Contrato de Obra No. 668 de 2022.

“CONTRATAR A PRECIOS UNITARIOS FIJOS SIN FORMULA DE AJUSTE Y A MONTO AGOTABLE LA CONSTRUCCIÓN DE PUENTES PEATONALES EN LA LOCALIDAD DE USME, BOGOTÁ D.C.”

EXPLORACION GEOTECNICA INDIRECTA

ENSAYO REFRACCIÓN SÍSMICA Y MASW

AJUSTES A LOS DISEÑOS DE CIMENTACIÓN

Versión 0

BOGOTÁ, COLOMBIA

JULIO DE 2025

TABLA DE CONTENIDO

Pág

1. LOCALIZACION 6

1.1 Ubicación general 6

1.2 Ubicación específica 6

2. MARCO TEORICO 8

2.1 Línea de refracción sísmica 8

2.2 Prospección Líneas Sísmicas De Refracción 13

3. ENSAYO MASW 16

3.1 Movimiento de la señal sísmica 16

3.2 Ondas de Rayleigh – “R” 16

3.3 Análisis de la señal con técnica MASW 16

3.4 Modelo 16

3.5 Modos de vibración 17

3.6 Profundidad del estudio 17

4. METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN EN CAMPO DE LÍNEAS SÍSMICAS DE REFRACCIÓN 18

4.1 Datos generales del Proyecto 19

4.2 Geología de la Zona de Estudio 20

4.3 Datos de registros LRS 1 – Puente Marichuela 21

4.4 Dromocronas LSR No 1 24

4.5 Datos de registros LRS 2 – Puente Casa Loma 32

4.6 Dromocronas LSR No 2 35

5. CONCLUSIONES EXPLORACIÓN INDIRECTA 44

6. AJUSTES AL DISEÑO DE CIMENTACIÓN **47**

6.1 Capacidad portante 49

6.2 Asentamientos 56

6.3 Consideraciones generales para los diseños geotécnicos 59

6.4 Cimentación profunda 60

7. BIBLIOGRAFÍA **64**

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1 Ubicación del alcance del proyecto..... 6

Figura 2 Localización línea de refracción Puente Marichuela 7

Figura 3 Localización línea de refracción Puente Casa Loma 7

Figura 4 Diagrama tiempos-distancias..... 9

Figura 5 Tiempo de retraso en diagrama tiempos-distancias 10

Figura 6 Esquema de adquisición de datos con geófonos..... 11

Figura 7 Construcción de las dromocronas a partir de la función velocidad 11

Figura 8 Construcción de las dromocronas a partir de la función tiempo-profundidad 12

Figura 9 Esquema de adquisición de líneas sísmicas 18

Figura 10 Localización LRS 19

Figura 11 Registro fotográfico Localización de LSR 1 y LRS 2 20

Figura 12 Geología de la Zona de Estudio 21

Figura 13 Dromocronas LSR No 1 24

Figura 14 Dromocronas elaboradas LSR No 1 25

Figura 15 Modelo Geológico - Refractores LRS No 1 26

Figura 16 Mapa de Velocidades LRS No 1 26

Figura 17 Trazas seleccionadas para análisis MASW L1 27

Figura 18 Espectro de Velocidad de Fase Vs Frecuencia – MASW No 1 28

Figura 19 Diagrama espectro de Velocidades de fase Frecuencia MASW No 1 ... 29

Figura 20 Diagrama de Inversión Calculado MASW No 1 30

Figura 21 Perfiles de velocidades en función de la profundidad - MASW No 1 30

Figura 22 Perfil estratigráfico MASW No 1 31

Figura 23 Dromocronas LSR No 2 35

Figura 24 Dromocronas elaboradas LSR No 2 36

Figura 25 Modelo Geológico - Refractores LRS No 2 37

Figura 26 Mapa de Velocidades LRS No 2 37

Figura 27 Trazas seleccionadas para análisis MASW L2 38

Figura 28 Espectro de Velocidad de Fase Vs Frecuencia – MASW No 2 39

Figura 29 Diagrama espectro de Velocidades de fase Frecuencia MASW No 2 ... 40

Figura 30 Diagrama de Inversión Calculado MASW No 2 41

Figura 31 Perfiles de velocidades en función de la profundidad - MASW No 2 41

Figura 32 Perfil estratigráfico MASW No 2 42

Figura 33 Parámetros geotécnicos de la roca en el sector Marichuela 48

Figura 34 Parámetros geotécnicos de la roca en el sector Casa Loma 49

Figura 35 Capacidad de carga axial de cimientos profundos en condición de estado límite de resistencia - Marichuela 60

Figura 36 Capacidad de carga axial de cimientos profundos en condición de estado límite de resistencia – Casa Loma 61

Figura 37 Capacidad de carga por tracción de cimientos profundos en condición de estado límite de resistencia – Marichuela 62

Figura 38 Capacidad de carga por tracción de cimientos profundos en condición de estado límite de resistencia – Casa Loma 62

Figura 39 Asentamientos elásticos de cimientos profundos – Marichuela y Casa Loma 63

1. LOCALIZACION

1.1 Ubicación general

El área de estudio se encuentra al sur de Bogotá en la Localidad de Usme en el área de influencia de la Quebrada Yomasa:



Figura 1 Ubicación del alcance del proyecto
(fuente: Google Earth extraído el 01 de julio de 2025)

1.2 Ubicación específica

A continuación, se presenta la ubicación del área de estudio en el puente Marichuela:



Figura 2 Localización línea de refracción Puente Marichuela
(fuente: Google Earth extraído el 01 de julio de 2025)

Seguidamente se presenta la ubicación de la investigación indirecta realizada para el puente del sector Casa Loma:



Figura 3 Localización línea de refracción Puente Casa Loma
(fuente: Google Earth extraído el 01 de julio de 2025)

2. MARCO TEORICO

A continuación, se relacionan los aspectos relevantes de la teoría que permite identificar diferentes estratos de materiales térreos a partir de la medición de velocidades de ondas S y P en el subsuelo.

2.1 Línea de refracción sísmica

La prospección por refracción sísmica permite interpretar la estratigrafía del subsuelo gracias al uso del principio físico del fenómeno de la refracción total de una onda sísmica que incide sobre una interfase localizada entre dos cuerpos con diferentes propiedades mecánicas, (horizonte de refracción). La condición fundamental para llevar a cabo estudios de sísmica por refracción es que la sucesión de los estratos a investigar se caracterice por velocidades sísmicas crecientes al aumentar la profundidad. De este modo se pueden evaluar hasta 4 o 5 horizontes de refracción diferentes.

Los ensayos se basan en la medición de los tiempos de recorrido de las ondas elásticas para las cuales -suponiendo amplias superficies de separación con respecto a la longitud de onda o en todo caso con una débil curvatura- los frentes de onda se representan por medio de los relativos rayos sísmicos. El análisis se basa en el principio de Fermat y en la ley de Snell.

El principio de Fermat establece que el rayo sísmico recorre la distancia entre la fuente y el receptor siguiendo el trayecto para el cual el tiempo empleado de recorrido es mínimo. En este principio, dado un plano que separa dos medios con diferentes características mecánicas, el rayo sísmico es el que se extiende a lo largo de un plano perpendicular a la interfase que contiene tanto la fuente como el recibidor.

La ley de Snell es una fórmula que describe los tipos de refracción de un rayo sísmico en la transición entre dos medios caracterizados por diferentes velocidades de propagación de las ondas o, equivalentemente, por diferentes índices de refracción. El ángulo formado entre la interfase y el rayo se denomina ángulo de incidencia θi, mientras que el formado entre el rayo refractado y la superficie normal se denomina ángulo de refracción θr. La fórmula matemática es:

$$v_2 \sin \theta_i = v_1 \sin \theta_r$$

Donde v_1 y v_2 son las velocidades de los dos medios separados por la interfase.

Cuando $v_1 > v_2$ se tiene que $\theta_i > \theta_r$ y por lo tanto la sísmica por refracción nos es factible ya que el rayo refractado se inclinaría hacia abajo. Cuando $v_1 < v_2$ se tiene que $\theta_i < \theta_r$ y existe un ángulo crítico de incidencia por lo que $\theta_r = 90°$ y el rayo refractado viaja paralelamente a la interfase. La expresión que define el ángulo crítico es:

$$\theta_i = \arcsin(v_1 / v_2)$$

La forma más sencilla de analizar los datos de refracción es construyendo un gráfico tiempo-distancia cuyo origen corresponda a la fuente de generación de las ondas elásticas. En el

eje de las abscisas se representan las posiciones de los geófonos y en las ordenadas los tiempos de primera llegada. A los geófonos más cercanos a la fuente llegan primero los impulsos que han seguido el recorrido directo en un tiempo T dado por la relación

$$T = x_i / V_1$$

Donde x_i es la distancia entre el punto de disparo y el punto de detección.

La ecuación anterior representa una recta que pasa por el origen de los ejes tiempos-distancias y su coeficiente angular permite calcular la velocidad V1 del primer medio como

$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

Los tiempos de llegada de los rayos refractados en el diagrama tiempos-distancias se disponen según una recta que tendrá una inclinación menor a la de las ondas directas.

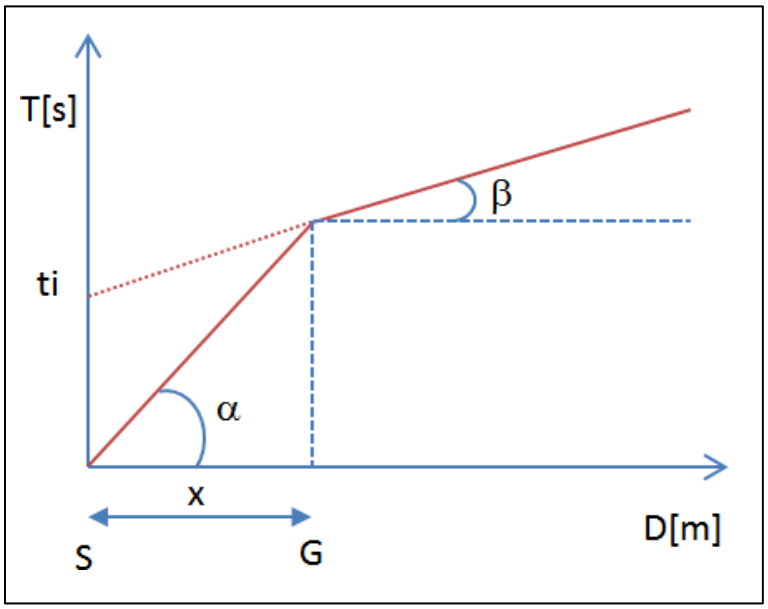


Figura 4 Diagrama tiempos-distancias

La curva tiempos-distancias tiende a un comportamiento regular según una polilínea cuyos vértices se denominan codos, los cuales representan, físicamente, la condición donde se da la llegada contemporánea de las ondas directas y la refractadas. Por lo tanto, para cada uno de los segmentos se determina el tiempo de retraso ti que representa la diferencia entre el tiempo que el rayo sísmico emplea en recorrer un tramo a la velocidad propia del estrato en el cual se transmite y el tiempo que emplearía para viajar a lo largo del componente horizontal de ese tramo a la máxima velocidad alcanzada en toda la trayectoria de refracción.

Gráficamente el tiempo de retraso está dado por la intersección de la recta que comprende un segmento de la curva tiempo-distancia con el eje de los tiempos.

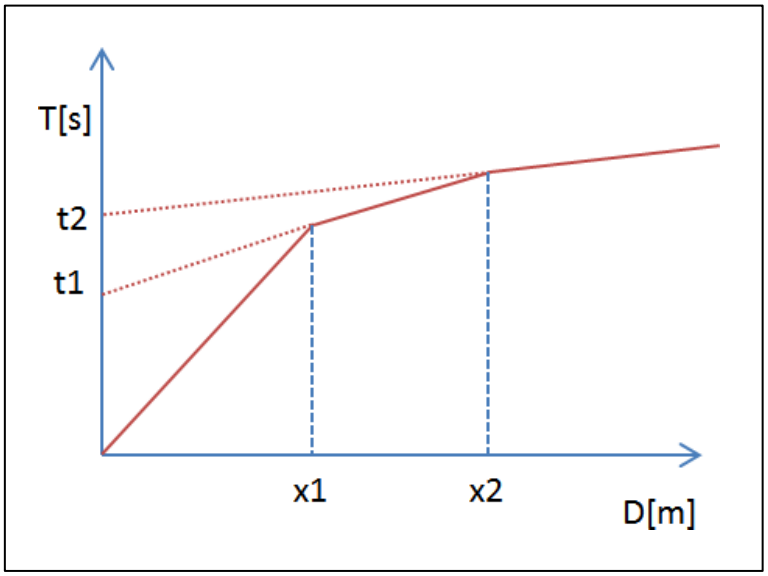


Figura 5 Tiempo de retraso en diagrama tiempos-distancias

Entonces, conociendo los tiempos t_i es posible obtener los espesores de los refractores mediante la relación:

$$h_{(i-1)} = \frac{V_{(i-1)}V_i}{2\sqrt{V_i^2 - V_{(i-1)}^2}}\left(t_i - \frac{2h_1\sqrt{V_i^2 - V_1^2}}{V_1V_i} - \ldots - \frac{2h_{(i-2)}\sqrt{V_i^2 - V_{(i-2)}^2}}{V_1V_{(i-2)}}\right)$$

En situaciones morfológicamente complejas, como método de elaboración se puede utilizar el Método de reciprocidad generalizada (Generalized Reciprocal Method) examinado por Palmer en 1980.

Este método se basa en la búsqueda de una distancia virtual XY entre geófonos tal que los rayos sísmicos que parten de puntos de disparo simétricos respecto al tendido, lleguen al geófono colocado en la posición X y al colocado en la posición Y, proviniendo desde un mismo punto del refractor

El primer paso operativo es construir un diagrama tiempos-distancias identificando en los sismogramas obtenidos con los datos de campo, las primeras llegadas de las ondas sísmicas. Para determinar la distancia óptima XY es necesario considerar varios puntos de disparo, tanto de los extremos como del interior del tendido. Esto hace posible identificar con más precisión los tiempos relativos de un mismo refractor que sirven para caracterizar las dromocronas, las cuales son fundamentales para la interpretación.

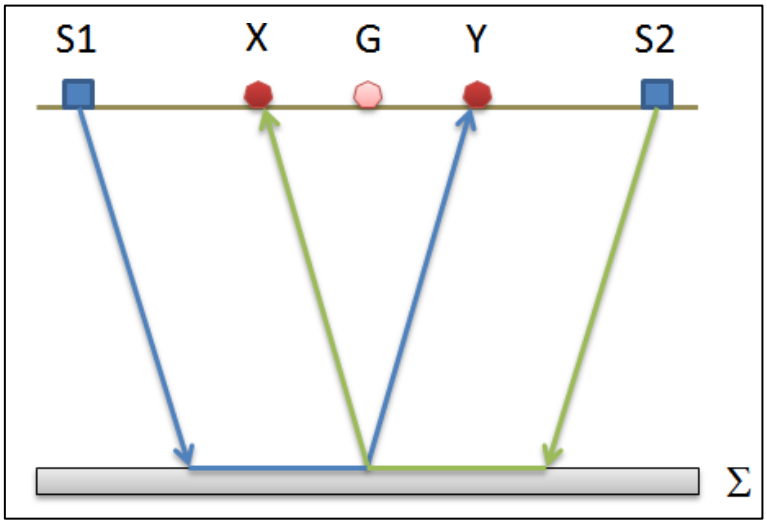


Figura 6 Esquema de adquisición de datos con geófonos

En las interpretaciones multi estratos, para generar las dromocronas se puede aprovechar las técnicas de phantoming y así superar la falta de datos de algunos refractores.

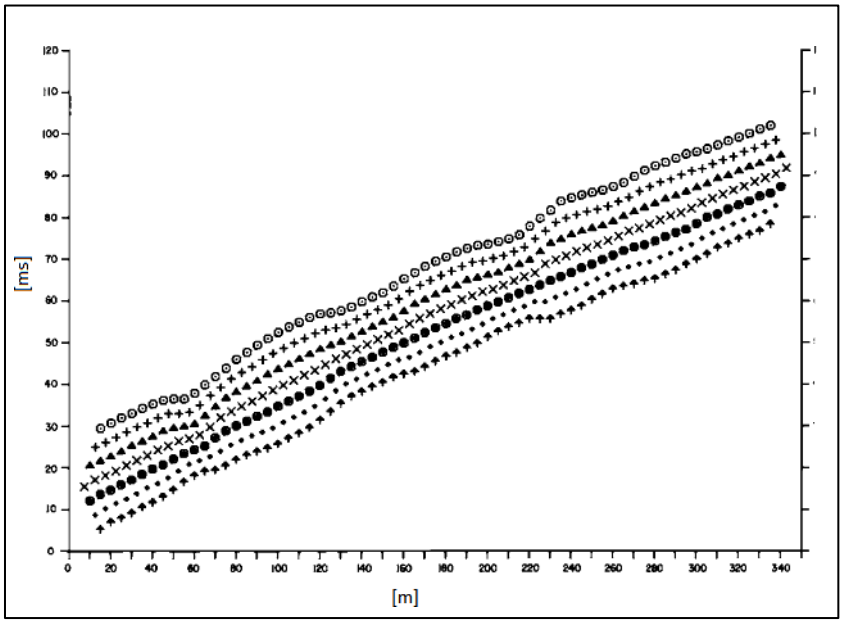


Figura 7 Construcción de las dromocronas a partir de la función velocidad

Partiendo de la construcción de las dromocronas es posible determinar ***la función velocidad*** según la ecuación

$$T_v = \frac{T_{S_1Y} - T_{S_2X} + T_{S_1S_s}}{2}$$

Donde T_{S1Y} y T_{S2X} son los tiempos de recorrido de los rayos sísmicos para llegar, respectivamente, de la fuente S1 a X y de la fuente S2 a Y, mientras que T_{S1S2} es el tiempo de recorrido entre dos puntos de disparo S1 y S2, externamente simétricos con respecto al tendido. T_V es el tiempo calculado en un geófono G puesto entre X y, no necesariamente coincidente con la posición de un geófono del tendido.

El cálculo de la función T_V se lleva a cabo para cada valor de XY comprendido entre cero y la mitad del tendido con variación igual a la distancia real entre los geófonos del tendido. La mejor recta de regresión de las funciones de velocidad obtenidas, permite determinar el XY óptimo y la velocidad del refractor que se obtiene del coeficiente angular.

Mediante la función tiempo-profundidad es posible encontrar la profundidad del refractor expresada en unidad de tiempo. Dicha función se expresa con:

$$T_G = \frac{T_{S_1Y} + T_{S_2X} - \left(T_{S_1S_2} + \frac{XY}{V_n} \right)}{2}$$

Donde V_n es la velocidad del refractor.

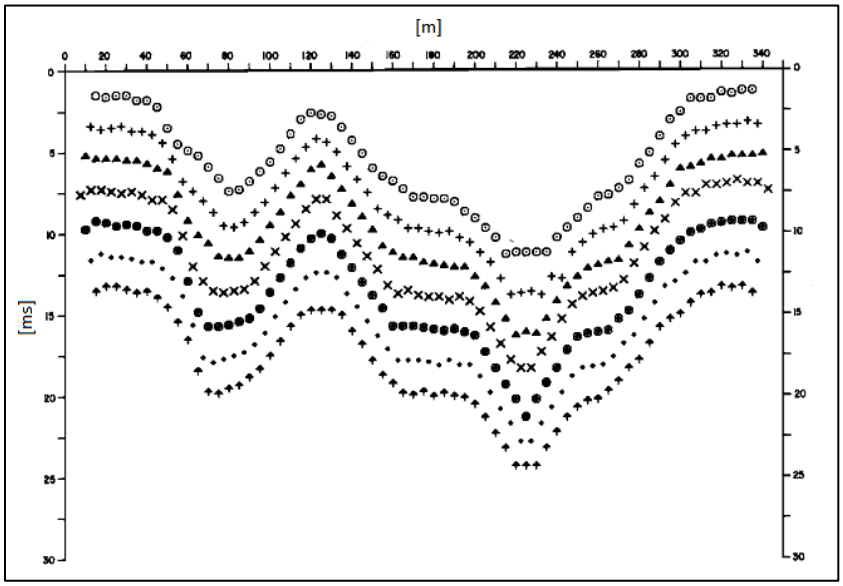


Figura 8 Construcción de las dromocronas a partir de la función tiempo-profundidad

De la misma manera que con la función velocidad, se determinan varias funciones tiempo-profundidad para el conjunto de los valores XY en estudio. Entre las funciones encontradas, la que presente la mayor articulación compete al valor óptimo de XY.

Finalmente, es posible determinar el espesor del refractor en las correspondientes posiciones de los geófonos G mediante la relación:

$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

h representa la profundidad mínima desde el geófono G por lo tanto la morfología del refractor se define con la envolvente de las semicircunferencias de rayo h.

