



**"ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL REFORZADO DEL
PROYECTO CARRETERA HUAYCÁN – CIENEGUILLA – SANTIAGO DE
TUNA – SAN ANDRÉS DE TUPICOCHA – SAN DAMIÁN YURACMAYO –
YAULI PACHACHACA – EMP. PE - 22"**

Aplicación de los Métodos Sísmicos (MASW1D-MASW2D-MAM) y Tomografía Eléctrica

SAN DAMIAN – HUAROCHIRÍ -- YAULI
Ciencias Ingeniería & Medio Ambiente S.A.C.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	3
1.1	Objetivos del Estudio.....	3
1.2	Ubicación de la Zona de Estudio	3
1.3	Personal Responsable	14
2.	MÉTODOS DE LA SÍSMICA PARA LA GENERACIÓN DE ONDA SUPERFICIAL.....	16
2.1	Método de Refracción Sísmica	17
2.1.1	Principio de Refracción Sísmica	18
2.2	Método del MASW (Multichannel Analysis Surface Waves).....	18
2.2.1	Principio del MASW (Multichannel Analysis Surface Waves).....	19
2.3	Método Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW 2D).....	19
2.4	Método Análisis Multicanal de Microtrepidaciones (MAM)	20
3.	MÉTODO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	21
3.1	Método de Tomografía Eléctrica.	22
4.	EQUIPOS Y PARAMETROS DE LEVANTAMIENTO PARA LA REFRACCION MASW y MAM.....	23
5.	EQUIPOS Y PARAMETROS DE LEVANTAMIENTO PARA LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.....	25
5.1	Equipo de Tomografía Eléctrica	25
5.2	Parámetros de Adquisición de Tomografía Eléctrica.....	26
6.	PROCEDIMIENTOS DE CAMPO PARA LA REFRACCION SÍSMICA MASW Y MAM.....	27
7.	PROCEDIMIENTOS DE CAMPO PARA LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	28
8.	PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE LA REFRACCION SISMICA MASW Y MAM.....	29
8.1	Análisis de Registros.....	29
8.2	Procesamiento de Datos	29
8.3	Presentación de los Datos Sísmicos.....	32
8.4	Interpretación de las secciones Sísmicas	33
9.	PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	34
10.	CONCLUSIONES.....	37
11.	RECOMENDACIONES	38
12.	BIBLIOGRAFIA	38
ANEXOS		
ANEXO I: PLANO DE UBICACIÓN DE LOS ENSAYOS SÍSMICOS Y TOMOGRAFÍAS ELECTRICAS		
ANEXO II: DROMOCRONAS.....		
ANEXO III: PERFÍLES DE REFRACCIÓN SÍSMICA.....		
ANEXO IV: PERFILES SÍSMICOS DE MASW2D.....		
ANEXO V: CONSTANTES ELÁSTICAS		
ANEXO VI: MASW1D.....		
ANEXO VII: MAM		
ANEXO VIII: PERFILES DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.....		
ANEXO IX: MAPAS DE INTERPRETACIÓN		

ANEXO X: PANEL FOTOGRÁFICO	
ANEXO XI: NORMAS	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coordenadas de las Líneas Sísmicas en zona de Puentes	5
Tabla 2: Coordenadas de las Líneas Sísmicas en zonas Inestables	8
Tabla 3: Coordenadas de las Líneas Sísmicas en zona de Túneles.....	10
Tabla 4: Coordenadas de los Puntos de MASW1D en las zonas evaluadas	12
Tabla 5: Coordenadas de los Puntos de MAM en las zonas evaluadas	13
Tabla 6: Coordenadas de las Líneas de Tomografía Eléctrica en zona de Túneles	14
Tabla 7: Personal Responsable de las actividades del proyecto	15
Tabla 8: Parámetros de adquisición de la Refracción	23
Tabla 9: Parámetros de adquisición del MASW	24
Tabla 10: Parámetros de Adquisición para MAM	24
Tabla 11: Instrumentos eléctricos utilizados para el estudio.....	25
Tabla 12: Parámetros de adquisición de la Tomografía Eléctrica	26
Tabla 13. Tabla de parámetros dinámicos del suelo.	34
Tabla 14. Valores de Resistividades Teóricos (Parasnis SD. Principios de Geofísica Aplicada)	35

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de las Líneas de Estudio en las zonas de Evaluación.....	4
Figura 2: Pasos para los métodos de ondas superficiales. (Modificado de Strobbia 2003).	16
Figura 3: Esquema de la propagación de la Onda Refractada.....	17
Figura 4: Sismograma de un tendido sísmico de 24 geófonos.....	18
Figura 5: Esquema de Toma de Datos de MASW	19
Figura 6: Típico registro de la sísmica pasiva.....	21
Figura 7: Principio del método resistivo, dispositivo electródico lineal (cuadripolo).	22
Figura 8: Representación simplificada de la técnica de Tomografía Eléctrica para un arreglo dipolo-dipolo. (Chávez et al., 2011)	22
Figura 9: Equipo Eléctrico para tomografía.....	25
Figura 10: Representación de la adquisición de datos sísmicos en campo.....	27
Figura 11: Representación de la adquisición de datos eléctricos en campo.....	29
Figura 12: Representación gráfica del concepto de CMP aplicado para el MASW 2D.....	30
Figura 13: Curvas de dispersión para los diferentes golpes generados.....	31
Figura 14: Conversión de la fase de tiempo al dominio de frecuencias representado por la fase de velocidad..	32

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio es realizado a partir de los requerimientos de la Empresa JNR CONSULTORES S.A. ante la necesidad de determinar los parámetros sísmicos tales como la velocidad de la onda P y de la onda S, mediante la ejecución de líneas sísmicas de REFRACCIÓN, MASW2D, MAM y puntos de MASW (Multichannel Analysis Surface Waves) y también determinar los parámetros eléctricos tales como la resistividad y conductividad del suelo, mediante la ejecución de líneas de Tomografía Eléctrica para el Proyecto "ESTUDIO DE PREINVERSIÓN A NIVEL DE PERFIL REFORZADO DEL PROYECTO CARRETERA HUAYCÁN – CIENEGUILLA – SANTIAGO DE TUNA – SAN ANDRÉS DE TUPICOCHA – SAN DAMIÁN YURACMAYO – YAULI PACHACHACA – EMP. PE - 22", los cuales determinarán las características y constitución del subsuelo para la zona de investigación.

El trabajo Geofísico se realizó en el mes de Noviembre durante este periodo de tiempo se ejecutaron 91 líneas sísmicas para zonas inestables y puentes con una extensión de 75 metros cada una, 39 puntos de MASW, 40 líneas sísmicas para zona de túneles con una extensión de 360 metros, con una extensión variada de 75, 160, 170 y 245 metros, 18 puntos de MAM y 10 líneas de tomografía eléctrica con una extensión de 360 metros, la distribución de las mencionadas líneas se realizó en zonas específicas determinadas según el interés del cliente.

Dicho levantamiento permitirá obtener un modelo de velocidades a manera de estratos y la potencia de los mismos. Además, se determinará la ubicación en profundidad de la roca o materiales más compactos.

1.1 Objetivos del Estudio

El objetivo del presente estudio, a partir de los datos sísmicos de V_p , V_s y datos eléctricos de resistividad y conductividad, es determinar las características geológicas y parámetros pseudodinámicos del subsuelo en la zona de estudio, para que finalmente estos resultados puedan corroborar y extrapolar información obtenida de métodos directos de investigación como calicatas o sondajes realizados en el lugar.

1.2 Ubicación de la Zona de Estudio

El área de estudio se ubica en el distrito de San Damián, dentro de la provincia de Huarochirí, en el departamento de Lima, todas las líneas de evaluación se distribuyeron en zonas de interés del proyecto.

