

INFORME DE SUELOS

Viernes, 8 de SETIEMBRE de 2023.

OBRA: NUEVA USINA USHUAIA.

COMITENTE: HSE INGENIERIA.

UBICACION: SECTOR CANTERAS DESEMBOCADURA RIO OLIVIA - COORDENADAS S 54°47.696', O 68°13.510' – USHUAIA - TIERRA DEL FUEGO.


INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de estudiar la rigidez y composición se estudia el subsuelo profundo del sector arriba indicado se utiliza técnica geofísica MASW, usando geófonos de sensibilidad vertical, para el análisis de ondas Rayleigh, método explicado en páginas siguiente, apoyado por estudios de refracción sísmica con una vista 2D del horizonte más probable.

Se obtiene con ello un perfil estratigráfico caracterizando la velocidad de ondas corte o VS para cada capa encontrada, y que se relacionan con los parámetros mecánicos y de deformación de los suelos, necesarios para los estudios ingeniería de la obra a ejecutarse.

❑ TAREAS DE CAMPO

- Se realizó un arreglo de 16 geófonos espaciados cinco metros entre sí, con longitud de 75 metros, dispuestos en la zona central de estudio con una orientación sur 30° al suroeste mostrada en el croquis de ubicación.
- Se llevó a cabo una calicata de control en la zona mostrando la conformación del subsuelo.



FABIO A. ZARATE
Ingeniero Civil
M.P. C.I.T.D.F.: 001
M.N. 14363

❏ DESCRIPCION DEL METODO

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.

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.

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.

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.

Modelo

A partir de un modelo geotécnico sintético caracterizado por espesor, densidad, coeficiente

$$v = \lambda \times v$$

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.

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.

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.

❑ TAREAS DE LABORATORIO

Se extrajo referencialmente una muestra superficial de suelos representativa del perfil, el cual se muestra muy uniforme en profundidad, (ver Figura 1), efectuando la granulometría para su clasificación.



Figura 1: Perfil natural debajo de la zona de estudio.

PERFILES DE SUELO – NIVEL FREÁTICO

Resumidamente, la descripción es la siguiente:

Ambos tipos de ensayos muestran perfiles similares en toda la profundidad estudiada, formada principalmente por suelos residuales propios de la zona, con arenas, limos firmes, gravas, Bochones y rocas.

De la calicata realizado se puede ver un perfil de suelo característico de zonas glaciarias formado por morenas, producto del arrastre y compresión de aquellos, con una matriz formada por limos grises azulados poco cohesivos muy preconsolidados, de muy baja permeabilidad, con una estructura formada por gran cantidad de rocas angulares y subangulares del orden de 4 a 6 “, con algunos bochones dispersos de gran tamaño, del orden de 20”.

El nivel freático no fue encontrado en la profundidad de estudio ratificándose por las velocidades compresionales inferiores a 1500m/seg, distintiva de las aguas, mostradas en la refracción sísmica realizada.

Estas características se mantienen minimamente hasta profundidades del orden de 15 metros según los perfiles determinados.

Los valores de penetración normal SPT obtenidos por correlación con velocidades de ondas de corte VS muestran entre 4 y 35 golpes/pie, hasta 4.30 m. Aumentando por encima de 130 para profundidades debajo de -5.00m, todas relacionadas al nivel natural actual.

Debajo de -15.00m metros las velocidades alcanzan 700 m/seg, característico de horizontes de roca blanda o granulares muy compactos y llegan a 900 m/seg de bajo de -17 m. valor representativo de roca firme, con valores correlacionados de N_{SPT} entre sobre los 350 golpes/pie.

Ver clasificación de suelos en página 16, respecto a la velocidad de ondas de corte.

La zona previamente fue una cantera donde se extrajo el material granular superior en varios metros hasta alcanzar este perfil descrito en el informe.