Una de las principales ventajas del G.R.M. es que el factor de conversión de la profundidad es relativamente insensible a las pendientes hasta aproximadamente 20°

2.2 Prospección Líneas Sísmicas De Refracción

La refracción sísmica es particularmente empleada para el reconocimiento de áreas donde no existe información geológica de la superficie, particularmente en estudios de ingeniería y geotecnia para determinar la velocidad de compresión (Vp), profundidad, y espesores de las diferentes capas que componen el subsuelo.

El método se basa en la medición del tiempo de viaje de las ondas refractadas críticamente en las interfaces de las capas con diferentes propiedades físicas; fundamentalmente por contraste entre impedancias acústicas (i =ρ.v.; en donde ρ es la densidad y v la velocidad de la capa). La energía sísmica se genera mediante un impacto controlado en superficie (o a una determinada profundidad), que va propagándose en forma de onda elástica a través del subsuelo interaccionando con las distintas capas.

Perturbaciones generadas al suelo originan los diferentes tipos de ondas mecánicas entre estas las ondas “P” (longitudinales) y ondas “S” (transversales), de manera que una parte de la energía se refleja y permanece en el mismo medio que la energía incidente, y el resto se transmite al otro medio con un fuerte cambio de la dirección de propagación debido al efecto de la interface (refracción). De esta interacción, la sísmica de refracción solo considera las refracciones con ángulo crítico ya que son las únicas ondas refractadas que llegan a la superficie y pueden ser captadas por los geófonos.

Cada capa se distingue por su impedancia acústica y se le llama refractor. El resultado de este método es una imagen sísmica del terreno en forma de campo de velocidades posteriormente es interpretado geológicamente.

La refracción sísmica se presenta, para cada línea, en dos perfiles llamados modelo simplificado y tomografía, los cuales corresponden a los métodos de interpretación conocidos como “Tiempos Interceptados” y “Tomografías Sísmica” respectivamente. Ambos perfiles representan velocidades compresionales (Vp).

El modelo simplificado es un modelo sencillo, general, de dos a cuatro capas que muestra los conjuntos principales de capas del subsuelo, caracterizados por su velocidad compresional (Vp) y sus espesores, producto de interpretar con el método de tiempos interceptados.

La tomografía sísmica es un método de cálculo que permite modelar el subsuelo con elementos finitos reproduciendo las trayectorias de los frentes de onda desde y hacia cada

punto de disparo y desde y hacia cada uno de los geófonos. El resultado es un modelo detallado del subsuelo en 10 o más capas que muestran la variación de la velocidad compresional con la profundidad, muy útil para definir el contacto con roca con base en el aumento de la velocidad.

La ripabilidad o excavabilidad de un suelo representa una medida del grado de dificultad que se presenta al excavar el terreno mediante la rotura con un tractor o bulldozer que permite su excavación o carga directa.

Un material puede ser clasificado como ripable, ripable marginalmente o no ripable, dependiendo de la capacidad de los equipos convencionales para excavarle. Son varios los criterios que se han venido utilizando para juzgar a priori la ripabilidad de un terreno, el más utilizado consiste en determinar la velocidad sísmica de propagación de las ondas de compresión Vp a través del suelo mediante la sísmica de refracción.

Las posibilidades de ripado se definen, para diversos tipos de suelos densos, por medio de su velocidad sísmica Vp. Para cada material se definen los márgenes de velocidad sísmica para los cuales es ripable o no ripable.

En este caso la ripabilidad se determina de acuerdo al criterio presentado por Caterpillar para un tractor D-9 con ripper usando como referencia la Tabla 1:

Tabla 1 Clasificación Ripabilidad del suelo en función de la velocidad de las ondas de compresión.

Velocidad de las ondas de compresión	**Categoría**
Vp<600 m/s	Materiales sueltos
Vp=600 - 1300 m/s	Ripado fácil
Vp=1300 - 1700 m/s	Ripado normal
Vp=1700 - 1850 m/s	Ripado duro
Vp> 1850 m/s	No son ripables

Fuente: (Hunt, Roy , 1986)

Cálculo de velocidad de onda Vp, Vs y relación Poisson (u)

Es importante aclara que el equipo empleado para en ensayos de refracción símica registra ondas P, es así como la tomografía de su interpretación se fundamenta en velocidades de ondas de corte (Vp), y a partir del coeficiente de Poisson se puede determinar la velocidad de onda de corte (Vs) como se establece en la siguiente ecuación:

$$\frac{Vp}{Vs} = \sqrt{\frac{1 - v}{0{,}5 - v}}$$

donde la velocidad de la onda p (Vp) y la Velocidad de la onda s (Vs) están dados en metros sobre segundo (m/s) y el módulo de Poisson (u) no tiene unidades.

Por otra parte, considerando lo anterior del análisis o interpretación de la refracción sísmica se obtiene las velocidades de onda de compresión Vp, mientras que del análisis o interpretación MASW se obtienen las velocidades de onda de corte Vs, con estos dos valores podemos despejar de la Ecuación anterior, la Relación de Poisson (u) obteniendo la siguiente Ecuación:

$$\nu = \{(Vp/Vs)^2 - 2\}/2\{(Vp/Vs)^2 - 1\}$$

Estableciendo el valor de la Relación de Poisson (u), para cada estrado de suelo, indirectamente se calculan las velocidades de onda de corte Vs.

3. ENSAYO MASW

La geofísica analiza el comportamiento de las ondas que se propagan al interno de un material. De hecho, las señales sísmicas se modifican en función de las características del medio que atraviesan. Dichas ondas se pueden generar artificialmente usando martillo, explosivo, etc.

3.1 Movimiento de la señal sísmica

La señal sísmica se puede descomponer en varias fases, cada una de las cuales identifica el movimiento de las partículas embestidas por las ondas sísmicas. Las fases pueden ser:

- **P** - Longitudinal: onda profunda de compresión;
- **S** - Transversal: onda profunda de corte o de cizalla;
- **L** - Love: onda de superficie, compuesta por ondas P y S;
- **R** - Rayleigh: onda de superficie con movimiento en forma de elipse retrógrada.

3.2 Ondas de Rayleigh – “R”

En el pasado, los estudios sobre la difusión de las ondas sísmicas se han centrado en la propagación de las ondas profundas (P,S), considerando las ondas superficiales como un disturbo de la señal acústica a analizar. Recientes estudios han permitido crear modelos matemáticos avanzados para el análisis de las ondas de superficie en medios con distinta rigidez.

3.3 Análisis de la señal con técnica MASW

Según la hipótesis fundamental de la física lineal (Teorema de Fourier), las señales se pueden representar como la suma de señales independientes, llamadas armónicos de la señal. Dichos armónicos, por análisis monodimensional, son funciones trigonométricas seno y coseno y se comportan en modo independiente, sin interactuar entre sí. Concentrando la atención en cada componente armónico, el resultado final del análisis lineal será equivalente a la suma de los comportamientos parciales de cada armónico. El análisis de Fourier (Análisis espectral FFT) es el instrumento fundamental para la descomposición espectral de la señal.

El análisis de las ondas Rayleigh con la técnica MASW se lleva a cabo mediante un tratamiento espectral de la señal que hace posible identificar con bastante facilidad la señal de las ondas Rayleigh con respecto a otros tipos de señales, teniendo en cuenta que las ondas Rayleigh se propagan a una velocidad que está en función de la frecuencia. Esta relación velocidad-frecuencia, que se conoce como espectro de dispersión, queda caracterizada en la llamada curva de dispersión, la cual se extrae mediante la transformada f-k y se conoce como curva de dispersión experimental y representa las amplitudes máximas del espectro en ese dominio.

3.4 Modelo

A partir de un modelo geotécnico sintético caracterizado por espesor, densidad, coeficiente de Poisson, velocidad de las ondas S y velocidad de las ondas P, es posible simular la curva de dispersión teórica que liga la velocidad y la longitud de onda según la relación:

$$v = \lambda \times v$$

Modificando los parámetros del modelo geotécnico sintético, se puede obtener una superposición de la curva de dispersión teórica con la experimental: esta fase se llama de inversión y permite determinar el perfil de las velocidades en medios con distintas rigideces.

3.5 Modos de vibración

Tanto en la curva de inversión teórica como en la experimental es posible identificar las diferentes configuraciones de vibración del terreno. Los modos de las ondas Rayleigh pueden ser: deformaciones en contacto con el aire, deformaciones casi nulas en la mitad de la longitud de onda y deformaciones nulas a grandes profundidades.

3.6 Profundidad del estudio

Las ondas Rayleigh decrecen en profundidades aproximadamente iguales a la longitud de onda. Pequeñas longitudes de onda (altas frecuencias) permiten estudiar zonas superficiales, mientras que grandes longitudes de onda (bajas frecuencias) permiten estudios a profundidades mayores.

4. METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN EN CAMPO DE LÍNEAS SÍSMICAS DE REFRACCIÓN

La metodología para la adquisición de las líneas sísmicas de refracción sísmica, se hace un tendido a lo largo de una línea disponiendo una serie de geófonos a una equidistancia de acuerdo con la longitud de cada línea con 24 Geófonos de 10 Hz espaciados a 4m (Línea 1) entre sí. Se generan energizaciones en el terreno empleando como fuente de energía en un martillo de aproximadamente 20 lb, disparos o impactos del martillo en diferentes puntos de la línea.

Para cada punto de energización se registran las ondas generadas en cada uno de los geófonos en un sismógrafo multicanal OYO McSeis Mx, resolución de 24 bits y permite trazas de muestreo de 2 ms con un máximo de 24 canales por unidad. En la siguiente figura se muestran esquema para la ejecución de las líneas sísmicas realizadas en campo.

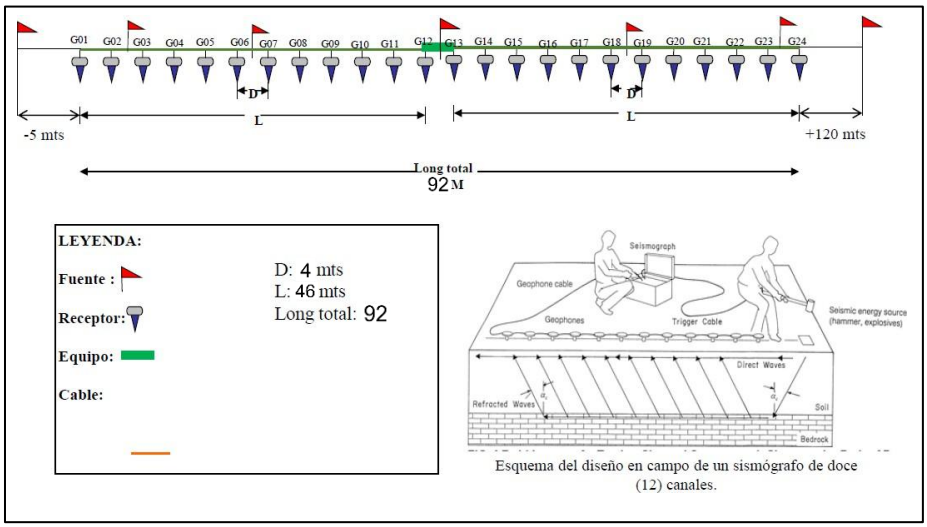


Figura 9 Esquema de adquisición de líneas sísmicas

A continuación, nombran los principales se equipos utilizados en campo:

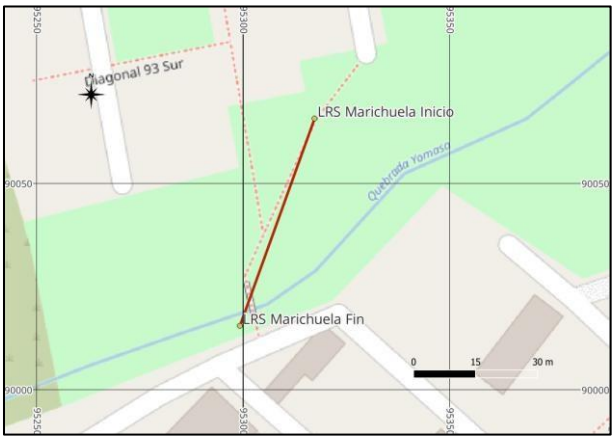
Sismógrafo OYO McSeis Mx
Almádana de 20 libras.
2 rollos de cable con 12 canales cada uno.
24 geófonos para adquirir andas P y S.
Batería de 12 Voltios.
Computador portátil.
GPS Garmin etrex Venture HC

Es pertinente indicar que, el registro sísmico se realizó utilizando un equipo de 24 canales; no obstante, debido al ruido ambiental presente en la zona, incluyendo el flujo constante de agua de la quebrada Yomasa, fue necesario limitar el procesamiento únicamente a los primeros 12 canales. Como resultado, se obtuvo una longitud efectiva de registro de 55 metros.

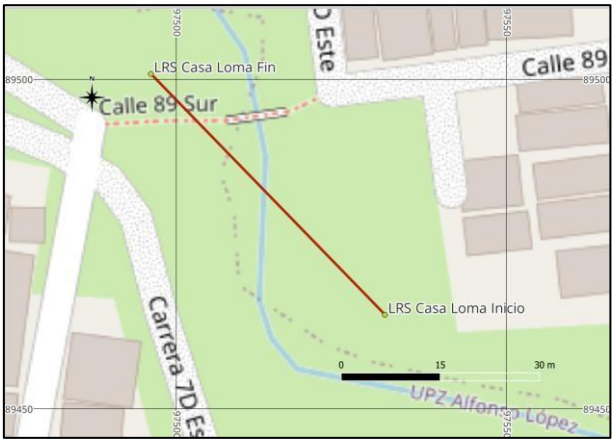
4.1 Datos generales del Proyecto

Proyecto: Contrato de Obra No. 668 de 2022. “CONTRATAR A PRECIOS UNITARIOS FIJOS SIN FORMULA DE AJUSTE Y A MONTO AGOTABLE LA CONSTRUCCIÓN DE PUENTES PEATONALES EN LA LOCALIDAD DE USME, BOGOTÁ D.C.”
Operador ERNESTO SERRANO

A continuación, se presentan la ubicación y un registro fotográfico del registro de las líneas sísmicas:



Puente Marichuela



Puente Casa Loma

Nombre	Este [m]	Norte [m]	Cota[msnm]
LRS Marichuela Inicio	95317.34	90065.75	2669.70
LRS Marichuela Fin	95299.24	90015.53	2663.00
LRS Casa Loma Inicio	97531.60	89464.28	2792.30
LRS Casa Loma Fin	97496.18	89500.79	2788.80

Figura 10 Localización LRS



Figura 11 Registro fotográfico Localización de LSR 1 y LRS 2

4.2 Geología de la Zona de Estudio

Según la zonificación geológica del Geoportal SIRE del IDIGER, el área de estudio se encuentra enmarcada dentro de unidades geológicas bien diferenciadas. A continuación, se describen las formaciones geológicas correspondientes a los sitios de emplazamiento de los puentes en análisis:

- Puente Marichuela:

  La zona corresponde a la Formación Marichuela (Ngm), de edad Neógeno. Esta formación está conformada predominantemente por depósitos conglomeráticos y arenosos de color pardo amarillento a gris, con intercalaciones de lutitas, que representan ambientes de sedimentación fluvio-lacustres. Su compactación es media a baja, y puede presentar niveles de meteorización diferenciales.

- Puente Casa Loma:

  El emplazamiento se encuentra sobre depósitos de la Formación Río Siecha (Qrs), correspondiente a materiales cuaternarios recientes, compuesta principalmente por gravas, arenas y limos con matriz arcillosa, propios de depósitos aluviales asociados a terrazas fluviales recientes. Esta formación se encuentra subyacida por la Formación Usme Inferior, constituida por secuencias de lutitas grises, arcillolitas y areniscas finas, típicas de un ambiente de sedimentación lacustre o de planicie de inundación con bajo grado de consolidación.

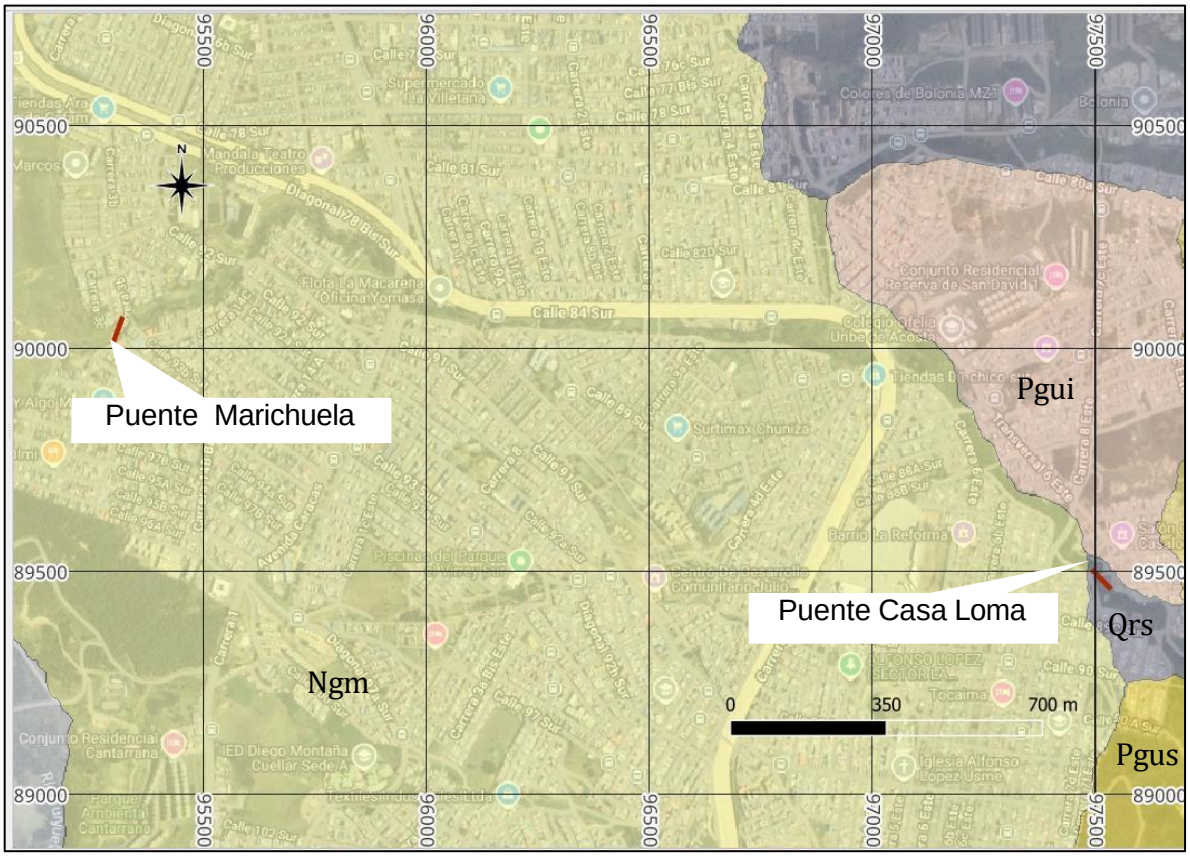


Figura 12 Geología de la Zona de Estudio
Fuente: SIRE IDIGER

4.3 Datos de registros LRS 1 – Puente Marichuela

Se presentan a continuación los registros obtenidos en la exploración e campo:

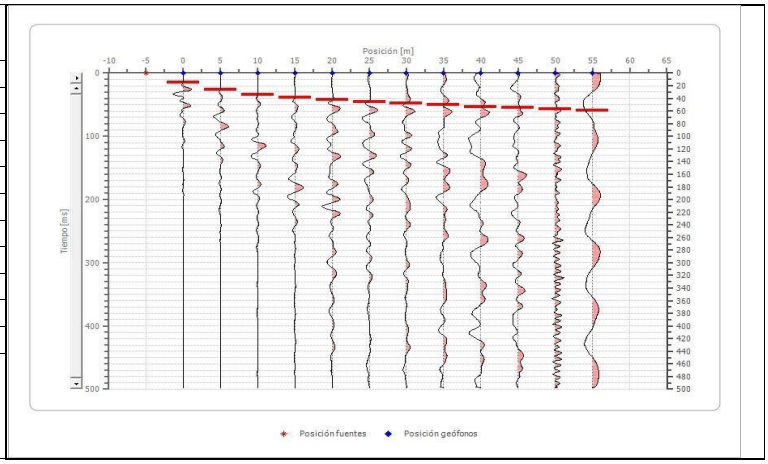
Tabla 2 Geometría geófonos LRS No 1

punto	Posición X [m]	Posición Z [m]
1	0.0	2669.7
2	5.0	2669.1
3	10.0	2668.5
4	15.0	2667.9
5	20.0	2667.3
6	25.0	2666.7
7	30.0	2666.0
8	35.0	2665.4
9	40.0	2664.8
10	45.0	2664.2
11	50.0	2663.6
12	55.0	2663.0

Datos impactos
Impacto 1
Posición fuente X -5 [m]

Posición fuente Z 2670 [m]