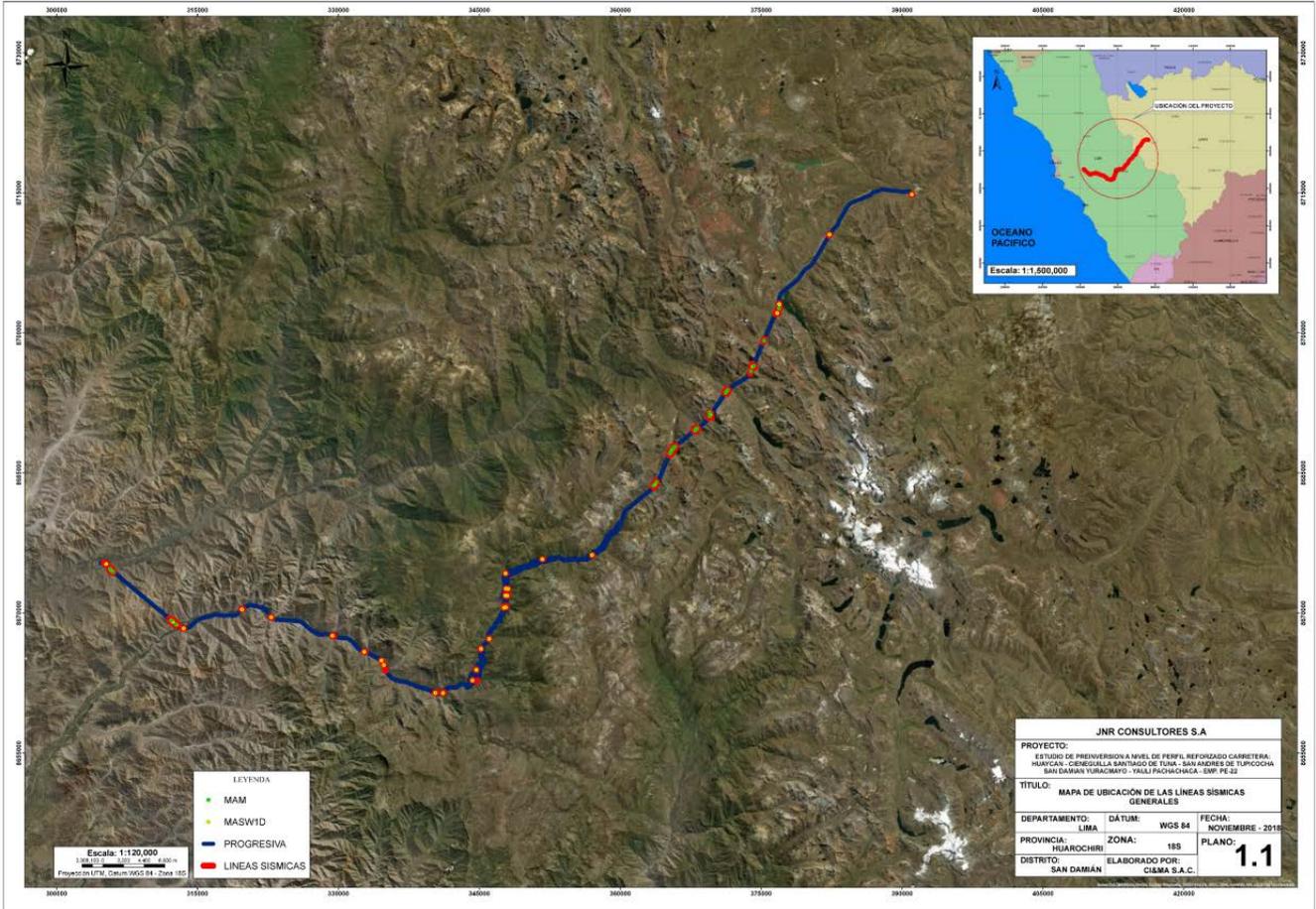


Figura 1: Ubicación de las Líneas de Estudio en las zonas de Evaluación

Tabla 1: Coordenadas de las Líneas Sísmicas en zona de Puentes

LINEA SISMICA	ORIENTACIÓN	COORDENADAS UTM (WGS84)		ELEVACIÓN	ESTACIÓN
		ESTE	NORTE		
LS-01	INICIO	305030.16	8675343.39	610.00	0
	FIN	305105.22	8675346.55	610.00	75
LS-02	INICIO	305226.37	8675363.22	610.67	0
	FIN	305301.40	8675366.59	612.17	75
LS-03	INICIO	305319.96	8675234.97	610.00	0
	FIN	305245.71	8675223.15	610.00	75
LS-04	INICIO	305284.17	8675234.57	610.00	0
	FIN	305315.51	8675166.33	610.00	75
LS-05	INICIO	312740.91	8668726.02	618.63	0
	FIN	312760.78	8668798.34	620.00	75
LS-06	INICIO	312748.01	8668721.98	616.24	0
	FIN	312767.44	8668794.42	620.00	75
LS-07	INICIO	312795.37	8668775.15	619.62	0
	FIN	312867.93	8668756.19	620.00	75
LS-08	INICIO	312782.38	8668705.10	611.88	0
	FIN	312798.13	8668778.42	620.00	75
LS-09	INICIO	319663.81	8670360.86	899.45	0
	FIN	319736.12	8670380.76	900.00	75
LS-10	INICIO	319750.58	8670375.66	900.00	0
	FIN	319677.69	8670393.32	896.05	75
LS-11	INICIO	319789.68	8670424.18	903.28	0
	FIN	319715.49	8670435.19	900.00	75
LS-12	INICIO	319806.43	8670498.84	925.78	0
	FIN	319758.24	8670441.37	912.92	75
LS-13	INICIO	322794.12	8669625.05	1040.00	0
	FIN	322839.61	8669565.43	1040.00	75
LS-14	INICIO	322809.78	8669505.88	1010.00	0
	FIN	322881.26	8669528.60	1011.49	75
LS-15	INICIO	322852.74	8669490.00	1010.00	0
	FIN	322926.65	8669502.77	1011.69	75
LS-16	INICIO	322892.49	8669504.49	1010.00	0
	FIN	322926.41	8669437.61	1011.31	75
LS-17	INICIO	340267.03	8661471.00	1756.29	0
	FIN	340336.80	8661443.16	1760.00	75

LINEA SISMICA	ORIENTACIÓN	COORDENADAS UTM (WGS84)		ELEVACIÓN	ESTACIÓN
		ESTE	NORTE		
LS-18	INICIO	340314.09	8661491.75	1753.62	0
	FIN	340324.70	8661417.35	1760.38	75
LS-19	INICIO	340383.98	8661461.11	1760.00	0
	FIN	340396.03	8661387.07	1770.00	75
LS-20	INICIO	340376.73	8661417.39	1761.90	0
	FIN	340451.73	8661417.88	1781.44	75
LS-21	INICIO	341077.04	8661402.00	1841.33	0
	FIN	341141.88	8661439.98	1791.96	75
LS-22	INICIO	341111.84	8661465.24	1801.87	0
	FIN	341150.96	8661401.07	1796.86	75
LS-23	INICIO	341175.79	8661504.54	1789.17	0
	FIN	341204.01	8661434.98	1798.52	75
LS-24	INICIO	341180.99	8661464.06	1790.00	0
	FIN	341238.72	8661512.07	1823.98	75
LS-25	INICIO	344681.97	8662697.58	2153.12	0
	FIN	344756.81	8662690.32	2162.44	75
LS-26	INICIO	344767.83	8662758.37	2100.00	0
	FIN	344694.33	8662742.99	2099.91	75
LS-27	INICIO	344302.01	8662769.99	2030.38	0
	FIN	344237.16	8662807.96	2020.00	75
LS-28	INICIO	344257.93	8662758.91	2031.95	0
	FIN	344281.99	8662830.06	2032.66	75
LS-29	INICIO	344682.61	8663861.08	2119.66	0
	FIN	344683.45	8663936.08	2120.00	75
LS-30	INICIO	344719.45	8663880.30	2148.74	0
	FIN	344669.67	8663936.40	2120.00	75
LS-31	INICIO	344658.85	8663985.52	2172.74	0
	FIN	344630.74	8663915.99	2193.13	75
LS-32	INICIO	345089.75	8666172.47	2449.88	0
	FIN	345117.95	8666102.91	2399.13	75
LS-33	INICIO	345195.50	8666144.16	2446.99	0
	FIN	345169.21	8666214.45	2460.32	75
LS-34	INICIO	346024.11	8667170.87	2621.23	0
	FIN	346072.31	8667228.41	2570.00	75
LS-35	INICIO	346084.95	8667207.40	2578.09	0
	FIN	346016.59	8667238.59	2561.80	75
LS-36	INICIO	346083.04	8667230.31	2570.00	0
	FIN	346011.56	8667253.36	2560.83	75

LINEA SISMICA	ORIENTACIÓN	COORDENADAS UTM (WGS84)		ELEVACIÓN	ESTACIÓN
		ESTE	NORTE		
LS-37	INICIO	346069.10	8667308.24	2619.46	0
	FIN	346056.68	8667234.15	2570.00	75
LS-38	INICIO	348100.46	8672598.55	2961.55	0
	FIN	348040.85	8672552.45	2965.61	75
LS-39	INICIO	348024.83	8672627.98	2987.35	0
	FIN	348092.98	8672652.99	3022.72	75
LS-40	INICIO	347862.29	8672615.80	2890.00	0
	FIN	347863.67	8672540.54	2890.00	75
LS-41	INICIO	347819.79	8672563.75	2904.24	0
	FIN	347837.91	8672636.69	2898.05	75
LS-42	INICIO	347793.93	8674282.46	3010.20	0
	FIN	347800.12	8674207.70	3001.28	75
LS-43	INICIO	347813.10	8674298.70	3010.00	0
	FIN	347830.44	8674225.73	3010.63	75
LS-44	INICIO	351670.07	8675746.21	3340.00	0
	FIN	351739.84	8675766.61	3350.00	75
LS-45	INICIO	351696.67	8675738.13	3340.00	0
	FIN	351767.46	8675752.18	3352.21	75
LS-46	INICIO	356989.49	8676155.47	3790.00	0
	FIN	357048.11	8676202.70	3790.11	75
LS-47	INICIO	356970.77	8676176.75	3790.00	0
	FIN	357024.99	8676228.94	3799.53	75
LS-48	INICIO	376942.00	8702961.00	4300.00	0
	FIN	376936.03	8703035.76	4292.06	75
LS-49	INICIO	376916.00	8703009.00	4303.19	0
	FIN	376976.40	8703053.46	4284.93	75
LS-50	INICIO	376926.00	8703087.00	4290.06	0
	FIN	376930.44	8703161.87	4307.54	75
LS-51	INICIO	376898.00	8703072.00	4280.00	0
	FIN	376954.57	8703121.24	4301.37	75
LS-52	INICIO	382229.00	8710428.00	4080.48	0
	FIN	382291.20	8710469.91	4094.59	75
LS-53	INICIO	382289.00	8710540.00	4094.93	0
	FIN	382230.53	8710493.03	4101.48	75
LS-54	INICIO	391028.00	8714803.00	3950.00	0
	FIN	391088.74	8714847.00	3950.00	75
LS-55	INICIO	391010.00	8714826.00	3950.00	0
	FIN	391074.47	8714864.32	3950.00	75

Tabla 2: Coordenadas de las Líneas Sísmicas en zonas Inestables

LINEA SISMICA	ORIENTACIÓN	COORDENADAS UTM (WGS84)		ELEVACIÓN	ESTACIÓN
		ESTE	NORTE		
LS - 56	INICIO	313349.03	8668385.00	702.94	0
	FIN	313421.82	8668366.93	688.06	75
LS - 57	INICIO	313400.95	8668334.99	696.40	0
	FIN	313393.21	8668409.59	680.57	75
LS - 58	INICIO	313502.99	8668352.00	697.92	0
	FIN	313577.88	8668348.03	736.52	75
LS - 59	INICIO	313529.02	8668314.99	700.90	0
	FIN	313512.22	8668388.08	701.47	75
LS - 60	INICIO	329317.02	8667592.06	1275.50	0
	FIN	329388.07	8667568.02	1276.47	75
LS - 61	INICIO	329353.04	8667539.05	1282.69	0
	FIN	329387.87	8667605.48	1270.85	75
LS - 62	INICIO	329472.03	8667541.06	1277.64	0
	FIN	329542.43	8667515.18	1282.65	75
LS - 63	INICIO	329487.06	8667502.98	1282.98	0
	FIN	329474.99	8667577.00	1270.00	75
LS - 64	INICIO	332686.02	8665876.07	1444.80	0
	FIN	332755.63	8665848.15	1447.22	75
LS - 65	INICIO	332735.00	8665820.03	1454.22	0
	FIN	332770.89	8665885.89	1437.45	75
LS - 66	INICIO	332797.95	8665796.05	1466.18	0
	FIN	332831.52	8665863.12	1434.00	75
LS - 67	INICIO	332805.05	8665832.04	1449.56	0
	FIN	332874.81	8665804.51	1450.70	75
LS - 68	INICIO	334569.97	8664929.07	1499.88	0
	FIN	334624.98	8664878.08	1508.99	75
LS - 69	INICIO	334570.98	8664884.05	1511.17	0
	FIN	334606.90	8664949.89	1498.33	75
LS - 70	INICIO	334724.91	8664653.42	1534.63	0
	FIN	334759.15	8664586.69	1558.83	75
LS - 71	INICIO	334716.23	8664606.32	1540.87	0
	FIN	334759.31	8664667.71	1534.43	75
LS - 72	INICIO	334822.78	8664455.25	1518.19	0
	FIN	334855.10	8664387.58	1500.40	75

LINEA SISMICA	ORIENTACIÓN	COORDENADAS UTM (WGS84)		ELEVACIÓN	ESTACIÓN
		ESTE	NORTE		
LS - 73	INICIO	334798.31	8664405.34	1538.64	0
	FIN	334861.28	8664446.08	1498.59	75
LS - 74	INICIO	334999.04	8663903.03	1528.89	0
	FIN	335059.04	8663858.03	1526.73	75
LS - 75	INICIO	334996.98	8663843.07	1540.00	0
	FIN	335047.26	8663898.72	1514.75	75
LS - 76	INICIO	347643.37	8670583.17	2827.85	0
	FIN	347640.62	8670508.08	2839.28	75
LS - 77	INICIO	347679.23	8670565.45	2843.86	0
	FIN	347606.03	8670582.34	2820.89	75
LS - 78	INICIO	347660.59	8670633.42	2827.31	0
	FIN	347669.58	8670708.03	2826.14	75
LS - 79	INICIO	347697.44	8670647.63	2842.12	0
	FIN	347623.29	8670659.07	2817.67	75
LS - 80	INICIO	347806.69	8670560.77	2896.59	0
	FIN	347827.97	8670632.75	2840.54	75
LS - 81	INICIO	347858.58	8670639.56	2850.00	0
	FIN	347787.74	8670614.37	2840.00	75
LS - 82	INICIO	347840.15	8670775.32	2917.45	0
	FIN	347857.06	8670701.94	2925.02	75
LS - 83	INICIO	347900.46	8670712.44	2933.50	0
	FIN	347825.39	8670711.13	2930.00	75
LS - 84	INICIO	347787.51	8671873.67	2905.58	0
	FIN	347780.11	8671798.97	2907.62	75
LS - 85	INICIO	347769.42	8671895.62	2882.48	0
	FIN	347810.44	8671832.63	2924.34	75
LS - 86	INICIO	347808.12	8671949.12	2906.30	0
	FIN	347808.08	8672024.26	2905.87	75
LS - 87	INICIO	347788.48	8671980.05	2889.13	0
	FIN	347860.53	8671976.83	2958.09	75
LS - 88	INICIO	347971.26	8671798.74	2997.64	0
	FIN	347983.96	8671872.92	2976.53	75
LS - 89	INICIO	348038.15	8671863.69	3003.94	0
	FIN	347966.12	8671842.14	2978.97	75
LS - 90	INICIO	348002.20	8672006.78	3045.89	0
	FIN	348009.29	8671932.05	3000.46	75
LS - 91	INICIO	347970.80	8671936.92	3002.03	0
	FIN	348045.30	8671946.26	3009.32	75

