



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP



ESTUDIO GEOFÍSICO DE LOS ACANTILADOS DE LA COSTA VERDE EN EL DISTRITO DE MAGDALENA DEL MAR

Región y Provincia de Lima

Lima - Perú
Enero, 2020

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipión

Director SCTS: Juan Carlos Gómez

Autores

Isabel Bernal, Hernando Tavera

Personal de apoyo: Fabiola Rosado
Liliana Torres
Kelly Pari
Luz Arredondo
Wilfredo Sulla
Jorge Salas
José Millones
Javier Oyola
Jesús Huarachi
Henry salas
Jhon Salazar
Mariana Vivanco
Mijael Berduzco
Juan Carlos Villegas
Wendy Quiroz

Personal logística: Robert Yupanqui
Augusto Cárdenas
Máximo Palomino

Personal administrativo: Marisol Enríquez

RESUMEN

En el acantilado del distrito de Magdalena del Mar, se evaluó el comportamiento dinámico de los suelos usando técnicas geofísicas como el método de resistividad eléctrica, gravimetría, métodos sísmicos (refracción, MASW, MAM) y razones espectrales. El procesamiento de los datos geofísicos y el análisis de la información obtenida han permitido definir en superficie y a lo largo del acantilado de la Costa Verde, el límite que separa los suelos estables de los inestables y cuyo comportamiento dinámico presenta un alto peligro por sismos de gran magnitud. Este límite se encuentra, de noroeste (NO) a sureste (SE), a una distancia de 60 a 120 metros desde el acantilado, tierra adentro. En la zona de Medalla Milagrosa, el límite se encuentra a 250 metros desde el acantilado.

Debido a la inestabilidad del terreno, a la ocurrencia de un sismo que genere elevadas intensidades de sacudimiento, las zonas que presentarían mayor riesgo son: Sectores ubicados entre el Jr. Leoncio Prado y la Av. Antonio José de Sucre, Malecón Castagnola, el borde del Malecón Grau, Puericultorio Pérez Aranibar y en algunos sectores del conjunto residencial Marbella.

INDICE

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- OBJETIVO.....	3
3.- METODOLOGÍA Y DATOS	4
3.1.- MÉTODO DE RAZONES ESPECTRALES (H/V)	5
3.1.1.- PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS	9
3.2.- MÉTODOS SÍSMICOS	9
3.2.1.- TOMOGRAFÍA DE REFRACCIÓN SÍSMICA (SRT).....	9
3.2.2.- ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)	9
3.2.3.- ANÁLISIS MULTICANAL DE MICROTREMORES (MAM)	11
3.2.5.- PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS	15
3.3.-MÉTODO DE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (ERT).....	17
3.3.1.- PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS	19
3.4.-MÉTODO GRAVIMÉTRICO	19
3.4.1.- PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS	20
4.- RESULTADOS	22
4.1.- RAZONES ESPECTRALES (H/V)	22
4.2.- SECCIONES SRT	26
4.3.- PERFILES DE MASW Y MAM	28
4.4.- PERFILES DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	31
4.5.- SECCIONES GRAVIMÉTRICAS	33
5.-ZONIFICACIÓN GEOFÍSICA DE LOS ACANTILADOS	37
CONCLUSIONES.....	45
REFERENCIAS	47
ANEXO I	49
ANEXO II	58
ANEXO III	64
ANEXO IV.....	68
ANEXO V.....	76

1.- INTRODUCCIÓN

Desde el año 1960, la zona de Costa Verde incrementa su área de ocupación urbana con ayuda de material de relleno. Estas nuevas áreas fueron destinadas a parques, jardines, áreas deportivas y para la construcción de edificaciones. En este escenario, el 08 de agosto del 2019, en horas de la madrugada, se produjo un derrumbe en el sector del malecón Castagnola, a la altura de la Av. Sucre (Magdalena del Mar), desplazándose aproximadamente 225 m³ de relleno artificial (INGEMMET, 2019). Este material dañó las geomallas en la zona e interrumpió el tránsito vehicular con sentido de sur a norte (hacia el Callao); además, alertó a los vecinos y autoridades locales ante la posible ocurrencia del mismo fenómeno en otros lugares.

De acuerdo al escenario descrito, en la zona costanera del distrito de Magdalena del Mar, se realizaron estudios geofísicos para determinar el comportamiento dinámico del suelo ante el peligro por sismos. En estos estudios, se aplicaron los métodos geofísicos de razones espectrales (H/V), para conocer el periodo de respuesta del suelo y estimar su factor de amplificación ante la ocurrencia sísmica; el método de tomografía de refracción sísmica (SRT), para identificar espesores de capas y velocidades de ondas de corte a diferentes niveles de profundidad; el método de tomografía de resistividad Eléctrica (ERT), para conocer la profundidad del nivel de saturación y el método gravimétrico, para definir la densidad de los materiales presentes en el subsuelo.

El distrito de Magdalena del Mar, es uno de los 43 distritos que conforman la provincia de Lima. Limita por el norte con los distritos de Pueblo Libre y San Miguel, por el este con los distritos de Jesús María y San Isidro, por el sur con el distrito de San Isidro y por el oeste con el Océano Pacífico. En este último, el límite está conformado por la costanera con una longitud de 2.2 km. Magdalena del Mar presenta un área de 1.52 km² y cuenta con una población de 60,290 habitantes al censo 2017 (Figura 1).