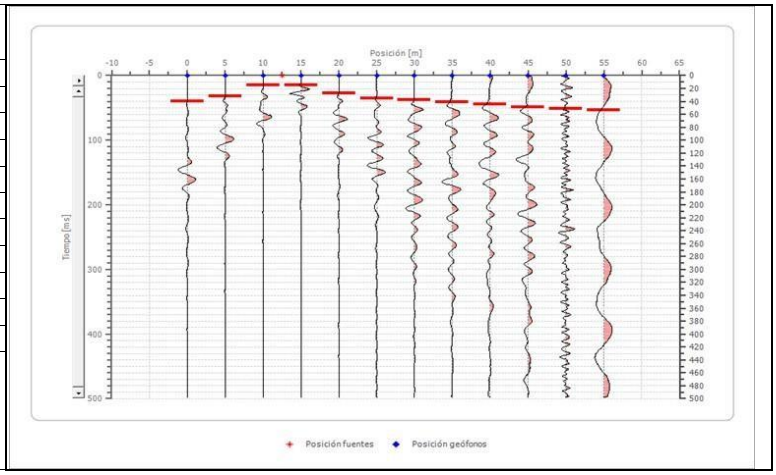
Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	15.0342
5.0	26.0000
10.0	34.3964
15.0	38.4966
20.0	41.6856
25.0	45.1025
30.0	47.8360
35.0	49.8861
40.0	53.3030
45.0	54.6697
50.0	56.7198
55.0	58.7699



Impacto 2

Posición fuente X 13 [m]
Posición fuente Z 2668 [m]

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	39.6355
5.0	31.8907
10.0	15.0342
15.0	14.8360
20.0	27.5626
25.0	34.8519
30.0	38.0000
35.0	40.5467
40.0	44.4191
45.0	48.5194
50.0	51.7084
55.0	53.5308

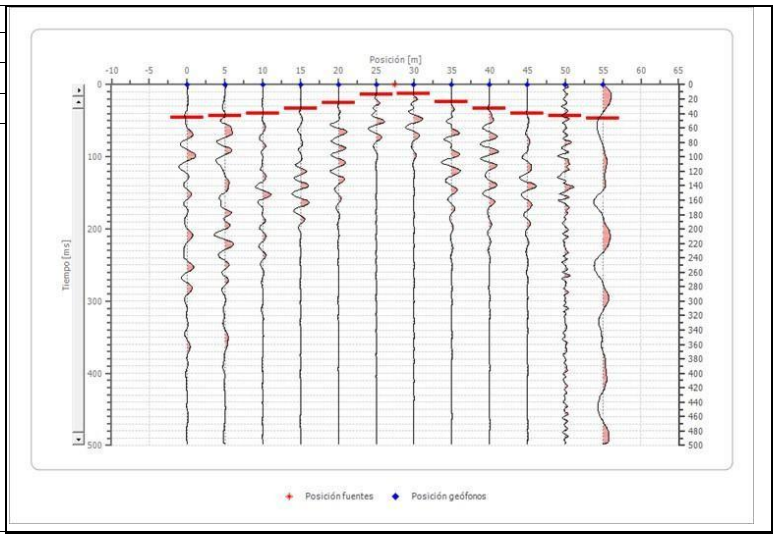


Impacto 3

Posición fuente X 28 [m]
Posición fuente Z 2666 [m]

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	45.7859
5.0	43.5080
10.0	40.3189
15.0	33.0296
20.0	24.6014
25.0	13.6674
30.0	12.9841

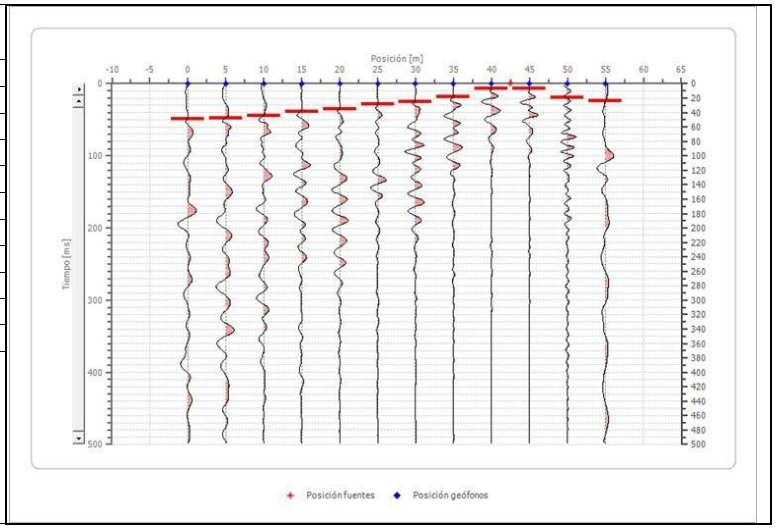
35.0	24.3736
40.0	33.0296
45.0	39.4077
50.0	43.2802
55.0	46.2415



Impacto 4

Posición fuente X 43 [m]
Posición fuente Z 2665 [m]

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	49.2027
5.0	47.8360
10.0	44.4191
15.0	38.7244
20.0	35.3075
25.0	28.7016
30.0	25.2847
35.0	18.4510
40.0	7.2893
45.0	6.3781
50.0	18.9066
55.0	24.3736

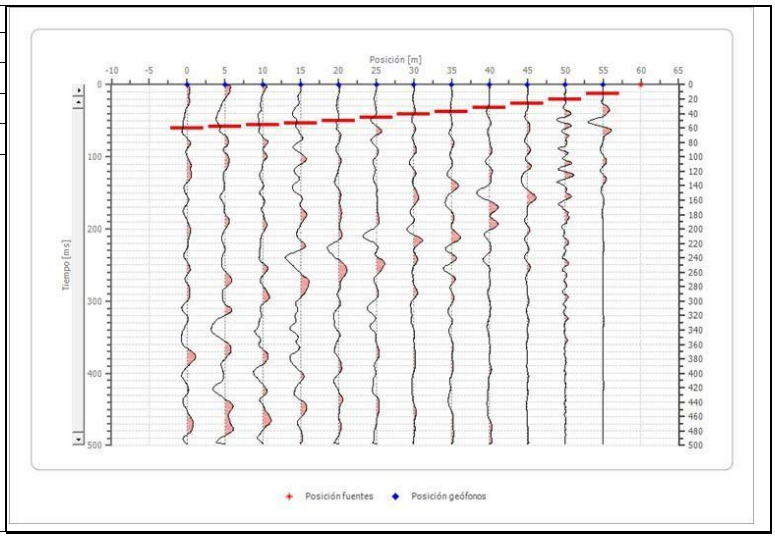


Impacto 5

Posición fuente X 60 [m]
Posición fuente Z 2663 [m]

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	60.1367
5.0	57.8588
10.0	55.3531
15.0	53.0752
20.0	49.8861
25.0	45.7859

30.0	40.7745
35.0	37.6606
40.0	31.4351
45.0	25.7403
50.0	20.9567
55.0	12.0729



4.4 Dromocronas LSR No 1

Utilizando las distancias entre los puntos de energización y de recepción y los tiempos de primera recepción de las señales sísmicas, se elaboran las dromocronas

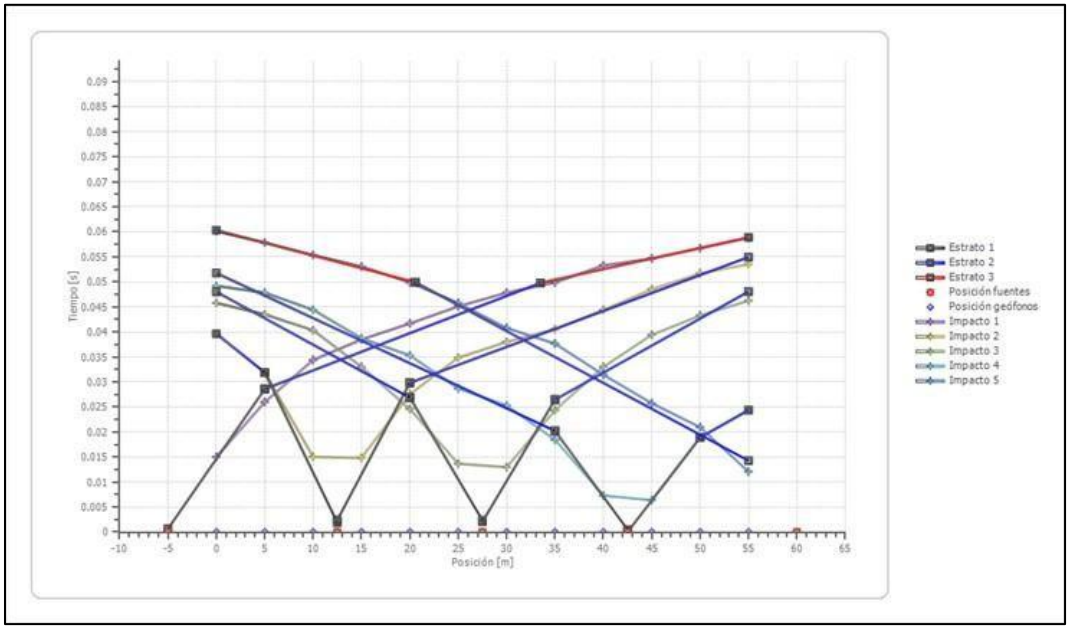


Figura 13 Dromocronas LSR No 1

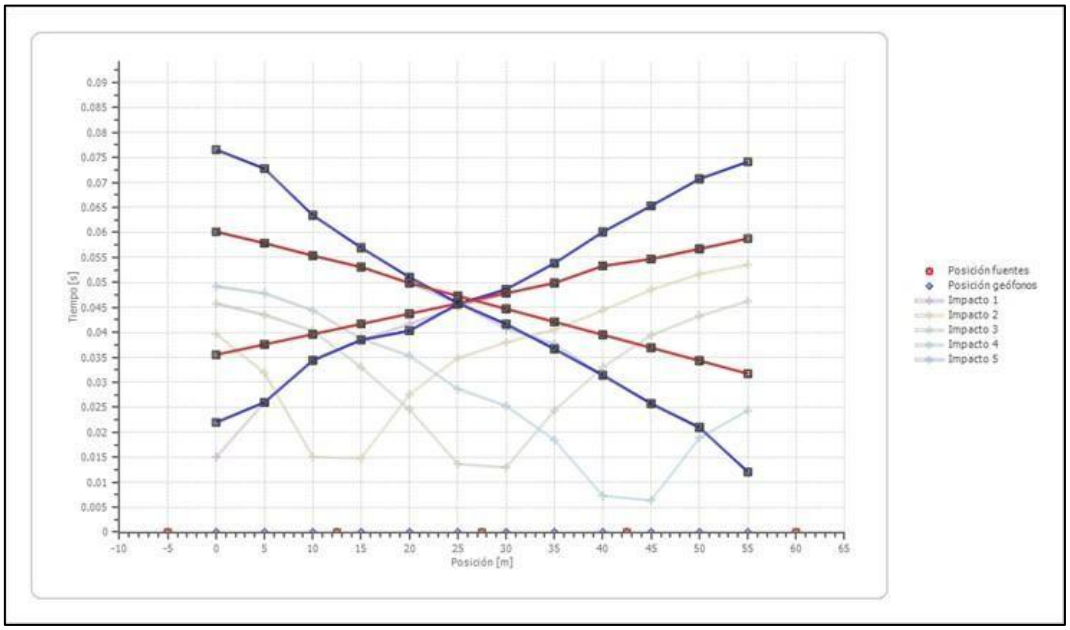


Figura 14 Dromocronas elaboradas LSR No 1

Tabla 3 Interpretación con el método G.R.M. LSR No 1

	Estrato n. 1 [m]*	Estrato n. 2 [m]	Estrato n. 3 [m]
G= 0.0 [m]	3.3	11.1	--
G= 5.0 [m]	3.4	10.9	--
G= 10.0 [m]	3.2	11.0	--
G= 15.0 [m]	2.8	11.8	--
G= 20.0 [m]	2.0	12.8	--
G= 25.0 [m]	2.1	12.4	--
G= 30.0 [m]	1.8	12.6	--
G= 35.0 [m]	1.9	12.2	--
G= 40.0 [m]	2.1	12.3	--
G= 45.0 [m]	2.0	11.8	--
G= 50.0 [m]	2.1	11.3	--
G= 55.0 [m]	1.1	13.1	--
Velocidad [m/sec]	337.4	966.5	2105.4
Descripción	Ngm-1	Ngm-2	Ngm-3

A continuación, se tabulan los resultados de parámetros geotécnicos obtenidos para la LRS No. 1 - Marichuela:

Tabla 4 Otros parámetros geotécnicos LSR No 1

	Estrato n. 1	Estrato n. 2	Estrato n. 3
Coeficiente Poisson	0.25	0.30	0.30
Densidad [kg/m³]	1800.00	1900.00	2000.00
Vp [m/s]	337.44	966.48	2105.38
Vs [m/s]	194.82	516.61	1125.37
G0 [MPa]	68.32	507.08	2532.93
Ed [Mpa]	204.96	1774.76	8865.26
M0 [MPa]	136.64	1267.69	6332.33
Ey [Mpa]	170.80	1318.40	6585.62

Donde:

G0: Módulo de deformación al corte;
Ed: Módulo edométrico;
M0: Módulo de compresibilidad volumétrica;
Ey: Módulo de Young;

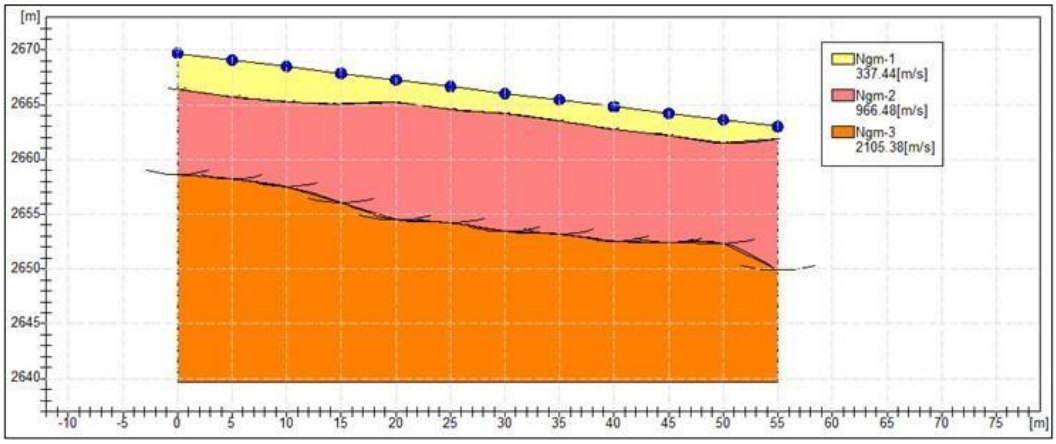


Figura 15 Modelo Geológico - Refractores LRS No 1

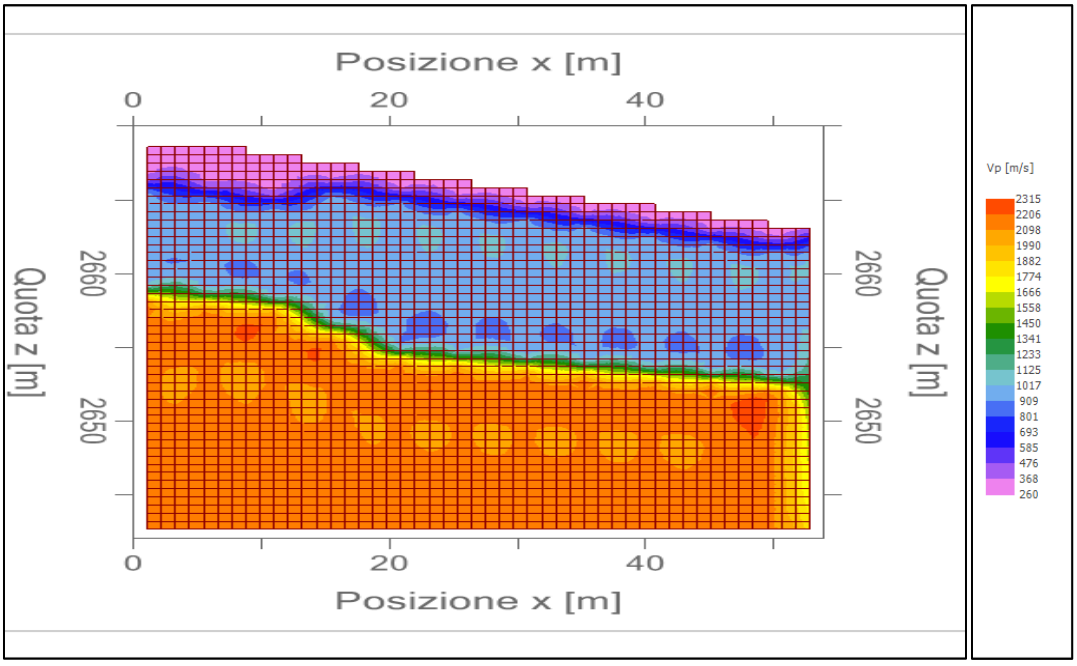


Figura 16 Mapa de Velocidades LRS No 1

Datos registro MASW No 1

Debido al alto ruido ambiental registrado durante la toma de datos, fue necesario realizar la revisión y selección de los registros con menor ruido de las lecturas tomas, de esta manera se seleccionó el registro tomado entre los geófonos G1 y G12, tomando los registros a -5m del Geófono 1. Los cuales se muestran a continuación:

Tabla 5 Trazas empleadas para la LSR No 1

N. trazas	25
Duración de adquisición [msec]	4096.0
Interdistancia geófonos [m]	5.0
Periodo de muestreo [msec]	1.00

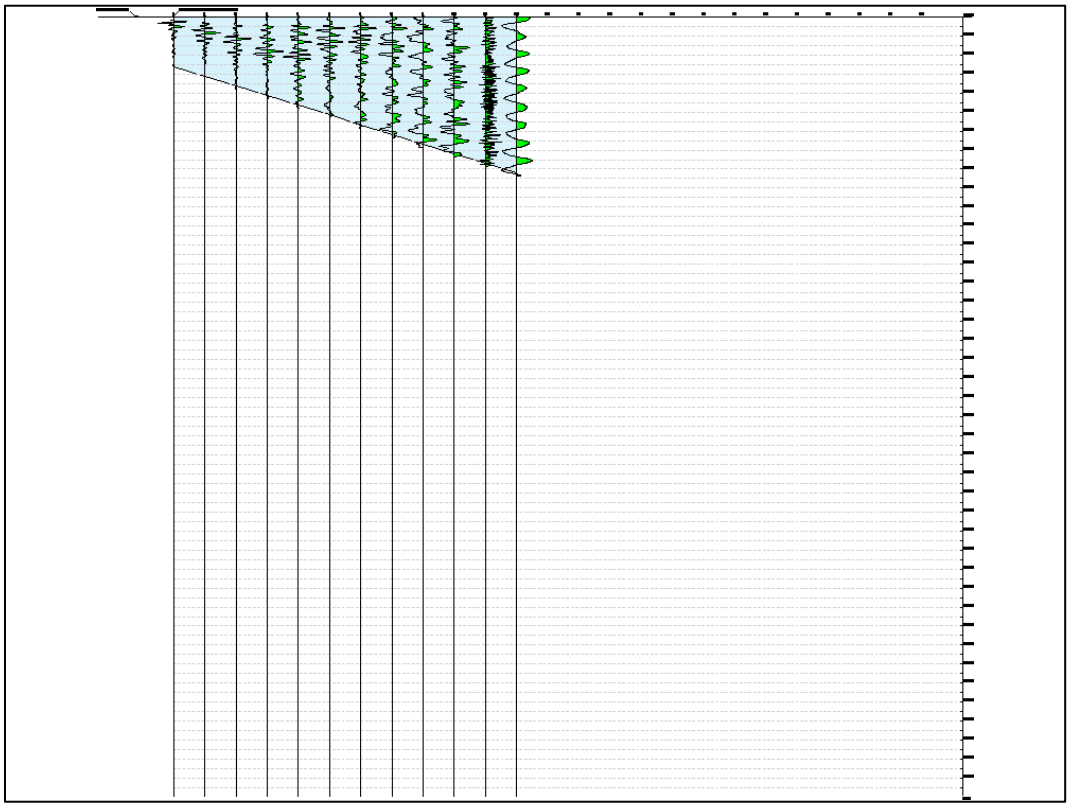


Figura 17 Trazas seleccionadas para análisis MASW L1

A partir de las trazas seleccionadas anteriormente se realizó el análisis espectral, con los siguientes datos de entrada:

Tabla 6 Análisis espectral LSR No 1

Frecuencia mínima de elaboración [Hz]	1
Frecuencia máxima de elaboración [Hz]	60
Velocidad mínima de elaboración [m/sec]	1
Velocidad máxima de elaboración [m/sec]	800
Intervalo velocidad [m/sec]	1

A partir de este análisis se obtiene la gráfica del espectro de frecuencias Vs velocidad mostrada a continuación:

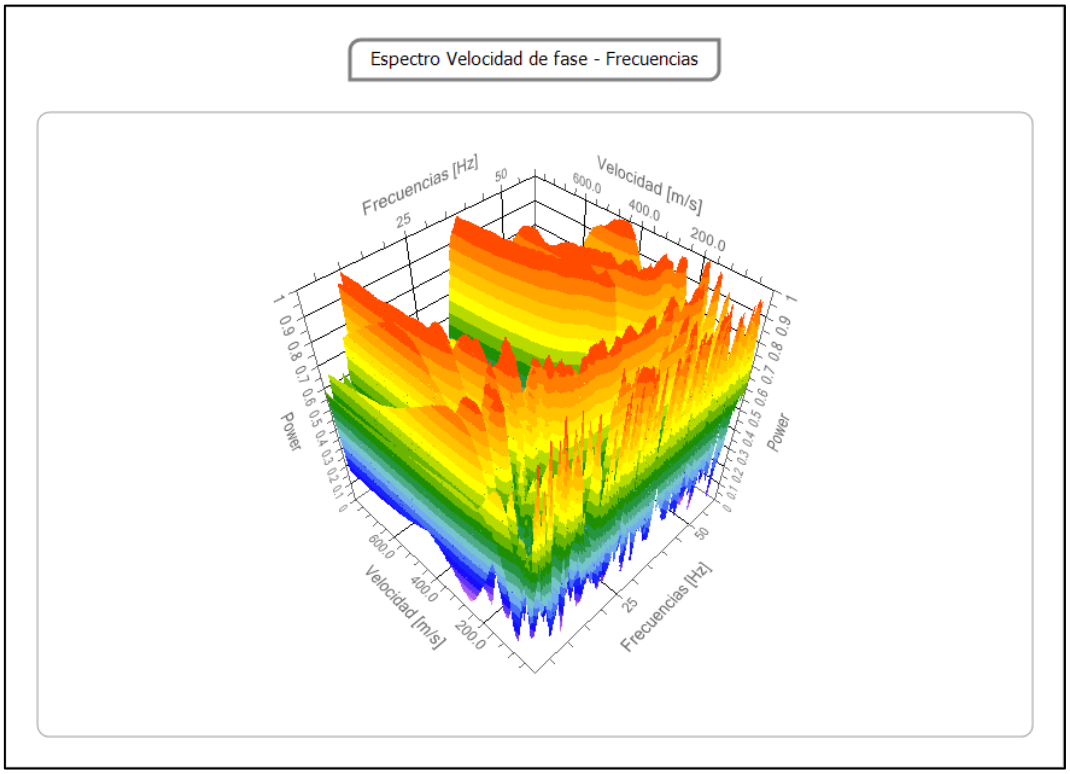


Figura 18 Espectro de Velocidad de Fase Vs Frecuencia – MASW No 1

De la gráfica anterior se calculó la curva de dispersión, cuyos datos se registran a continuación:

Tabla 7 Curva de dispersión LSR No 1

n.	frecuencia [Hz]	Velocidad [m/sec]	Modo
1	9.8	685.5	0
2	11.2	520.9	0
3	14.0	365.9	0
4	20.3	253.8	0
5	38.2	170.3	0

En la figura a continuación se observa las curvas de dispersión sobre el espectro de velocidades de base Vs frecuencias

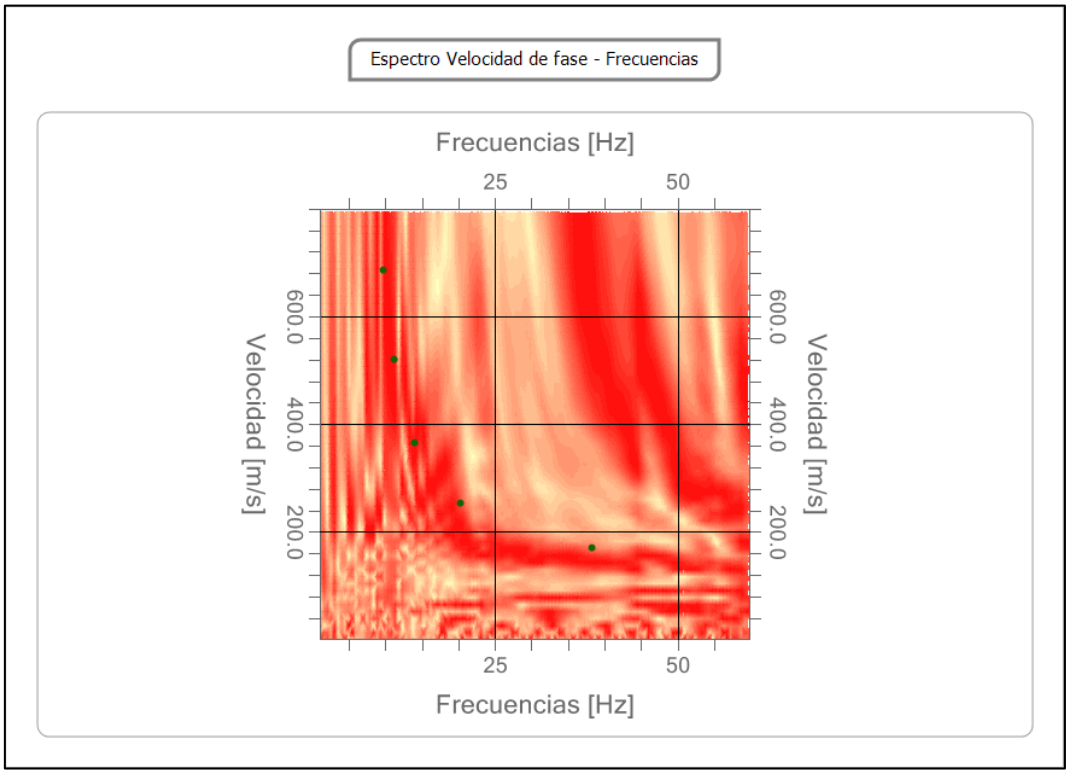


Figura 19 Diagrama espectro de Velocidades de fase Frecuencia MASW No 1

En la siguiente tabla se consignan los datos para obtenidos a partir de los diagramas de inversión los perfiles de velocidad en función de la profundidad, las cuales se presentan seguidamente.

Tabla 8 Curva de inversión LSR No 1

n.	Descripción	Profundidad [m]	Espesor [m]	Peso específico [kg/mc]	Coeficiente Poisson	Nivel freático	Vp [m/sec]	Vs [m/sec]
1	Ngm-1	3.00	3.00	1800.0	0.3	No	300.4	173.4
2	Ngm-2	4.60	1.60	1900.0	0.3	No	541.6	289.5
3	Ngm-2	8.60	4.00	1900.0	0.3	No	879.2	469.9
4	Ngm-2	13.59	4.99	1900.0	0.3	No	873.0	466.7
5	Ngm-3	18.55	4.96	2000.0	0.3	No	1436.3	767.7
6	Ngm-3	oo	oo	2000.0	0.3	No	2356.0	1259.3

Porcentaje de error 0.135 %
Factor de desadaptación de la solución 0.030

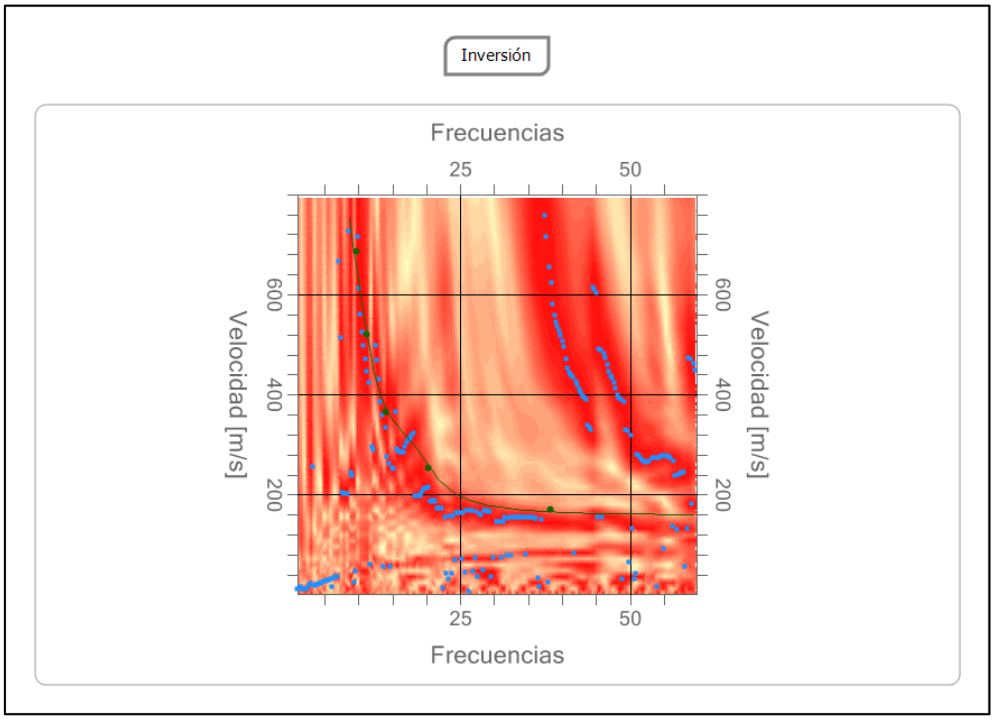


Figura 20 Diagrama de Inversión Calculado MASW No 1

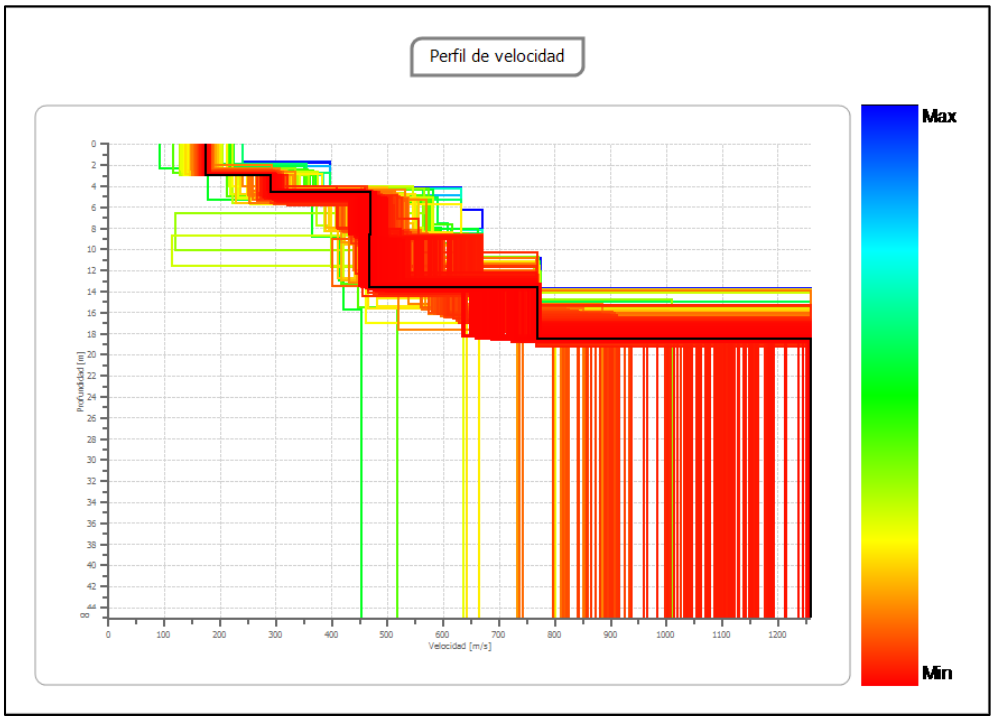


Figura 21 Perfiles de velocidades en función de la profundidad - MASW No 1

Finalmente, a continuación, se obtiene el perfil de velocidad que permite determinar el perfil estratigráfico de la zona estudiada:

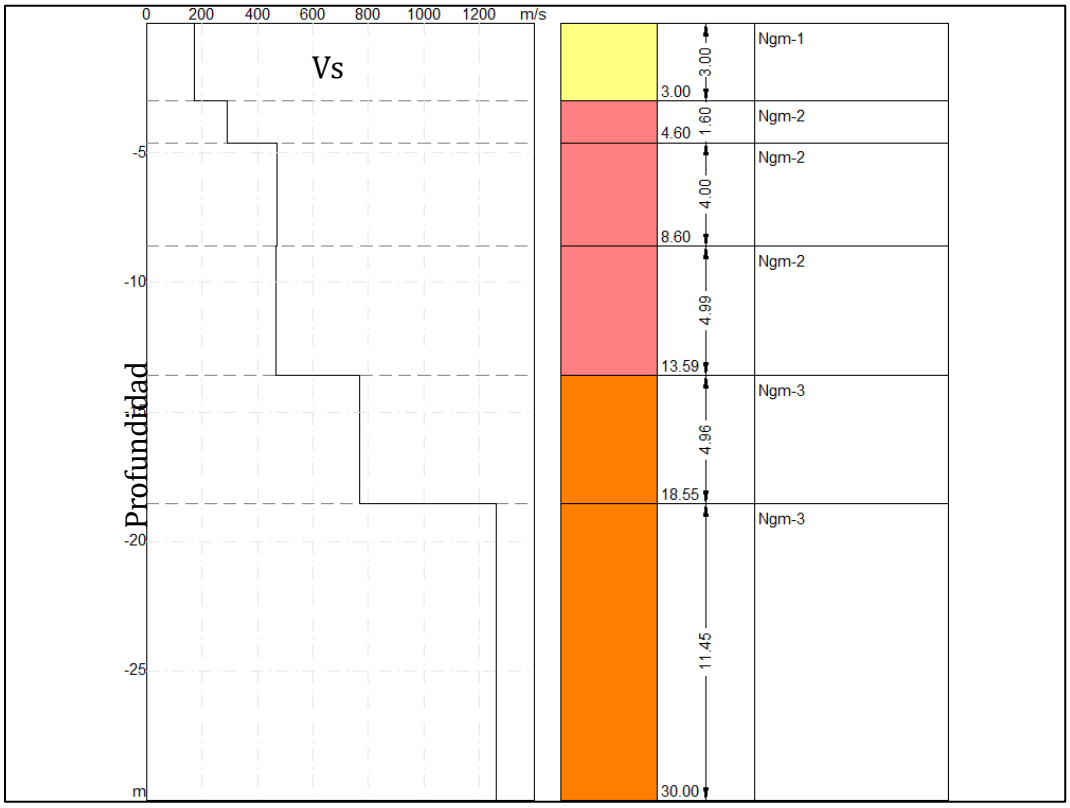


Figura 22 Perfil estratigráfico MASW No 1

A continuación, se realiza la descripción de los resultados obtenidos del MASW correlacionados con la información disponible del sitio de implementación del puente Marichuela.

Tabla 9 Resultados MASW No 1

Profundidad del plano de cimentación [m]	0.00
Vs30 [m/sec]	520.97
Categoría de suelo	Rocas blandas y depósitos de suelo de grano grueso muy densos o suelos de grano fino muy consistentes con espesores sup. a 30 m

Suelo de tipo: Rocas blandas y depósitos de suelo de grano grueso muy densos o suelos de grano fino muy consistentes con espesores sup. a 30 m, caracterizados por un mejoramiento gradual de las propiedades mecánicas a según del aumento de la profundidad y por valores Vs,30 comprendidos entre 360 m/s y 800 m/s (o NSPT,30 > 50 en suelos de grano grueso y cu,30 > 250 kPa en suelos de grano fino).

Tabla 10 Otros parámetros geotécnicos MASW No 1

n.	Profundidad [m]	Espesor [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densidad [kg/mc]	Coeficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]	NSPT	Qc [kPa]
1	3.00	3.00	173.45	300.42	1800.00	0.25	54.15	162.45	90.25	135.38	N/A	371.71
2	4.60	1.60	289.49	541.59	1900.00	0.30	159.23	557.31	345.00	414.00	N/A	4877.03
3	8.60	4.00	469.94	879.18	1900.00	0.30	419.61	1468.63	909.15	1090.98	N/A	N/A
4	13.59	4.99	466.65	873.03	1900.00	0.30	413.75	1448.13	896.46	1075.75	N/A	N/A
5	18.55	4.96	767.74	1436.31	2000.00	0.30	1178.85	4125.99	2554.19	3065.02	N/A	N/A
6	oo	oo	1259.32	2355.97	2000.00	0.30	3171.78	11101.23	6872.19	8246.63	0	N/A

Donde,

G0: Módulo de deformación al corte;
Ed: Módulo edométrico;
M0: Módulo de compresibilidad volumétrica;
Ey: Módulo de Young;

4.5 Datos de registros LRS 2 – Puente Casa Loma

Se presentan a continuación los registros obtenidos en la exploración de campo:

Tabla 11 Geometría geófonos LRS No 2

	Posición X [m]	Posición Z [m]
1	0.0	2792.3
2	5.0	2792.0
3	10.0	2791.7
4	15.0	2791.3
5	20.0	2791.0
6	25.0	2790.7
7	30.0	2790.4
8	35.0	2790.1
9	40.0	2789.7
10	45.0	2789.4
11	50.0	2789.1
12	55.0	2788.8

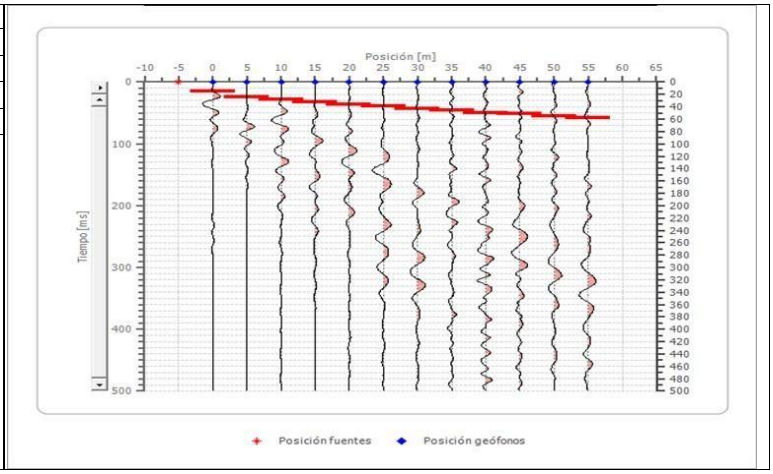
Datos impactos

Impacto 1

Posición fuente X -5 [m]
Posición fuente Z 2792 [m]

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	14.8064
5.0	23.6902
10.0	28.0000
15.0	32.0000
20.0	35.9909
25.0	39.1800

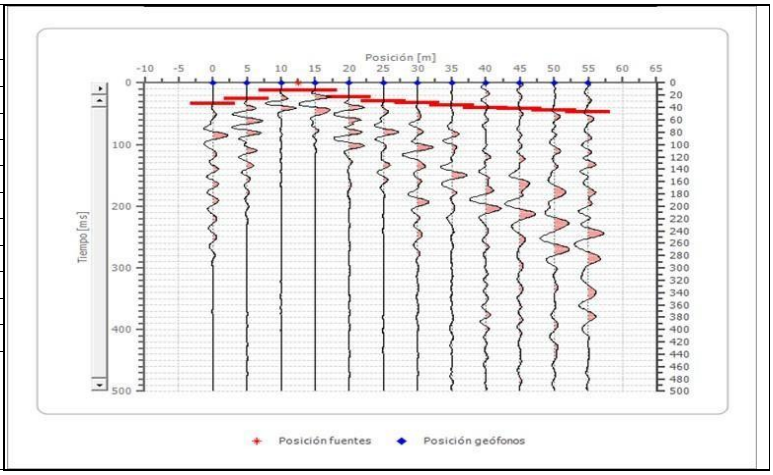
30.0	42.5968
35.0	45.7859
40.0	49.6583
45.0	51.7084
50.0	54.6697
55.0	57.8588



Impacto 2

Posición fuente X 13 [m]
Posición fuente Z 2792 [m]

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	34.0000
5.0	26.0000
10.0	12.3007
15.0	12.5285
20.0	23.0068
25.0	29.1572
30.0	32.1185
35.0	36.4465
40.0	40.3189
45.0	42.3690
50.0	45.1025
55.0	47.6082

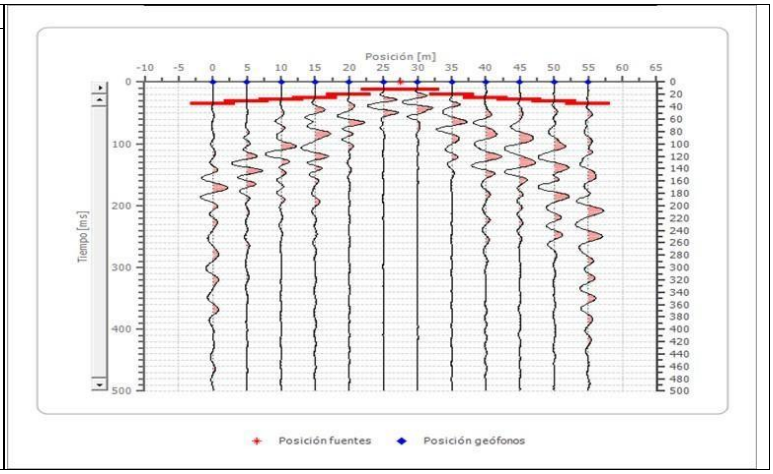


Impacto 3

Posición fuente X 28 [m]
Posición fuente Z 2791 [m]

