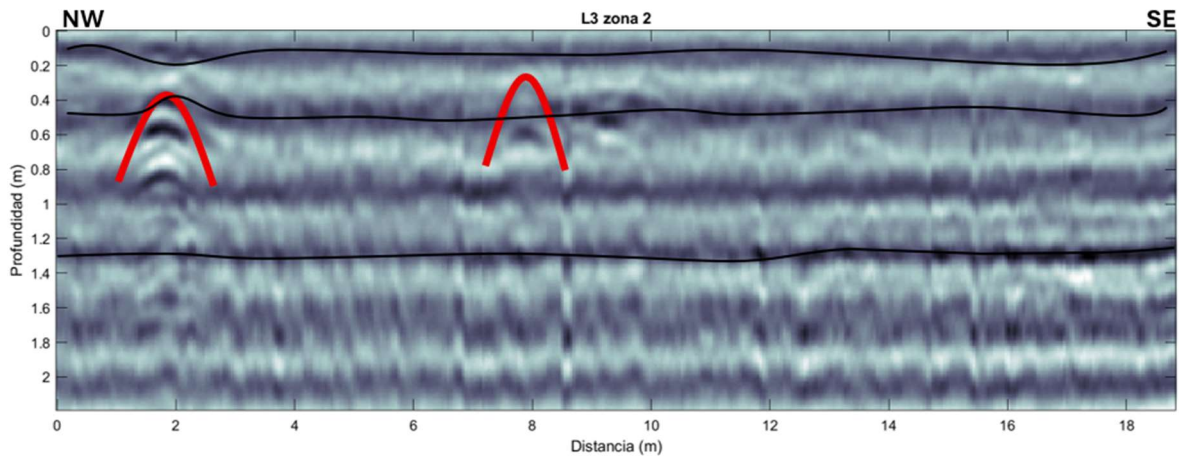


Figura A 18. Línea 3 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

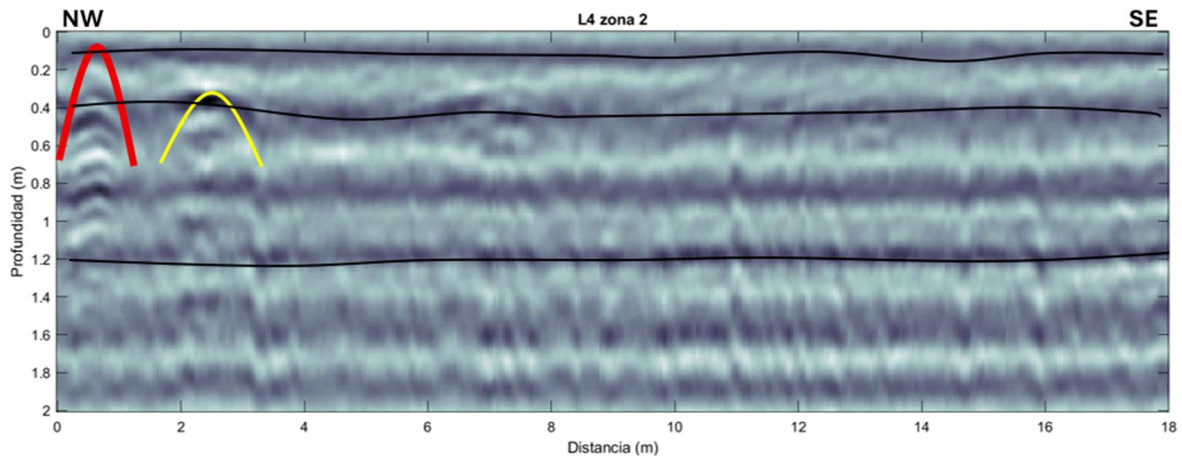


Figura A 19. Línea 4 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

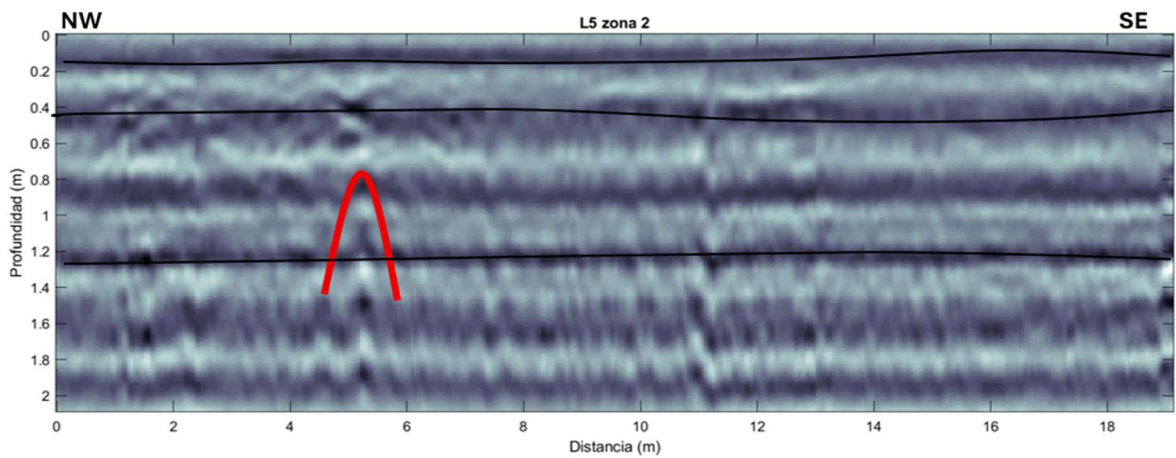


Figura A 20. Línea 5 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

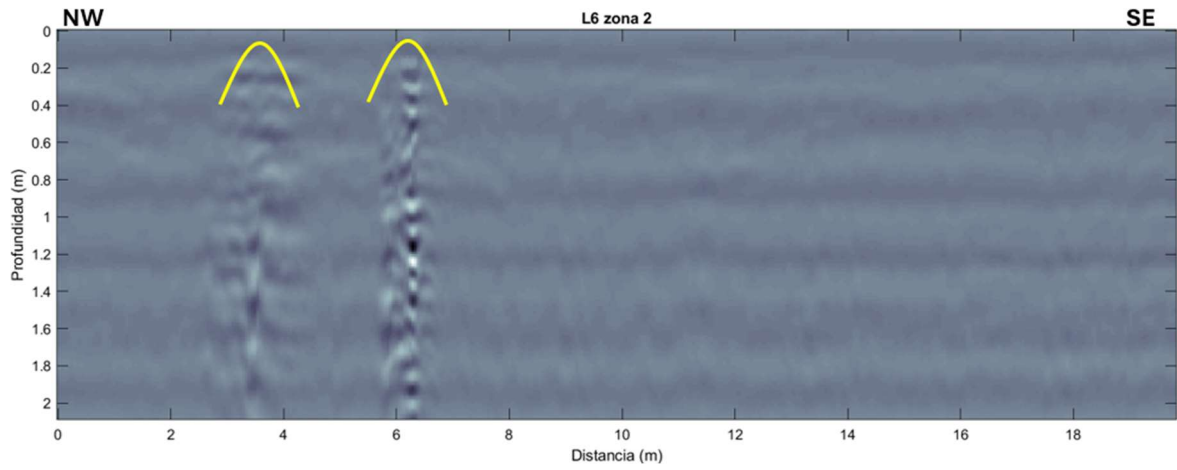