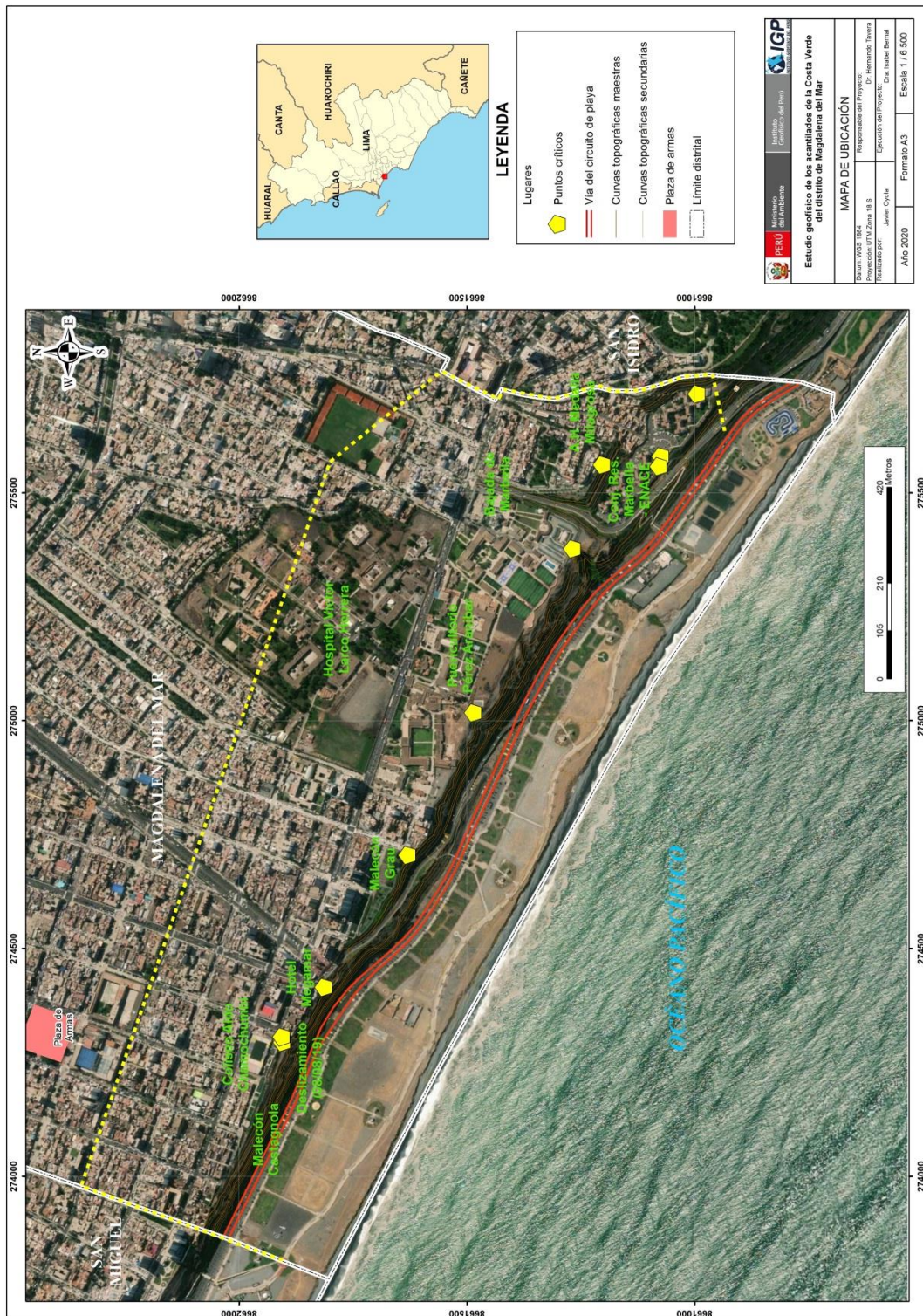


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona costanera en el distrito de Magdalena del Mar. La distribución de los puntos críticos corresponde a zonas afectadas por problemas de asentamientos, grietas y deslizamientos.

2.- OBJETIVO

El objetivo del presente estudio es determinar los parámetros físicos del suelo, mediante la aplicación de técnicas geofísicas, a fin de definir en superficie y a lo largo del acantilado de la Costa Verde (distrito de Magdalena del Mar), el límite que separa los suelos estables de los inestables y cuyo comportamiento dinámico presenta un alto peligro por sismos de gran magnitud.

3.- METODOLOGÍA Y DATOS

Las características físicas del suelo dependen de los materiales que conforman sus diferentes capas en profundidad y que pueden ser conocidas con la geología, estratigrafía y geomorfología. Sin embargo, su dinámica asociada a la ocurrencia de sismos, lluvias, entre otros, puede ser conocida usando métodos geofísicos de monitoreo temporal. En el caso de zonas con la presencia de acantilados, la información que se genere a partir del procesamiento y análisis de los datos geofísicos permitirán identificar y delimitar, en superficie y profundidad, los suelos con diferente comportamiento dinámico asociado a su composición, rigidez y nivel de saturación. Este tipo de suelos, son los propensos a generar deslizamientos ante la ocurrencia de sismos y/o gravedad.

La zona del acantilado en el distrito de Magdalena del Mar, con una longitud aproximada de 2.2 km (Figura 1), está conformado por depósitos aluviales provenientes del río Rímac; es decir, compuestos por gravas (bolonería) soportadas en matriz areno limosa y lentes de arenas (parte media de acantilado). Por otro lado, moradores del distrito de Magdalena, indican que tiempo atrás, partes del acantilado han sido rellenados con material alóctono (rellenos antrópicos) hasta alcanzar, en la actualidad, una altura promedio de 60 m.s.n.m. Asimismo, el reconocimiento in-situ de la actual morfología del acantilado, permitió identificar puntos críticos donde se observa asentamientos diferenciales del suelo, fisuras en paredes y grietas con longitudes de 70 m y aberturas de 5 cm en promedio; además de desplazamientos en muros de mampostería con aperturas de hasta 2 cm en dirección este – oeste. Estos últimos en zonas de recreación, edificios multifamiliares, viviendas y hoteles. Asimismo, es notorio que un gran número de viviendas y edificios de 3 a más pisos, se asientan en el borde del acantilado (Ver Anexo I).

Considerando la geometría del acantilado en Magdalena de Mar y los objetivos del presente estudio, los puntos y líneas donde se realizan la adquisición de datos geofísicos, fueron distribuidos de manera relativamente homogénea, por lo restringido del espacio requerido por los diferentes métodos geofísicos.

3.1.- Método de Razones espectrales (H/V)

El método de razones espectrales (H/V) fue propuesto por Nakamura (1989) para caracterizar la respuesta dinámica del suelo y en algunos casos, estimar su amplificación, ante la sollicitación sísmica. El método hace uso de registros de vibración ambiental que contienen información sobre las características físicas de los suelos en sus primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de cada capa estratigráfica superficial, de diferente espesor, geometría y composición litológica, causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes a la ocurrencia de un sismo de gran magnitud.

La adquisición de datos en campo se realizó durante 10 días del mes de diciembre del 2019. Durante este periodo se recolectaron 123 registros de vibración ambiental utilizando sensores Lennartz y registradores CityShark II (Figura 2). Los puntos de adquisición de datos se distribuyen siguiendo 14 líneas perpendiculares al acantilado y longitudes del orden de 400 metros, con intervalos de 50 metros en promedio. Cada registro de vibración ambiental, tiene una duración de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de datos para su posterior análisis.