❑ DESARROLLO DEL METODO MASW

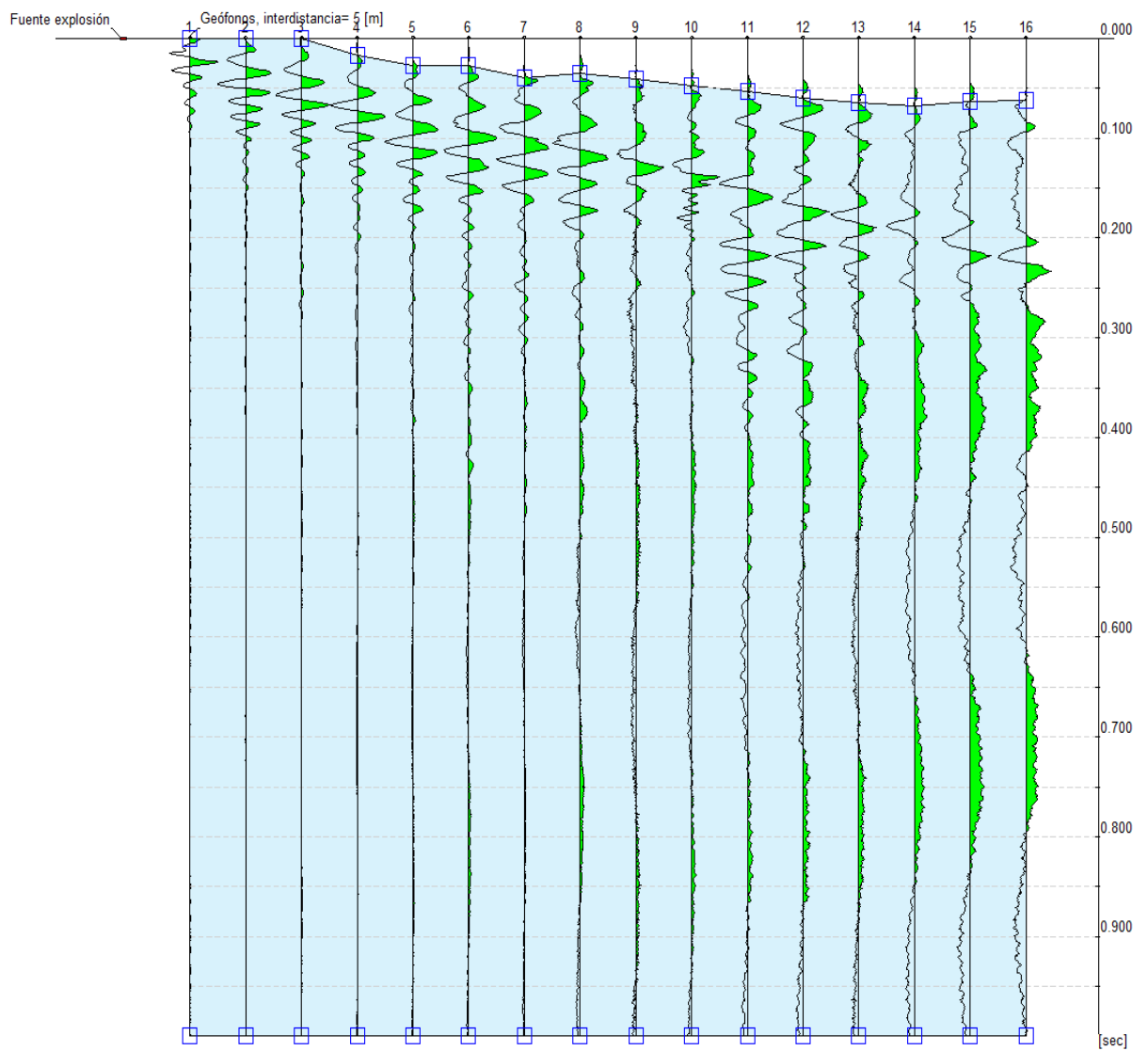
1. ARREGLO

Orientación y sentido del arreglo NORTE-SUR 30° AL SUROESTE

Trazas

N. trazas	16
Duración de adquisición [msec]	1000.0
Interdistancia geófonos [m]	5.0
Periodo de muestreo [msec]	1.00

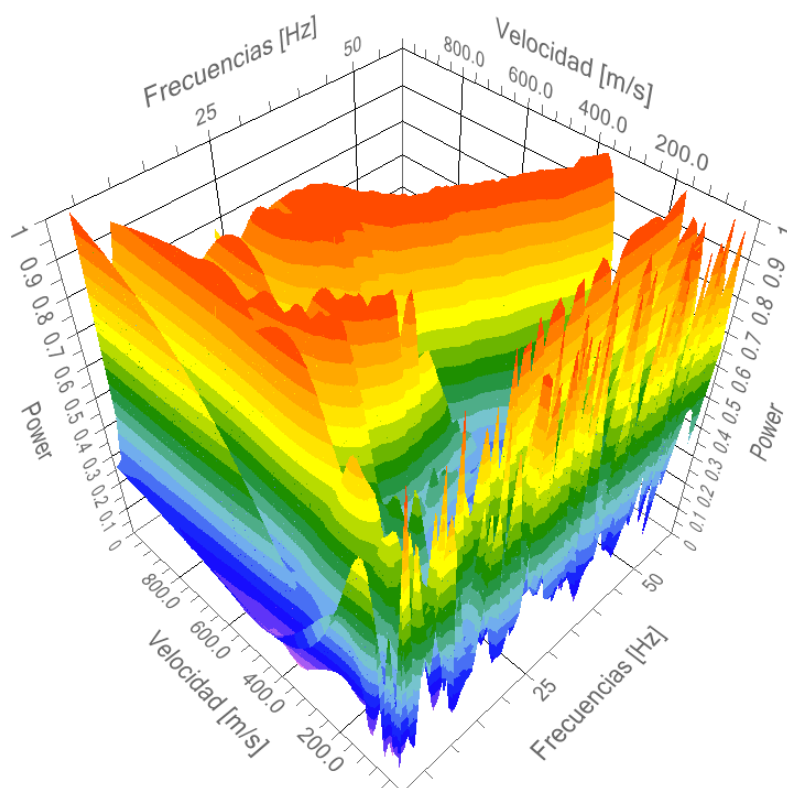
Detalle de la traza utilizada



Análisis espectral

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]	1000
Intervalo velocidad [m/sec]	1

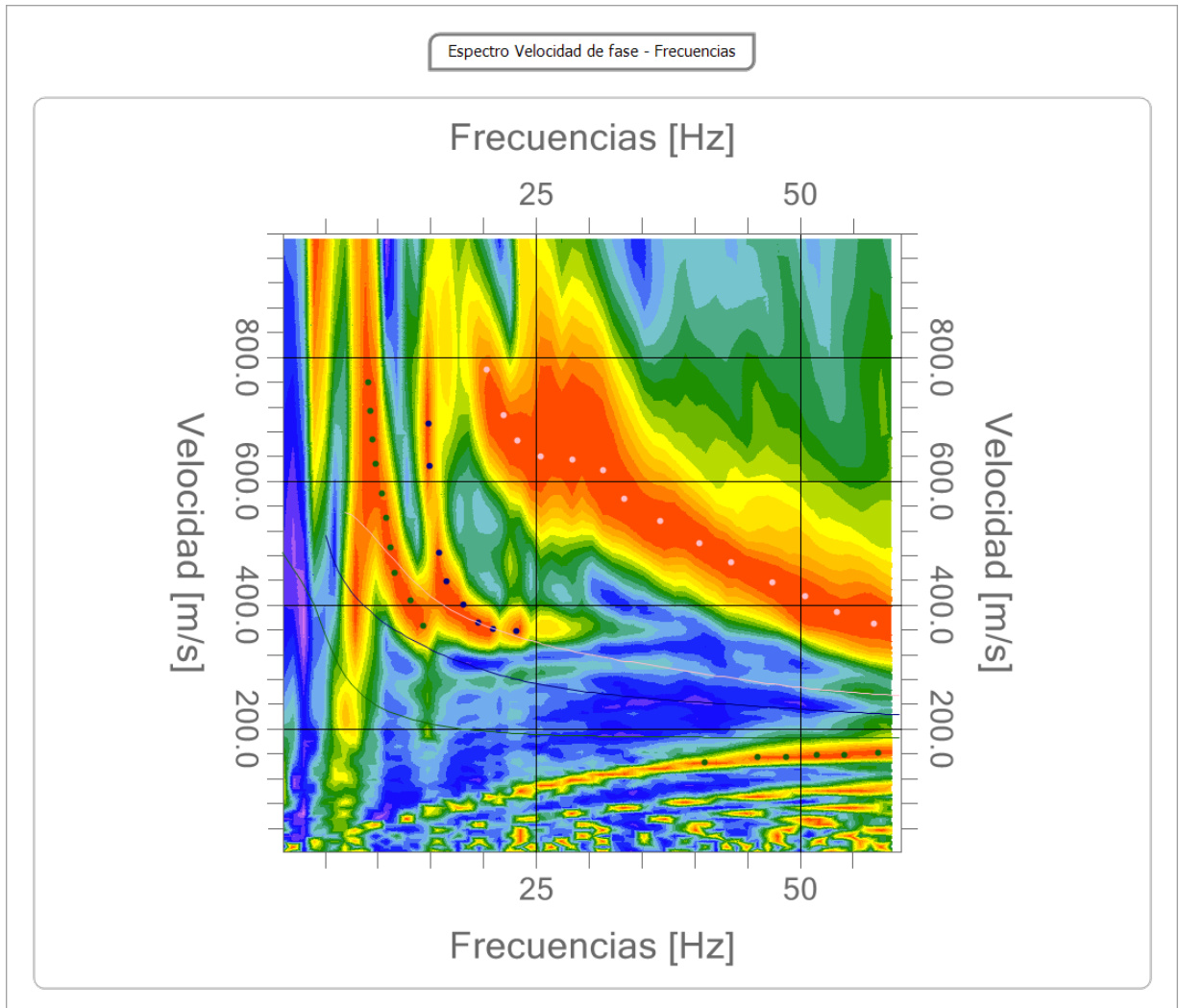
Espectro Velocidad de fase - Frecuencias



Curva de dispersión

n.	frecuencia [Hz]	Velocidad [m/sec]	Modo
1	9.1	758.6	0
2	9.3	713.1	0
3	9.5	667.6	0
4	9.8	627.3	0
5	10.4	580.1	0
6	10.8	539.9	0
7	11.2	492.6	0
8	11.7	452.4	0
9	13.1	406.9	0
10	14.3	366.7	0
11	14.8	692.1	1
12	14.9	623.8	1
13	15.9	483.9	1
14	16.5	438.4	1
15	18.1	399.9	1
16	19.5	371.9	1
17	20.4	779.6	2
18	21.0	361.4	1
19	21.9	706.1	2
20	23.1	357.9	1
21	23.2	665.8	2
22	25.5	639.6	2
23	28.5	634.3	2
24	31.3	616.8	2
25	33.4	571.4	2
26	36.8	536.4	2
27	40.4	499.6	2
28	41.0	146.2	0
29	43.5	468.1	2
30	46.0	155.0	0
31	47.4	436.6	2
32	48.7	155.0	0
33	50.5	413.9	2
34	51.6	158.5	0
35	53.4	389.4	2
36	54.2	158.5	0
37	57.0	370.2	2
38	57.4	162.0	0

Gráfica Velocidades de fase vs Frecuencia del modelo propuesto.