Figura A 21. Línea 6 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

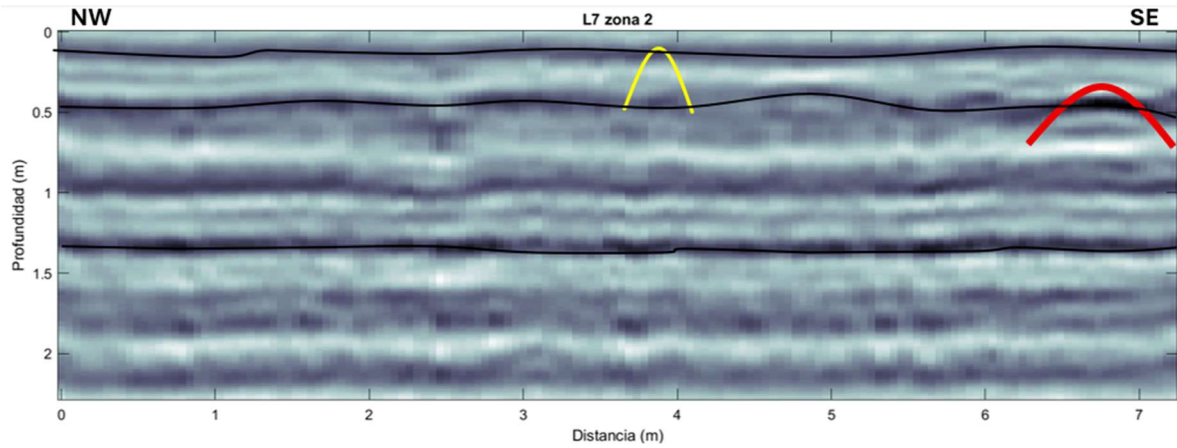


Figura A 22. Línea 7 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

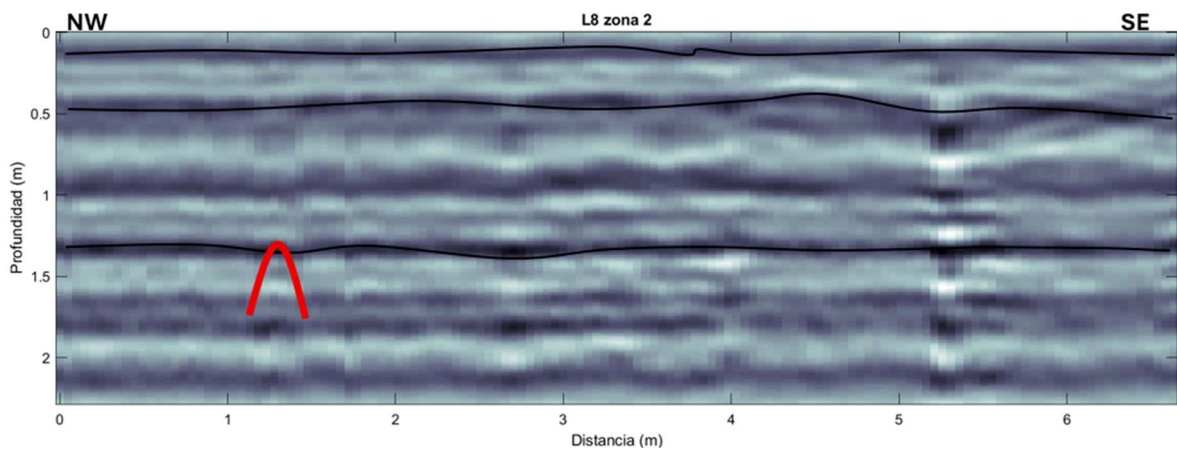


Figura A 23. Línea 8 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

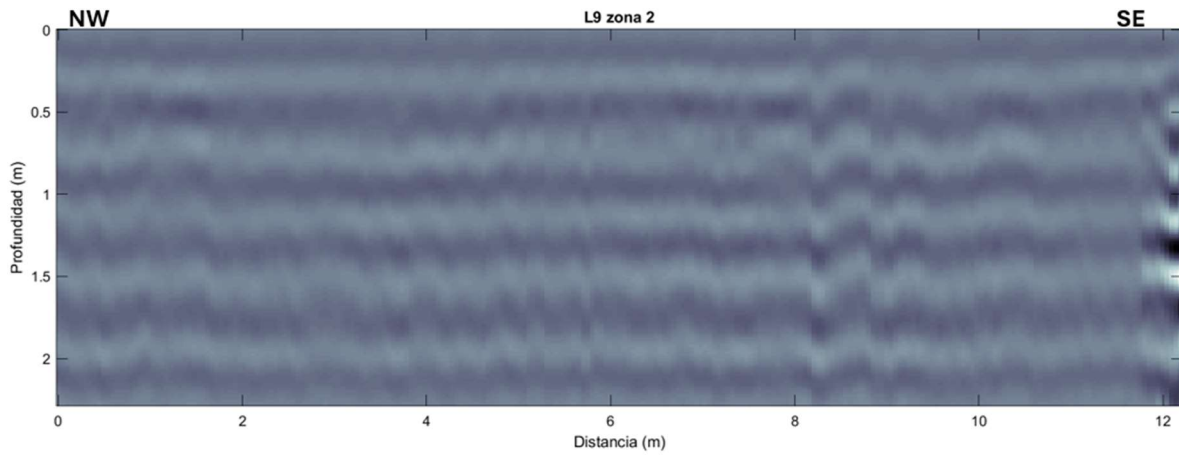


Figura A 24. Línea 9 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