Tabla 3: Coordenadas de las Líneas Sísmicas en zona de Túneles

LINEA SISMICA	ORIENTACIÓN	COORDENADAS UTM (WGS84)		ELEVACIÓN	ESTACIÓN
		ESTE	NORTE		
MASW2D - 01	INICIO	306419.35	8674094.91	770.92	0
	FIN	306695.93	8673863.38	942.02	360
MASW2D - 02	INICIO	306341.48	8674261.40	716.07	0
	FIN	306349.41	8673901.83	760.31	360
MASW2D - 03	INICIO	305919.20	8674751.70	753.30	0
	FIN	305835.25	8674401.63	837.78	360
MASW2D - 04	INICIO	306424.82	8674205.84	762.86	0
	FIN	306555.75	8673869.24	875.59	360
MASW2D - 05	INICIO	312051.62	8669421.17	923.40	0
	FIN	312254.88	8669132.44	880.00	360
MASW2D - 06	INICIO	312112.01	8669029.25	867.67	0
	FIN	312378.17	8669271.65	921.90	360
MASW2D - 07	INICIO	312285.84	8668938.77	906.85	0
	FIN	312478.72	8669241.19	970.00	360
MASW2D - 08	INICIO	312671.07	8668655.93	700.23	0
	FIN	312782.46	8668966.02	671.77	360
MASW2D - 09	INICIO	363692.00	8683800.00	4596.77	0
	FIN	363479.54	8683509.38	4455.60	360
MASW2D - 10	INICIO	363493.00	8683767.00	4501.33	0
	FIN	363571.72	8683415.71	4493.59	360
MASW2D - 11	INICIO	363687.00	8683539.00	4559.33	0
	FIN	363570.04	8683879.47	4549.91	360
MASW2D - 12	INICIO	363934.00	8683835.00	4753.47	0
	FIN	363799.28	8684168.84	4778.38	360
MASW2D - 13	INICIO	365266.00	8686981.00	4634.70	0
	FIN	365389.71	8687319.08	4456.28	360
MASW2D - 14	INICIO	365168.00	8687202.00	4520.32	0
	FIN	365446.89	8686974.36	4550.69	360
MASW2D - 15	INICIO	365232.00	8687321.00	4485.35	0
	FIN	365481.60	8687061.58	4500.43	360
MASW2D - 16	INICIO	365545.00	8687173.00	4449.56	0
	FIN	365249.98	8687379.31	4465.74	360
MASW2D - 17	INICIO	365891.00	8687847.00	4580.00	0
	FIN	365606.31	8687626.66	4391.64	360
MASW2D - 18	INICIO	365673.00	8687457.00	4417.94	0
	FIN	365581.57	8687805.20	4385.37	360

LINEA SISMICA	ORIENTACIÓN	COORDENADAS UTM (WGS84)		ELEVACIÓN	ESTACIÓN
		ESTE	NORTE		
MASW2D-19	INICIO	365806.67	8687580.71	4471.08	0
	FIN	365696.85	8687923.55	4430.80	360
MASW2D-20-A	INICIO	365927.21	8687678.72	4567.67	0
	FIN	365779.64	8687874.29	4491.75	245
MASW2D-20-B	INICIO	365506.00	8687533.00	4401.45	0
	FIN	365542.98	8687467.75	4411.06	75
MASW2D-21	INICIO	367913.00	8689527.00	4639.29	0
	FIN	368177.97	8689770.70	4466.34	360
MASW2D-22	INICIO	368102.00	8689455.00	4610.19	0
	FIN	367803.65	8689656.47	4610.96	360
MASW2D-23	INICIO	367944.00	8689790.00	4523.96	0
	FIN	368176.54	8689515.18	4561.08	360
MASW2D-24	INICIO	368295.00	8689614.00	4481.19	0
	FIN	368045.48	8689873.50	4469.72	360
MASW2D-25	INICIO	369626.00	8691297.00	4612.49	0
	FIN	369415.77	8691004.76	4435.33	360
MASW2D-26	INICIO	369433.00	8691314.00	4470.62	0
	FIN	369616.19	8691004.10	4436.82	360
MASW2D-27	INICIO	369667.00	8691095.00	4498.37	0
	FIN	369472.48	8691397.93	4500.90	360
MASW2D-28-A	INICIO	369490.00	8691386.00	4507.67	0
	FIN	369529.51	8691551.35	4558.61	170
MASW2D-28-B	INICIO	369664.45	8691049.05	4472.62	0
	FIN	369706.21	8690894.60	4473.14	160
MASW2D-29	INICIO	371222.00	8693598.00	4410.53	0
	FIN	371430.50	8693891.48	4313.34	360
MASW2D-30	INICIO	371567.00	8693773.00	4327.70	0
	FIN	371285.34	8693997.20	4296.80	360
MASW2D-31	INICIO	371202.00	8693874.00	4336.95	0
	FIN	371473.05	8693637.08	4367.28	360
MASW2D-32	INICIO	371348.00	8693471.00	4417.65	0
	FIN	371097.36	8693729.42	4373.85	360
MASW2D-33	INICIO	373978.00	8696046.00	4470.82	0
	FIN	373837.51	8695714.55	4400.80	360
MASW2D-34	INICIO	374206.00	8696566.00	4547.93	0
	FIN	374054.28	8696239.54	4534.72	360
MASW2D-35	INICIO	373980.00	8696530.00	4611.89	0
	FIN	374215.95	8696258.10	4555.09	360

LINEA SISMICA	ORIENTACIÓN	COORDENADAS UTM (WGS84)		ELEVACIÓN	ESTACIÓN
		ESTE	NORTE		
MASW2D-36	INICIO	374087.00	8696695.00	4550.00	0
	FIN	374306.73	8696409.84	4541.52	360
MASW2D-37	INICIO	375218.00	8699009.00	4575.42	0
	FIN	375359.22	8699340.14	4490.00	360
MASW2D-38	INICIO	376728.00	8702303.00	4412.50	0
	FIN	376892.08	8702623.44	4351.14	360
MASW2D-39	INICIO	376736.00	8702527.00	4364.74	0
	FIN	377035.99	8702726.02	4347.74	360
MASW2D-40	INICIO	376856.00	8702162.00	4478.61	0
	FIN	376521.02	8702030.14	4472.56	360

Tabla 4: Coordenadas de los Puntos de MASW1D en las zonas evaluadas

MASW	COORDENADAS UTM (WGS84)		ELEVACIÓN
	ESTE	NORTE	
MASW1D-02	312379.00	8669071.00	952.23
MASW1D-03	363639.00	8683709.00	4555.25
MASW1D-04	365382.00	8687216.00	4489.45
MASW1D-05	365743.00	8687743.00	4456.36
MASW1D-06	368070.00	8689730.00	4540.91
MASW1D-07	369593.50	8691228.00	4529.07
MASW1D-07-B	369498.00	8691095.00	4443.83
MASW1D-08	371341.00	8693753.00	4351.46
MASW1D-09	374097.00	8696403.00	4590.00
MASW1D-10	376693.00	8702133.00	4477.79
MASW1D-11	305286.43	8675229.63	610.00
MASW1D-12	312756.06	8668757.61	617.83
MASW1D-13	319732.60	8670380.99	900.00
MASW1D-14	322848.00	8669537.00	1017.47
MASW1D-15	340320.07	8661449.84	1760.00
MASW1D-16	341131.06	8661433.71	1795.84
MASW1D-17	344268.35	8662789.70	2025.62
MASW1D-18	344684.81	8663916.23	2120.00
MASW1D-19	345180.17	8666174.84	2452.21
MASW1D-20	346063.16	8667217.34	2573.70
MASW1D-20-A	365521.00	8687500.00	4408.27
MASW1D-21	346057.46	8667238.56	2570.00
MASW1D-22	347828.85	8672600.22	2904.41

MASW1D-23	348070.66	8672575.50	2960.06
MASW1D-24	347797.02	8674245.08	3010.00
MASW1D-25	351702.30	8675764.52	3351.85
MASW1D-26	356997.88	8676202.84	3793.48
MASW1D-27	376923.00	8703087.00	4292.73
MASW1D-28	376937.00	8703024.00	4295.35
MASW1D-29	382269.00	8710523.00	4087.59
MASW1D-30	391040.00	8714846.00	3950.00
MASW1D-31	313519.00	8668352.00	705.33
MASW1D-32	329370.00	8667573.00	1278.76
MASW1D-33	332751.29	8665849.93	1446.95
MASW1D-34	334587.12	8664912.53	1500.29
MASW1D-35	334835.65	8664430.87	1508.98
MASW1D-36	347643.03	8670573.79	2830.00
MASW1D-37	347826.65	8670628.20	2843.73
MASW1D-38	347787.02	8671868.59	2904.03
MASW1D-39	347979.23	8671846.06	2983.82

Tabla 5: Coordenadas de los Puntos de MAM en las zonas evaluadas

MAM	COORDENADAS UTM (WGS84)		ELEVACIÓN
	ESTE	NORTE	
MAM-03	312211.63	8669208.31	906.85
MAM-04	312697.00	8668809.00	685.37
MAM-05	363535.00	8683648.00	4493.14
MAM-06	363865.00	8684006.00	4769.09
MAM-07	365310.50	8687087.50	4566.90
MAM-08	365393.50	8687272.00	4469.99
MAM-09	365612.50	8687632.00	4392.49
MAM-10	365861.50	8687811.50	4545.30
MAM-11	367961.00	8689551.50	4613.00
MAM-12	368183.00	8689759.50	4468.94
MAM-13	369505.00	8691100.00	4447.59
MAM-14	369503.50	8691494.00	4518.07
MAM-15	371221.50	8693600.50	4409.92
MAM-16	371422.50	8693886.50	4316.14
MAM-17	373918.50	8695884.00	4419.15
MAM-18	374209.00	8696456.50	4540.00
MAM-19	375292.00	8699176.00	4509.83
MAM-20	376897.00	8702624.50	4352.52

Tabla 6: Coordenadas de las Líneas de Tomográfica Eléctrica en zona de Túneles

LINEA TOMOGRÁFICA	ORIENTACIÓN	COORDENADAS UTM (WGS84)		ELEVACIÓN	ESTACIÓN
		ESTE	NORTE		
LT-01	INICIO	306419.98	8674095.48	771.30	0
	FIN	306695.84	8673864.17	941.39	360
LT-02	INICIO	312040.04	8669420.13	927.10	0
	FIN	312254.88	8669132.44	880.00	360
LT-03	INICIO	363692.00	8683800.00	4596.77	0
	FIN	363478.57	8683512.33	4455.44	360
LT-04	INICIO	365267.07	8686980.84	4634.36	0
	FIN	365389.50	8687319.38	4456.20	360
LT-05	INICIO	365606.26	8687626.64	4391.64	0
	FIN	365890.74	8687847.26	4580.00	360
LT-06	INICIO	367908.77	8689523.00	4642.32	0
	FIN	368173.80	8689766.64	4468.97	360
LT-07	INICIO	369625.00	8691296.18	4610.10	0
	FIN	369414.10	8691004.42	4435.43	360
LT-08	INICIO	371221.92	8693597.82	4410.64	0
	FIN	371430.66	8693891.13	4313.42	360
LT-09	INICIO	373979.50	8696047.14	4471.69	0
	FIN	373839.50	8695715.48	4401.96	360
LT-10	INICIO	376728.47	8702302.70	4412.70	0
	FIN	376892.09	8702623.37	4351.16	360

1.3 Personal Responsable

En campo los trabajos se realizaron en coordinación con el Cliente, quienes indicaron al personal de CI & MA la ubicación de las líneas sísmicas para la ejecución de las mismas. En la tabla 3 se indica al personal involucrado en el Proyecto.