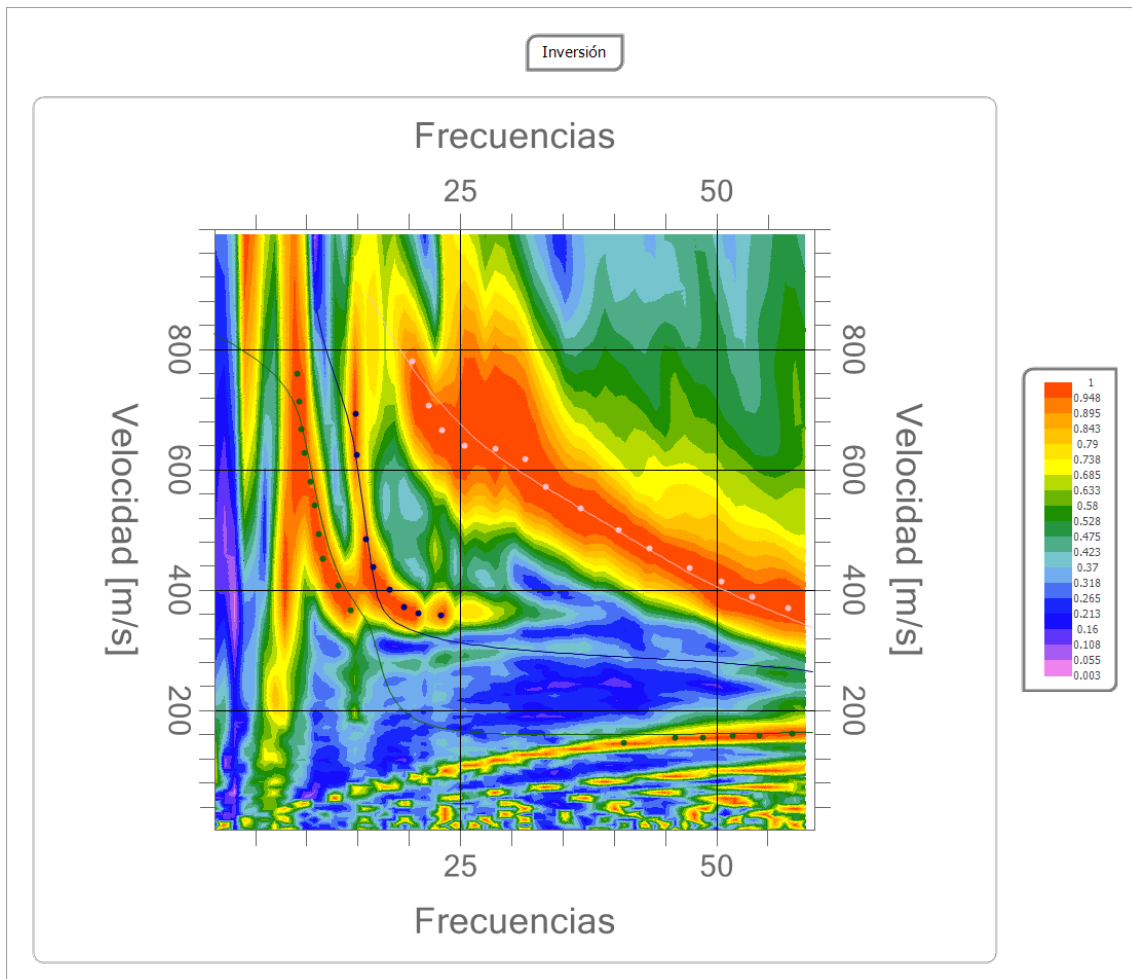
RESULTADOS DE LA INVERSION

Inversión

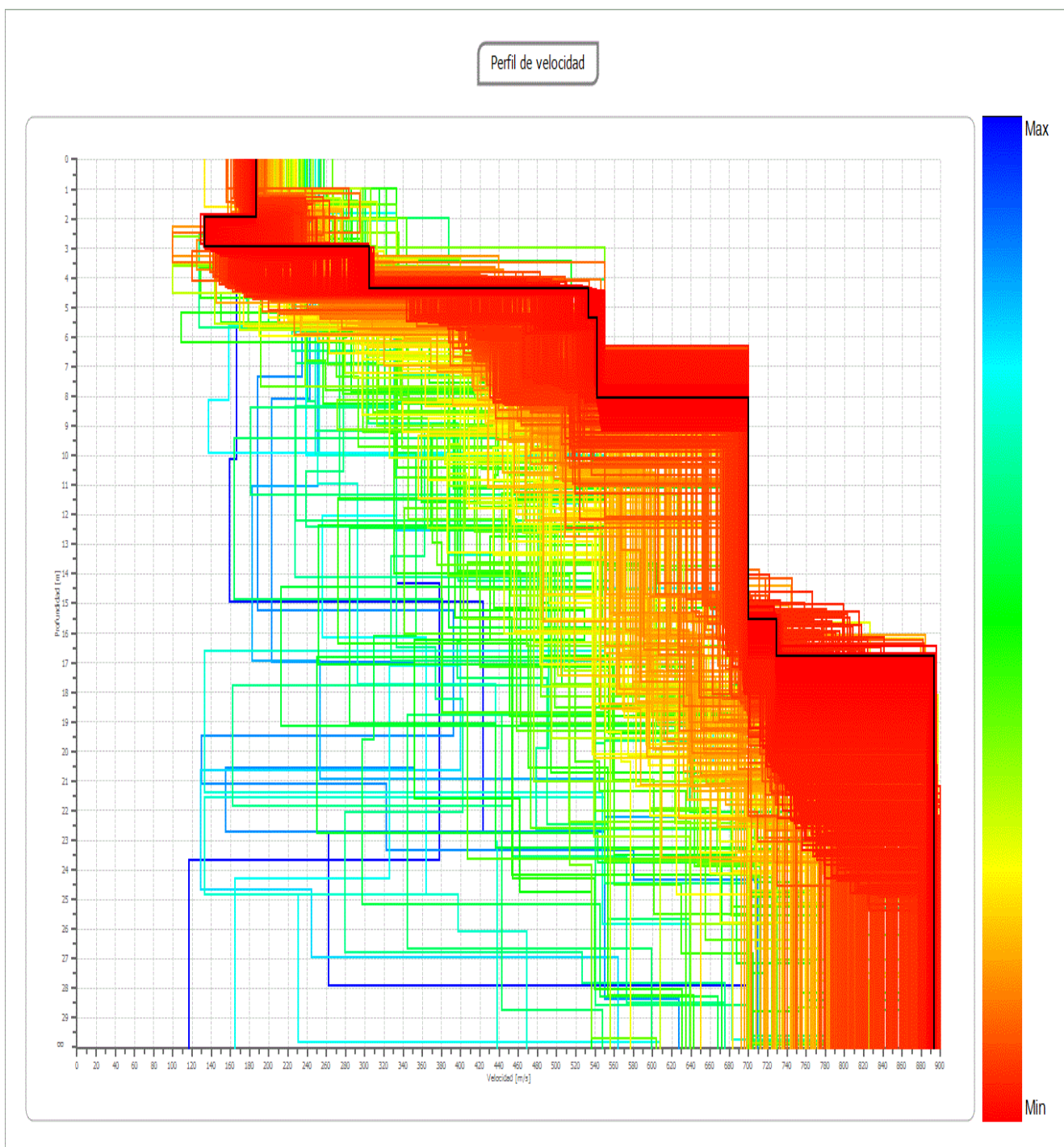
n.	Descripción	Profundidad [m]	Espesor [m]	Peso específico [kg/mc]	Coefficiente Poisson	Nivel freático	Vp [m/sec]	Vs [m/sec]
1	Gravas angulares limosas poco densas	1.95	1.95	1850.0	0.2	No	304.1	186.2
2	Gravas angulares limosas poco densas.	2.96	1.01	1540.0	0.2	No	219.3	134.3
3	Gravas angulares con limos preconsolidados firmes. Morena Glaciar.	4.33	1.38	2000.0	0.3	No	514.9	297.2
4	Gravas angulares con limos preconsolidados. Muy firmes. Morena Glaciar	5.34	1.00	2200.0	0.3	No	992.3	530.4
5	Gravas angulares con limos preconsolidados muy firmes. Morena Glaciar	7.77	2.44	2200.0	0.3	No	1013.2	541.6
6	Rocas blanda o Gravas angulares con limos preconsolidado muy firmes. Morena Glaciar	15.37	7.60	2300.0	0.4	No	1456.7	699.8
7	Rocas blanda o Gravas angulares con limos preconsolidado muy firmes. Morena Glaciar	16.80	1.43	2300.0	0.4	No	1514.9	727.8
8	Roca firme.	oo	oo	2300.0	0.4	No	1860.3	893.7