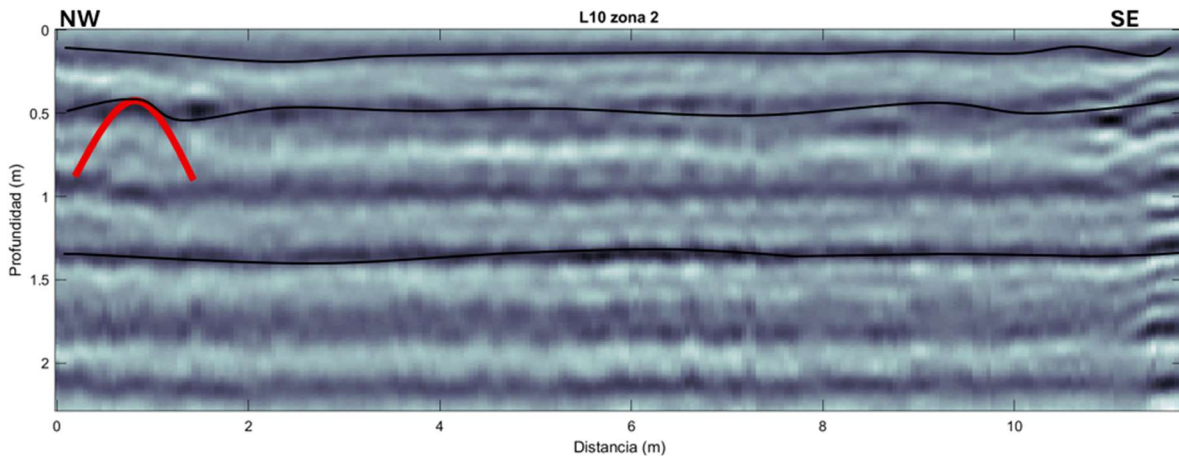


Figura A 25. Línea 10 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

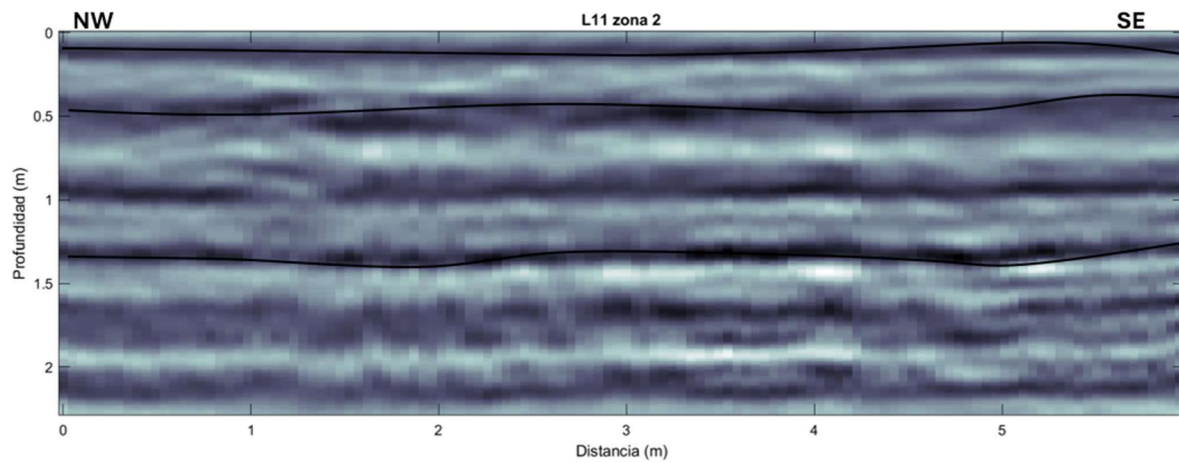


Figura A 26. Línea 11 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

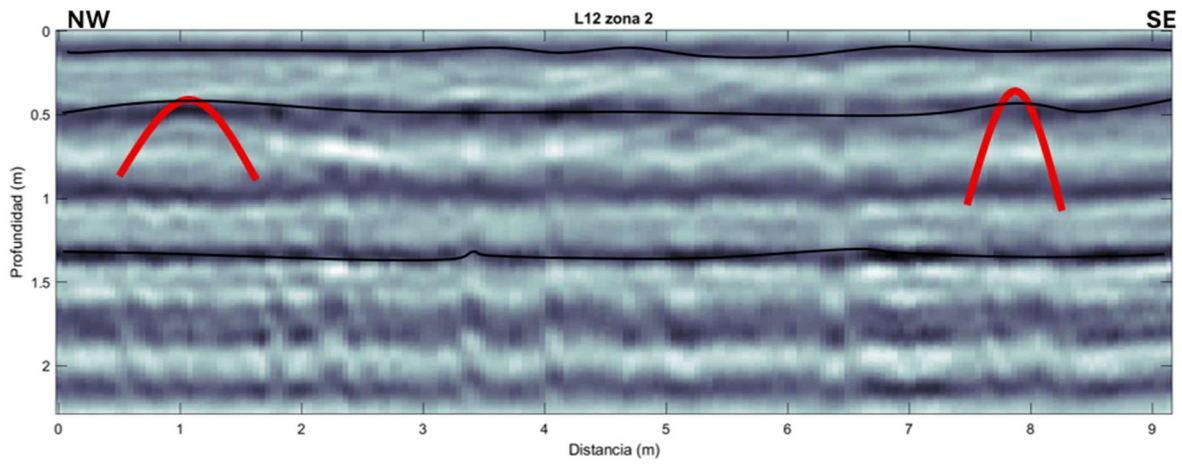


Figura A 27. Línea 12 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

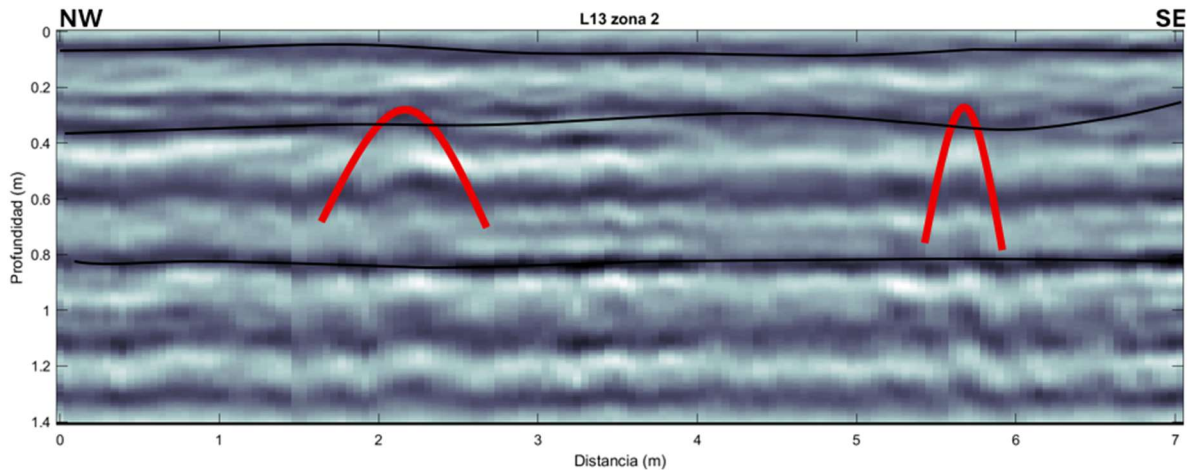