En la Figura 3, se muestra la disposición del equipo sísmico, al momento del registro de datos, además de ejemplos de señales de vibración ambiental registrados en un punto cualquiera sobre el Jirón Alfonso Ugarte donde existe ruido de poca amplitud y/o saltos transitorios (MM01-02, suelos compactos), otro en el Jirón Castilla sobre el acantilado con presencia de ruido de fondo constante (MM02-07, suelos heterogéneos); y finalmente, otro ubicado en el circuito de playas con presencia de altos niveles de ruido (MM03-08, suelos muy heterogéneos y/o blandos).

Para aplicar la técnica de razones espectrales H/V, los registros de vibración ambiental fueron tratados por ventanas de 20 segundos, luego se calculó la Transformada Rápida de Fourier a fin de obtener los cocientes espectrales para cada componente de registro entre su componente vertical (E-O/V; N-S/V). Finalmente, en cada señal se procedió a identificar la frecuencia predominante considerando un rango de interés que fluctúa entre 0.5 a 20 Hz y picos/rangos con amplificaciones relativas de al menos 2 veces (Figura 4).

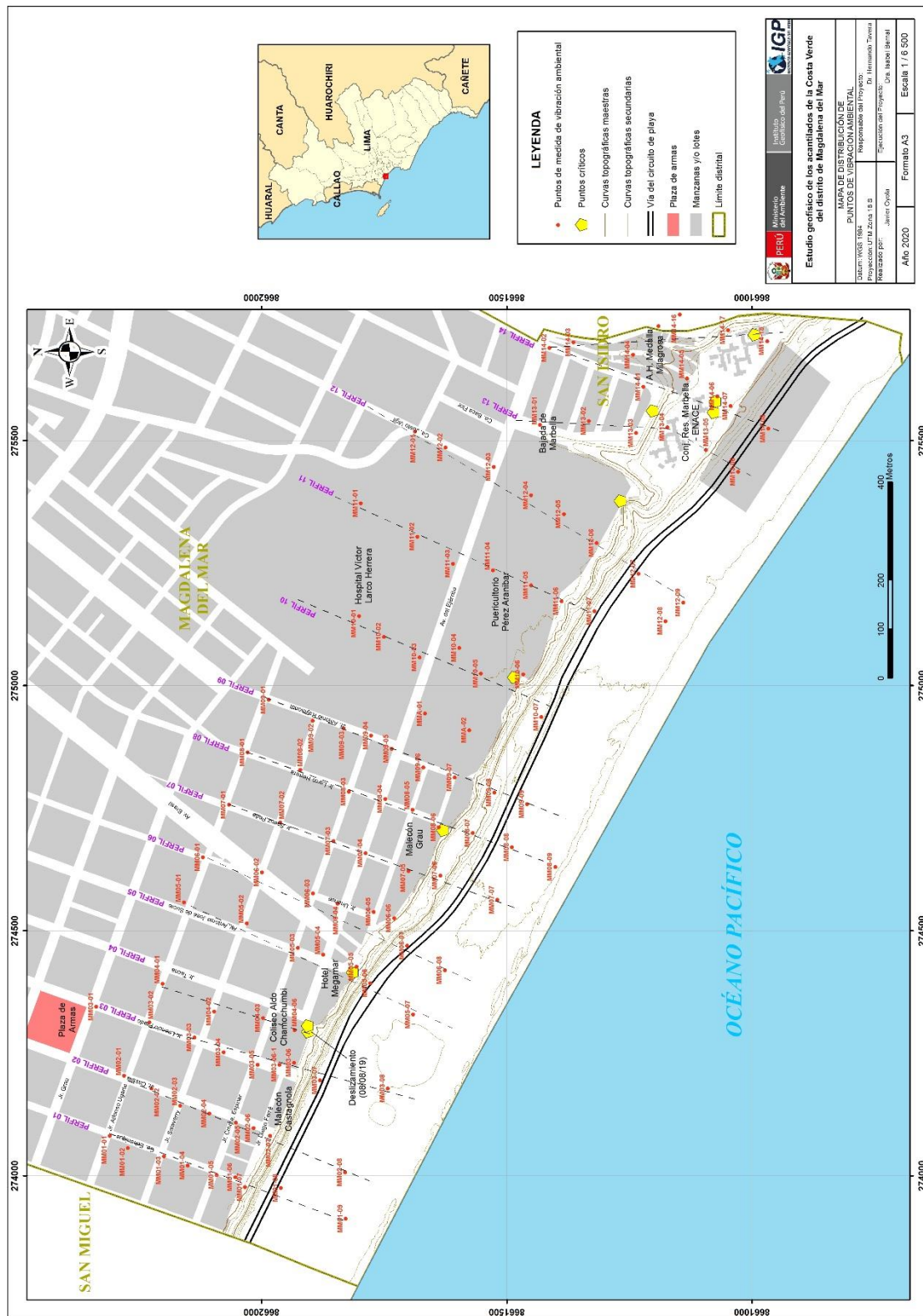


Figura 2. Distribución espacial de los puntos de registros de vibración ambiental en la zona costanera en el distrito de Magdalena del Mar.