Porcentaje de error 0.297 %
 Factor de desadaptación de la solución 0.057

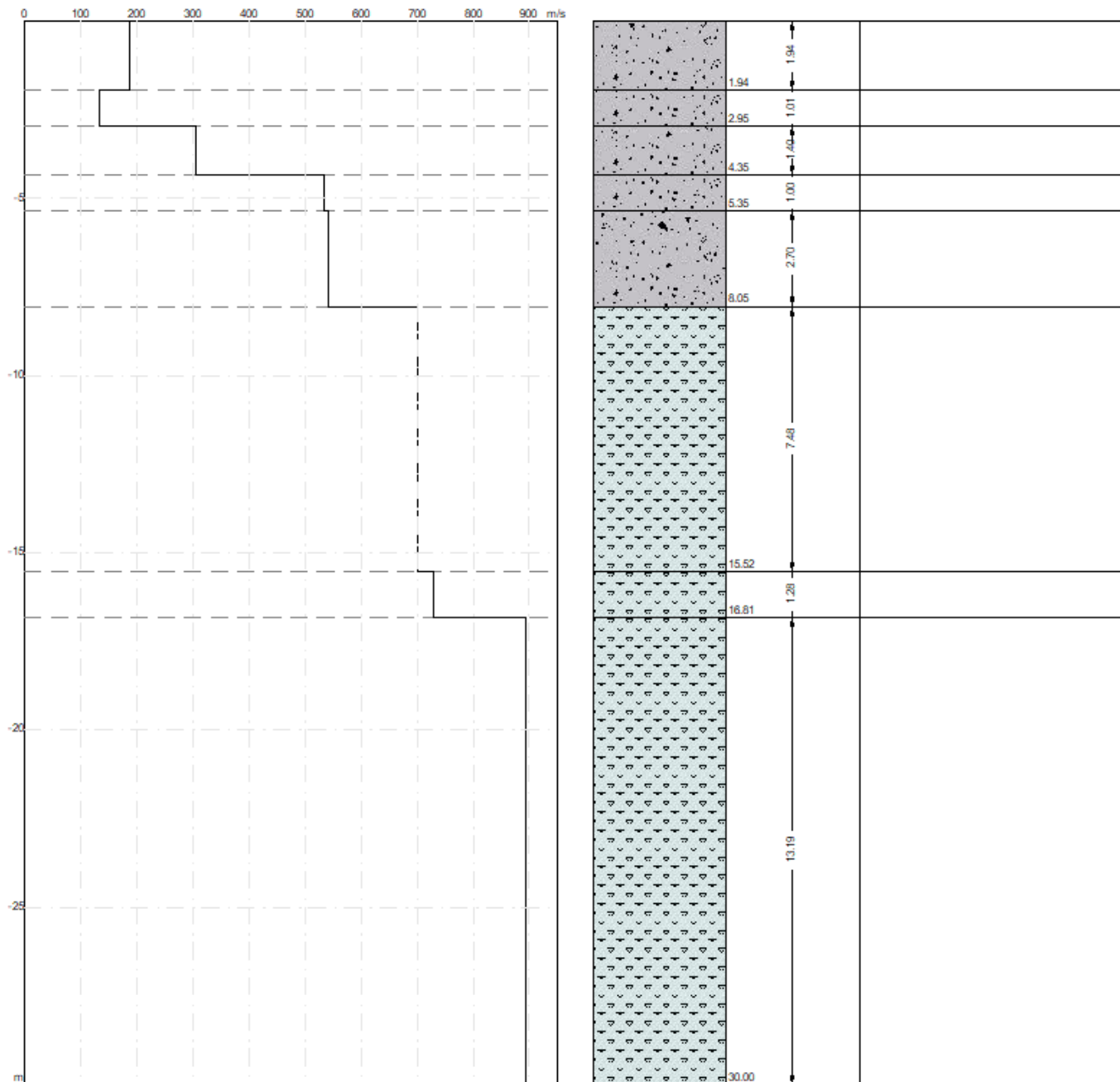
Gráfica Velocidades de fase vs Frecuencia obtenida en la inversión.



Perfiles de velocidades estudiados y perfil de menor error porcentual.



Perfil Estratigráfico obtenido Vs (m/seg.) – Profundidad (m)



Resultados

Profundidad plano de cimentación [m]	0.00
Vs30 [m/sec]	529.65
Categoría de suelo	B

Descripción Suelo de tipo B: Rocas blandas y depósitos de suelo de grano grueso muy densos o suelos de grano fino muy consistentes con espesores superiores 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).