Figura A 28. Línea 13 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

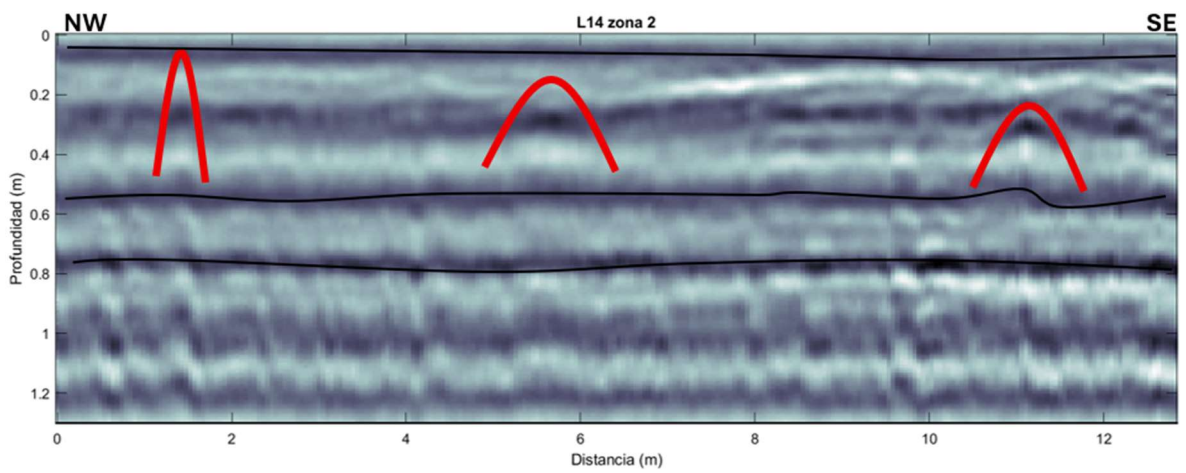


Figura A 29. Línea 14 correspondiente a la zona 2 del método GPR.

9.1.3 Líneas y picado del Tendido de Refracción Sísmica (TRS).

A continuación, se agregan los picados correspondientes a la Línea 1.

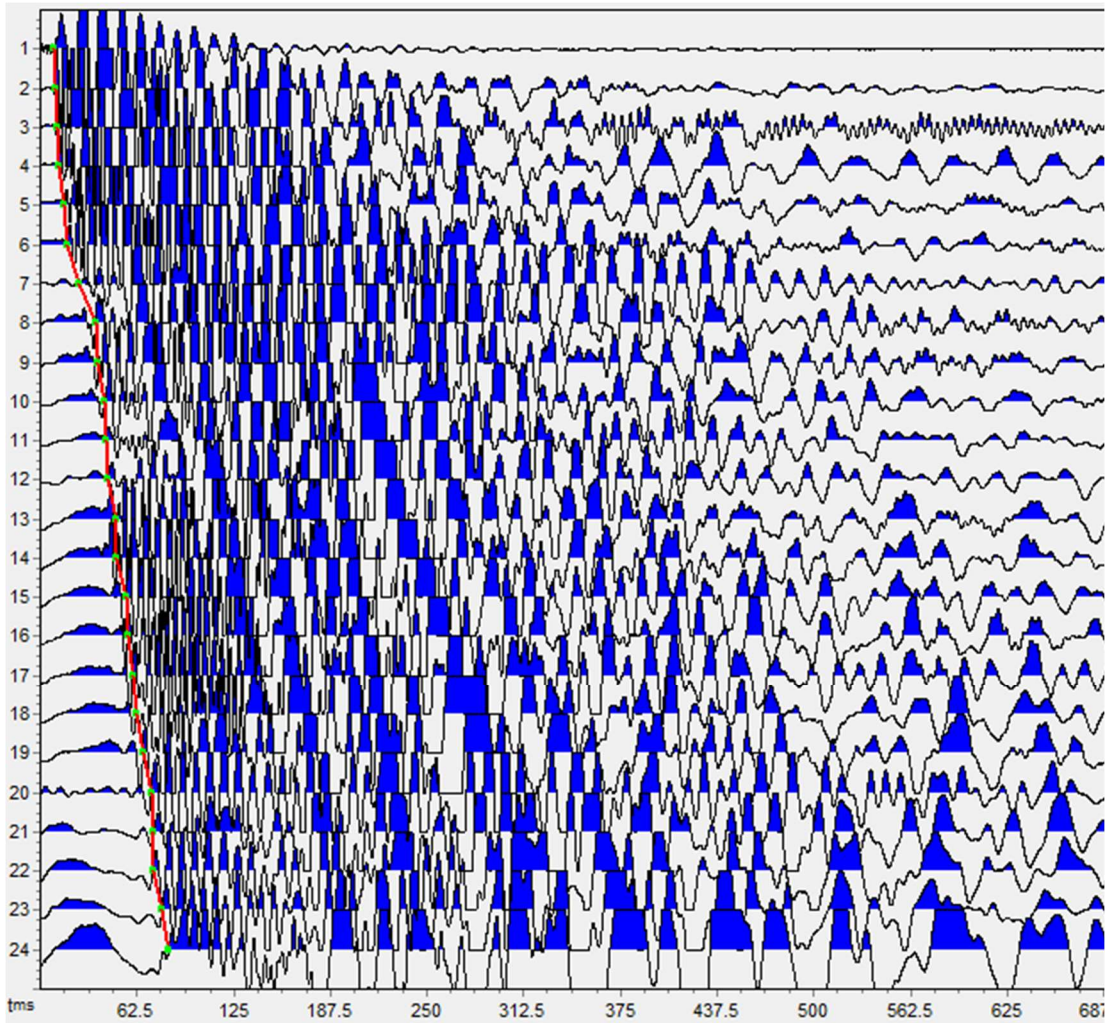


Figura A 30. Picado de la primera fuente correspondiente a la línea 1.