En la zona de evaluación se requirió el apoyo de 4 personas las cuales se encargaron de trasladar los equipos y materiales a las zonas de evaluación, quienes colaboraron en el tendido de las líneas.

Tabla 7: Personal Responsable de las actividades del proyecto

PROFESIONAL	CIP	CARGO	FUNCIÓN
Ing. Cesar Huayhua	127747	Supervisor de Proyecto	Supervisión, control de calidad y redacción de Informe Final.
Ing. Karina Sueldo	98066	Jefe Área Procesamiento	Elaboración de Planos, Figuras y presentación de secciones.
Paola Pinto Lazo		Geofísico	Recolección de datos y elaboración de reportes preliminares
Alberto Apaza Chino		Geofísico	Recolección de datos y elaboración de reportes preliminares
Adrian Barrios Aguilar		Geofísico	Recolección de datos y elaboración de reportes preliminares
Ivan Ramos Florez		Geofísico	Recolección de datos y elaboración de reportes preliminares
Miler Acahuana Mollo		Geofísico	Recolección de datos y elaboración de reportes preliminares
Yonathan Claros Ramos		Técnico	Recolección de datos y elaboración de reportes preliminares

2. MÉTODOS DE LA SÍSMICA PARA LA GENERACIÓN DE ONDA SUPERFICIAL

Los métodos aplicados para la generación de las ondas dependerán de las condiciones circundantes del área de estudio, de la sensibilidad del equipo y de los alcances que se desea obtener.

Estos métodos pueden ser clasificados según el tipo de fuente a utilizarse siendo conocidos como activos y pasivos, existiendo una variante donde se combinan ambos. Los pasos fundamentales de los métodos de ondas superficiales (MOS) según De Lucena (2016) y Strobbia (2003) consisten en: Adquisición, Procesamiento e Inversión (Figura 2).

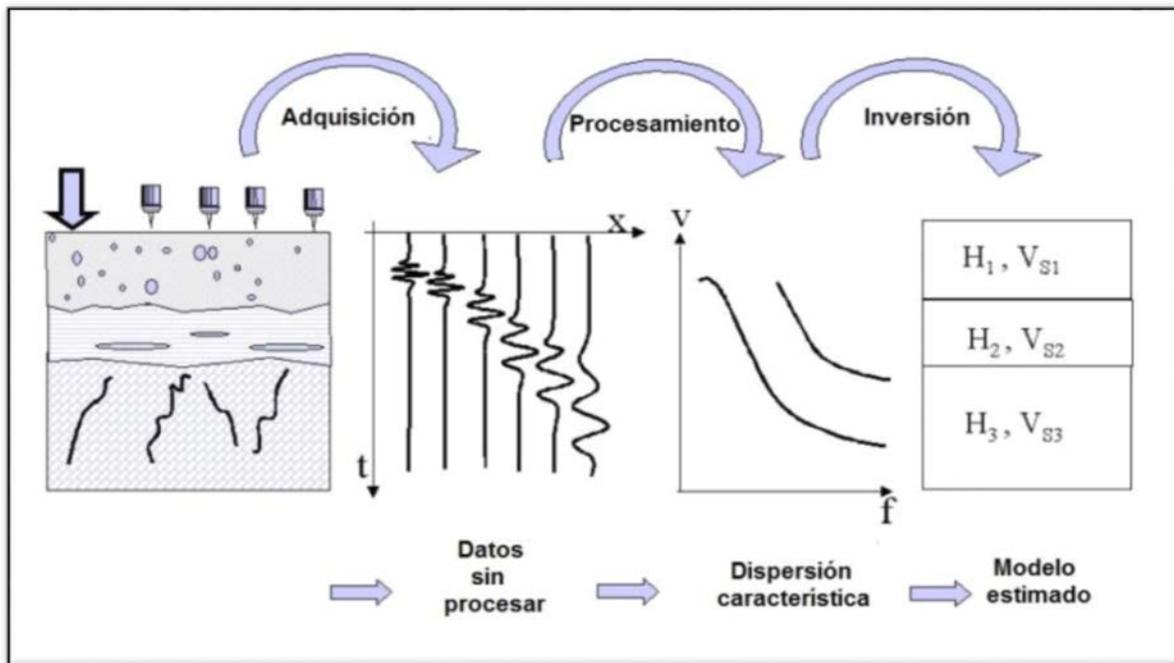


Figura 2: Pasos para los métodos de ondas superficiales. (Modificado de Strobbia 2003).

El método activo utiliza una fuente sísmica impulsiva controlada (puede ser un marro o explosivos), para generar las ondas elásticas las cuales viajarán bajo la superficie del suelo y serán registradas por varios receptores (geófonos) los cuales estarán separados a una distancia determinada. La elección de una fuente impulsiva y la separación de los sensores en la superficie dependerán de la profundidad de análisis que se desea alcanzar.

El método pasivo, no necesita de una fuente impulsiva activa (maza o explosivos) para generar una señal, ya que se activa mediante las fuentes pasivas, mediante la vibración ambiental que es generada por ruidos ambientales provocada por la actividad humana, viento, olas de mar; basándose en la adquisición de ruido sísmico con diferentes disposiciones de sensores y durante una ventana temporal determinada. El objetivo de este método es evaluar al terreno de forma indirecta y no destructiva.

2.1 Método de Refracción Sísmica

Una vez establecidos los objetivos de la exploración sísmica y determinado el lugar del levantamiento, en cada línea sísmica se fijan los intervalos de espaciamiento Fuente – Geófonos (según arreglo de campo) y Geófono - Geófono (3m), con la finalidad de obtener la mayor precisión en los tiempos de arribo en cada geófono a partir de la señal sísmica y lograr la profundidad requerida en los objetivos. En la Figura 3 se visualiza el principio de la refracción.

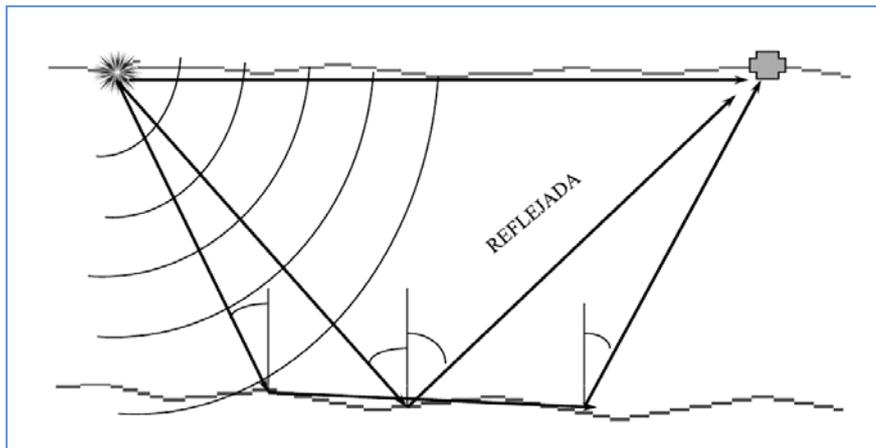


Figura 3: Esquema de la propagación de la Onda Refractada.

El arribo de los frentes de onda produce vibraciones que son registrados en cada uno de los geófonos y estos son amplificadas por el sismógrafo, para finalmente ser visualizados en la pantalla de una Computadora Personal. En la Figura 4 observamos el registro de la señal o vibración del terreno mediante la excitación artificial para un arreglo de 24 geófonos.

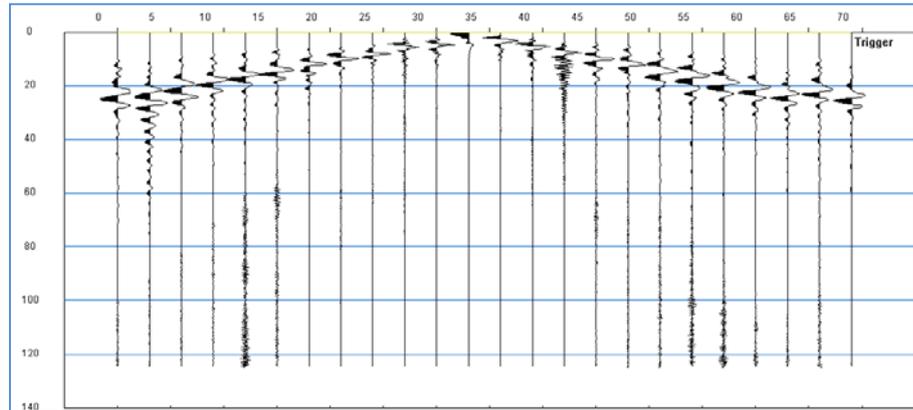


Figura 4: Sismograma de un tendido sísmico de 24 geófonos

2.1.1 Principio de Refracción Sísmica

La refracción sísmica es un método muy empleado en los trabajos de la ingeniería Geotécnica y otros campos afines. El principio de Refracción Sísmica se basa en la propagación de ondas sísmicas, básicamente las ondas Primarias (P), originadas mediante esfuerzos que generan deformaciones del terreno a partir de una fuente en superficie (disparos de escopeta y/o iterativos golpes de una comba sobre una placa metálica). Dicho fenómeno de deformación de la corteza genera frentes de onda que viajan por el subsuelo. Estos frentes de onda o simplemente ondas sísmicas, al encontrar interfaces entre dos medios con propiedades elásticas diferentes, provocan que parte de su energía continúe penetrando a mayor profundidad y otra parte viaje por la interfaz y regresa a la superficie donde es registrada por los geófonos.

La onda de fase sísmica P llega a los geófonos pasado un tiempo " t_i " denominado Tiempo de Arribo, el cual va a depender principalmente de la distancia " d_i ", comprendida entre el punto de disparo y su recorrido por el subsuelo hasta llegar al geófono. Sin embargo, este tiempo se ve afectado por las propiedades de elasticidad y de densidad del medio por el cual viaja. Cabe señalar que el método de refracción sísmica está limitado a determinar capas de velocidades crecientes con las profundidades de investigación.