Otros parámetros geotécnicos

Estrato	Profundidad [m]	Espesor [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Densidad [kg/mc]	Coefficiente Poisson	G0 [MPa]	Ed [MPa]	M0 [MPa]	Ey [MPa]	N1(60) SPT
1	1.95	1.95	186.20	304.07	1600.00	0.20	55.73	148.62	74.31	133.75	10
2	2.96	1.01	134.29	219.29	1300.00	0.20	23.10	61.60	30.80	55.44	4
3	4.33	1.38	297.25	514.85	1860.00	0.25	172.42	517.27	287.37	431.05	35
4	5.34	1.00	530.40	992.29	2100.00	0.30	596.64	2088.24	1292.72	1551.26	167
5	7.77	2.44	541.56	1013.16	2150.00	0.30	630.64	2207.25	1366.39	1639.67	177
6	15.37	7.60	699.76	1456.67	2200.00	0.35	1077.24	4668.06	3231.73	2908.56	138
7	16.80	1.43	727.75	1514.94	2250.00	0.35	1195.79	5181.76	3587.37	3228.63	148
8	oo	oo	893.67	1860.33	2250.00	0.35	1795.29	7779.59	5385.87	4847.28	>350

G0: Módulo inicial de deformación al corte;

Ed: Módulo edométrico inicial;

M0: Módulo de compresibilidad volumétrica inicial;

Ey: Módulo de Young inicial; (No secante)

Vp: Velocidad de onda compresional o primaria.

Vs: Velocidad de ondas de corte.

N1(60): Valor ensayo SPT corregido,

Correlaciones con el valor de N_{SPT} corregidos mediante la fórmula ponderada para todo tipo de suelos:

$$Vs = 78.63 N^{0.373}$$

Con una precisión de $R^2=0.996$.

Clasificación de los suelos según velocidad V_s (m/seg.)

Categoría	Descripción	V_s min [m/sec]	V_s max [m/sec]
A	Afloraciones de masas rocosas o suelos muy rígidos caracterizados por valores de $V_{s,30}$ superiores a 800 m/s, que eventualmente comprenden en superficie un estrato de alteración, con un espesor máximo de 3m.	800	-
B	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 $V_{s,30}$ comprendidos entre 360 m/s y 800 m/s (o $NSPT_{30} > 50$ en suelos de grano grueso y $c_{u,30} > 250$ kPa en suelos de grano fino).	360	800
C	Depósitos de suelos de grano grueso medianamente densos o suelos de grano fino medianamente consistentes con espesores superiores a 30m, caracterizados por un mejoramiento gradual de las propiedades mecánicas a según del aumento de la profundidad y por valores de $V_{s,30}$ comprendidos entre 180 m/s y 360 m/s (o $15 < NSPT_{30} < 50$ en suelos de grano grueso y $70 < c_{u,30} < 250$ kPa en suelos de grano fino).	180	360
D	Depósitos de suelos de grano grueso poco densos o de suelos de grano fino poco consistentes con espesores superiores a 30m, caracterizados por un mejoramiento gradual de las propiedades mecánicas a según del aumento de la profundidad y por valores de $V_{s,30}$ inferiores a 180 m/s (o $NSPT_{30} < 15$ en suelos de grano grueso y $c_{u,30} < 70$ kPa en suelos de grano fino).	-	180
E	Suelos de tipo C o D con espesor no superior a 20 m, sobre el substrato de referencia (con $V_s > 800$ m/s)	-	-
S1	Depósitos de suelos caracterizados por valores de $V_{s,30}$ inferiores a 100 m/s (o $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), que incluyen un estrato de por lo menos 8 m de suelos de grano fino de poca consistencia, o que incluyen por lo menos 3 m de turba o de arcillas altamente orgánicas.	-	100
S2	Depósitos de suelos susceptibles a licuefacción, de arcillas sensitivas o cualquier otro tipo de subsuelo inclasificable en las categorías anteriores.	-	-

❑ PERFIL OBTENIDO MEDIANTE REFRACCION SISMICA VERTICAL

Se utilizaron trazas con disparos a perfil, contraperfil y al centro del arreglo planteado, y que continuación se mostrarán. Con la técnica de refracción según método G.R.M., (*Generalized Reciprocal Method*), se confeccionan las dromocronas o líneas posición- tiempo. Explicación del método en últimas páginas.

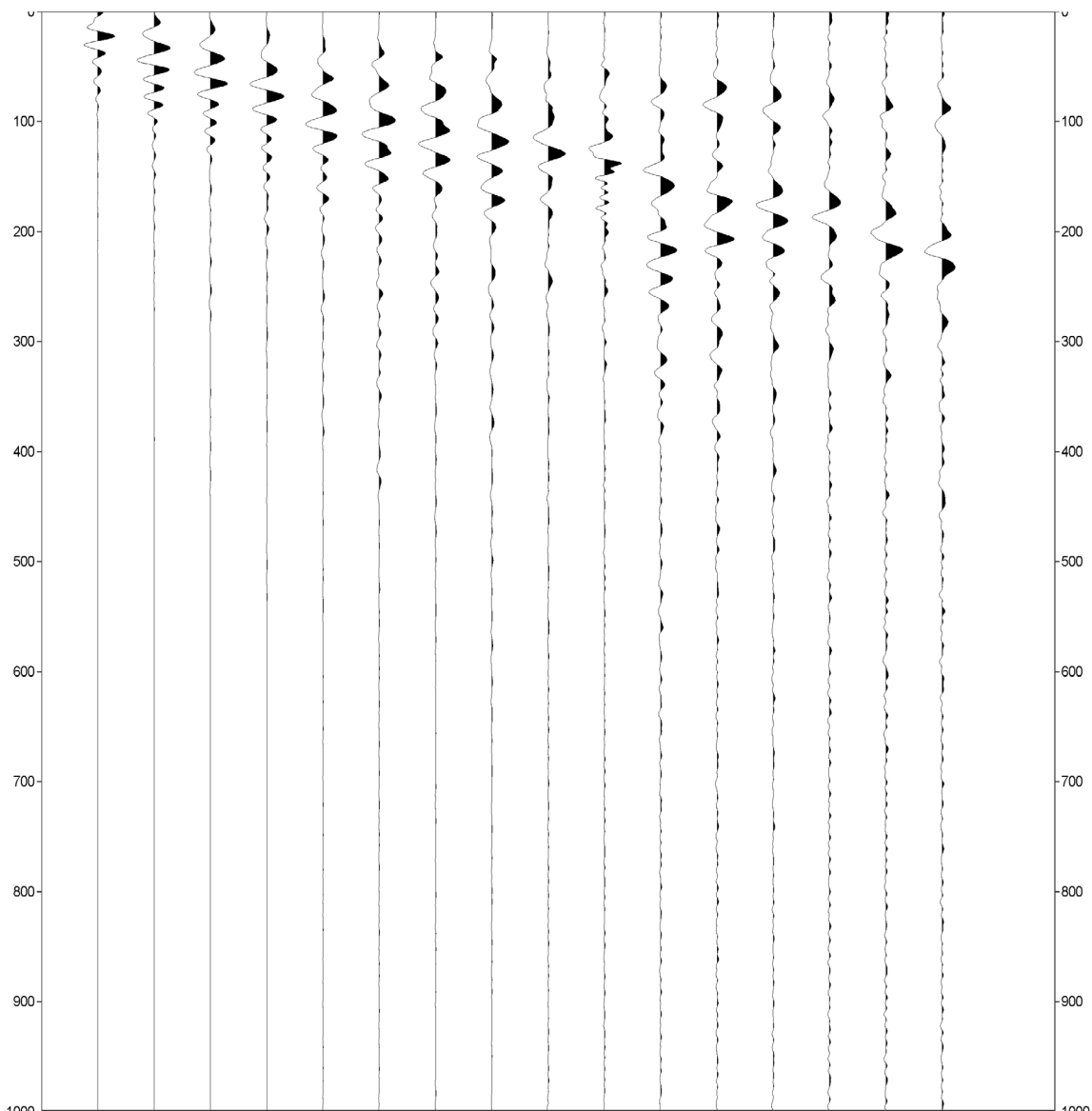
Geometría Geófonos.