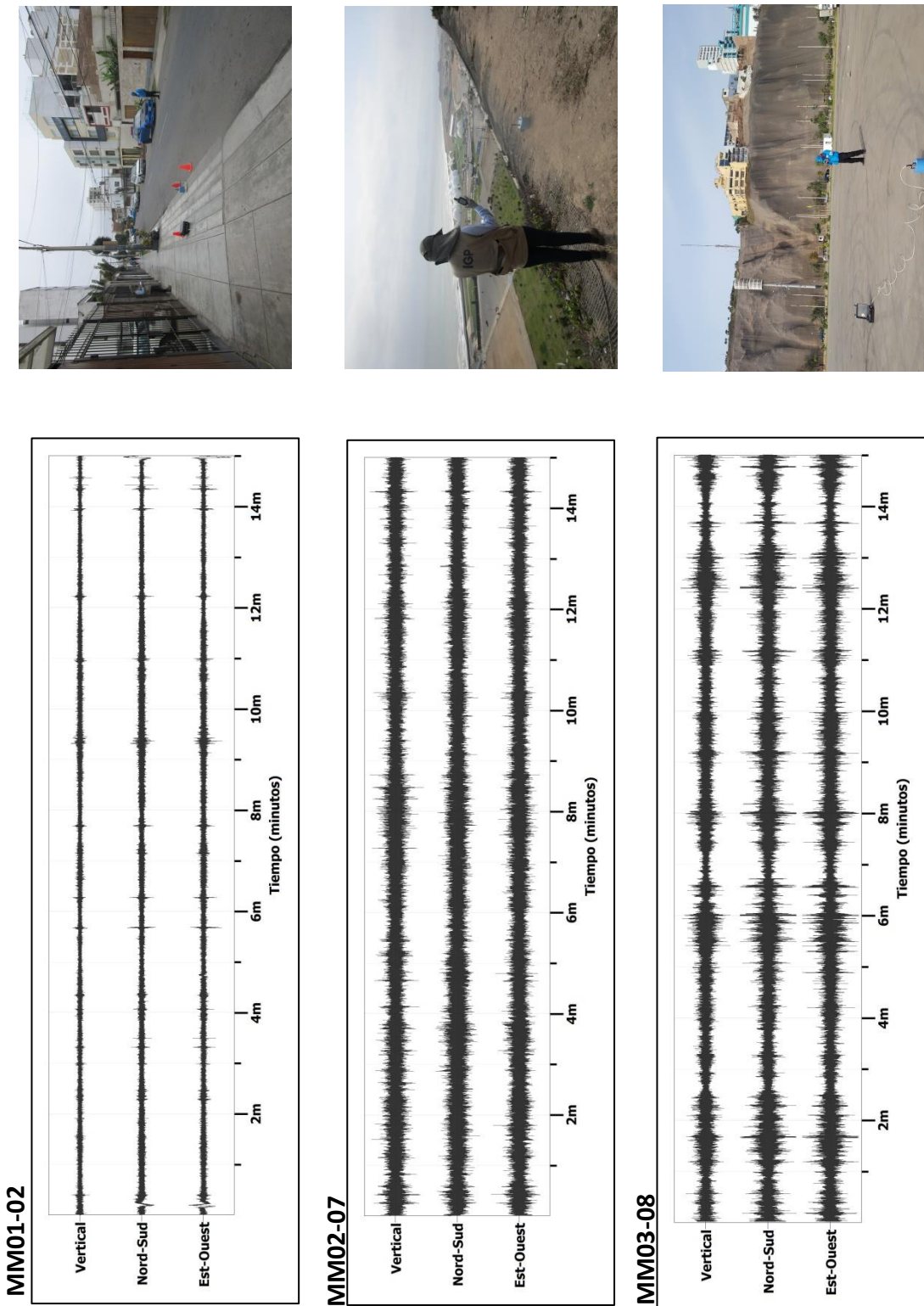
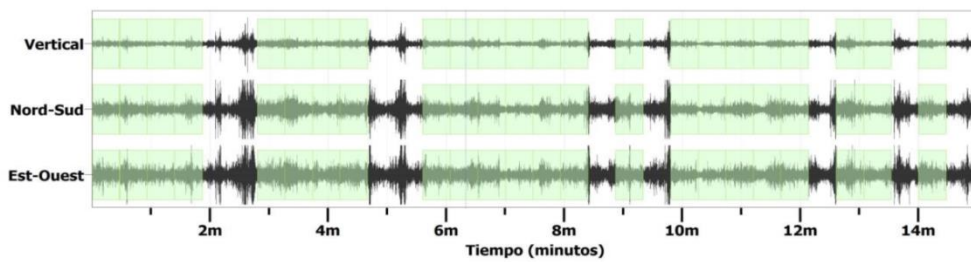


Figura 3. Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales (ver texto)

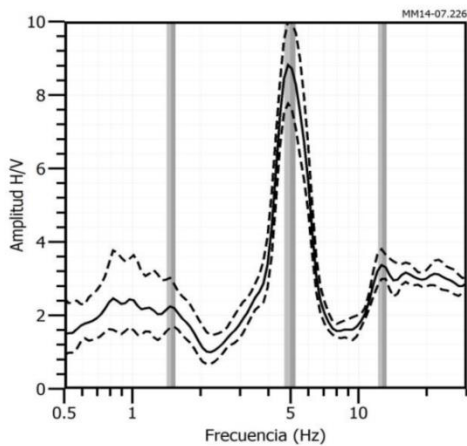
**Evaluación Geofísica de los acantilados de la Costa Verde
en el distrito de Magdalena del Mar
Frecuencias predominantes del Suelo**

MM14-07

Señal registrada y ventanas seleccionadas para el procesamiento



Curva H/V



Recolección de Datos



Interpretación de resultados

Dudoso	Pico(s) H/V	f0	f1	f2
Ningún pico	(Hz) <input checked="" type="checkbox"/>	1.48	4.96	12.71
Observaciones				
Var. azimutal	Homogénea	Amplitud max. Entre y°		

Figura 4. Ejemplo de la ficha H/V para el punto MM14-07 en la cual se recopila los datos registrados y analizados. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en líneas discontinuas y Abajo resultados.

3.1.1.- Procesamiento y análisis

Para el análisis de la información sísmica se debe considerar los siguientes criterios: 1) Las frecuencias predominantes menores a 1.0 Hz corresponden a vibraciones generadas por el oleaje del mar y/o cambios meteorológicos (periodos muy largos); 2) Las bajas frecuencias o periodos largos son debidas a la presencia de depósitos profundos; y 3) Las frecuencias altas o periodos cortos son debidos a depósitos superficiales blandos y de poco espesor (SESAME, 2006; Bernal, 2006).

En la Figura 4, se muestra un ejemplo del análisis, procesamiento y resultados obtenidos para el punto MM14-07. Aquí el registro es sectorizado en ventanas de 20 segundos y analizado individualmente, para luego obtener el promedio espectral para las curvas, y así identificar el rango de las frecuencias y/o periodos predominantes, que caracterizan al suelo bajo el punto de observación. También es visible el factor de amplificación del suelo ante la incidencia de las ondas sísmicas.

3.2.- Métodos sísmicos

3.2.1.- Tomografía de Refracción Sísmica (SRT)

El método sísmico de tomografía (SRT) permite conocer la velocidad de ondas V_p y el espesor de las capas, a partir del contraste de velocidades por efecto de la propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo. Básicamente, el SRT consiste en generar ondas sísmicas a partir de una fuente artificial (martillo) y medir el tiempo requerido por las ondas para viajar, desde la fuente hacia una serie de geófonos, usualmente dispuestos en línea recta, tal como muestra la Figura 5.

3.2.2.- Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

El método sísmico de MASW permite determinar la estratigrafía del subsuelo y los espesores de las capas a partir de la velocidad de propagación de las ondas de corte (V_s). Este método permite analizar la dispersión de ondas superficiales (ondas Rayleigh) generadas por una fuente de energía impulsiva y registrada por arreglos lineales de estaciones sísmicas, tal como muestra la Figura 6.