2.2 Método del MASW (Multichannel Analysis Surface Waves)

El método MASW (Multichannel Analysis Surface Waves), es muy similar al levantamiento de refracción sísmica, pues al igual que él se realiza un tendido de cable sísmico con un espaciamiento de geófonos de entre 1 a 3 m. posteriormente se aplican shots o golpes con una comba sísmica (hammer), para generar las

vibraciones. El tendido del cable será realizado perpendicular a la Línea Sísmica a la cual se quiere asociar el perfil de onda de corte, aunque muchas veces los inconvenientes de campo hacen que este tendido no sea siempre perpendicular. Se aplican por lo general 3 golpes fuera del tendido de cable alineado a la misma. Estos son a distancia equivalentes al 5%, 10% y 20 % de la longitud del tendido, tanto a un lado del tendido como al otro, nombrándolos a estos shots en modo Normal y en modo Reverso. La ubicación del Punto MASW debe estar siempre en la mitad del dispositivo como el esquema mostrado en la figura 5.

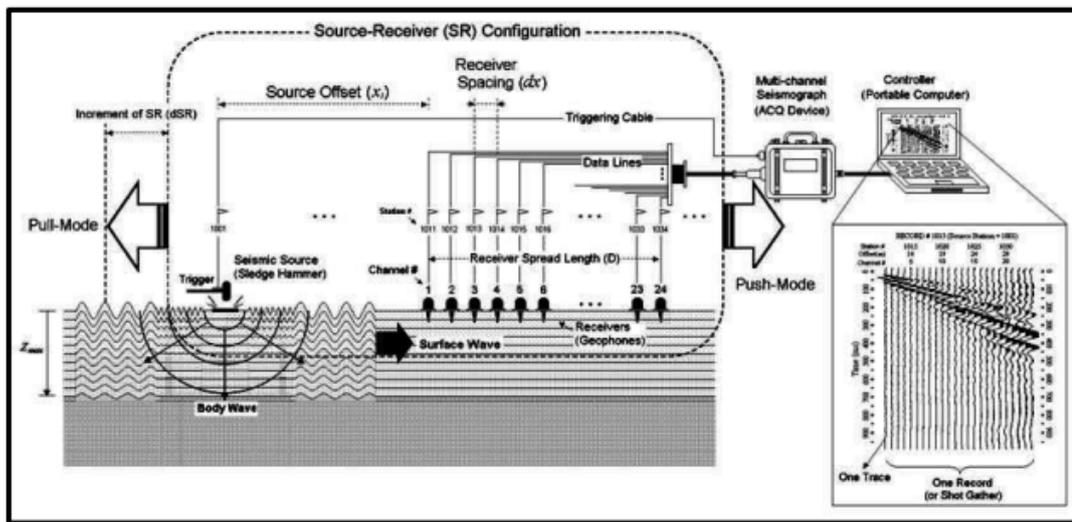


Figura 5: Esquema de Toma de Datos de MASW

2.2.1 Principio del MASW (Multichannel Analysis Surface Waves)

El principio del método de MASW se basa la obtención de un perfil de velocidad de onda de corte empleando para ello registros sísmicos de ondas de superficie generadas a partir de un golpe o shot en superficie. Estos registros son analizados en función a la distribución de velocidades y frecuencias, para finalmente obtener la Curva de Dispersión de Velocidades, para luego por métodos de inversión obtener el modelo de variación de la velocidad de onda de corte.

2.3 Método Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW 2D)

Para la obtención de secciones en 2D en función de la Velocidad de Onda de Corte (V_s), se hace uso del análisis de Cross-Correlación del Punto Medio Común (CMPCC) en datos multicanal de ondas superficiales. El análisis de Cross-Correlación del Punto Medio Común es una extensión adicional al Análisis Multicanal de las Ondas

Superficiales (MASW), que permite obtener en las curvas de dispersión las velocidades de fase con mayor precisión y resolución; así mismo secciones en 2D con un mayor contraste en comparación con los métodos sísmicos convencionales.

En general, el ensayo MASW 2D utiliza el concepto de la reflexión sísmica del CDP (Punto Profundo Común), que es el punto medio entre un par receptores y la fuente, y el punto medio común (CMP), que es un conjunto de trazas que tienen el mismo punto medio. Para cualquier configuración dada, se correlaciona cada par de trazas de un registro, reúne todas las trazas de correlación por CMP, entonces esas trazas que tienen igual espaciamiento se apilan en el dominio del tiempo (Hayashi y Suzuki, 2004). Estos pasos adicionales mejoran la técnica MASW original por el aumento efectivo de la resolución lateral y la precisión de la V_s final en una sección transversal.

2.4 Método Análisis Multicanal de Microtrepidaciones (MAM)

El método MAM o Análisis de Microtrepidaciones en Arreglo Multicanal, consiste en monitorear vibraciones ambientales del entorno de la adquisición, es decir utiliza como fuente todo ruido ambiental (mareas, transporte, peatonal, etc.), en arreglos predeterminados y a través del análisis de dispersión del registro de vibración, se determina las velocidades de ondas S en un perfil Unidimensional. Cabe mencionar, que las bases teóricas del método presentan cierta similitud al método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW).

La principal diferencia entre el método MASW y MAM es el proceso de adquisición (fuente activa y pasiva). El método MASW debido a un suelo anisotrópico puede llegar a una profundidad máxima de investigación entre 20 a 30 m. Para llegar a una uniformidad de investigación del subsuelo ($H=30m$), a través de una fuente activa en el mismo rango de frecuencias, se debe utilizar fuentes con mayor magnitud (SPT, explosivos, etc.); lo cual hace que sea un método poco proactivo y antieconómico. Debido a esta necesidad, la metodología a aplicar es analizar los ruidos ambientales denominado microtrepidaciones, que suelen ser de baja frecuencia (1-30 Hz), con longitudes de ondas que van desde unos cuantos kilómetros (fuentes naturales), a unas pocas decenas o cientos de metros (fuentes artificiales) permitiendo obtener perfiles de la velocidad de onda de corte (V_s) a mayor profundidad. En general, la combinación de los métodos MASW y MAM, permiten obtener perfiles de ondas S a profundidades mayores a 30 m, en la figura 6 se puede observar un típico registro de sísmica pasiva.

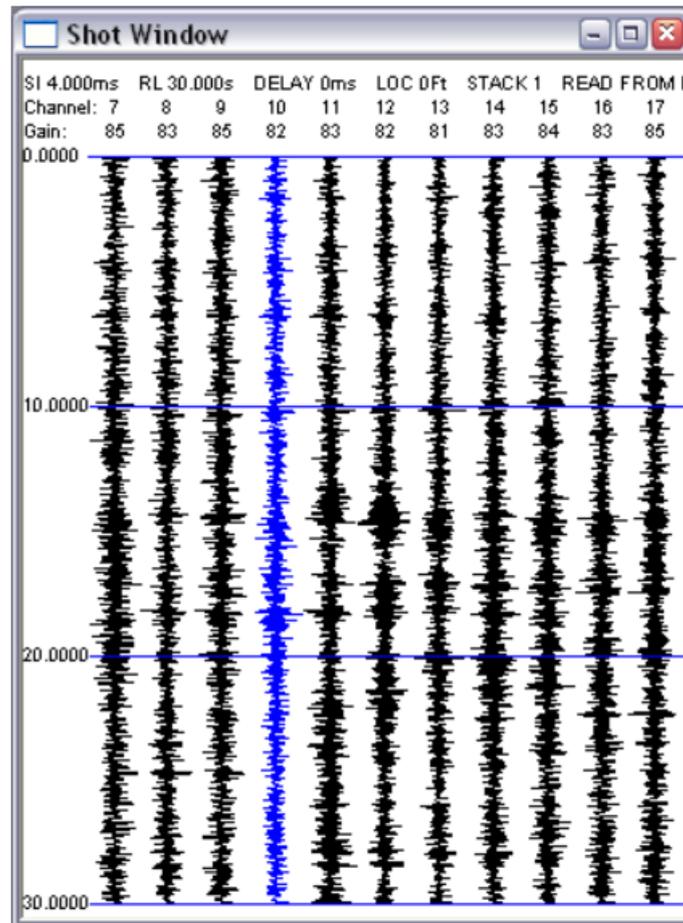


Figura 6: Típico registro de la sísmica pasiva

3. MÉTODO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

El método eléctrico es sin duda uno de los más conocidos de entre las técnicas de prospección geofísica y representa una solución tecnológicamente válida y robusta en investigaciones hidrológicas someras. Los métodos eléctricos constituyen pruebas realizadas para la determinación de las características geotécnicas de un terreno, como parte de las técnicas de un reconocimiento geotécnico.

El principio físico en el que se basa esta metodología está relacionado con el siguiente concepto: mediante un dispositivo electródico, se inyecta una corriente estacionaria a través de un par de electrodos puntuales [C1 y C2], y se lee la diferencia de potencial entre otro par de electrodos [P1 y P2]. La relación de estas dos magnitudes proporciona una resistividad aparente que depende de la resistencia de los materiales presentes en el subsuelo (Figura 7).

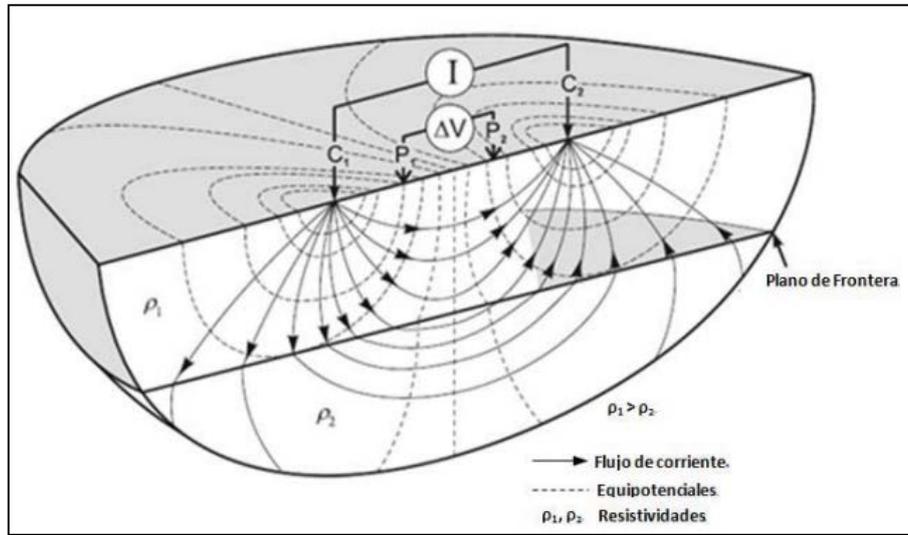


Figura 7: Principio del método resistivo, dispositivo electrónico lineal (cuadrípolo). (Tomada de Knödel, 2007).

3.1 Método de Tomografía Eléctrica.

La Tomografía eléctrica es un método geofísico que utiliza la teoría de potencial eléctrico y a través de la emisión de corriente eléctrica al terreno y según los materiales presentes se va viendo las variaciones del potencial eléctrico asociado a la resistividad de cada tipo de roca, las resistividades son representados en secciones 2D y bloques 3D, en la figura 8 se muestra un esquema de la técnica de Tomografía eléctrica.

Este método consiste en obtener información de la distribución resistiva del subsuelo sobre un perfil, se utilizan diferentes tipos de dispositivos tetraelectródicos (dipolo - dipolo, polo - dipolo), y su principal función es determinar de manera lateral los cambios en la estructura geológica del subsuelo.