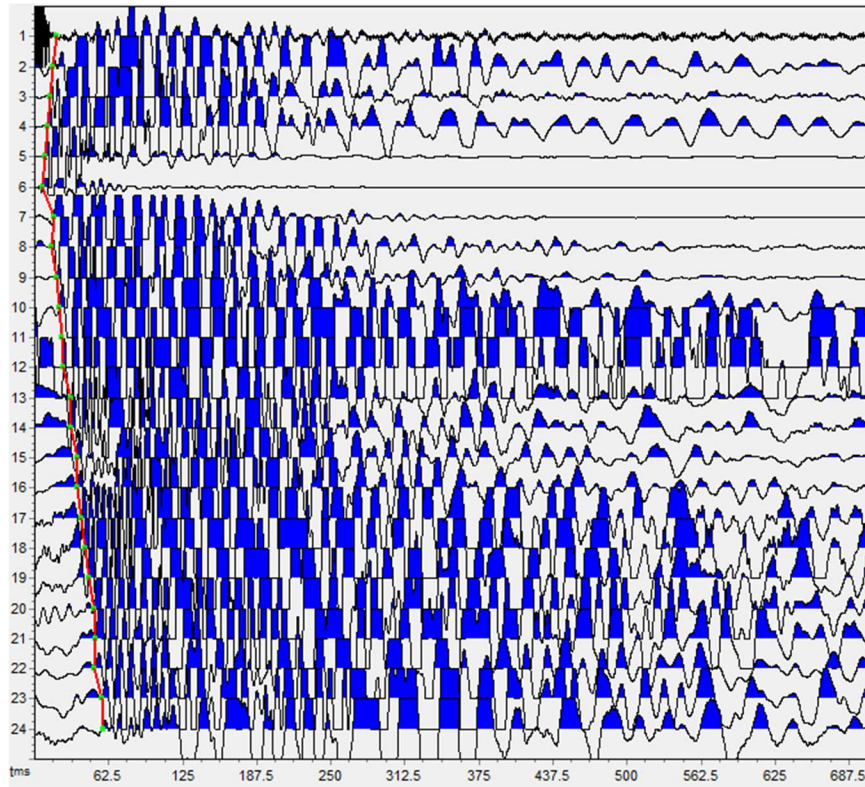


Figura A 31. Picado de la segunda fuente correspondiente a la línea 1.

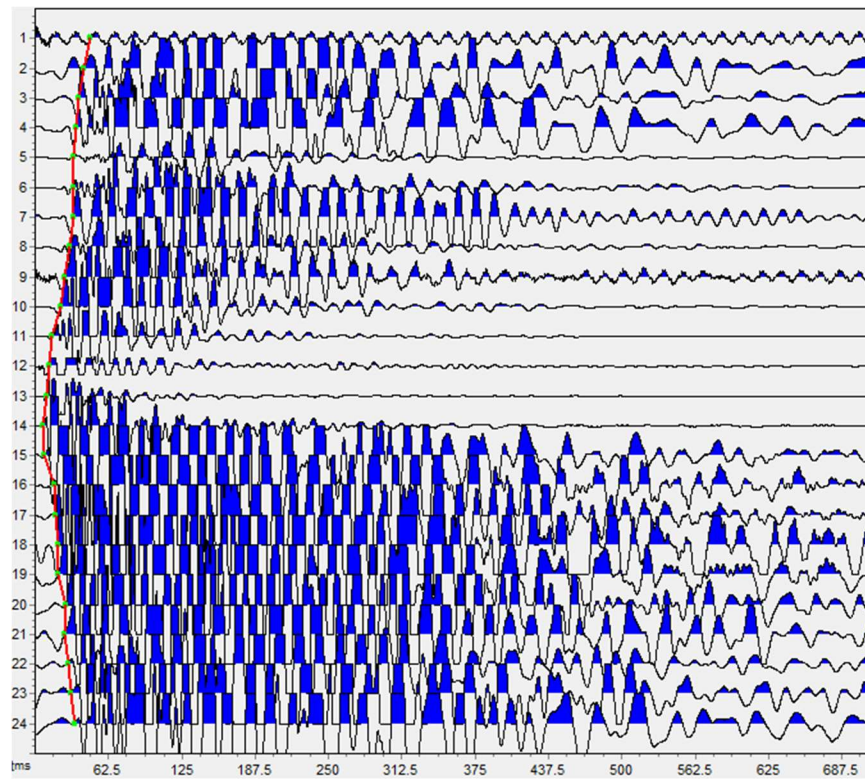


Figura A 32. Picado de la tercera fuente correspondiente a la línea 1.