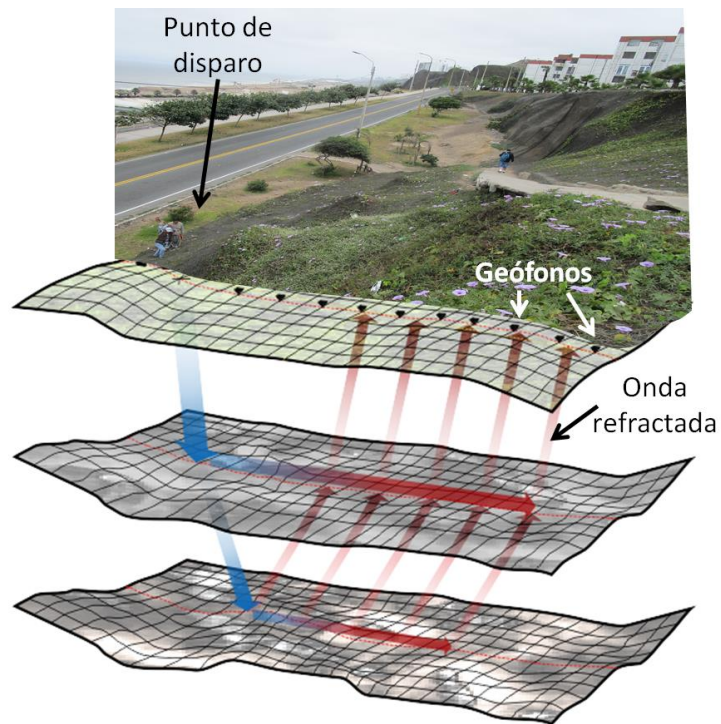


Figura 5. Esquema básico de emisión y recepción de ondas sísmicas por el método SRT

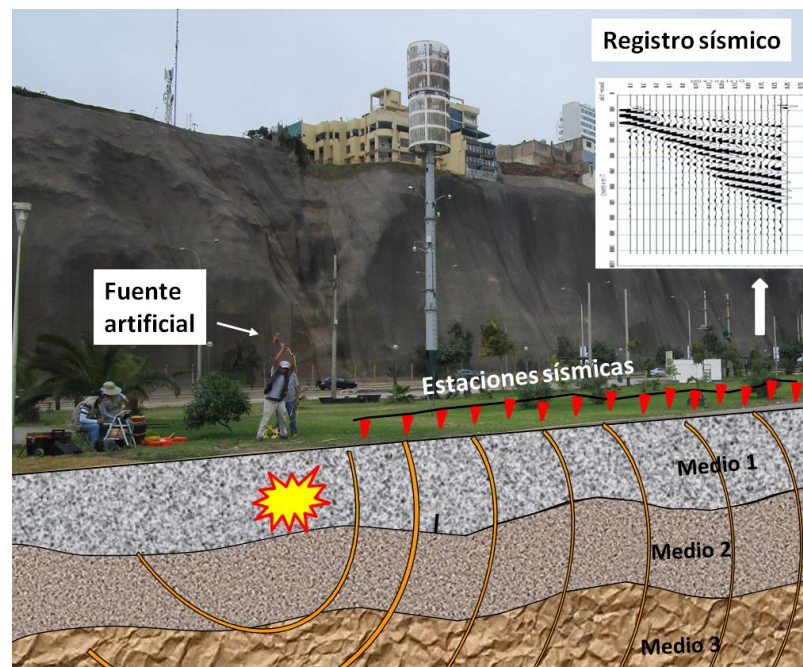


Figura 6. Generación de ondas Rayleigh con fuente artificial y su respectivo registro.

3.2.3.- Análisis Multicanal de Microtremores (MAM)

El Análisis Multicanal de Microtremores (MAM) o sísmica de Microtremores, es otro método para conocer la velocidad de las ondas de corte (V_s), siendo sus bases teóricas similares al método MASW. En este caso, no existe fuente sísmica artificial y solo se considera el registro de microtremores (vibración generada por la actividad humana); por lo tanto, su contribución es principalmente a bajas frecuencias, característica que permite investigar a mayores profundidades dependiendo de la longitud del tendido utilizado (Figura 7).

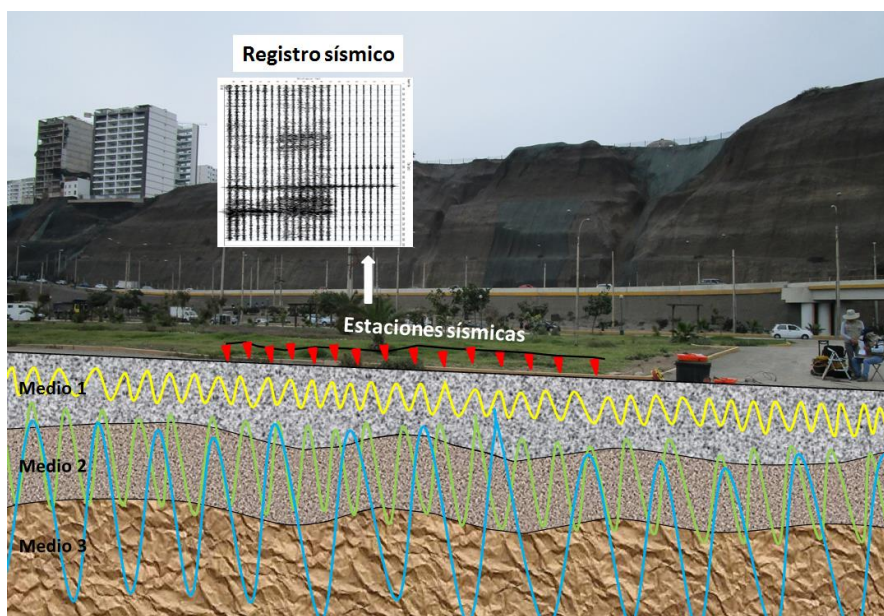


Figura 7: Registro de vibración ambiental generada por la actividad humana.

Para el registro de datos, según las técnicas SRT, MASW y MAM se sigue el mismo procedimiento y se utiliza un equipo sísmico modelo GEODE de Geometrics con 24 sensores o geófonos de baja frecuencia (4.5 Hz), ver Figura 8. Los parámetros de registro, tales como la geometría del tendido y el espaciamiento entre geófonos, fueron variables ya que dependió de la geomorfología de la zona de estudio y de la accesibilidad a los puntos seleccionados.