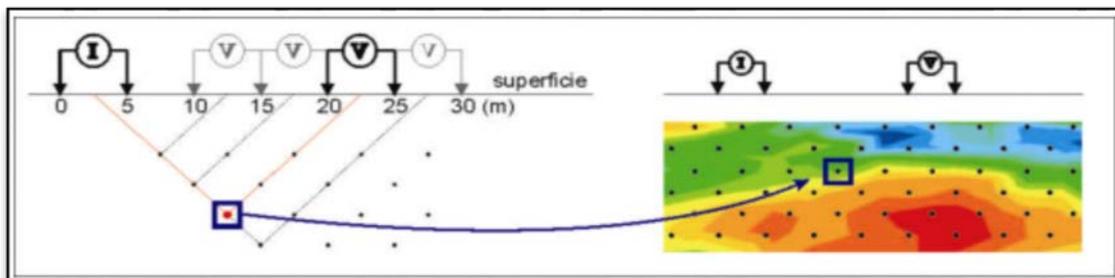


Figura 8: Representación simplificada de la técnica de Tomografía Eléctrica para un arreglo dipolo-dipolo. (Chávez et al., 2011)

4. EQUIPOS Y PARAMETROS DE LEVANTAMIENTO PARA LA REFRACCION MASW y MAM

El equipo utilizado para el levantamiento sísmico es un sismógrafo que registra las señales de las ondas **P** y **S** en 24 canales de registro, antes de ser llevado a campo se realizaron controles de operatividad realizando pruebas de registro en comparación con equipos similares y determinando los mismos registros y así de esta manera se concluyó la buena operatividad del equipo.

4.1 Equipo de Refracción Sísmica.

El levantamiento se realizó empleando el siguiente equipo:

- 01 sismógrafo de marca Geometrics, modelo Geode
- 01 computadora personal con software de adquisición ESOS
- 01 cable sísmico de 24 canales
- 24 geófonos
- Cable de contacto de Comba (Hammer Switch Cable)
- Una comba de 20 Lb.
- Platillo de contacto de Comba
- Baterías de 12 V

La unidad de registro es controlada a través de una computadora portátil usando el software ESOS, el cual incluye rutinas de lecturas interactivas de los primeros arribos de las ondas refractadas, que sirven para optimizar la toma de datos. Esta opción de lectura permite sumar datos de múltiples impactos, permitiendo mejorar la señal sísmica/ruido. Con ello se podrá definir mejor los cambios de velocidad en profundidad y así poder determinar el número de capas para cada estudio.

4.2 Parámetros de adquisición de Refracción Sísmica MASW y MAM

Los parámetros de levantamiento de campo para los diferentes ensayos sísmicos son mostrados en las siguientes tablas:

Tabla 8: Parámetros de adquisición de la Refracción

PARAMETRO	DESCRIPCION
Mediciones	t , Tiempo de Arribo de P
Arreglo de geófonos	24 unidades
Intervalo entre geófonos	3 m.
Ganancia de Pre amplificación	36 Db.
Filtros	No se utilizó
Intervalo de muestreo	0.250 milisegundos
Fuente de Tiro	Golpe de martillo

Tabla 9: Parámetros de adquisición del MASW

PARAMETRO	DESCRIPCION
Mediciones	t , Tiempo de Arribo de S
Arreglo de geófonos	24 unidades
Intervalo entre geófonos	3 m.
Ganancia de Pre amplificación	36 Db.
Filtros	No se utilizó
Intervalo de muestreo	0.5 milisegundos
Fuente de Tiro	Golpe de martillo

La empresa contratante suministró el plano topográfico del área de estudio que sirvieron de guía para ubicar y realizar los tendidos de los cables, ya con las líneas planteadas y considerando la profundidad de investigación (entre 30 y 40m para la Sísmica y 30m para el MASW). El replanteo de las líneas se realizó en campo, observando las distancias requeridas para la información y las direcciones que debían tener las líneas.

Tabla 10: Parámetros de Adquisición para MAM

PARAMETRO	DESCRIPCION
Configuración de dispositivo	Lineal
Mediciones	t , Tiempo de Arribo de S
Arreglo de geófonos	11 unidades
Intervalo entre geófonos	10 m.
Tipos de geófono	4.5 Hz vertical
Ganancia de Pre amplificación	36 Db.
Filtros	No se utilizó
Intervalo de muestreo	2 milisegundos
Fuente Sísmica	Micro tremores ambientales. En sitios "callados" el ruido puede ser generado por equipo pesado, camiones, etc. Pero debe ser posicionado al menos a una longitud de arreglo de distancia del arreglo.

5. EQUIPOS Y PARAMETROS DE LEVANTAMIENTO PARA LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

5.1 Equipo de Tomografía Eléctrica

El levantamiento se realizó empleando el siguiente equipo:

- Un equipo transmisor Innova Electronics de 250 Watts
- Un receptor marca GDD modelo RX 8-32 de 10 canales con baterías internas
- 24 electrodos de metal
- Cables de corriente de 100 m
- Cables de potencial de 120 m

En la tabla 11 se indican el modelo del equipo eléctrico y en la figura 9 se puede apreciar el equipo empleado para tomografía eléctrica.

Tabla 11: Instrumentos eléctricos utilizados para el estudio

Instrumentos	Modelo
Equipo RX	GDD 10 Canales con programación de 20 ventanas en modo user
Transmisor TX	Innova Electronics de 250 Watts de potencia



Figura 9: Equipo Eléctrico para tomografía (Receptor y Transmisor Innova Electronics)

5.2 Parámetros de Adquisición de Tomografía Eléctrica

Los parámetros utilizados en el levantamiento se detallan en la tabla 12, el modo del levantamiento fue de manera Lineal en 2D. Las mediciones se realizaron utilizando el dominio de tiempo en el cual se inyecta corriente por 2 segundos y se corta en otros 2 segundos y de esta manera el equipo invierte las polaridades de la corriente, para que el equipo receptor pueda detectar estos cambios y así sincronizar las lecturas de inversión.

Las líneas de investigación fueron programadas según el requerimiento del cliente, donde se indicaron el comienzo y el fin de tal manera que abarque el ámbito de influencia de la zona de evaluación, la dirección fue tomada de tal manera que se pueda cortar las posibles anomalías presentes en la zona.

Para la configuración de los electrodos se utilizó el arreglo Polo-dipolo por lo que se utilizó un punto auxiliar, denominado como infinito y este es ubicado a una distancia prudente y perpendicular a la línea de lectura, así de esta manera asegurarnos que este punto no genere un sub campo en las lecturas a lo largo de la línea.

La distancia entre los puntos de lectura fue de 10 metros asegurando así una investigación por encima de los 30 metros con 10 niveles de investigación.

En la Tabla 12 se presenta un resumen de los parámetros eléctricos usados para las lecturas de las tomografías programadas dentro del proyecto.

Tabla 12: Parámetros de adquisición de la Tomografía Eléctrica

Parámetros	Modo de Adquisición
Mediciones	Dominio de Tiempo
Intervalo entre las líneas	No hay
Configuración de electrodos	Polo – Dipolo
Extensión del dipolo	10 m
Densidad de puntos	2000 pto /km
Profundidad nominal	30 metros
Factor de separación (n)	Lecturas de n 1 a n 10
Ventanas de medición	20 ventanas de 80 milisegundos
Tiempo de Retraso	240 ms

6. PROCEDIMIENTOS DE CAMPO PARA LA REFRACCION SÍSMICA MASW Y MAM

Los trabajos de campo comprenden tres etapas principales para realizar los registros sísmicos. A continuación, se detallan los procedimientos efectuados en campo dado por una secuencia:

- **Reconocimiento de la zona de estudio.** Se realizó un análisis visual de las características del terreno, evaluando la accesibilidad, peligros y riesgos que puedan suscitarse.
- **Instalación de equipos y cables.** Una vez realizada la inspección de la zona, se procedió a determinar la ubicación de las líneas sísmicas observando la extensión y dirección de estas, para luego realizar la verificación de los equipos a utilizar, previo a la instalación del sismógrafo y geófonos, para proceder a realizar el tendido de los cables y la instalación de los geófonos a cada 3 mts.
- **Toma de datos.** Al momento de realizar los Golpes con la comba el operador verifica la instalación de los geófonos observando en el módulo de la Lap -Top y confirma el disparo mediante una radio. El operador evalúa la información registrada y designa si se repite o se realiza otro golpe en otra posición, se muestra una representación en la figura 10.

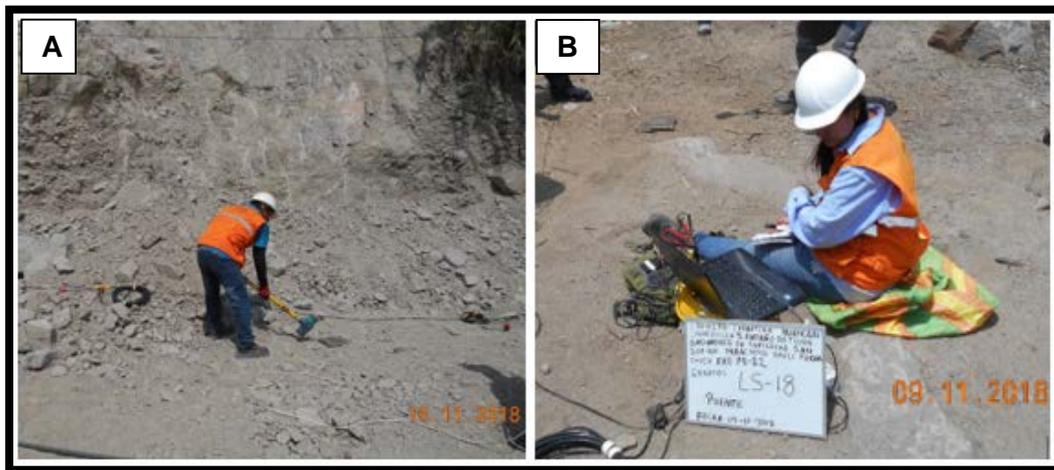


Figura 10: Representación de la adquisición de datos sísmicos en campo
A) Generación de Golpes B) Registro en Laptop

6.1 Consideraciones del Levantamiento de Campo

- Se realizaron 91 líneas sísmicas de 3m de separación entre geófonos, denominadas LS con una extensión de 75 m cada una.

- Para lograr alcanzar profundidad se hicieron golpes o shots fuera de línea con la intención de aumentar el offset del dispositivo y así mismo su extensión.
- Se realizó 39 puntos de MASW con un espaciamiento entre geófonos de 3 m.
- Para los ensayos sísmicos se utilizó una comba de 20 libras con la finalidad de mejorar la relación de señal /ruido. Así también se empleó la técnica de acumulación de golpes para una misma lectura, considerando que la zona se encuentra en zonas de puentes, zonas inestables y zonas de túneles, para así lograr obtener un control de calidad de los datos.
- Se tomó las coordenadas en campo de la posición de los geófonos y de los Shots, con el fin de poder ubicarlos en el plano de ubicación y en los perfiles sísmicos (ver Anexo I: Plano de ubicación).