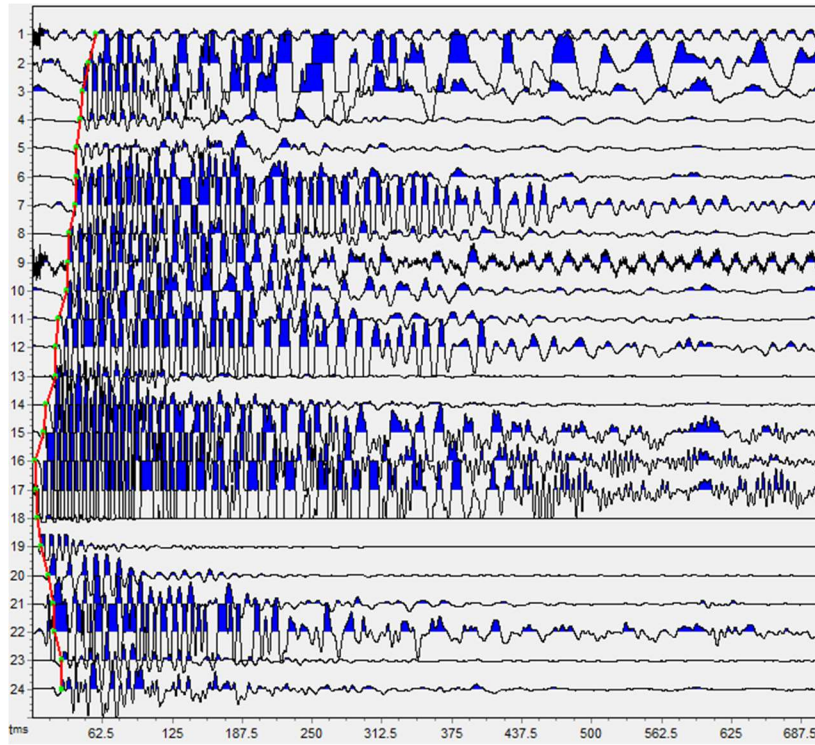


Figura A 33. Picado de la cuarta fuente correspondiente a la línea 1.

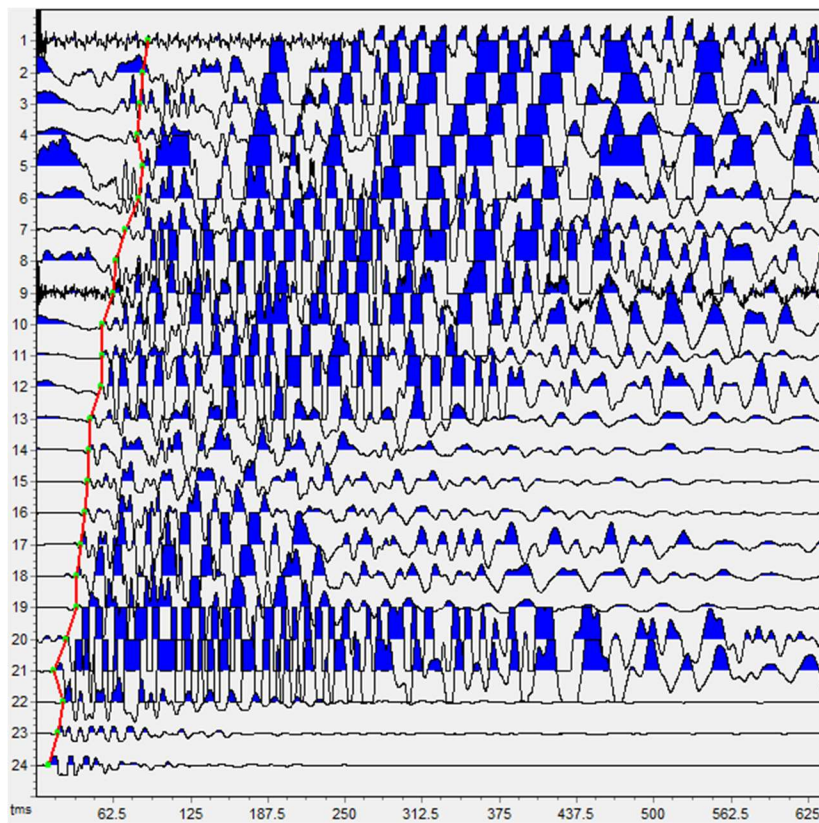


Figura A 34. Picado de la quinta fuente correspondiente a la línea 1.

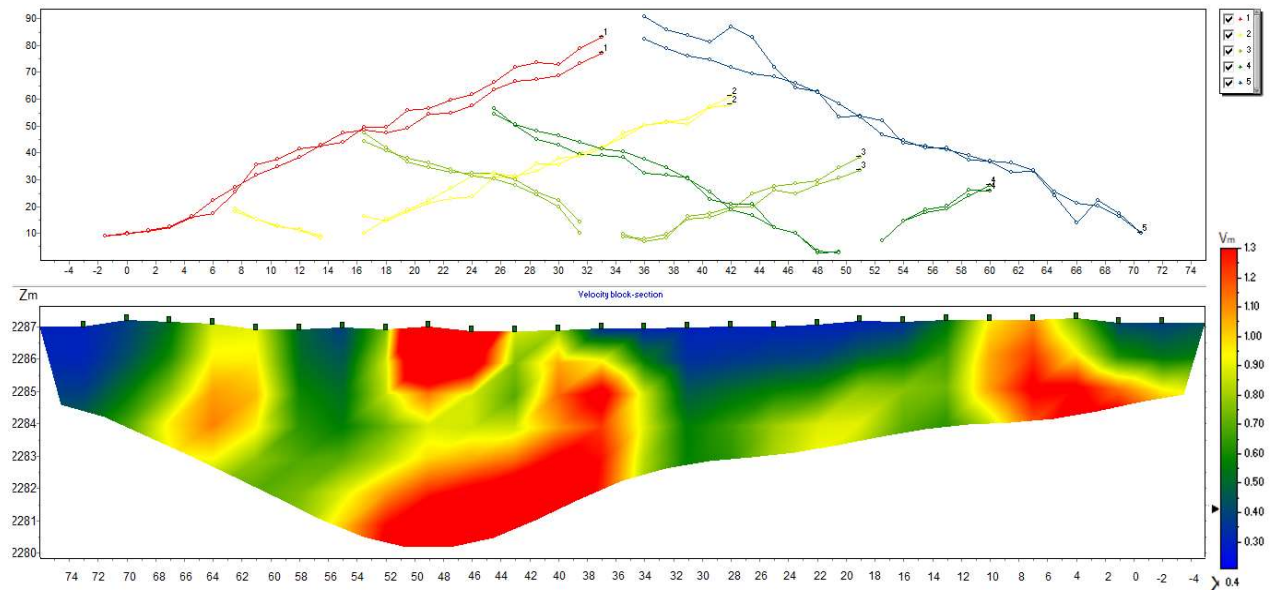


Figura A 35. Línea 1 del Tendido de Refracción Sísmica procesada y con dromocronas.

A continuación, se agregan los picados correspondientes a la Línea 2.