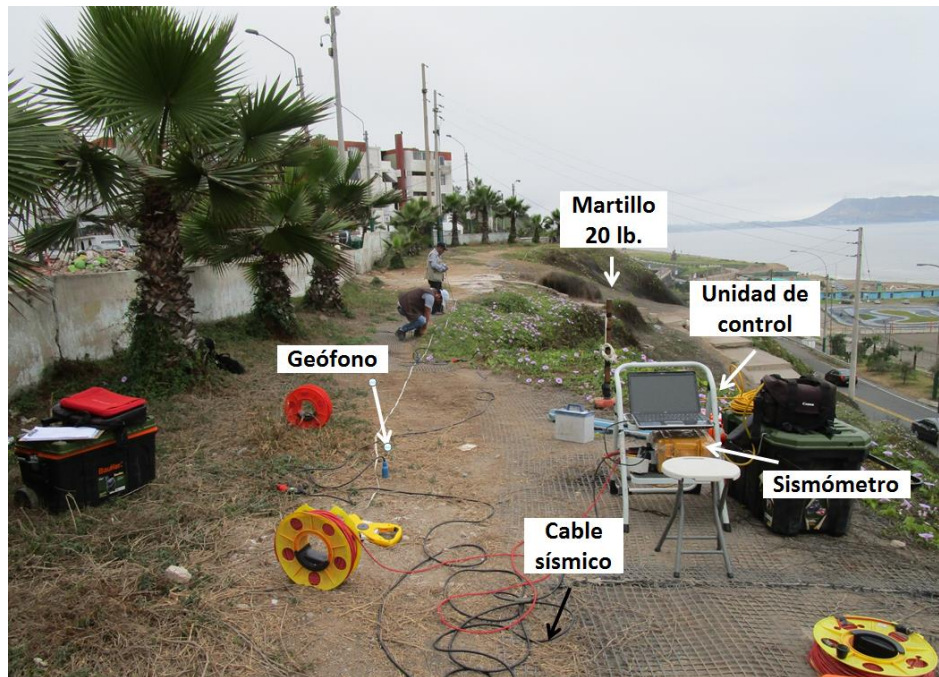


Figura 8. Equipos utilizados en la toma de datos según las técnicas SRT y MASW.

En el acantilado de Magdalena del Mar, se realizaron 3 líneas de SRT codificadas como LR01-MM, LR02-MM, LR03-MM; y 7 arreglos lineales de MASW y MAM codificadas como LS01-MM, ..., LS07-MM (ver Tabla 1). La distribución espacial de estas líneas se muestra en la Figura 9.

Durante los trabajos de campo, los datos y/o sismogramas eran visualizados en una PC portátil a fin de verificar la calidad de cada registro y los niveles de ruido de fondo, tal como se observa en la Figura 10. En la misma figura, también se muestra ejemplos de los registros obtenidos considerando un golpe de martillo a 0.5 metros del inicio del arreglo lineal de geófonos.

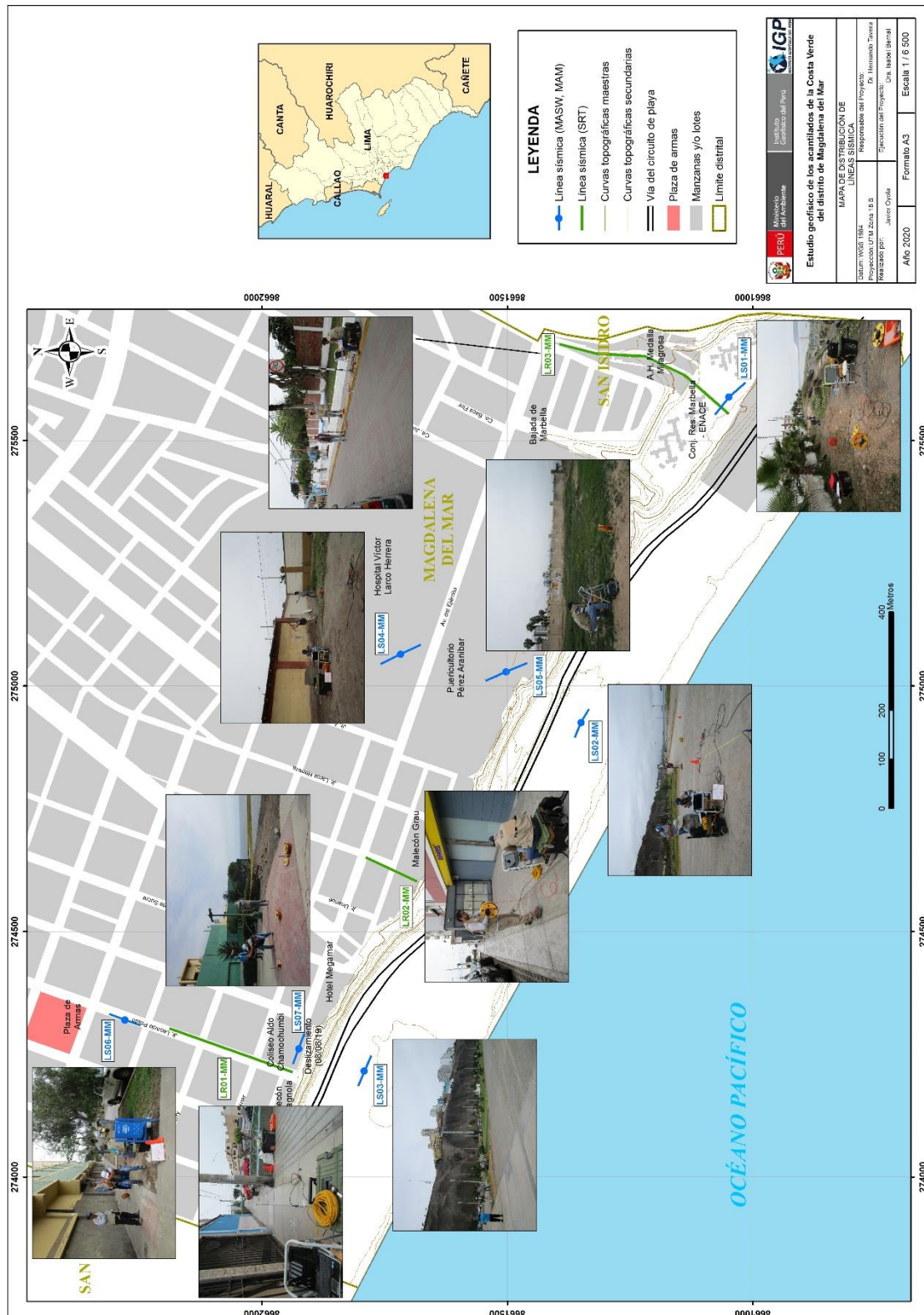


Figura 09. Distribución espacial de los arreglos lineales de SRT codificadas como LR01-MM, LR02-MM, LR03-MM y arreglos lineales de MASW y MAM, codificadas como LS01-MM, ..., LS07-MM.