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	34.6241
5.0	31.0000
10.0	27.7904
15.0	25.0000
20.0	20.0456
25.0	11.8451
30.0	11.6173
35.0	20.0000
40.0	25.7403
45.0	28.0182

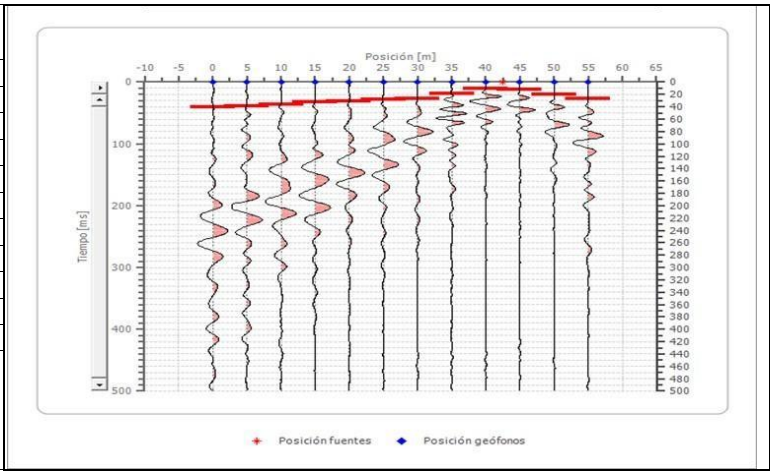
50.0	30.5239
55.0	34.3964



Impacto 4

Posición fuente X 43 [m]
Posición fuente Z 2790 [m]

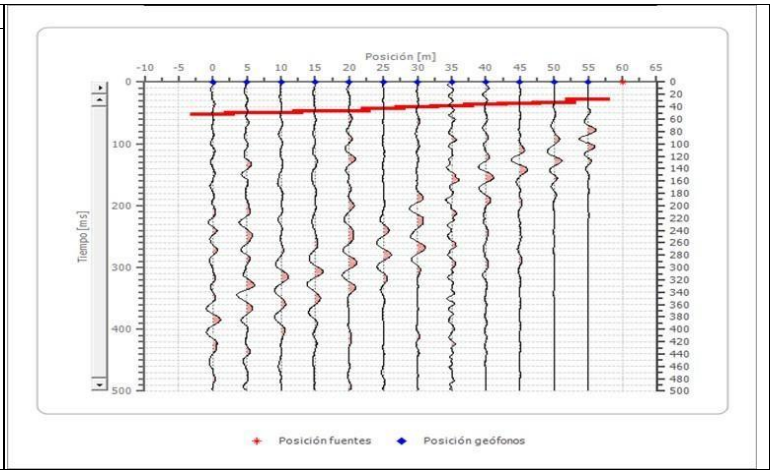
Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	40.5467
5.0	38.4966
10.0	35.7631
15.0	32.5740
20.0	31.6629
25.0	27.7904
30.0	26.4237
35.0	18.2232
40.0	11.1617
45.0	11.6173
50.0	20.0456
55.0	27.3349



Impacto 5

Posición fuente X 60 [m]
Posición fuente Z 2789 [m]

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	52.3918
5.0	50.3417
10.0	49.4305
15.0	47.8360
20.0	46.7904
25.0	43.5080
30.0	41.0843
35.0	38.9522
40.0	36.5194
45.0	34.6241

50.0	33.0296	
55.0	27.7904	

4.6 Dromocronas LSR No 2

Utilizando las distancias entre los puntos de energización y de recepción y los tiempos de primera recepción de las señales sísmicas, se elaboran las dromocronas

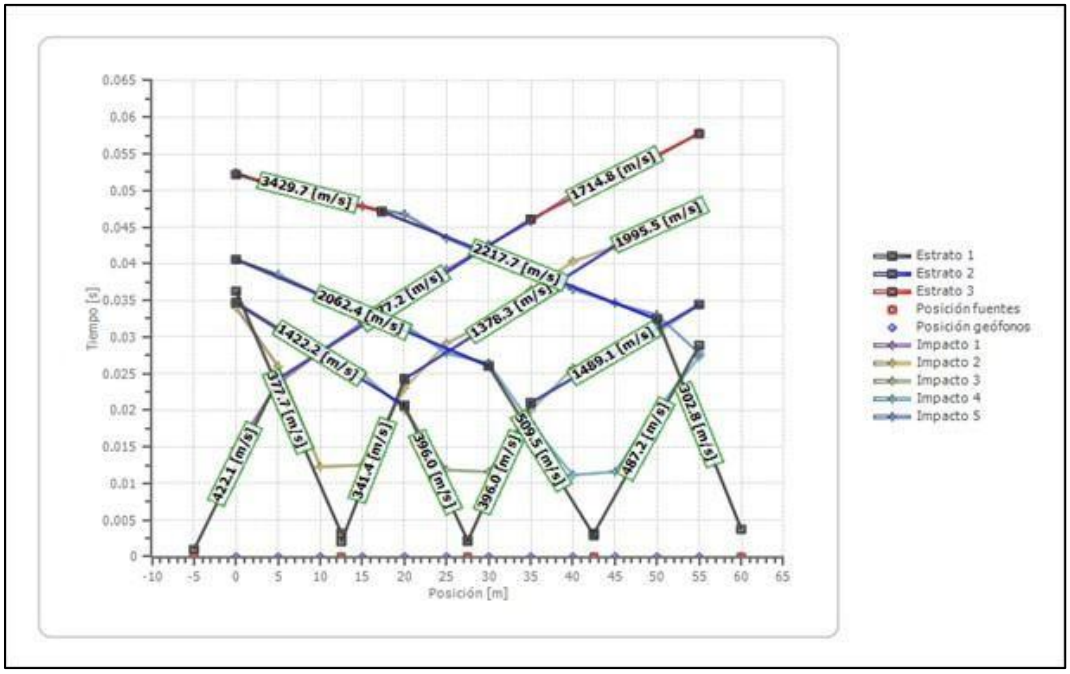


Figura 23 Dromocronas LSR No 2

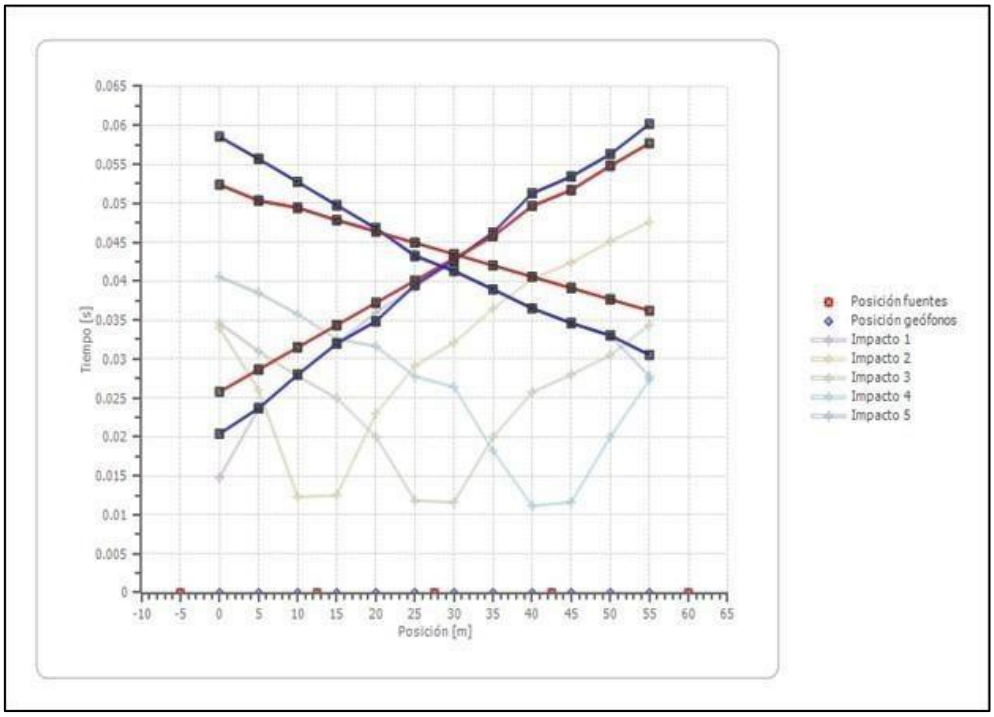


Figura 24 Dromocronas elaboradas LSR No 2

Tabla 12 Interpretación con el método G.R.M. LSR No 2

	Estrato n. 1 [m]*	Estrato n. 2 [m]	Estrato n. 3 [m]
G= 0.0 [m]	3.5	8.2	--
G= 5.0 [m]	3.6	8.7	--
G= 10.0 [m]	3.8	9.6	--
G= 15.0 [m]	4.0	10.1	--
G= 20.0 [m]	4.0	11.8	--
G= 25.0 [m]	4.3	12.3	--
G= 30.0 [m]	4.5	12.7	--
G= 35.0 [m]	4.8	13.2	--
G= 40.0 [m]	5.3	13.5	--
G= 45.0 [m]	5.4	13.9	--
G= 50.0 [m]	5.6	14.6	--
G= 55.0 [m]	5.9	14.9	--
Velocidad [m/sec]	404.1	1612.9	2292.3
Descripción	Qrs	Pgui-1	Pgui-2

A continuación, se tabulan los resultados de parámetros geotécnicos obtenidos para la LRS No. 2 – Casa Loma:

Tabla 13 Otros parámetros geotécnicos LSR No 2

	Estrato n. 1	Estrato n. 2	Estrato n. 3
Coeficiente Poisson	0.18	0.25	0.25
Densidad [kg/m³]	1800.00	1900.00	2000.00
Vp [m/s]	404.09	1612.89	2292.33
Vs [m/s]	252.44	931.21	1323.48
G0 [MPa]	114.70	1647.57	3503.20
Ed [Mpa]	293.92	4942.72	10509.59

M0 [MPa]	179.22	3295.14	7006.39
Ey [Mpa]	270.70	4118.93	8757.99

Donde,

G0: Módulo de deformación al corte;
Ed: Módulo edométrico;
M0: Módulo de compresibilidad volumétrica;
Ey: Módulo de Young;

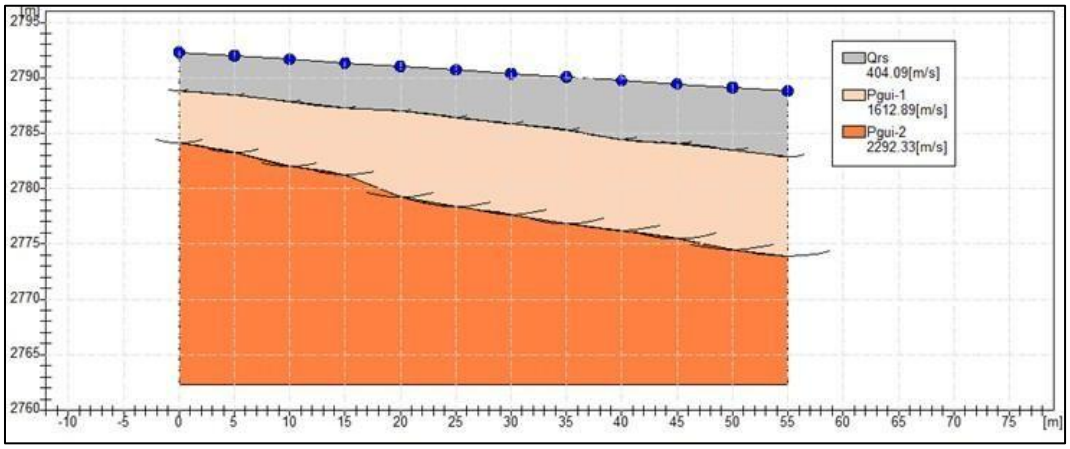


Figura 25 Modelo Geológico - Refractores LRS No 2

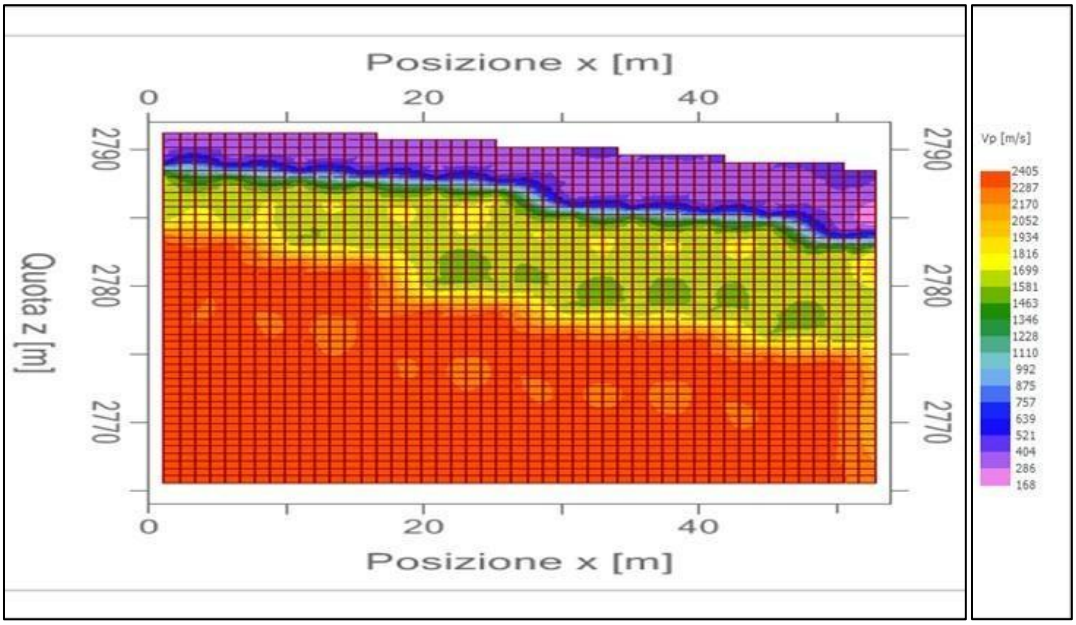


Figura 26 Mapa de Velocidades LRS No 2

Datos registro MASW No 2

Debido al alto ruido ambiental registrado durante la toma de datos, fue necesario realizar la revisión y selección de los registros con menor ruido de las lecturas tomas, de esta manera

se seleccionó el registro tomado entre los geófonos G1 y G12, tomando los registros a -5m del Geofono 1. Los cuales se muestran a continuación:

Tabla 14 Trazas empleadas para la LSR No 2

N. trazas	25
Duración de adquisición [msec]	4096.0
Interdistancia geófonos [m]	5.0
Periodo de muestreo [msec]	1.00

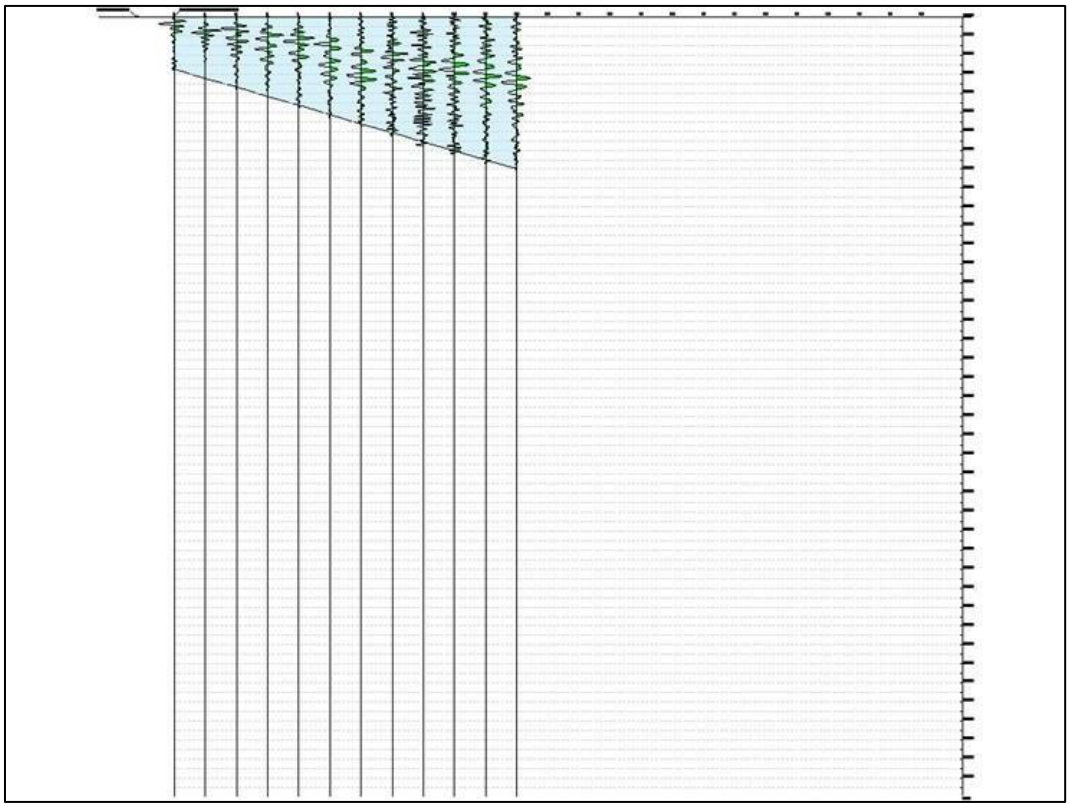


Figura 27 Trazas seleccionadas para análisis MASW L2

A partir de las trazas seleccionadas anteriormente se realizó el análisis espectral, con los siguientes datos de entrada:

Tabla 15 Análisis espectral LSR No 2

Frecuencia mínima de elaboración [Hz]	1
Frecuencia máxima de elaboración [Hz]	60
Velocidad mínima de elaboración [m/sec]	1
Velocidad máxima de elaboración [m/sec]	800
Intervalo velocidad [m/sec]	1

A partir de este análisis se obtiene la gráfica del espectro de frecuencias Vs velocidad mostrada a continuación:

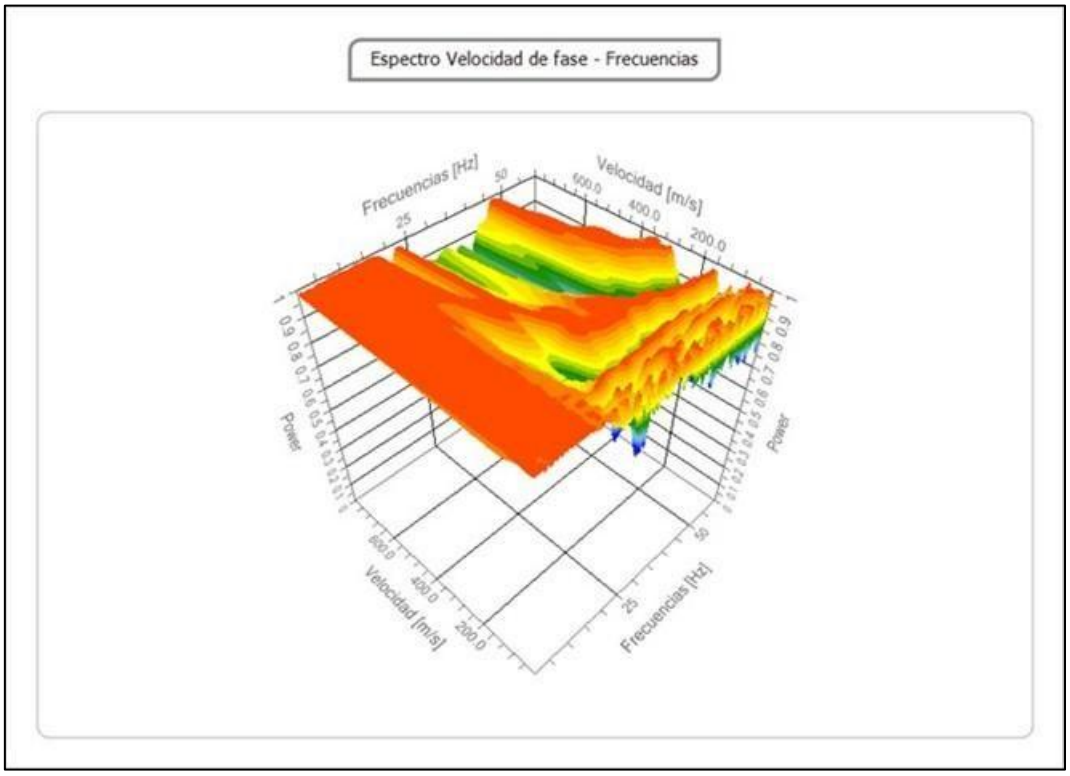


Figura 28 Espectro de Velocidad de Fase Vs Frecuencia – MASW No 2

De la gráfica anterior se calculó la curva de dispersión, cuyos datos se registran a continuación:

Tabla 16 Curva de dispersión LSR No 2

n.	frecuencia [Hz]	Velocidad [m/sec]	Modo
1	17.3	757.1	0
2	20.1	535.3	0
3	24.4	385.0	0
4	31.9	303.9	0
5	42.3	292.0	0

En la figura a continuación se observa las curvas de dispersión sobre el espectro de velocidades de base Vs frecuencias

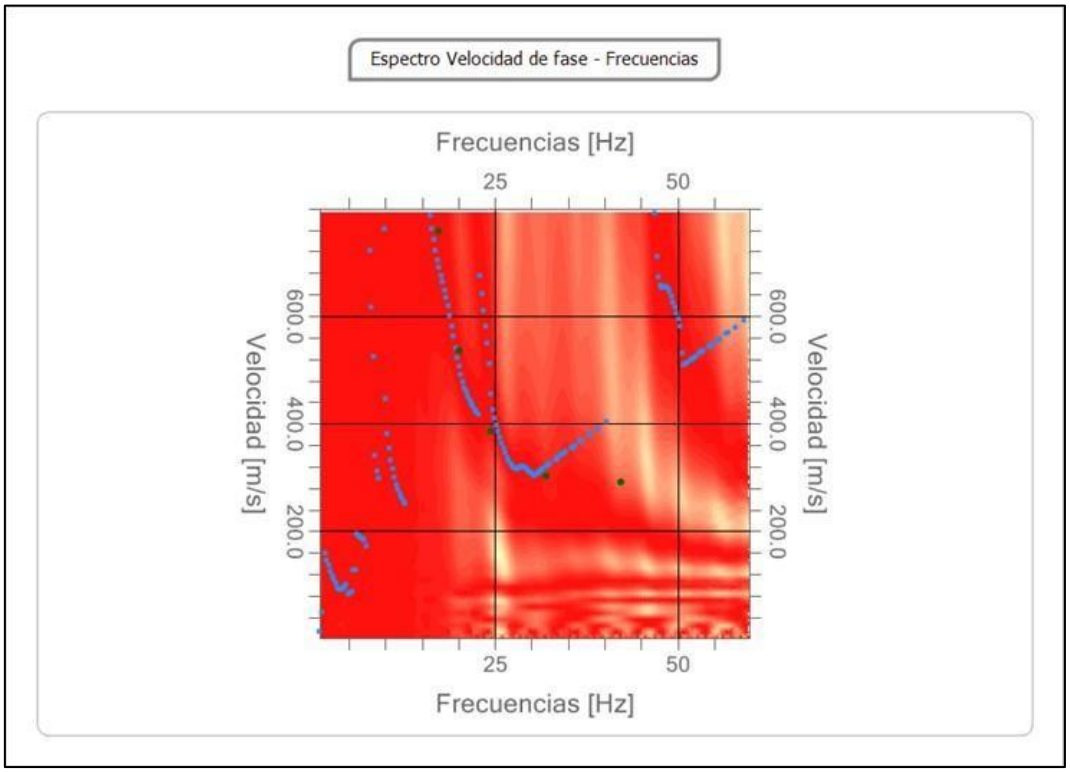


Figura 29 Diagrama espectro de Velocidades de fase Frecuencia MASW No 2

En la siguiente tabla se consignan los datos para obtenidos a partir de los diagramas de inversión los perfiles de velocidad en función de la profundidad, las cuales se presentan seguidamente.

Tabla 17 Curva de inversión LSR No 2

n.	Descripción	Profundidad [m]	Espesor [m]	Peso específico [kg/mc]	Coeficiente Poisson	Nivel freático	Vp [m/sec]	Vs [m/sec]
1	Qrs	2.99	2.99	1800.0	0.2	No	479.8	299.8
2	Qrs	4.23	1.23	1800.0	0.2	No	467.6	292.1
3	Pgui-1	9.32	5.10	1900.0	0.3	No	1120.9	647.2
4	Pgui-2	15.42	6.10	2000.0	0.3	No	1408.7	813.3
5	Pgui-2	24.11	8.69	2000.0	0.3	No	1753.1	1012.2
6	Pgui-2	oo	oo	2000.0	0.3	No	2351.2	1357.5

Porcentaje de error 2.652 %
Factor de desadaptación de la solución 0.114

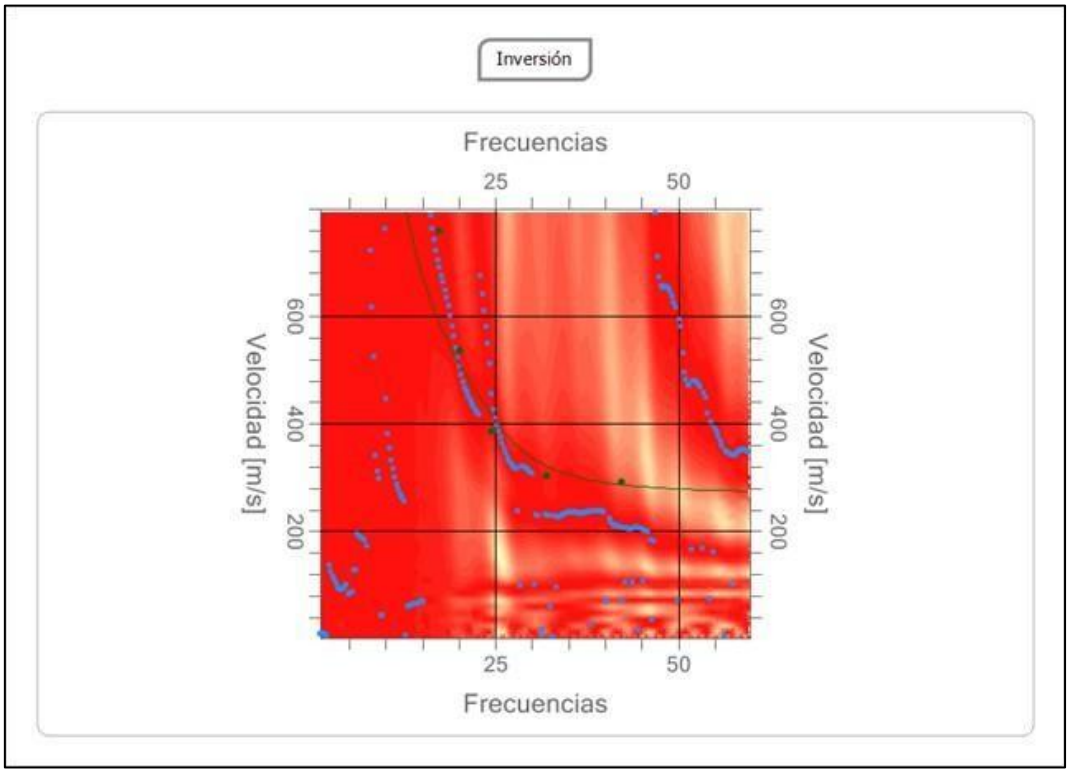


Figura 30 Diagrama de Inversión Calculado MASW No 2

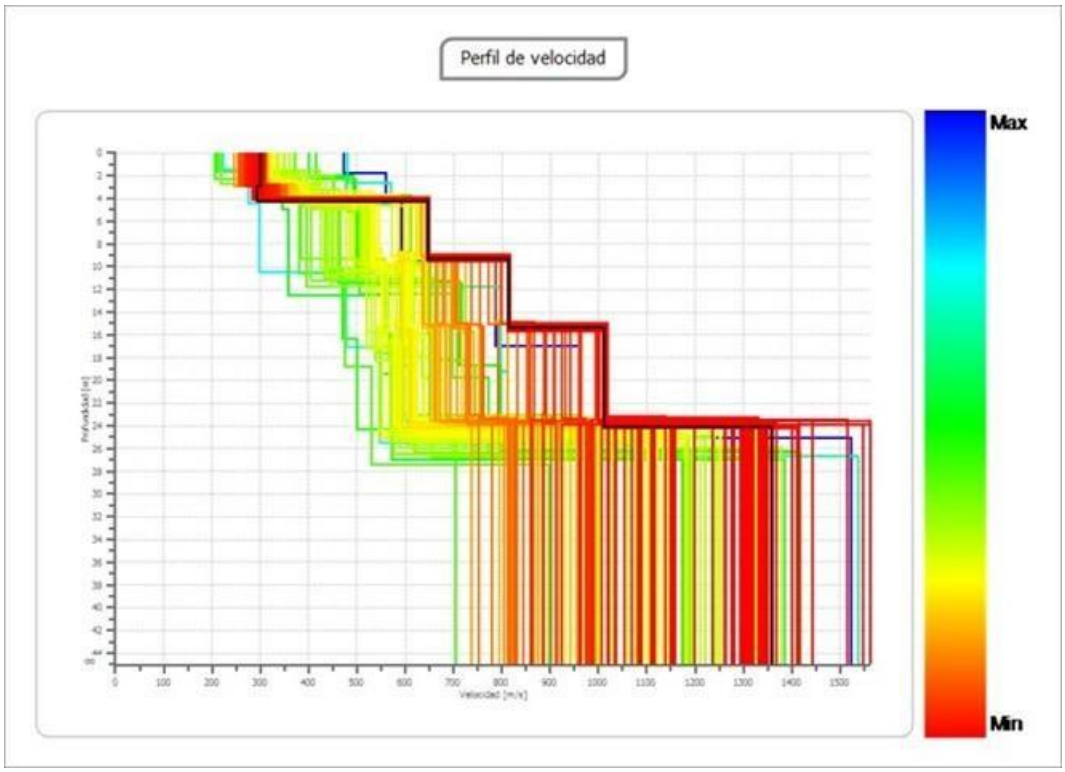


Figura 31 Perfiles de velocidades en función de la profundidad - MASW No 2

A continuación, se tabulan los resultados de parámetros geotécnicos obtenidos para la LRS No. 2 – Casa Loma:

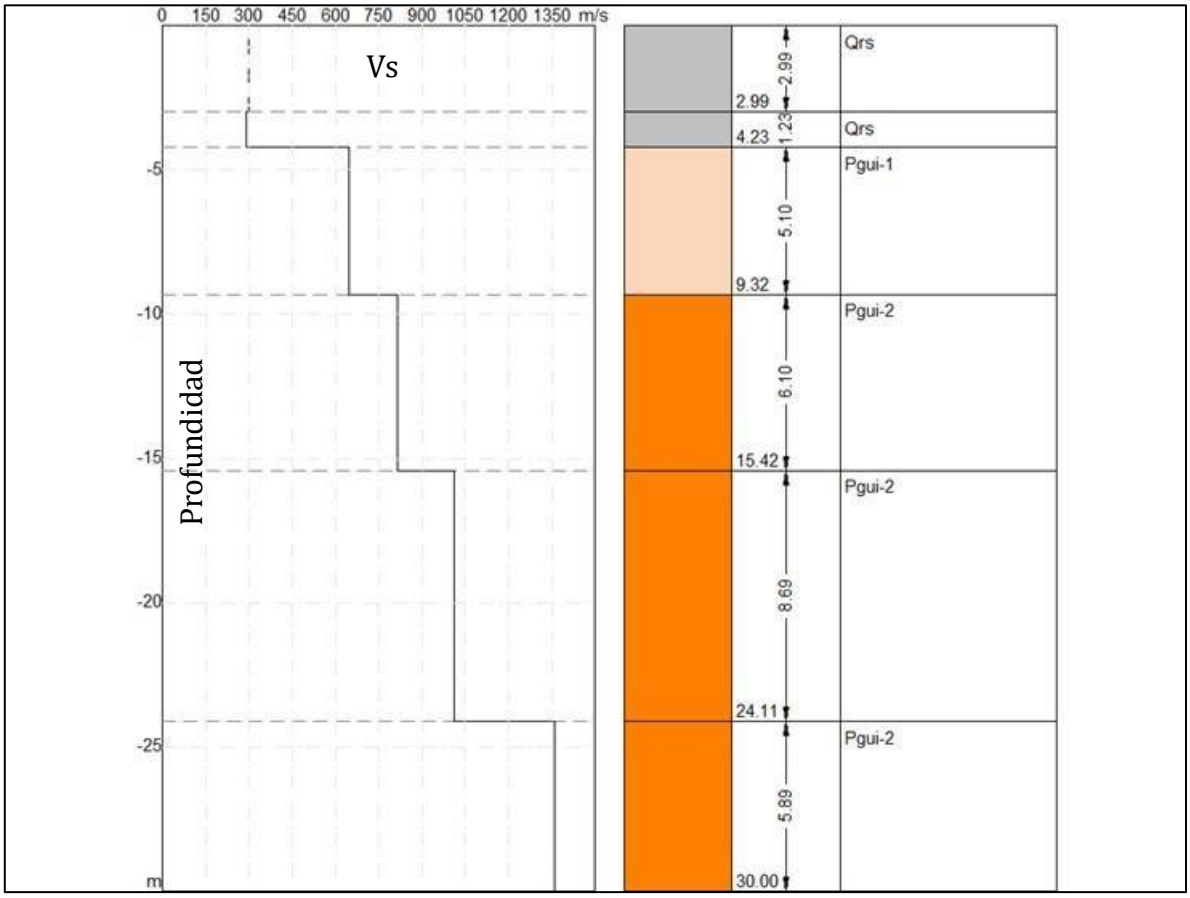


Figura 32 Perfil estratigráfico MASW No 2

A continuación, se realiza la descripción de los resultados obtenidos del MASW correlacionados con la información disponible del sitio de implementación del puente Casa Loma.

Tabla 18 Resultados MASW No 2

Profundidad del plano de cimentación [m]	0.00
Vs30 [m/sec]	705.82
Categoría de suelo	Rocas blandas y depósitos de suelo de grano grueso muy densos o suelos de grano fino muy consistentes con espesores sup. a 30 m

Suelo de tipo : Rocas blandas y depósitos de suelo de grano grueso muy densos o suelos de grano fino muy consistentes con espesores sup. a 30 m, caracterizados por un mejoramiento gradual de las propiedades mecánicas a según del aumento de la

profundidad y por valores Vs,30 comprendidos entre 360 m/s y 800 m/s (o NSPT,30 > 50 en suelos de grano grueso y cu,30 > 250 kPa en suelos de grano fino).

Tabla 19 Otros parámetros geotécnicos MASW No 2

n.	Profundidad [m]	Espesor [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densidad [kg/mc]	Coeficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]	NSPT	Qc [kPa]
1	2.99	2.99	299.75	479.84	1800.00	0.18	161.73	414.44	198.79	381.69	N/A	N/A
2	4.23	1.23	292.14	467.65	1800.00	0.18	153.62	393.65	188.82	362.54	N/A	N/A
3	9.32	5.10	647.16	1120.91	1900.00	0.25	795.74	2387.23	1326.24	1989.36	N/A	N/A
4	15.42	6.10	813.32	1408.71	2000.00	0.25	1322.97	3968.91	2204.95	3307.42	N/A	N/A
5	24.11	8.69	1012.16	1753.10	2000.00	0.25	2048.92	6146.75	3414.86	5122.29	N/A	N/A
6	oo	oo	1357.48	2351.22	2000.00	0.25	3685.50	11056.49	6142.49	9213.74	0	N/A

G0: Módulo de deformación al corte;
Ed: Módulo edométrico;
M0: Módulo de compresibilidad volumétrica;
Ey: Módulo de Young;

5. CONCLUSIONES EXPLORACIÓN INDIRECTA

De la Exploración geofísica realizada se concluye:

Línea No 1 – Puente Marichuela:

- Los resultados de la línea de refracción sísmica No. 1 indican que la zona de estudio se caracteriza por un modelo de dos capas con velocidades compresionales promedio. La primera capa, con una velocidad Vp1 de 337.44m/s, está asociada a materiales sueltos o no consolidados, posiblemente suelos arenosos de baja consolidación de la Formación Marichuela (Ngm-1), lo que se contrasta con el estudio de suelos y cimentaciones elaborado por el Ing Jaime Miranda (2019), en donde el registro de Perforación del Sondeo No 1 a profundidades de 1.5 a 3.5metros en el cual se identifican “Limo arenoso con presencia de arcilla color café oscuro, presencia de gravas de hasta 1” en un 10%. Presencia de bloques en un %5, de tamaño hasta 10cm.”, esta unidad geológica según el registro sísmico abarca hasta los 3.3m de profundidad.

  La segunda capa, con una velocidad Vp2 de 966.48 m/s, se interpreta como materiales de ripio normal, asociados, según la geología local, a la unidad de depósitos de areniscas blandas o friables con contenidos de arcillas de origen lacustre, esta unidad se identifica hasta profundidades hasta los 10.9 y 13.1m, conforme el estudio de suelos del Ing Jaime Miranda (2019), en Sondeo No 1 para profundidades de 3.5m a 10.30m se identifican “Arena limosa arcillosa color café rojizo con matriz de gravas en un 20%”, lo cual es consistente con la Formación Marichuela (Ngm-2),

  La tercera capa, con una velocidad Vp2 de 2105.38 m/s, se interpreta como materiales no ripable, asociados, según la geología local, a la unidad de roca , esta unidad se identifica a profundidades mayores a los 10.9 y 13.1m, y según el estudio de suelos del Ing Jaime Miranda (2019), en Sondeo No 1 para profundidades mayores a 10.30m se identifican “Arena limosa color café claro, humedad media, resistencia media.”, lo cual es consistente con la f Formación Marichuela (Ngm-2), ante la presencia de rocas arenisca de dureza media a alta, debido a la compactación relativa por aumento de profundidad.

- Por otra parte, los resultados del análisis MASW No. 1 revelan las siguientes velocidades de onda de corte (Vs): en la primera capa, se registran valores de Vs1 de 173.42 m/s, hasta una profundidad de 3 metros. Estos valores están asociados a materiales sueltos o no consolidados, correspondientes a la Formación Marichuela. (Ngm-1).

- La segunda capa registrada entre los 3.00 m hasta los 13.59m reporta Vs2 de 289.49 m/s a 466.65 m/s, lo cual se asocia a materiales de la Formación Marichuela. (Ngm-2).

- Por debajo de los 13.592 metros de profundidad, se identifica una tercera capa con una velocidad de onda de corte Vs2 de 767.74 m/s a 1259.32 m/s, asocia a materiales de la Formación Marichuela. (Ngm-3).

Línea No 2 Puente Casa Loma

- Los resultados de la línea de refracción sísmica No. 2 indican que la zona de estudio se caracteriza por un modelo de dos capas con velocidades compresionales promedio. La primera capa, con una velocidad Vp1 de 404.09m/s, está asociada a materiales sueltos o no consolidados, posiblemente suelos de origen aluvial de la unidad geológica Formación Río Siecha (Qrs), conformada por tantos y bloques de rocas areniscas en matriz limosa a anrenoarcillosa lo que se contrasta con el estudio de suelos y cimentaciones elaborado por el Ing Jaime Miranda (2019), en donde el registro de Perforación del Sondeo No 1 a profundidades de 0.5 a 2.5metros en el cual se identifican “Arena gruesa a fina limosa color café oscuro con intercalaciones de arcilla gris y presencia de gravas hasta de 1” en un 10%, Bloques de hasta 10 cm pequeños en un 5%.”, estsa unidad geológica según el registro sísmico abarca hasta los 5.9m de profundidad.

  La segunda capa, con una velocidad Vp2 de 1612.89 m/s, se interpreta como materiales de ripio normal, asociados, según la geología local, a la unidad de roca areniscas blanda de la Formación Usme Inferior, esta unidad se identifica hasta profundidades hasta los 8.2 y 14.9m, conforme el estudio de suelos del Ing Jaime Miranda (2019), en Sondeo No 1 para profundidades de 2.5m a 8.20m se identifican “Arena limosa arcillosa color habano claro con matriz de gravas en un 20%”, lo cual es consistente con la formación Usme Inferior Pgui-1 ante la presencia de arenas finas.

  La tercera capa, con una velocidad Vp2 de 2292.33 m/s, se interpreta como materiales no ripable, asociados, según la geología local, a la unidad de roca arcillosa blanca a intermedia, esta unidad se identifica a profundidades mayores a los 8.2 y 14.9m, y según el estudio de suelos del Ing Jaime Miranda (2019), en Sondeo No 1 para profundidades mayores a 8.20m se identifican “Limo arcilloso color gris oscuro, humedad media, de media plasticidad y resistencia media.”, lo cual es consistente con la formación Usme Inferior (Pgui-2) ante la presencia de unidades de arcillas o arcillolitas.

- Por otra parte, los resultados del análisis MASW No. 2 revelan las siguientes velocidades de onda de corte (Vs): en la primera capa, se registran valores de Vs1 que oscilan entre 292.14 y 299.75 m/s, hasta una profundidad de 4.23 metros. Estos valores están asociados a materiales sueltos o no consolidados, correspondientes a la Formación Río Siecha (Qrs).

  La segunda capa registrada hasta los 9.32m reporta Vs2 de 647.16 m/s, lo cual se asocia a materiales de areniscas friables de la unidad Formación Usme Inferior Pgui-1).

  Por debajo de los 9.32 metros de profundidad, se identifica una tercera capa con una velocidad de onda de corte Vs2 de 813.32 m/s a 1357.4 m/s, asociada a rocas blandas. De acuerdo con la exploración geotécnica del proyecto, esta capa corresponde a materiales tipo arcillolita de la Formación Usme Inferior Pgui-2).