Geófono	Posición X [m]	Posición Z [m]
1	5.0	0.0
2	10.0	0.07
3	15.0	0.18
4	20.0	0.24
5	25.0	0.40
6	30.0	0.68
7	35.0	0.85
8	40.0	0.96
9	45.0	1.25
10	50.0	1.44
11	55.0	1.45
12	60.0	1.59
13	65.0	1.79
14	70.0	1.98
15	75.0	2.24
16	80.0	2.53

Datos impactos

Impacto 1

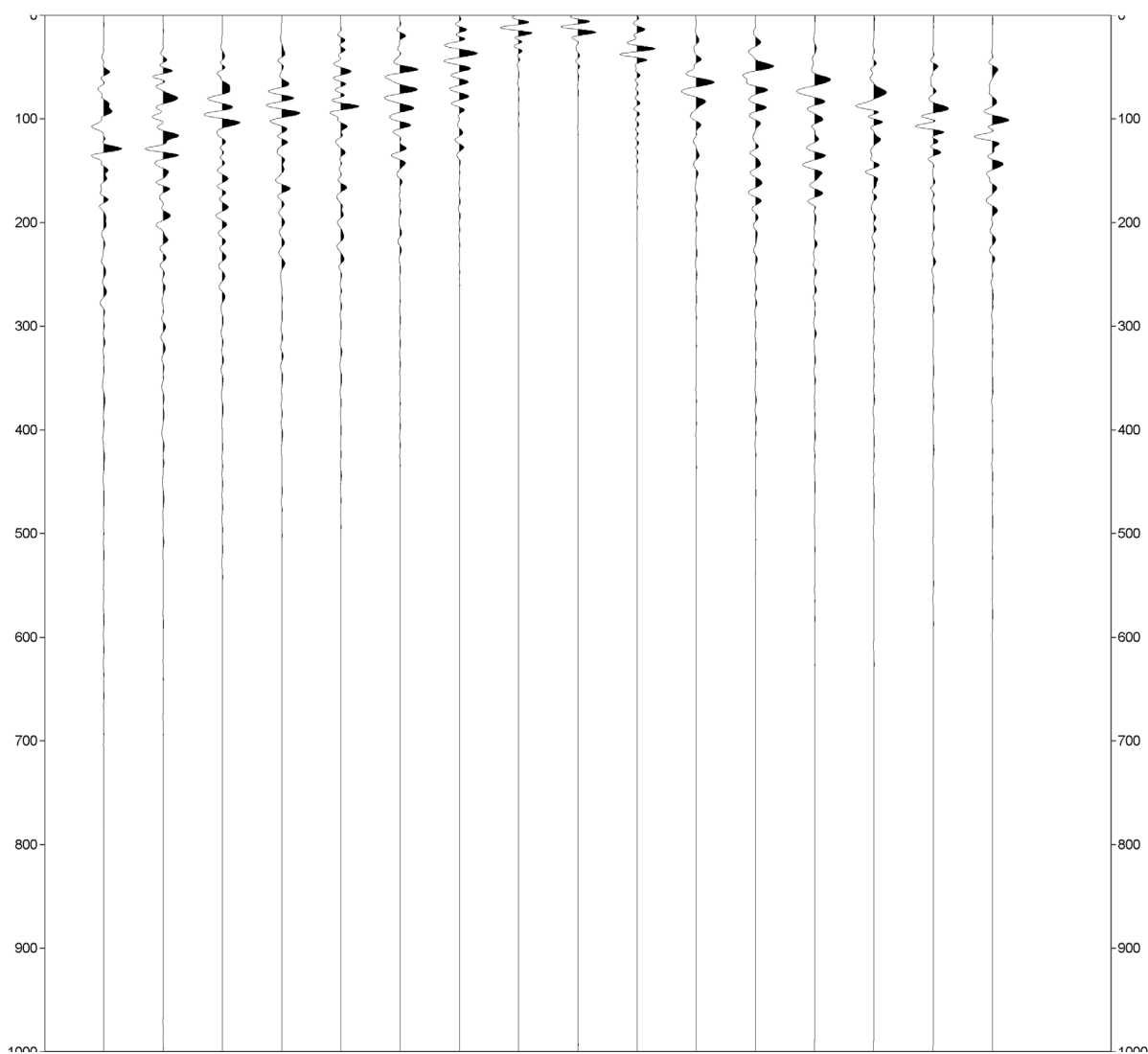
Posición fuente X 0 [m]
Posición fuente Z 0 [m]



Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
5.0	2.5792
10.0	4.5135
15.0	13.5405
20.0	31.5946
25.0	58.0309
30.0	96.7182
35.0	0.0000
40.0	0.0000
45.0	0.0000
50.0	0.0000
55.0	0.0000
60.0	0.0000
65.0	0.0000
70.0	0.0000
75.0	0.0000
80.0	0.0000

Impacto 2

Posición fuente X 47.5 [m]
Posición fuente Z 1.17 [m]