Tabla 1: Coordenadas y características de las líneas sísmicas.

Línea Sísmica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total (m)
SRT					
LR01-MM	274214	8661938	56	6	270
	274303	8662189	60		
LR02-MM	274602	8661684	54	5	115
	274651	8661789	61		
LR03-MM	275555	8661049	30	6	402
	275697	8661394	65		
MASW y MAM					
LS01-MM	275619	8661015	43	4	92
	275553	8661077	53		
LS02-MM	274895	8661363	13	3	69
	274954	8661334	17		
LS03-MM	274247	8661777	24	3	69
	274185	8661804	24		
LS04-MM	275045	8661759	74	4	92
	275085	8661676	79		
LS05-MM	275010	8661545	64	4	92
	275047	8661460	64		
LS06-MM	274332	8662311	68	3	69
	274309	8662247	64		
LS07-MM	274230	8661937	71	3	69
	274293	8661914	72		

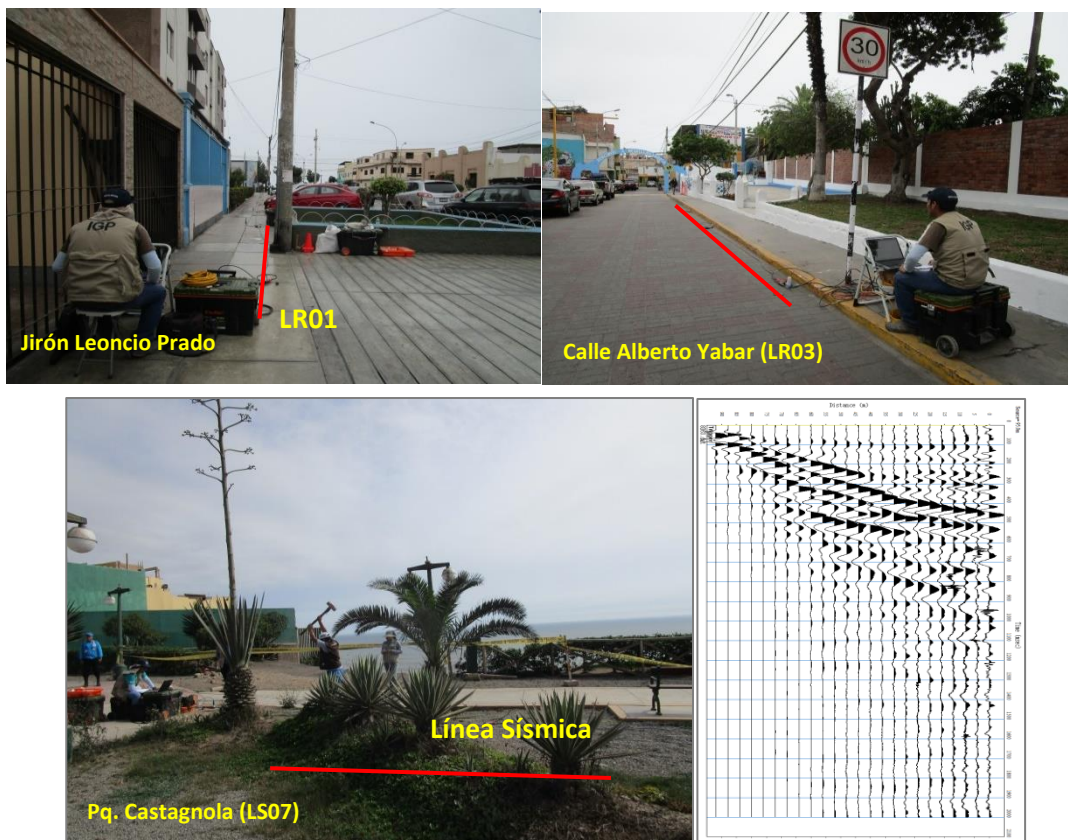


Figura 10. Disposición del equipo de adquisición de registros sísmicos

3.2.5.- Procesamiento y análisis

Para el ensayo SRT, el primer paso consistió en realizar el picado de los primeros arribos de la onda P en cada registro, para luego construir curvas tiempo vs distancia (dromocronas), que luego mediante el proceso de inversión, se obtiene el perfil 2D de SRT. El procesamiento fue realizado en el programa de computación SeisImager. En la Figura 11, se muestra un ejemplo de curvas tiempo vs distancia para la línea sísmica LS03-MM realizada en la calle Alberto Yabar (A.H. Medalla Milagrosa).

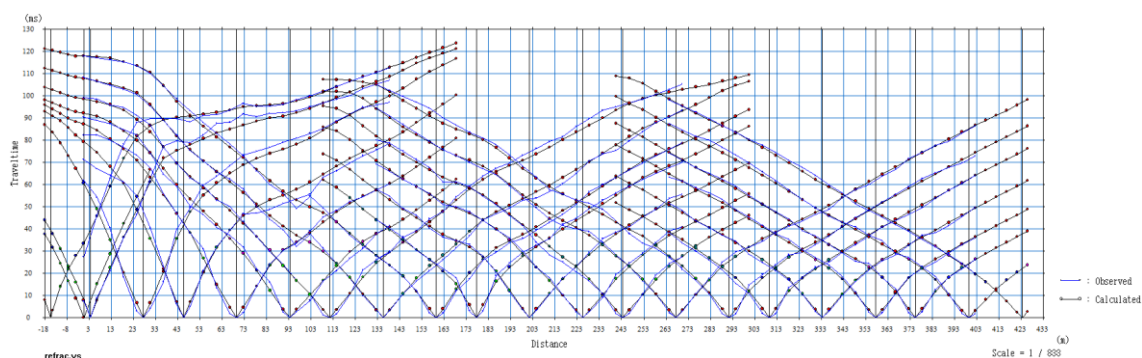


Figura 11: Curvas tiempo vs distancia, obtenidos para la línea sísmica.