7. PROCEDIMIENTOS DE CAMPO PARA LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

Los trabajos de campo comprenden tres etapas principales para realizar los registros eléctricos, a continuación, se detalla los procedimientos efectuados en campo dado por una secuencia:

- **Reconocimiento de la zona de estudio.** Se realizó un análisis visual de las características del terreno, evaluando la accesibilidad, peligros y riesgos que puedan suscitarse.
- **Instalación de equipos y cables.** Una vez realizada la inspección de la zona, se procedió a determinar la ubicación de las líneas, observando la extensión y dirección de estas para proceder a realizar el tendido de los cables de potencial y de corriente, tendiéndose los cables para luego proceder con la instalación del clavado de los electrodos, colocando electrodos (Varillas de acero) a cada 10 metros, para la adquisición de datos; primero se ubicaban los puntos en la dirección indicada y luego se registraban estos puntos en un GPS Diferencial, seguidamente se procedió a conectar los terminales del cable de recepción a cada electrodo en intervalos de 10 metros dependiendo de la línea.
- **Toma de datos.** Una vez establecida las líneas eléctricas con los puntos y cables, se procederá a realizar las medidas de resistividad. A través de un Equipo transmisor de corriente el cual se encargará de emitir corriente hacia el subsuelo mediante los electrodos y el Equipo receptor de voltaje el cual recepcionará los valores de potencial, en conjunto los dos equipos, serán los encargados de recibir las lecturas que se registran; ya registrada la información estos datos serán transferidos a un computador y usando los softwares adecuados se procederá a realizar las secciones preliminares. Se muestra una representación en la figura 11.



Figura 11: Representación de la adquisición de datos eléctricos en campo
A) Tendido de cable de corriente, B) Registro de datos con el equipo eléctrico

8. PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE LA REFRACCION SISMICA MASW Y MAM

El procesamiento de datos y la interpretación de las secciones para los métodos de refracción sísmica, MASW Y MAM, se realizan netamente en gabinete, empleando para ello software especializado.

8.1 Análisis de Registros

En este proceso se verifica y analiza cada una de las señales sísmicas obtenidas en campo, calificando cada uno de los registros y sus repeticiones a fin de obtener el registro de mejor calidad para el procesamiento final de datos de Refracción, MASW y MAM.

8.2 Procesamiento de Datos

A.- Para el caso de la Refracción Sísmica, en este proceso se determina el tiempo de arribo de cada señal en cada registro. Para ello se hace uso del software llamado Pickwin versión 3.14.

Una vez obtenido el tiempo de arribo para cada geófono, a partir de ellos se obtiene las gráficas Tiempo - Distancia, llamadas también Curvas Dromocrónicas.

En dicha grafica se determina los cambios de pendiente de los tiempos obtenidos para cada geófono, en forma de rectas, de lo cual se deduce por teoría que el inverso de la pendiente “mi” de cada una de las rectas r_i , representa la Velocidad Aparente V_i , para un estrato i . La obtención de las velocidades y espesores de los estratos del modelo obtenido son realizados en el software de procesamiento

denominado Plotrefra. Dicho procedimiento incluye la corrección por topografía de cada geófono y punto de disparo.

B.- Para el caso de la sísmica MASW, se emplea el módulo Surface Wave Analysis Wizard, el cual primero importa el registro obtenido para cada shot realizado, previamente seleccionado y calificado, para después obtener la Curva de Dispersión de las velocidades de las ondas de superficie. Posteriormente se obtiene por inversión el perfil de Velocidad de onda de Corte.

C.- Para el caso de la sísmica MASW 2D, se empleó el software llamado SeisImager/SW, el cual contiene un módulo de análisis de ondas superficiales llamado Surface Wave Analysis Wizard.

Por medio del módulo Surface Wave Analysis Wizard, se realiza el cálculo de las señales de las ondas de corte en un sistema que muestre el espaciamiento de los geófonos (m) y el tiempo de adquisición (ms), a partir de todos los registros sísmicos, se procede a obtener la curva de dispersión a través del cálculo de la velocidad de fase donde se presenta la variación de la curva de dispersión en un gráfico de Velocidad de Fase versus Frecuencia, como se muestra en la figura 12.

	Single channel record	Shot record	CMP gather
1. Distribution of sampling for reflection methods	<p>1a.</p>	<p>1b.</p>	<p>1c.</p>
	Original surface wave method (SASW)	New surface wave method (MASW)	Advanced surface wave method (CMP-based MASW)
2. Distribution of sampling for active source surface wave methods	<p>2a.</p>	<p>2b.</p>	<p>2c.</p>

Figura 12: Representación gráfica del concepto de CMP aplicado para el MASW 2D

En la curva de dispersión se selecciona el modo fundamental del suelo que se ve representado por un color intenso, el cual denota una mayor energía, luego se

presenta las curvas de dispersión para todos los golpes generados a lo largo de la línea como lo mostrado en la Figura 13.

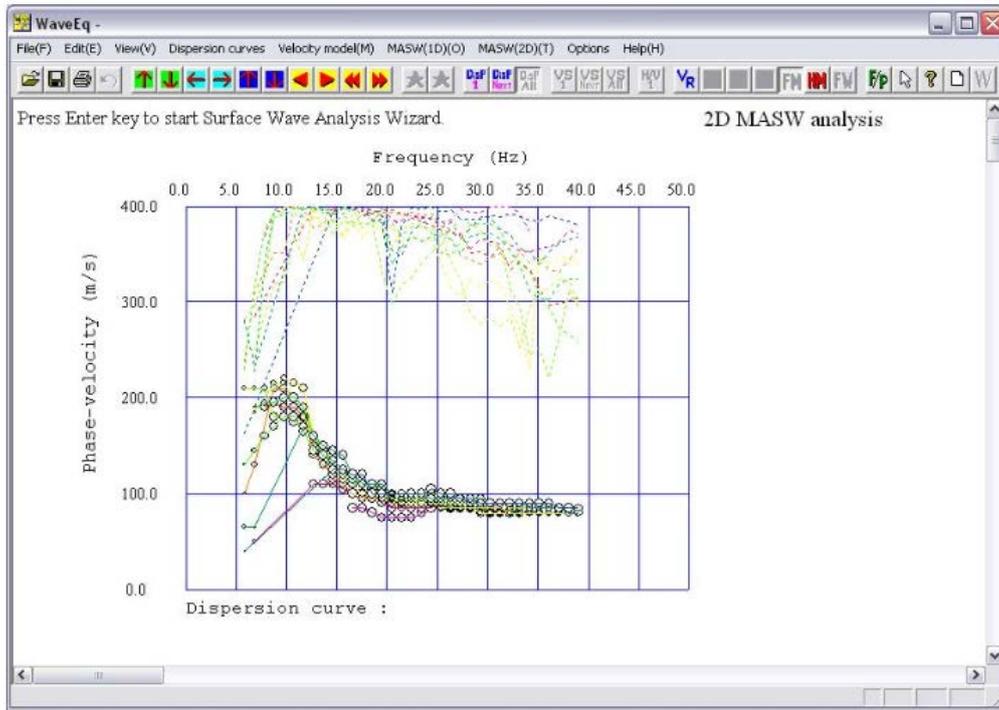


Figura 13: Curvas de dispersión para los diferentes golpes generados

A partir de la velocidad aparente determinada en la curva de dispersión, se obtienen las variaciones de la velocidad de la onda de corte (V_s) en profundidad. Luego mediante el proceso de inversión no lineal de ondas e iteraciones se obtiene el perfil unidimensional del suelo que tiene un sistema de profundidad (m) y velocidad de ondas de corte en (m/s) empleándose el módulo WaveEq.

D.- Para el caso del ensayo sísmico del MAM, las señales obtenidas en campo serán procesadas empleando el software SeisImager/SW, el cual contiene un módulo de análisis de ondas superficiales llamado Surface Wave Analysis Wizard y waveEq.

EL procesamiento consiste en obtener las señales de las ondas de corte en un sistema que muestre el espaciamiento de los geófonos (m) y el tiempo de adquisición (ms). Luego por medio del módulo Surface Wave Analysis Wizard, los registros sísmicos obtenidos en el dominio del tiempo son llevados al dominio de las frecuencias; obteniendo un gráfico de Velocidad de Fase vs. Frecuencia, el cual nos permite definir la curva de dispersión de las ondas Rayleigh. Luego

haciendo uso del módulo WaveEq del software SeisImager/SW se calcula la variación en profundidad de la Velocidad de Onda de Corte, a partir de los datos de la curva de dispersión mediante una inversión no lineal (Mínimos Cuadrados), como se muestra en la figura 14.

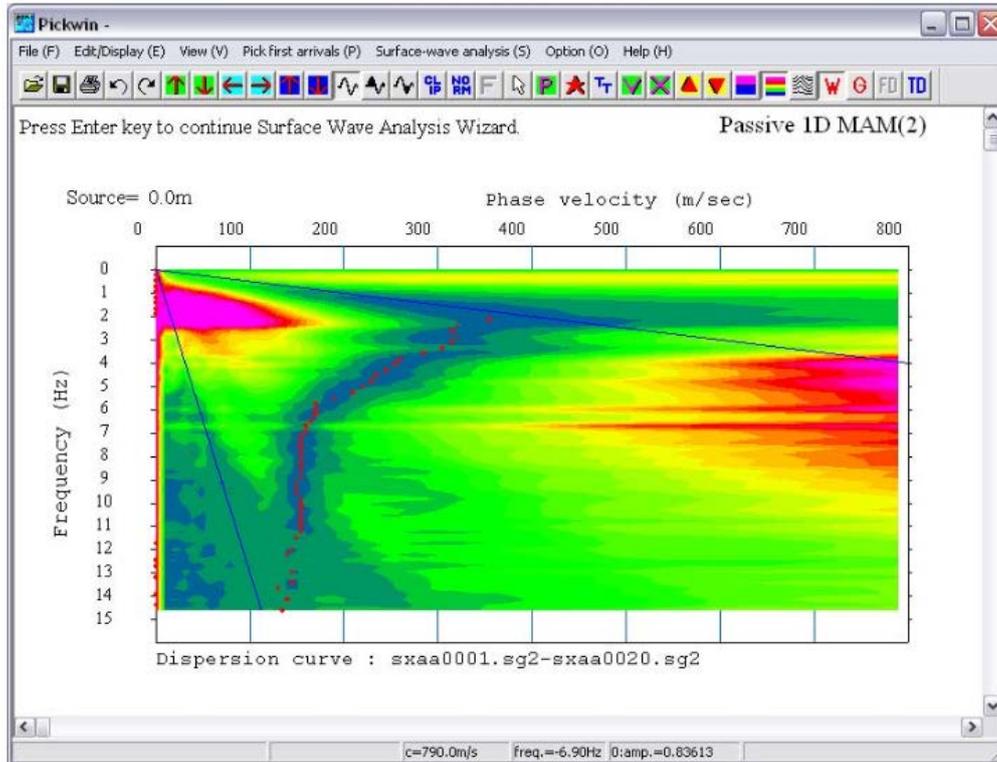


Figura 14: Conversión de la fase de tiempo al dominio de frecuencias representado por la fase de velocidad.

8.3 Presentación de los Datos Sísmicos

Para los ensayos sísmicos, la presentación de los datos y los resultados se hace a través de:

- Dromocronas; donde se observan las gráficas espacio tiempo estos gráficos los observamos en el Anexo II y a partir de estos gráficos se genera la velocidad de la Onda P y las aproximaciones de las diferentes capas presentados en los perfiles.
- Perfiles Sísmicos; donde se muestra el modelo de velocidades obtenidos a través de modelos inversos de velocidades y los cuales se grafican mediante capas de velocidades según la profundidad y se pueden observar en el Anexo III.