En Conclusión, los resultados e interpretaciones arrojan que hasta los 30 metros superficiales, las velocidades promedio de onda de corte ($\overline{Vs}$) en arrojan valores entre 520.97 m/s (Puente Marichuela) 705.82 m/s (Puente Casa Loma) de acuerdo con lo cual en el área predomina una clasificación y/o caracterización de perfiles de suelos rígidos correspondientes a un perfil de ***TIPO C***, el cual se recomienda sea adoptado para los análisis estructurales.

Tabla 20 Clasificación de los perfiles de suelo basados en el parámetro de velocidad media de la onda de cortante

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente.	$\overline{Vs} \geq 1500\ ^{m}/_{s}$
B	Perfil de roca de rigidez media.	$1500\ m/s > \overline{Vs} \geq 760\ ^{m}/_{s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante	$760\ m/s > \overline{Vs} \geq 360\ ^{m}/_{s}$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de onda de cortante.	$360\ m/s > \overline{Vs} \geq 180\ ^{m}/_{s}$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante	$180\ m/s > \overline{Vs}$

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial Dirección del Sistema Habitaciona, 2010)

- Las relaciones de poisson son obtenidas mediante la siguiente ecuación $\nu = \{(Vp/Vs)^2 - 2\}/2\{(Vp/Vs)^2 - 1\}$, donde las velocidades Vp son obtenidas de la interpretación de la refracción sísmica y las velocidades Vs son obtenidas de la interpretación o análisis MASW.

- Las propiedades de densidad son adoptadas según el comportamiento de cada material identificado, sin embargo, una vez se cuente con exploración geotécnica directa y ensayos de laboratorio los resultados podrán validarse

- Los ensayos LRS y/o MASW son ensayos para un análisis indirecto que tiene un grado de aproximación aceptable, sin embargo, requieren de exploración geotecnia directa y ensayos de laboratorio para ajustar el modelo del subsuelo según sus características y propiedades mecánicas.

6. AJUSTES AL DISEÑO DE CIMENTACIÓN

Teniendo en cuenta los resultados de medición de velocidad en ondas p para los materiales rocosos encontrados inmediatamente después en profundidad a los materiales aluviales sueltos, se procederá a asignar un valor de resistencia a la compresión uniaxial que permitirá establecer los parámetros de diseño geotécnico en el criterio de falla de Mohr-Coulomb, según se explica a continuación:

Acorde con Poulos H, la resistencia a la compresión simple de rocas sedimentarias se puede estimar empleando la velocidad de las ondas P, a partir de las siguientes correlaciones:

Tabla 21 Curva de inversión LSR No 1

Equation Number	*Correlation*	*Rock type*
1	$UCS = 0.78\ V_p^{0.88}$	Volcanic group
2	$UCS = 9.95V_p^{1.21}$	Marl, limestone, dolomite, sandstone, hematite, serpentine, diabase, tuff
3	$UCS = 22.03\ V_p^{1.247}$	Granites
4	$UCS = 2.304\ V_p^{2.4315}$	Diorite, quartzite, sandstone, limestone, marble, granodiorite, basalt, travertine, trachyte, tuff, andesite
5	$UCS = 12.746\ V_p^{1.194}$	Limestone, sandstone, travertine, marl, dolomite, mudrock-shale, slate, siltstone

Note: UCS in MPa, V_p in km/s

Con lo anterior, se tienen los valores de resistencia a la compresión simple detallados en la siguiente tabla:

Tabla 22 Obtención de resistencia a la compresión simple LSR No 1

n.	Descripción	Profundidad [m]	Espesor [m]	Peso específico [kg/mc]	Coeficiente Poisson	Nivel freático	Vp [m/sec]	UCS [MPa]
1	Ngm-1	3.00	3.00	1800.0	0.3	No	300.4	-
2	Ngm-2	4.60	1.60	1900.0	0.3	No	541.6	6.1
3	Ngm-2	8.60	4.00	1900.0	0.3	No	879.2	10.9
4	Ngm-2	13.59	4.99	1900.0	0.3	No	873.0	10.8
5	Ngm-3	18.55	4.96	2000.0	0.3	No	1436.3	19.6
6	Ngm-3	oo	oo	2000.0	0.3	No	2356.0	35.5

Los datos obtenidos anteriormente, aunados a otros aspectos descritos en este documento respecto a las características de la formación Marichuela presente en la zona de estudio, permiten emplear la herramienta gratuita RocData para obtener los parámetros de resistencia Morh-Coulomb:

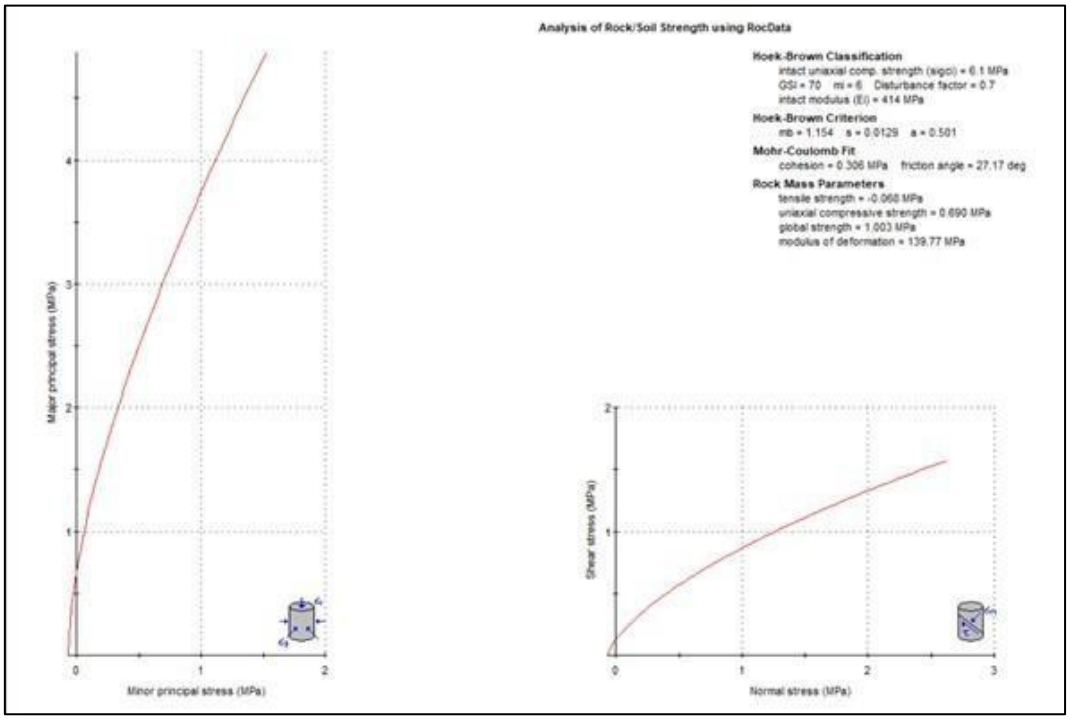


Figura 33 Parámetros geotécnicos de la roca en el sector Marichuela

En estos términos, se emplearán los parámetros geotécnicos ϕ=27.17° y C=0.306 MPa, de manera conservadora para asignación de resistencia a todo el perfil de roca en el puente Marichuela, aun cuando a mayores profundidades la velocidad de la onda P es mayor y por ende la calidad de la roca.

Lo propio se plantea para el puente de Casa Loma, obteniendo los siguientes valores de UCS en Megapascales:

Tabla 23 Obtención de resistencia a la compresión simple LSR No 2

n.	Descripción	Profundidad [m]	Espesor [m]	Peso específico [kg/mc]	Coeficiente Poisson	Nivel freático	Vp [m/sec]	UCS [MPa]
1	Qrs	2.99	2.99	1800.0	0.2	No	479.8	-
2	Qrs	4.23	1.23	1800.0	0.2	No	467.6	-
3	Pgui-1	9.32	5.10	1900.0	0.3	No	1120.9	14.6
4	Pgui-2	15.42	6.10	2000.0	0.3	No	1408.7	19.2
5	Pgui-2	24.11	8.69	2000.0	0.3	No	1753.1	24.9
6	Pgui-2	oo	oo	2000.0	0.3	No	2351.2	35.4

Los datos obtenidos anteriormente, aunados a otros aspectos descritos en este documento respecto a las características de la formación Marichuela presente en la zona de estudio, permiten emplear la herramienta gratuita RocData para obtener los parámetros de resistencia Morh-Coulomb:

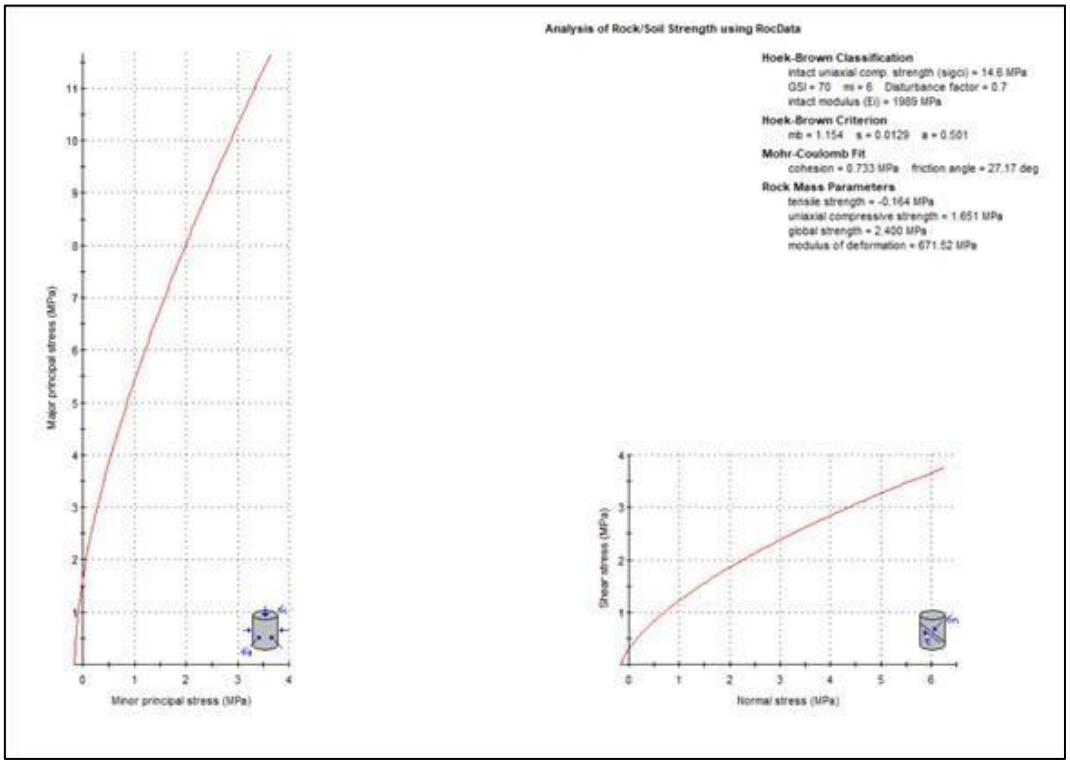


Figura 34 Parámetros geotécnicos de la roca en el sector Casa Loma

En estos términos, se emplearán los parámetros geotécnicos ϕ=27.17° y C=0.733 MPa, de manera conservadora para asignación de resistencia a todo el perfil de roca en el puente casa Loma, aun cuando a mayores profundidades la velocidad de la onda P es mayor y por ende la calidad de la roca.

Con base en estos perfiles, y considerando las profundidades de cimentación establecidas, se llevarán a cabo los análisis geotécnicos de capacidad portante y asentamientos para la cimentación proyectada.

En este capítulo se presentan las metodologías utilizadas para el cálculo de cimientos profundos mediante pilotes.

6.1 Capacidad portante

La resistencia nominal de los pilotes según el numeral 10.8.3.5 del CCP-14, se toma como:

$$Qt=Qs*FR+Qp*FR-Wp \quad \text{(Condición Estática)}$$

$$Qt=Qs+Qp-Wp \quad \text{(Condición Seudo-Estática)}$$

Dónde:

Qs: Aporte por fricción en el fuste (ton).

Qp: Aporte por punta (ton).

Wp: Peso del pilote (ton).

F.R.: Factor de Reducción (-). Que cumple con el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes de 2014 en su numeral 10.5.5.2.4 el cual presenta los factores de resistencia a aplicar para el diseño de pilotes/caissons. Los factores de resistencia se relacionan en la tabla:

Método/Suelo/Condición			**Factor de resistencia**
La resistencia nominal a la compresión axial de pilotes perforados individuales, ϕ_{sta}	Resistencia por fuste en arcilla	Método α (O’Neill and Reese, 1999)	0,45
	Resistencia por punta en arcilla	Esfuerzo total (O’Neill and Reese, 1999)	0,40
	Resistencia por fuste en arena	Método β (O’Neill and Reese, 1999)	0,55
	Resistencia por punta en arena	(O’Neill and Reese, 1999)	0,50
	Resistencia por fuste en IGMs	(O’Neill and Reese, 1999)	0,60
	Resistencia por punta en IGMs	(O’Neill and Reese, 1999)	0,55
	Resistencia por fuste en roca	Horvath and Kennedy (1979) O’Neill and Reese, (1999)	0,55
	Resistencia por fuste en roca	Carter and Kulhawy (1988)	0,50
	Resistencia por punta en roca	Sociedad Geotécnica Canadiense (1985) Método de medición de la presión (Sociedad Geotécnica Canadiense, 1985) O’Neill and Reese, (1999)	0,50

Método/Suelo/Condición			Factor de resistencia
Falla en bloque, ϕ_b	Arcilla		0,55
Resistencia al levantamiento de pilotes perforados individuales, ϕ_{up}	Arcilla	Método α (O’Neill and Reese, 1999)	0,35
	Arena	Método β (O’Neill and Reese, 1999)	0,45
	Roca	Horvath and Kennedy (1979) Carter and Kulhawy (1988)	0,40
Resistencia al levantamiento del grupo de pilotes ϕ_{ug}	Arena y arcilla		0,45
Resistencia geotécnica horizontal del pilote individual o grupo de pilotes	Todos los materiales		1,00

Tabla 24 Factores de resistencia para pilotes perforados

Fuente: CCP-14 tabla 10.5.5.2.4.1 Factores de resistencia para la resistencia geotécnica de pilotes perforados.

El aporte por fricción en el fuste es calculado por medio de las siguientes ecuaciones:

La resistencia friccional y la resistencia de punta de pilotes apoyados en suelo se determinaron empleando la metodología presentada en el Manual EM 1110-2-2906 del U.S Army Corps of Engineers y las metodologías AASHTO descritas a continuación:

Capacidad de carga por Fuste – Estratos Cohesivos (Metodología Alfa)

La resistencia friccional de los pilotes pre-excavados en suelos cohesivos se estimó con la siguiente aproximación:

$$q_s = \alpha S_u$$

Donde,

Su: resistencia al corte en condición no drenada (MPa)

α: factor de adherencia (adimensional)

Se deberá considerar que la siguiente porción de los pilotes perforados, no contribuye al desarrollo de resistencia por fricción superficial:

- Como mínimo los 1.5 m superiores de cualquier pilote perforado.
- En el caso de los pilotes rectos, una longitud inferior del pilote encima de la punta igual al diámetro del fuste.
- La periferia de los pilotes acampanados.
- Una distancia por encima del extremo acampanado igual al diámetro del fuste.

Los valores de α se presentan en la Tabla 25:

S_u (MPa)	α
<0.2	0.55
0.20-0.30	0.49
0.30-0.40	0.42
0.40-0.50	0.38
0.50-0.60	0.35
0.60-0.70	0.33
0.70-0.80	0.32
0.80-0.90	0.31
>90	Tratar como roca

Tabla 25. Valores de α para la determinación de la resistencia lateral en suelo cohesivo (Reese y O'Neill, 1988)

<u>Capacidad de carga por Fuste – Estratos Arenosos (Metodología US Army)</u>

$$Q_s = \Delta L.\, p.\, K_0.\, \sigma'_v.\, \tan\frac{2}{3}\boldsymbol{\phi}$$

Dónde:

Qs: Carga de trabajo por fuste (ton).

p: Perímetro del pilote (m).

K0: Coeficiente de presión de tierras en reposo

$\sigma'v$: Esfuerzo vertical efectivo (ton/m2).

ϕ: Ángulo de fricción del material de soporte (°).

ΔL: Δ Longitud del pilote (Espesor del estrato), m.

Capacidad de carga por Fuste – Estratos Arcillosos o Mixtos (Metodología Beta)

$$Q_s = \Delta L.\, p.\, \sigma'_v.\, \beta + \Delta L.\, p.\, Ca$$

Dónde:

Qs: Carga de trabajo por fuste (ton).

p: Perímetro del pilote (m).

Ca: Adhesión (ton/m^2).

$\sigma'v$: Esfuerzo vertical efectivo (ton/m^2).

ΔL: Δ Longitud del pilote (Espesor del estrato), m.

β: Factor Beta. Se define de dos maneras:

β= $(1-sen\phi_R)*tan\phi_R*\sigma'v$, Arcillas normalmente consolidadas:

β= $(1-sen\phi_R)*tan\phi_R*\sqrt{(OCR*\sigma'v)}$, Arcillas sobreconsolidadas:

OCR= Relación de sobreconsolidación

El aporte por punta se obtiene a través de la metodología recomendada por el USACE[1] a partir del cálculo de un factor adimensional de carga, y empleando la siguiente ecuación:

Capacidad de carga por Punta – Estratos Arcillosos o Mixtos (Metodología Vesic-1979)

$$\mathrm{Q_p} = \mathrm{A}_t(c.N^*_c + \sigma´_o.N^*_\sigma)$$

Dónde:

Qp: Carga de trabajo por punta (ton).

σ´o: Esfuerzo efectivo normal medio del terreno a nivel de la punta del pilote (ton/m2).

$$\sigma´_o = (\frac{1+2k_0}{3}).\sigma´_v$$

$$k_o = (1 - sin\,\emptyset)$$

N*σ, N*c: Factor adimensional de carga que dependen del Irr, índice de rigidez reducida para el suelo (-) y ϕ.

At: Área de la Punta del elemento (m^2).

Capacidad de carga por Punta – Estratos Arenosos (Metodología US Army)

$$\mathrm{Q_p} = \mathrm{A}_t.N_q.\sigma_v$$

[1] Design of pile foundations US army Corps Engieneers. January 1991.

Dónde:

Qp: Carga de trabajo por punta (ton).

σv: Esfuerzo vertical efectivo a nivel de la punta del elemento (ton/m^2).

Nq: Factor adimensional de carga (-)[1].

At: Área de la Punta del elemento (m^2).

Capacidad de carga por Punta – Estratos Arcillosos (Metodología Alfa)

La resistencia de punta de pilotes perforados en suelos cohesivos se determinó empleando la siguiente ecuación:

$$q_p = N_c S_u \leq 4.0$$

Para lo cual:

$$N_c = 6\,[1 + 0.2\,(\frac{Z}{D})] \leq 9.0$$

Donde:

D: Diámetro del pilote perforado (mm)

Z: Penetración del pilote perforado (mm)

Su: Resistencia al corte en condición no drenada (MPa)

El valor de Su se deberá determinar a partir de los resultados de ensayos in situ y/o en laboratorio de muestras no alteradas obtenidas dentro de una profundidad de 2.0 diámetros por debajo de la punta del pilote. Si el suelo a 2 diámetros por debajo de la punta tiene Su < 0.024 MPa, el valor de Nc se deberá reducir en un tercio.

Finalmente, la expresión para estimación de capacidad de carga por punta de esta metodología se simplifica de la siguiente manera:

$$\mathrm{Q_p} = 9.S_u.\mathrm{A}_t$$

Dónde:

Su: Resistencia al corte en condición no drenada (MPa)

At: Área de la Punta del elemento (m^2).

6.2 Asentamientos

En el caso de los asentamientos de pilotes, estos se evaluarán por teorías elásticas que permitan estimar desplazamientos por fricción, por punta y por acortamiento elástico.