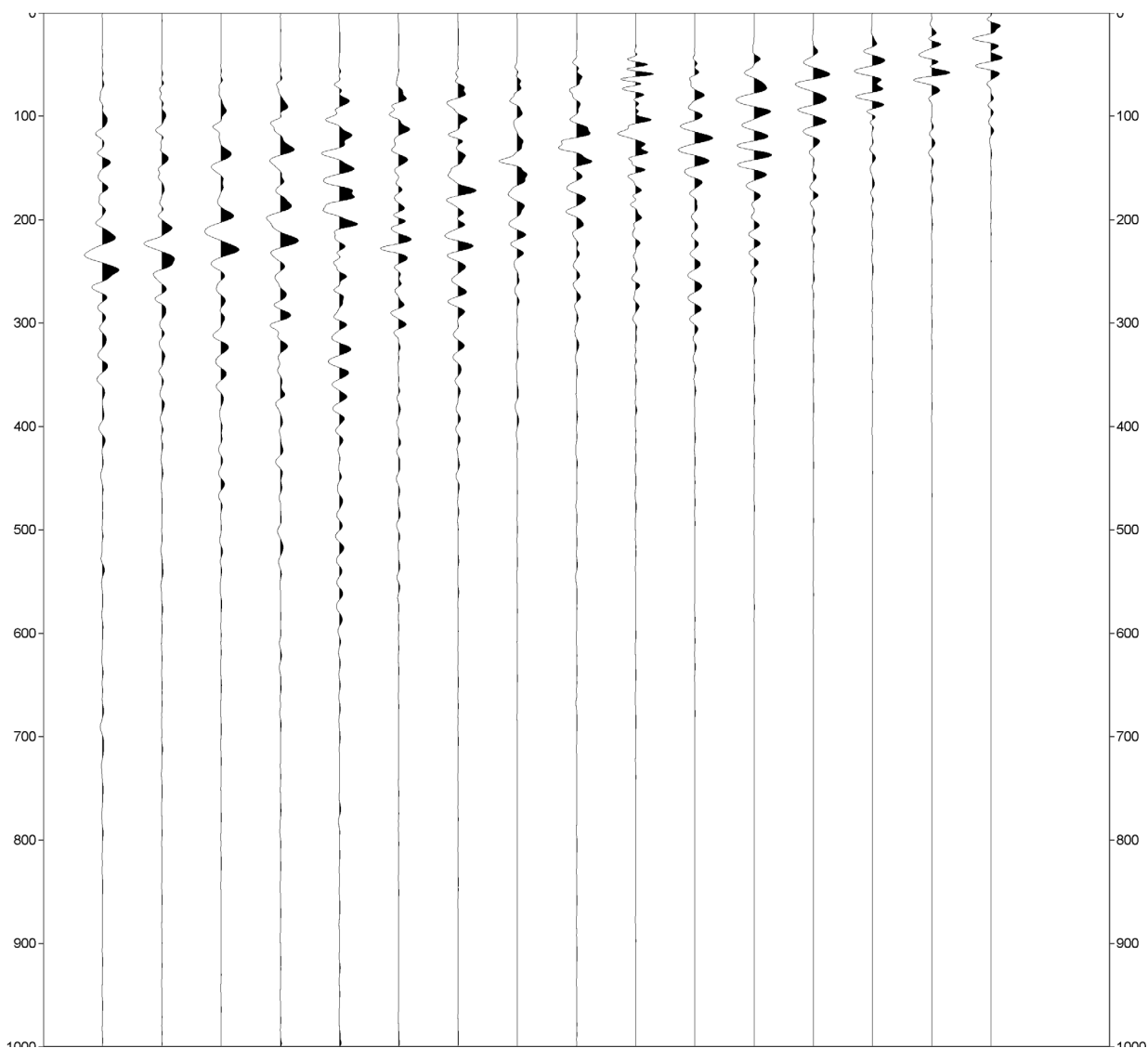


Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
5.0	90.0000
10.0	83.0000
15.0	75.4402
20.0	72.8610
25.0	20.0000
30.0	12.8958
35.0	9.0270
40.0	3.8687
45.0	0.6448
50.0	7.7375
55.0	15.4749
60.0	41.9112
65.0	54.1622
70.0	69.6371
75.0	83.1776
80.0	94.7838

Impacto 3

Posición fuente X 85 [m]

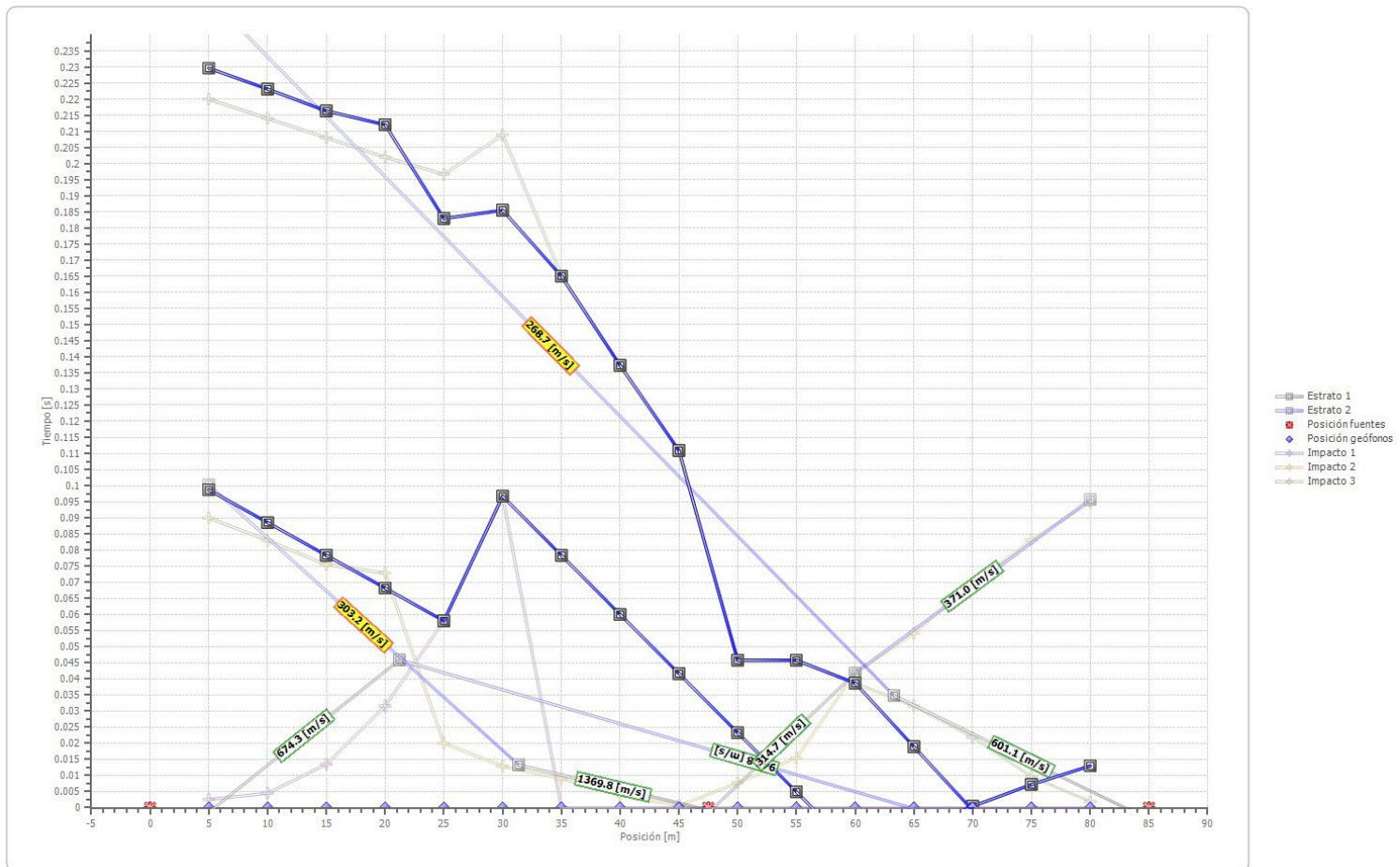
Posición fuente Z 2.78 [m]



Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
5.0	220.0000
10.0	214.0000
15.0	208.0000
20.0	202.0000
25.0	196.6603
30.0	208.9112
35.0	165.0657
40.0	137.3398
45.0	110.9035
50.0	45.7799
55.0	45.7799
60.0	38.6873
65.0	31.5946
70.0	21.9228
75.0	9.6718
80.0	1.9344

Dromocronas y dromocronas elaboradas.

(Líneas Posición – tiempo)



Perfil de velocidades superficiales de corte Vs encontrado.