- Parámetros Pseudodinámicos; donde se muestra un resumen de los resultados obtenidos para cada sección sísmica, como espesores, profundidades de cada capa, los cálculos Pseudodinámicos, incluyendo constantes elásticas este resumen de resultados lo podemos observar en el Anexo V y una pequeña descripción, el tipo de material y la consistencia de cada capa según la variación de velocidad de P y S asociado a la densidad de material.
- Perfiles MASW1D; se ha determinado la velocidad de las ondas de corte en profundidad, representando la variación de velocidad a lo largo de un perfil y con ayuda de la refracción proyectamos las variaciones a lo largo de las secciones, esto lo podemos observar en el Anexo VI.
- Para el caso de los perfiles MAM, cuyo fin es incrementar la profundidad que alcanzan los resultados de las ondas sísmicas y sus velocidades. Estos perfiles se detallan en el Anexo VII.

8.4 Interpretación de las secciones Sísmicas

Finalmente, con ayuda de los datos de Refracción Sísmica y el MASW, se hace un análisis cualitativo correlacionando dicha información.

Y apoyándonos con información de la Norma Técnica Peruana (NTP-E030-2016) podemos correlacionar los valores de la Onda S, al tipo de consistencia del subsuelo.

Así mismo con la Norma Internacional, ASTM –D5777, podemos asociar los resultados de la Onda P, al tipo de material del subsuelo, ver Anexo XI

En las secciones procesadas e interpretadas, se tienen zonas delimitadas y numeradas de acuerdo a los valores de velocidad de la Onda P, en algunas secciones se han delimitado en tres capas y en otras en dos, cada sección muestra las diferencias de cada capa en profundidades y espesores, representando las formas que cada una pudiera tomar en profundidad.

De los Masw ejecutados se ha determinado la velocidad de las ondas de corte en profundidad, si bien es ciertos estos resultados no se presentan en todas las secciones, nos da una representación de la variación de velocidad a lo largo de un perfil y con la ayuda de la refracción proyectamos las variaciones a lo largo de las secciones, es por esto que en cada sección se presentan un cuadro resumen como el presentado en la Tabla 13, donde se presenta un resumen de los resultados obtenidos con cada sección de refracción, como espesores, profundidades de cada capa, los cálculos Pseudodinámicos, una pequeña

descripción, el tipo de material y la consistencia de cada capa según la variación de velocidad de P y S asociado a la densidad de material.

Tabla 13. Tabla de parámetros dinámicos del suelo.

Línea Sísmica 69											
Nro. Capa	Profundidad (m)	Potencia (Espesor) (m)	Velocidad Onda P (m/s)	Velocidad Onda S (m/s)	Módulo de Poisson (Razón de Poisson) ν	Densidad Estimada (Ref. Telford, 2001) $d(Kg/m^3)$	Módulo de Corte $Gd(Kg/cm^2)$	Módulo de Young $Ed(Kg/cm^2)$	Módulo Bulk $Kd(Kg/cm^2)$	Tipo de material Asociado (Ref. ASTM-D5777)	Consistencia (Ref. NTP-E030-2016)
1	0 a 4.90	1.53 a 4.90	353.00	217.00	0.20	1868	896.95	2146.01	1177.62	Materiales superficiales y/o antrópicos.	Medianamente Compacta y/o Medianamente Densa
2	1.53 a 11.33	2.96 a 6.88	953.00	454.00	0.35	1888	3968.13	10739.46	12193.94	Materiales granulares, gravas y arenas con poca presencia de materiales finos y/o una mezcla de los materiales antes mencionados.	Medianamente Compacta y/o Medianamente Densa
3	4.54 a ?	-	1176.00	680.00	0.25	1946	9175.57	22917.88	15208.80	Materiales granulares, gravas y arenas con poca presencia de materiales finos y/o una mezcla de los materiales antes mencionados.	Compacta y/o Densa

*La tabla esta basada en el Perfil LS-69 y el MASW-34 (La distancia aproximada entre el MASW mas cercano a la Línea Sísmica es de 0.10 metros).

9. PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

El procesamiento se realizó empleando las técnicas del módulo de Res del programa de Prosys II visualizando los valores obtenidos conjuntamente con los porcentajes de error. Como primer paso se realizó el Control de Calidad (QC) mediante la observación en campo de las diferencias de potencial para cada dipolo de lectura, eliminando las lecturas cuyo nivel de ruido era mayor de 5%. Se realizaron dos repeticiones por punto de medida, con la finalidad de garantizar la repetición de las lecturas y obtener un buen control de calidad.

Adicionalmente se verifico los valores de tal manera que no se produzcan saltos entre puntos cercanos y de esta manera se filtró estos datos teniendo mucho cuidado de no eliminar anomalías representativas del terreno.

9.1 Control de Calidad

Las lecturas en campo se controlaban observando los porcentajes de error de la resistividad aparente para cada lectura, se realizó 2 medidas en cada punto para comprobar la repetición de los valores. Además de estas observaciones se revisaban las diferencias de potencial para ver la correlación de la información si corresponde a los niveles de profundidad respectivo. Posteriormente los valores obtenidos fueron comparados con los valores de la tabla 14, que muestra valores de resistividades asociados a diferentes materiales.

Tabla 14. Valores de Resistividades Teóricos (Parasnis SD. Principios de Geofísica Aplicada)

TIPO DE AGUA Y ROCA	RESISTIVIDAD Ohm.m
Agua de mar	0.20
Agua de acuíferos aluviales	10 -30
Agua de fuentes	50 -100
Arenas y gravas secas	1 000 - 10 000
Arenas y gravas con agua dulce	50 - 500
Arenas y gravas con agua salada	0.5 - 5
Arcillas	2 - 20
Margas	20 - 100
Calizas	300 - 10 000
Areniscas arcillosas	50 - 300
Areniscas cuarcíticas	300 - 10 000
Cineritas, tobas volcánicas	50 - 300
Lavas	300 - 10 000
Esquistos grafitosos	0.5 - 5.0
Esquistos arcillosos o alterados	100 - 300
Esquistos sanos	300 - 3 000
Gneis, granito alterados	100 - 1 000
Gneis, granitos sanos	1 000 - 10 000

9.2 Proceso de Inversión

Se empleó el programa de inversión para verificar la confiabilidad de los resultados. Este software emplea elementos finitos y métodos diferenciales finitos para generar celdas rectangulares independientes donde el valor del modelo permita variaciones en las tres direcciones simultáneamente. El usuario puede definir la geometría de los bloques rectangulares que conforman el modelo y/o aplicar varios parámetros para ajustar la inversión a un modelo geológico determinado. En el presente caso se ha

aplicado el proceso por defecto, donde lo más resaltante es: Selección de mitad de celda para las tres primeras capas; 02/03 nodos; Máximo diferencia de error entre iteraciones 5%; y con 06 iteraciones.

9.3 Presentación de los Datos Eléctricos

Los resultados del proceso de inversión se presentan en la sección de la línea medida hasta una profundidad de 30 metros donde se puede hacer diferenciaciones del comportamiento geológico en la zona de estudio.

El resultado final de este tipo de estudio es una Imagen distancia profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos, geotécnicos o ambientales como demuestran los diversos ejemplos que se presentan.

Para el método de tomografía eléctrica, la presentación de los datos y los resultados se hace a través de:

- Pseudosecciones de resistividad: Se muestra una pseudosección, la cual constituye una sección con curvas de isoresistividad que reflejan cualitativamente la variación espacial (2D) de resistividad aparente en el perfil investigado, como se puede observar en el anexo VIII.
- Perfiles bidimensionales: Gracias a esta visión bidimensional de alta resolución, este método eléctrico permitirá detectar zonas susceptibles a filtración, así como caracterizar la estimación de la profundidad, esto lo podemos observar en el anexo VIII.

10. CONCLUSIONES

De los trabajos realizados en campo y gabinete se llega a las siguientes conclusiones:

- Los trabajos en campo fueron desarrollados con normalidad y realizando un adecuado control de calidad en los datos para la revisión y procesamiento en gabinete.
- En cada perfil de Refracción, se insertó la sección topográfica realizada en campo con el apoyo de un GPS Garmin MAP 62, esto se niveló con la topografía levantada y actualizada proporcionada por el cliente, ajustando de esta manera cada sección a la forma real en terreno de la superficie y de las capas determinadas en cada sección.
- Se realizó el procesamiento de datos definiendo los tiempos de arribo determinados con la mejor precisión, con la finalidad de obtener lo más real la secuencia de las capas interpretadas e identificación las variaciones de velocidad en cada sección.
- Se ha realizado una interpretación preliminar asociada a las distintas velocidades de la Onda P determinadas con la refracción sísmica y a la Onda S determinadas con el Masw y con la ayuda de la Onda S se ha logrado diferenciar zonas en profundidad con posible presencia de vacíos o roca fracturada.
- En las secciones de refracción sísmica, se han determinado de forma consistente la presencia de 02 y en otros 03 estratos y/o capas respecto a la velocidad de onda de su respuesta sísmica, para cada línea sísmica (materia de investigación de este estudio).
- De acuerdo a los resultados obtenidos en campo, los valores de Velocidad de la Onda P son variables para la primera capa, pudiendo encontrar tanto materiales superficiales y/o antrópicos como materiales granulares, asimismo, en el caso de las capas ubicadas a mayor profundidad los materiales que se encontraron suelen presentar suelos mixtos en muchos casos, presencia de roca fracturada, roca con distintos grados de fracturación o roca sana en algunos casos.
- Respecto a los resultados de las evaluaciones de tomografía que se realizaron, los resultados muestran algunas zonas con agua o materiales con alto contenido de humedad, mientras que otras zonas se puede notar la presencia de materiales semipermeables y materiales asociados a roca en profundidad.
- Para una mejor interpretación de los datos obtenidos mediante los diferentes ensayos, el Anexo X contiene los mapas de interpretación de los trabajos realizados en cada una de las zonas de interés.

11. RECOMENDACIONES

- En general los métodos Geofísicos son ensayos indirectos y tienen un grado de aproximación aceptable, sin embargo requiere definir el grado de aproximación de los estratos encontrados a través de calicatas y/o perforaciones para determinar su grado de precisión.
- Asimismo, se recomienda durante el logueo de las perforaciones en detalle definir las anomalías correspondientes a estratos; con la finalidad de evaluar las potencias definidas y poder generar mejor los modelos de velocidad existentes y asociarlos a las rocas presentes.

12. BIBLIOGRAFIA

- Guía Estándar para el Uso del Método de Refracción Sísmica para la Investigación Subsuperficial (ASTM D5777 , pag. 5 , referencia Tabla 1 Rango de Velocidades por Comprensión de Onda en Suelo y Roca)
- Norma Técnica E.030 Diseño Sismo Resistente (Pag. 576296, referencia Tabla 2 – Clasificación de Perfiles de Suelos).
- Clasificación de Sísmica ASCE - 2010.

ANEXOS

ANEXO I: PLANO DE UBICACIÓN DE LOS ENSAYOS SÍSMICOS Y TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS

ANEXO II: DROMOCRONAS

ANEXO III: PERFILES DE REFRACCIÓN SÍSMICA

ANEXO IV: PERFILES SÍSMICOS DE MASW2D

ANEXO V: CONSTANTES ELÁSTICAS

ANEXO VI: MASW1D

ANEXO VII: MAM

ANEXO VIII: PERFILES DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

ANEXO IX: MAPAS DE INTERPRETACIÓN

ANEXO X: PANEL FOTOGRÁFICO

ANEXO XI: NORMAS