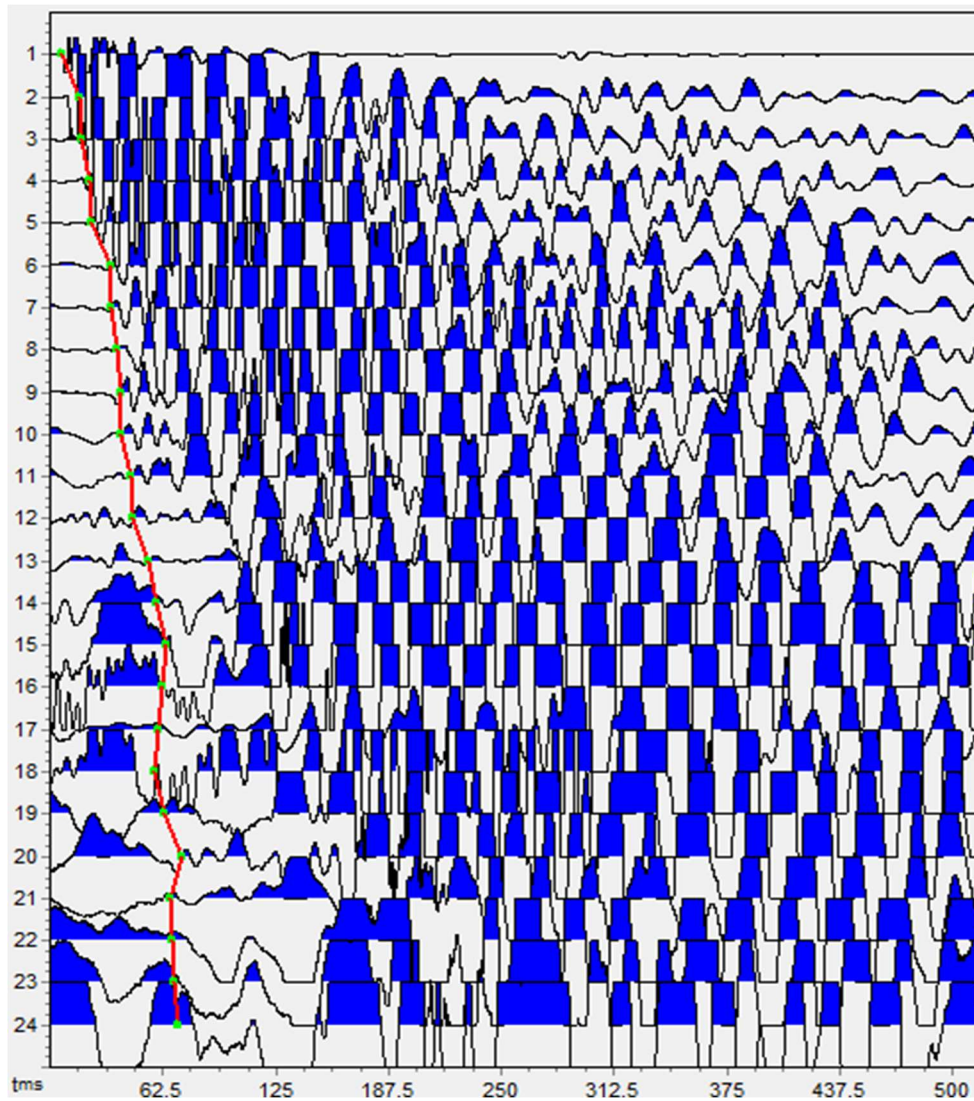


Figura A 36. Picado de la primera fuente correspondiente a la línea 2.

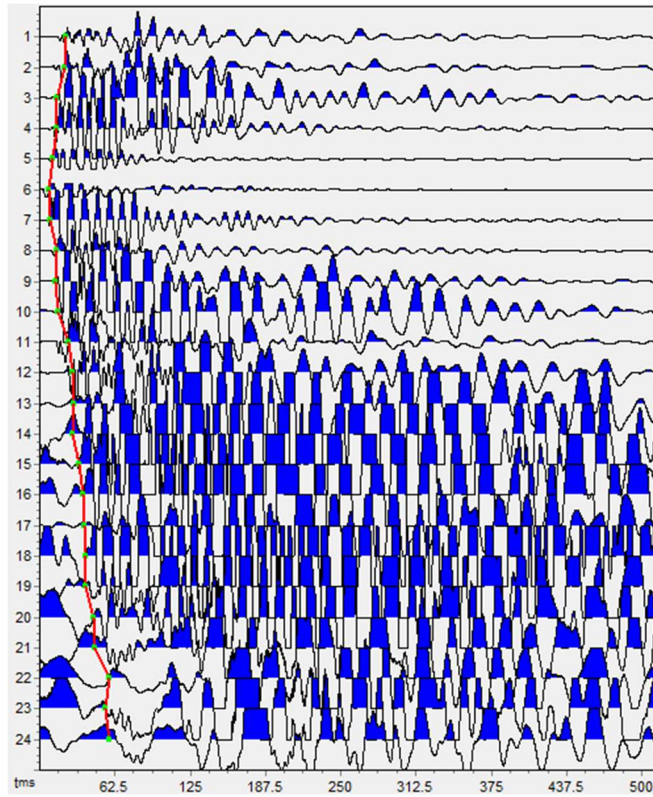


Figura A 37. Picado de la segunda fuente correspondiente a la línea 2.

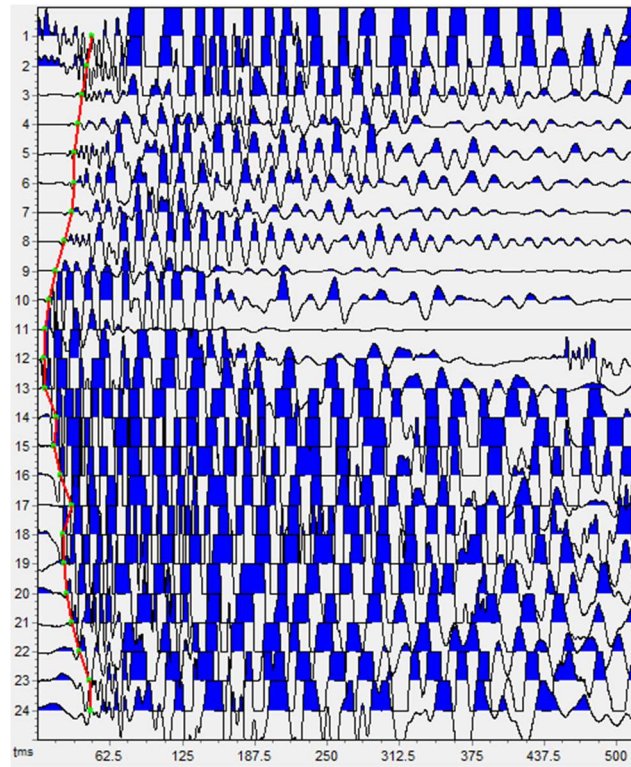


Figura A 38. Picado de la tercera fuente correspondiente a la línea 2.