Asentamientos elásticos en cimentaciones profundas

Los asentamientos elásticos en cimentaciones profundas para el caso de pilotes perforados, el asentamiento elástico total en suelo bajo una carga de trabajo vertical Q_w, está dado por:

$$S_e = S_{e(1)} + S_{e(2)} + S_{e(3)}$$

Donde:

Se(1): asentamiento elástico del pilote

Se(2): asentamiento del pilote causado por la carga en la punta del pilote

Se(3): asentamiento del pilote causado por la carga transmitida a lo largo del fuste del pilote

La deformación por acortamiento elástico del pilote se evalúa usando los principios fundamentales de la mecánica de materiales como:

$$S_{e(1)} = \frac{\left(Q_{wp} + \xi Q_{ws}\right) L}{A_p E_p}$$

Donde:

Qwp: carga en la punta del pilote bajo condición de carga de trabajo

Qws: carga por resistencia de fricción bajo condición de carga de trabajo

Ap: área de la sección transversal del pilote

L: longitud del pilote

Ep: módulo de elasticidad del material del pilote

La magnitud de ξ dependerá de la naturaleza de la distribución de la resistencia por fricción unitaria a lo largo del fuste (*f*). Para el cálculo se puede adoptar una distribución triangular de *f*, por lo que la magnitud de ξ es aproximadamente de 0.67 (Vesic, 1977). El asentamiento de un pilote causado por la carga en la punta se expresa de la siguiente forma:

$$S_{e(2)} = \frac{q_{wp} D}{E_s}\left(1 - \mu_s^2\right) I_{wp}$$

Donde:

D: ancho o diámetro del pilote

q_{wp}: carga puntual por área unitaria en la punta del pilote = Q_{wp}/A_p

E_s: módulo de elasticidad del suelo en o bajo la punta del pilote

μ_s: relación de Poisson del suelo

I_{wp}: factor de influencia ~ 0.85

El asentamiento de un pilote causado por la carga transmitida por el fuste se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$S_{e(3)} = \left(\frac{Q_{sw}}{pL}\right)\frac{D}{E_s}\left(1-\mu_s^2\right)I_{sw}$$

Donde:

p: perímetro del pilote

L: longitud de penetración

I_{ws}: factor de influencia

$$I_{sw} = 2 + 0.35\sqrt{\frac{L}{D}}$$

<u>Módulo de Reacción De Los Pilotes</u>

$$k = 0.65\sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{E_F I_F}}\frac{E_s}{B(1-\mu_s^2)}$$

Donde:

Kh= Modulo de reacción horizontal de Vesic 1961

Es= Módulo del suelo

B=D= Diámetro del pilote

Ep= Módulo de pilote

μ= relación de poisson del suelo

Ip=momento de inercia de la sección transversal de la cimentación.

$$Kv = \frac{q}{\Delta}$$

Donde:

Kv: Módulo de reacción vertical

q= carga por área unitaria

Δ= asentamiento

6.3 Consideraciones generales para los diseños geotécnicos

En este capítulo se presentan los resultados de los cálculos preliminares para pilote individual, con base en la caracterización geotécnica definida a partir de la información primaria.

Para el desarrollo de los análisis geotécnicos, se plantean las siguientes premisas:

- Con base en las solicitaciones de carga estructural, se considera que sobre la cimentación actuarán cargas axiales del orden de 1000 kN (100 Ton), las cual corresponden a la sumatoria de cargas verticales por estribo sin mayorar, entre las que se cuentan la carga muerta + el peso de la superestructura, el peso propio del estribo, la losa de aproximación, peso propio del cimiento (aunque es de precisar que este es restado directamente a la capacidad de carga en las memorias de cálculo geotécnicas), carpeta asfáltica, y carga viva vehicular.
- Con lo anterior se considera un sistema de cimentación con pilotes o caissons que, se encargarán de transmitir la totalidad de la carga al suelo de fundación.
- Se analizarán cimientos de distintos diámetros: 1.00 m, 1.10 m, 1.20 m, 1.30 m y 1.40 m, como elemento seleccionado de cimentación. Esto para que el Cliente logre junto con el equipo de diseño estructural, encontrar desde el punto de vista técnico y económico, la alternativa que brinde los mejores resultados.
- Se considera una longitud de cimiento máxima de 15.0 m.
- La cantidad de pilotes a implementar depende del diámetro a considerar.

- Se define una separación mínima entre pilotes de 3 veces el diámetro del pilote analizado, esto con el propósito de obtener una eficiencia de grupo del 100%.
- Se consideran para los análisis geotécnicos los factores de carga por fuste y punta, de conformidad con lo indicado en el CCP-14 y en el presente documento.

6.4 Cimentación profunda

Las siguientes figuras presentan la capacidad de carga axial, así como la capacidad por tracción para la condición de estado límite de resistencia, para cimientos profundos del puente del Sector Marichuela y el puente del Sector Casa Loma, sobre la quebrada Yomasa, para el perfil del sondeo 1 (izquierda) como para el perfil del sondeo 2 (derecha).

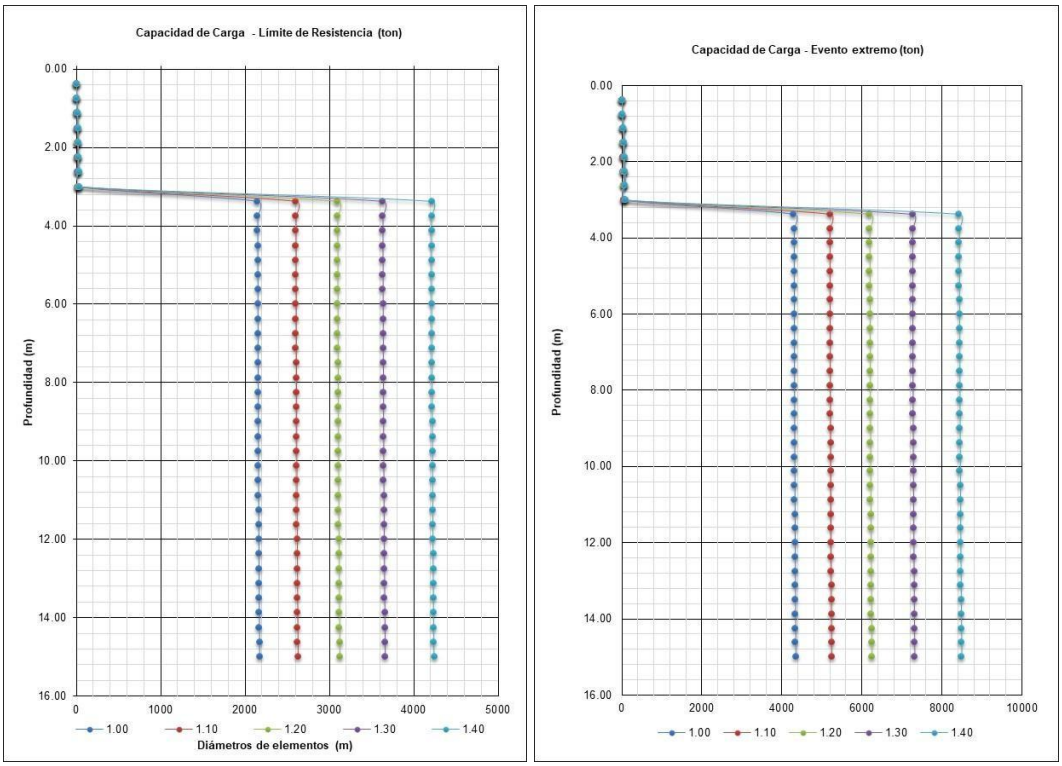


Figura 35 Capacidad de carga axial de cimientos profundos en condición de estado límite de resistencia - Marichuela

Fuente: Elaboración propia

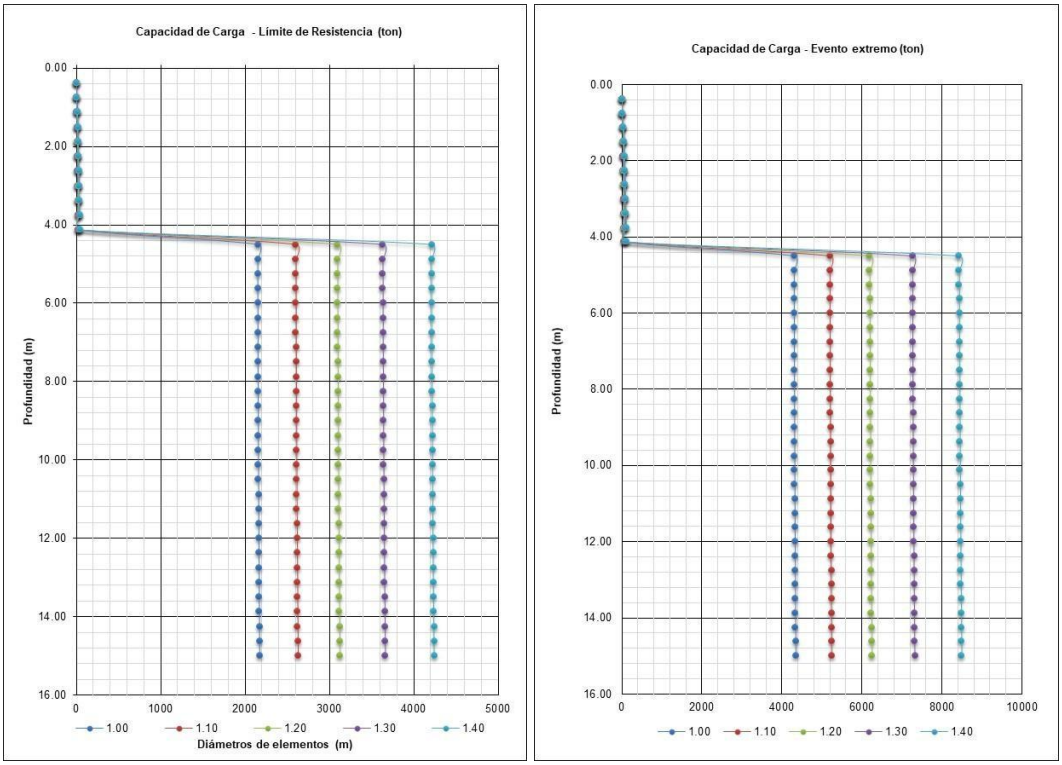


Figura 36 Capacidad de carga axial de cimientos profundos en condición de estado límite de resistencia – Casa Loma

Fuente: Elaboración propia

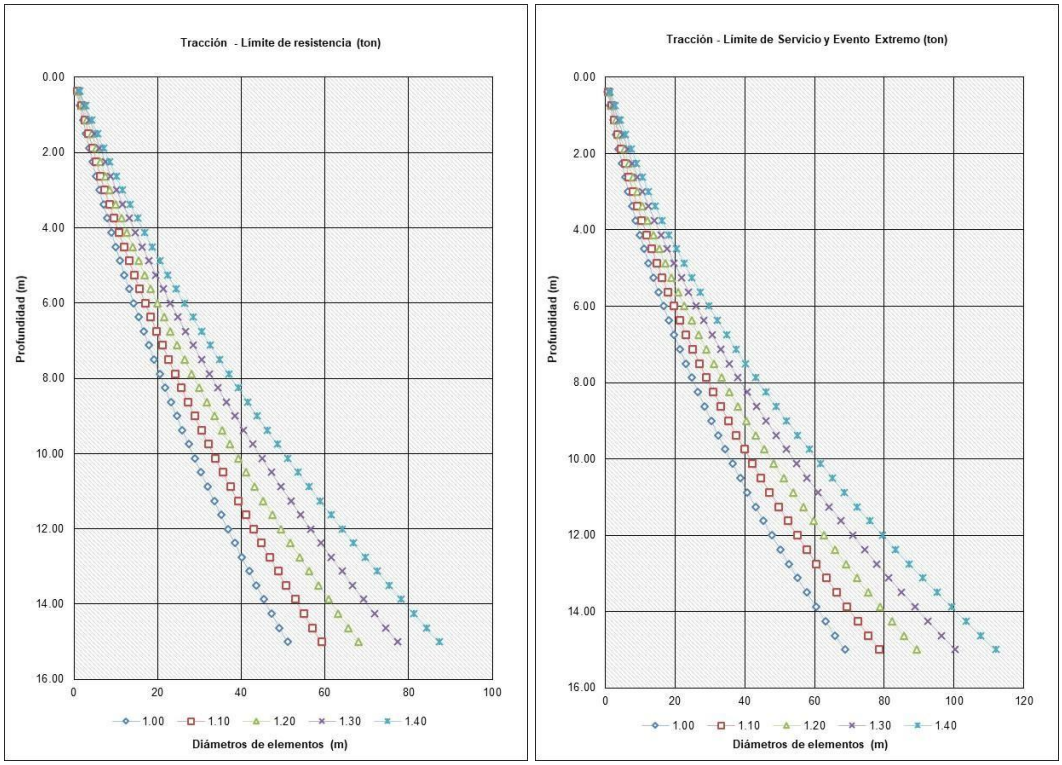


Figura 37 Capacidad de carga por tracción de cimientos profundos en condición de estado límite de resistencia – Marichuela
Fuente: Elaboración propia

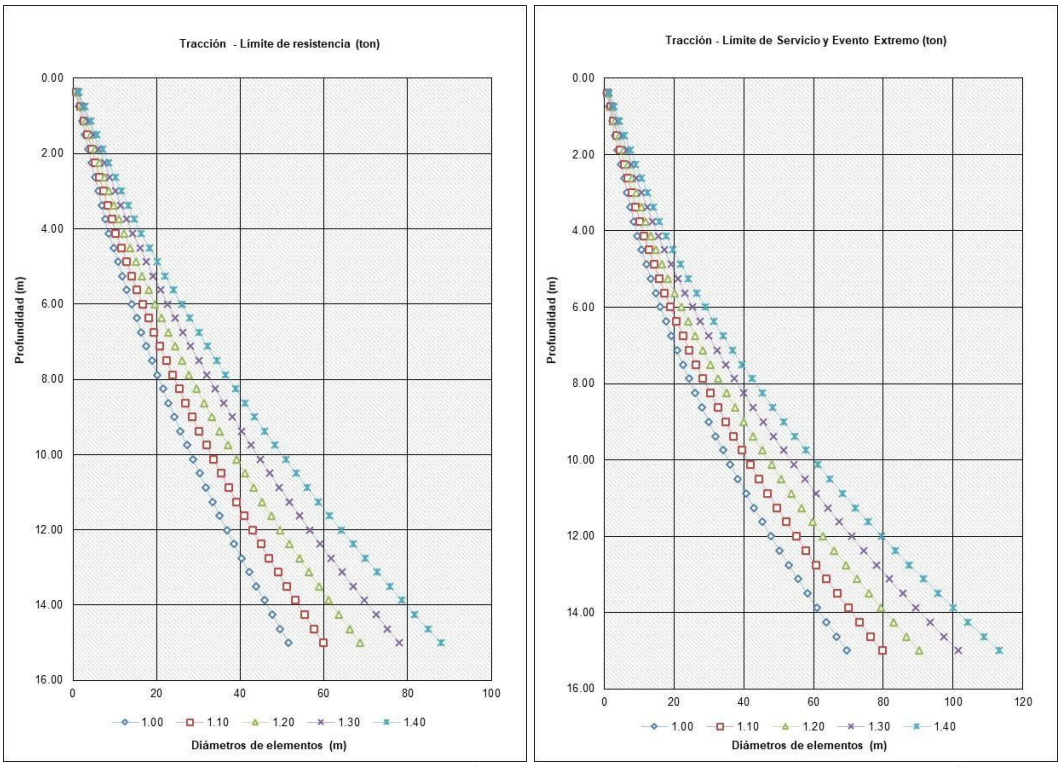


Figura 38 Capacidad de carga por tracción de cimientos profundos en condición de estado límite de resistencia – Casa Loma
Fuente: Elaboración propia

o

Así mismo, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan las estimaciones de asentamientos elásticos obtenidas para los cimientos profundos, para el Puente Marichuela (izquierda) como para el puente Casa Loma (derecha).

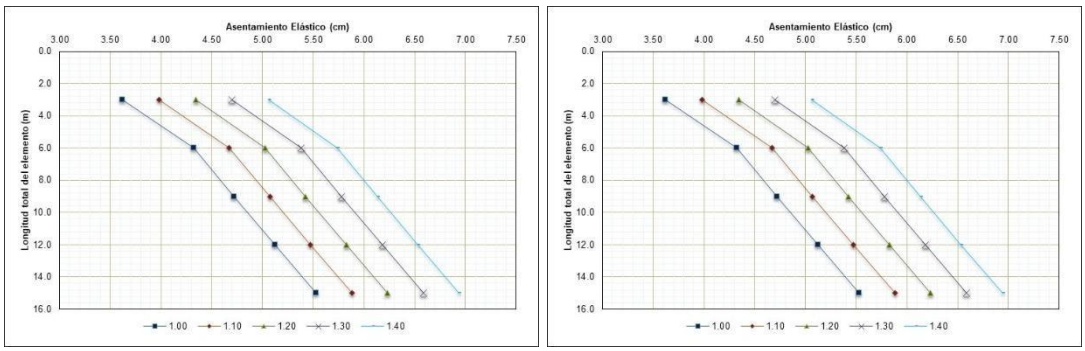


Figura 39 Asentamientos elásticos de cimientos profundos – Marichuela y Casa Loma
Fuente: Elaboración propia

De la misma manera, en la Ilustración 1 se presentan de manera resumida los módulos de reacción vertical y horizontal correspondientes a los ábacos de diseño de cimentación profunda mostrados con anterioridad, para el perfil del sondeo 1 (izquierda) como para el perfil del sondeo 2 (derecha).

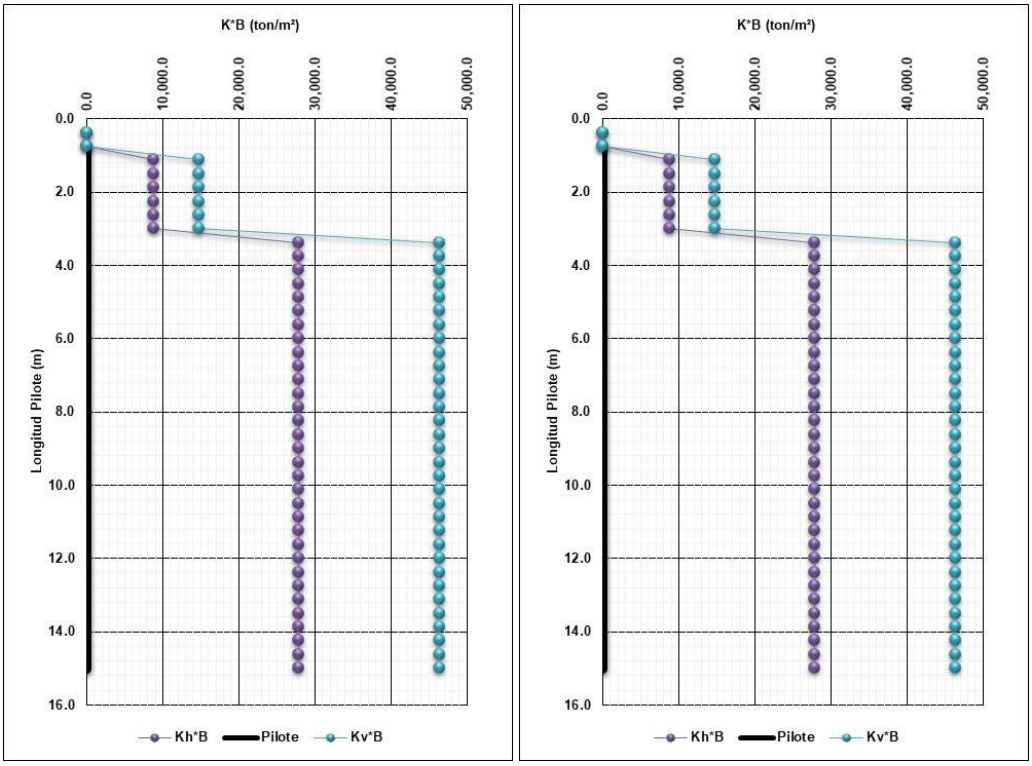


Ilustración 1 Módulos kh y kv para cimentación profunda

Fuente: Elaboración propia

De lo anterior se puede concluir que la instalación de caissons en el estrato inmediatamente mas profundo a los depósitos aluviales garantiza la capacidad de carga de los cimientos de manera conservadora.

PABLO JOSE HERNANDEZ HERNANDEZ
ESPECIALISTA GEOTÉCNICO DE OBRA

7. BIBLIOGRAFÍA

- Guía de Usuario IPI2Win, Universidad Estatal de Moscú Facultad de Geología
- Departamento de Geofísica. Moscú - 2000
- ITC, 1992. Physical Properties of Rocks, International Institute for Aerospace Surveys and Earth Sciences, Delft, The Netherlands.
- ITC, 1985. Resistivity Surveying, Pictorical Atlas and Lecture Notes, International Institute for Aerospace Surveys and Earth Sciences, Delft, The Netherlands.
- SHERIFF, R.E. 1994. Enciclopedic dictionary of Exploration Geophysics, third edition, Society of Exploration Geophysicist, Tulsa, United States of America.
- TELDFORD, W.M., GELDART L.P., SHERIFF, R.E. 1994. Applied Geophysics, second edition, Cambridge University Press, London, United Kingdom.}
- Software Geostru- EasyRefract
- Software Geostru- EasyMASW
- Estudio de suelos y cimentaciones puente peatonal Casaloma, Bogota – Cundinamarca, Diciembre de 2019, Ing. Jaime Miranda.
- Estudio de suelos y cimentaciones puente peatonal Marichuela, Bogota – Cundinamarca, Diciembre de 2019, Ing. Jaime Miranda
- USE OF SHEAR WAVE VELOCITY FOR FOUNDATION DESIGN, Harry G Poulos, Tetra Tech Coffey, Sydney, Australia