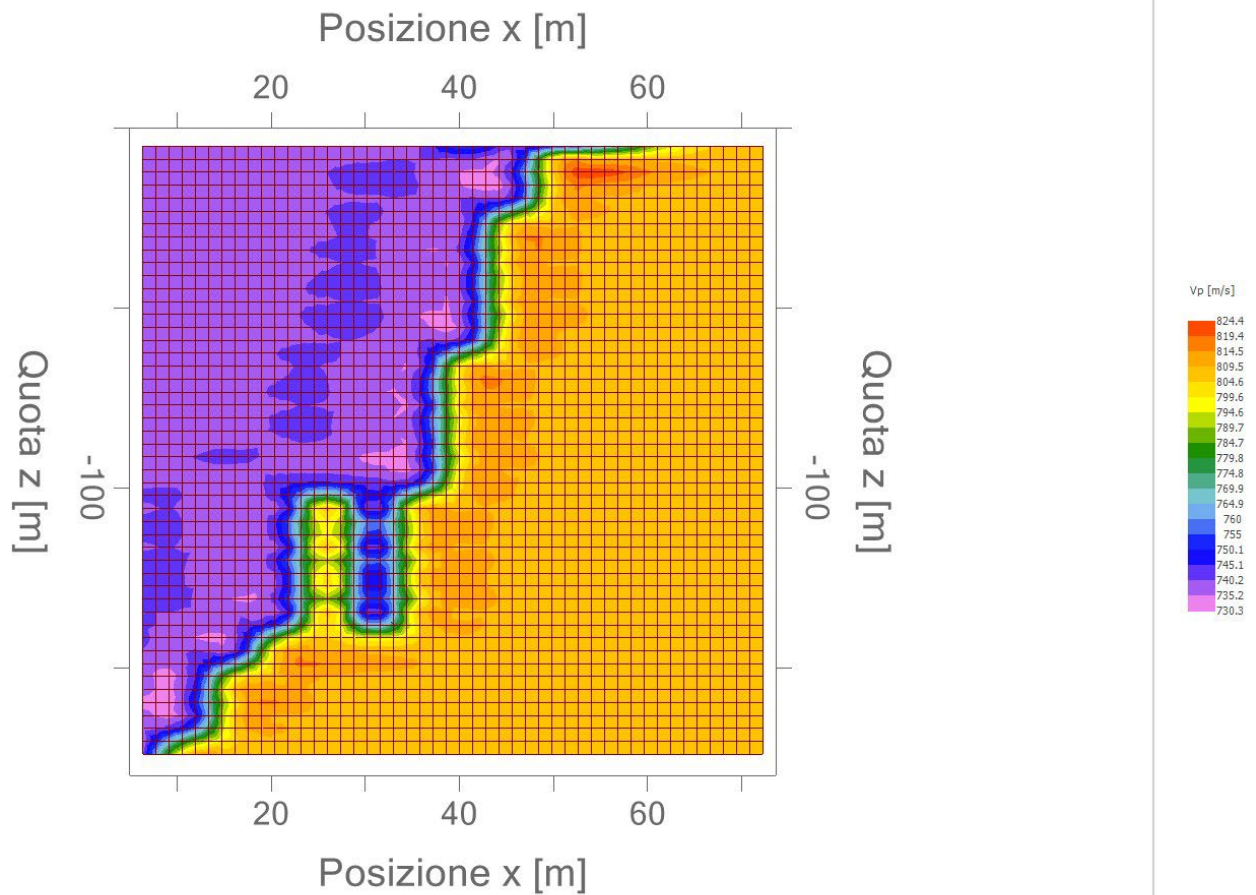
Primero geófono, progresiva: +5.00.

Ultimo geófono, progresiva: +80.00.

En la gráfica planteada en dos capas, se ven horizontes muy homogéneos con velocidades de ondas primarias o compresionales medias ponderadas comprendidas entre 740 y 810 m/seg, que se corresponden VS (ondas de corte) a 396 y 433 m/seg, esto para un coef. de Poisson medio de 0.30. Estas resultan análogas a las obtenidas por MASW y mostradas en tabla de página 15.

Estos valores se consideran como válidos hasta aproximadamente 30 metros de profundidad.

Mapa de velocidades de corte VP. (Primarias o Compresionales)



- CROQUIS DE UBICACIÓN - COORDENADAS S 54°47.696', O 68°13.510'



Método 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 ó 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 receptor.

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 θ_i , mientras que el formado entre el rayo refractado y la superficie normal se denomina ángulo de refracción θ_r . 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 $\theta_r = 90^\circ$ 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

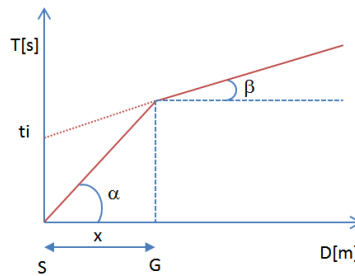
$$T = x_i / V_1$$

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 V_1 del primer medio como

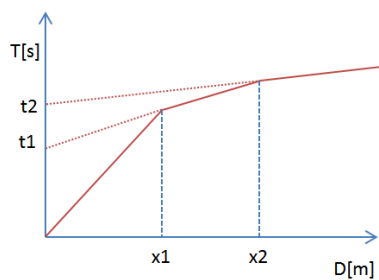
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

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.



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 t_i 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.

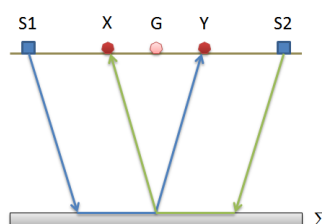


Entonces, conociendo los tiempos t_i es posible obtener los espesores de los refractores mediante la relación:

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

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

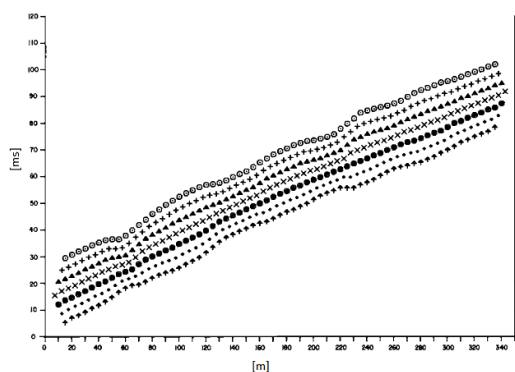
Este método se basa en la búsqueda de una distancia virtual XY entre geófonos tal que los rayos sísmicos que parten de puntos de disparo simétricos respecto al tendido, lleguen al geófono colocado en la posición X y al colocado en la posición Y, proviniendo desde un mismo punto del refractor



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

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

$$T_v = \frac{T_{S_1Y} - T_{S_2X} + T_{S_1S_2}}{2}$$



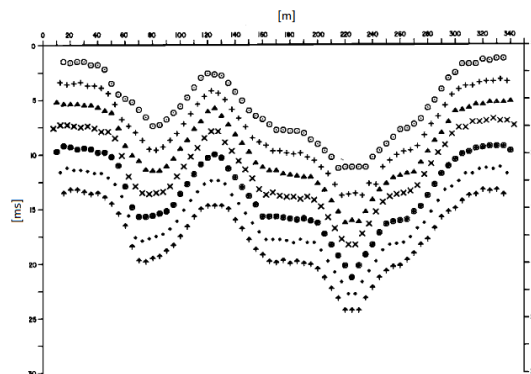
Donde T_{S_1Y} y T_{S_2X} son los tiempos de recorrido de los rayos sísmicos para llegar, respectivamente, de la fuente S_1 a X y de la fuente S_2 a Y , mientras que $T_{S_1S_2}$ es el tiempo de recorrido entre dos puntos de disparo S_1 y S_2 , externamente simétricos con respecto al tendido. T_V es el tiempo calculado en un geófono G puesto entre X y 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.



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 radio 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°