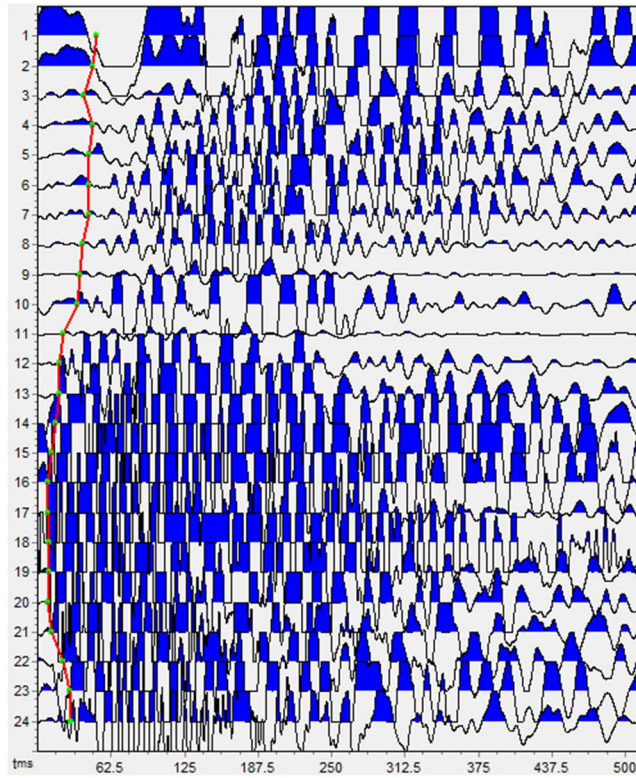


Figura A 39. Picado de la cuarta fuente correspondiente a la línea 2.

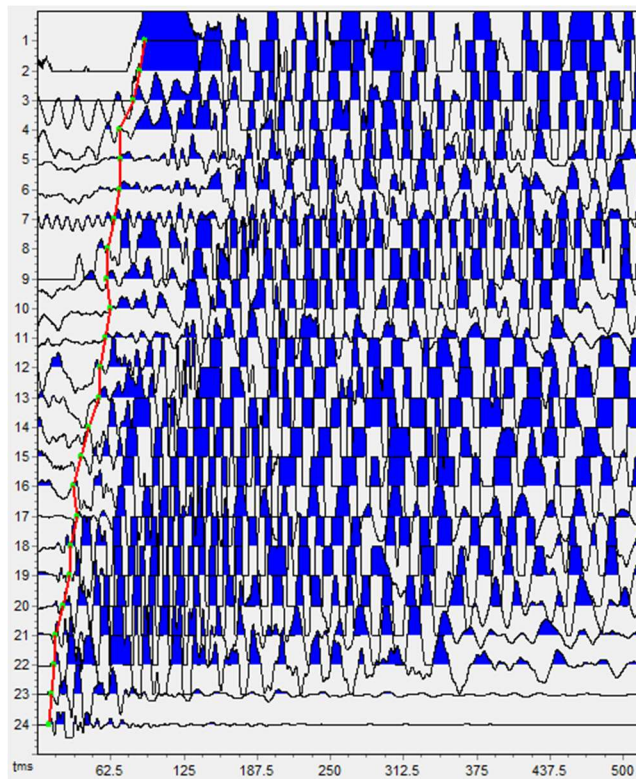


Figura A 40. Picado de la quinta fuente correspondiente a la línea 2.

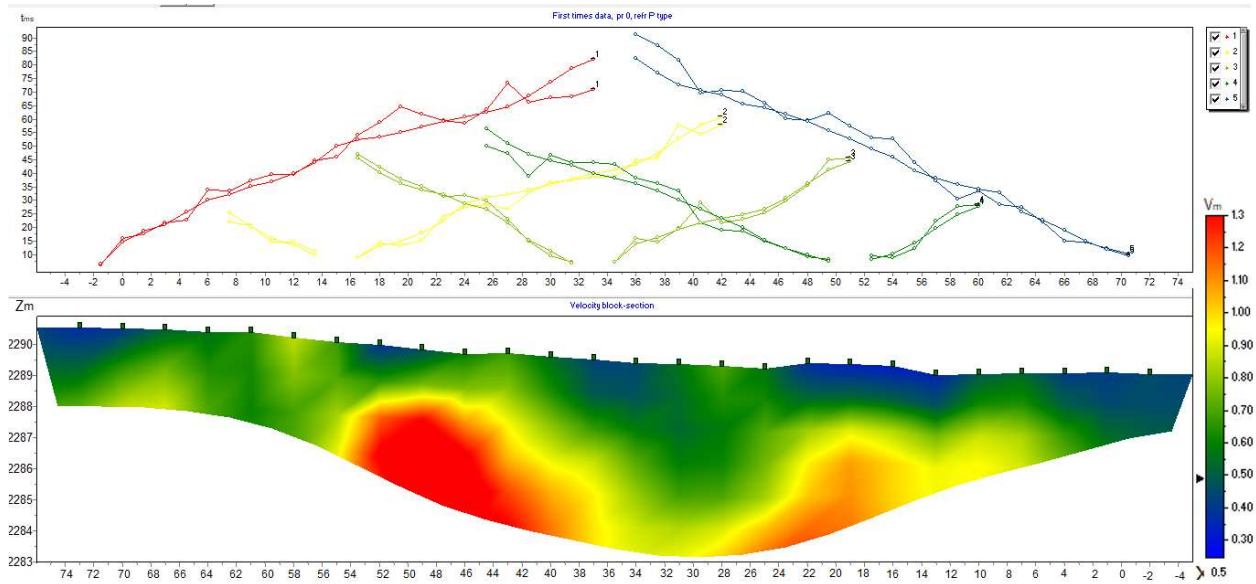


Figura A 41. Línea 2 del Tendido de Refracción Sísmica procesada y con dromocronas.