En el caso de los ensayos MASW y MAM, se procedió a aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) a los registros sísmicos obtenidos para cada punto de disparo (Reynolds, 2011), para luego tener como resultado, la imagen de dispersión de ondas que relaciona la velocidad de fase de las ondas superficiales con la frecuencia. Una vez obtenidas las curvas de dispersión, se procedió de forma individual, a un proceso de inversión a fin de obtener los perfiles de velocidad V_s en una dimensión (1D), tal como se muestra en la Figura 12.

Para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos con el ensayo SRT, se considera como base los valores de la Tabla 2, los mismos que correlacionan los valores de velocidad de propagación de ondas longitudinales (V_p) con los diferentes tipos de suelos (CNA, 1993; ASTM-D5777).

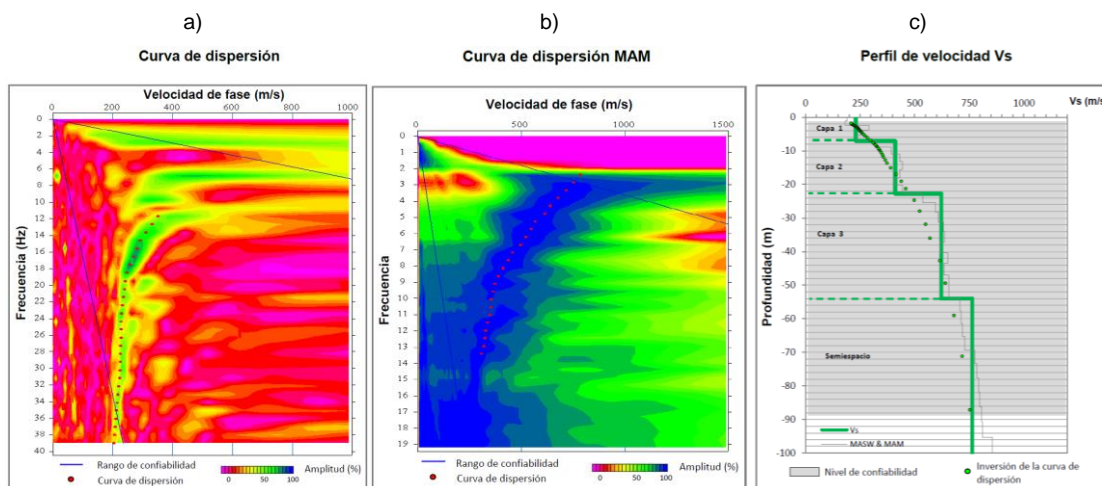


Figura 12. a y b) Curvas de dispersión obtenidos a partir de la aplicación de los métodos de MASW y MAM. c) perfil de velocidad obtenido a partir de la combinación de ambos ensayos.

Tabla 2: Clasificación de perfiles de suelo según CNA (1993) y la ASTM-D5777.

CNA, 1993		ASTM-D5777	
Velocidad Vp [m/s]	Descripción	Velocidad Vp [m/s]	Descripción
170 – 450	Suelos arenosos	240 - 610	Suelo intemperizado
300 – 650	Suelos con finos	460 - 915	Grava o arena seca
500 – 900	Suelos gruesos	1830 - 1220	Arena saturada
800 – 1,400	Depósitos de Talud	910 - 2750	Arcilla saturada
1,450 – 1,550	Materiales saturados	1430 - 1665	Agua
1,400 – 2,000	Roca blanda	1460 - 1525	Agua de mar
1,800 – 2,500	Roca muy fracturada	1830 - 3960	Arenisca
2,000 – 3,000	Roca fracturada	2750 - 4270	Esquisto, arcilla esquistosa
3,000 – 5,000	Roca intacta	1830 - 3960	Tiza
4,500 – 6,500	Granito sano	2134 - 6100	Caliza
6,000 – 7,500	Rocas Metamórficas	4575 - 5800	Granito
5,500 – 8,000	Caliza intacta	3050 - 7000	Roca metamórfica

Para los ensayos de MASW y MAM, se considera la clasificación de suelos según la Norma E.030 (2018). En este caso, el rango de velocidades para los perfiles de suelo S1 y S2, se subdividen a fin de considerar dos clasificaciones adicionales. Asimismo, los valores obtenidos son representados con colores a fin de facilitar su interpretación (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación de perfiles de suelo, según la norma E.030.

Clasificación de los perfiles de Suelo				
N°	Vs	Norma E.030		Descripción
1	< 180 m/s	S ₃	Suelo blando	Suelo blando
2	180 m/s a 350 m/s	S ₂	Suelo medianamente rígido	Suelo moderadamente rígido
3	350 m/s a 500 m/s			Suelo rígido
4	500 m/s a 800 m/s	S ₁	Roca o suelo muy rígido	Suelo muy rígido o roca blanda
5	800 m/s a 1500 m/s			Roca moderadamente dura
6	> 1500 m/s	S ₀	Roca dura	Roca dura

3.3.-Método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT)

El ensayo de ERT permite determinar las variaciones de resistividad y conductividad eléctrica en las rocas y suelos para conocer su grado de saturación. En general, los materiales que conforman el subsuelo muestran ciertos rangos de resistividad (ρ) al paso de la corriente eléctrica, y que pone en evidencia el contenido de agua, de sales disueltas en las fracturas de las rocas o en la porosidad del suelo.

Los datos recolectados en campo corresponden al registro de valores de resistividad obtenidos en 05 líneas de ERT distribuidas en la zona de estudio, tal como se observa en la Figura 13. El instrumental utilizado en campo corresponde a un Equipo de Resistividad / IP Syscal Pro de marca Iris Instruments. En la Tabla 4, se detalla las características de las líneas de ERT realizadas en el acantilado del distrito de Magdalena del Mar. Para la instalación de los equipos y los tendidos de los cables para la adquisición de los datos, en algunos sectores se tuvieron limitaciones de acceso y de espacio.

Tabla 4: Parámetros físicos de los tendidos para la aplicación de Tomografía Eléctrica.

TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA				
Nombre de la Línea Eléctrica	Separación entre electrodos / Número de Electrodo	Extensión de la línea (m)	Profundidad de investigación (m)	Orientación de la línea
LE01-MM	20 m / 18 electrodos	320 m	80 m	NO –SE
LE02- MM	20 m / 19 electrodos	340 m	80 m	NE –SO
LE03- MM	20 m / 24 electrodos	440 m	80 m	NO - SE
LE04- MM	20 m / 18 electrodos	320 m	80 m	NO - SE
LE05- MM	20 m / 21 electrodos	380 m	80 m	NE - SO

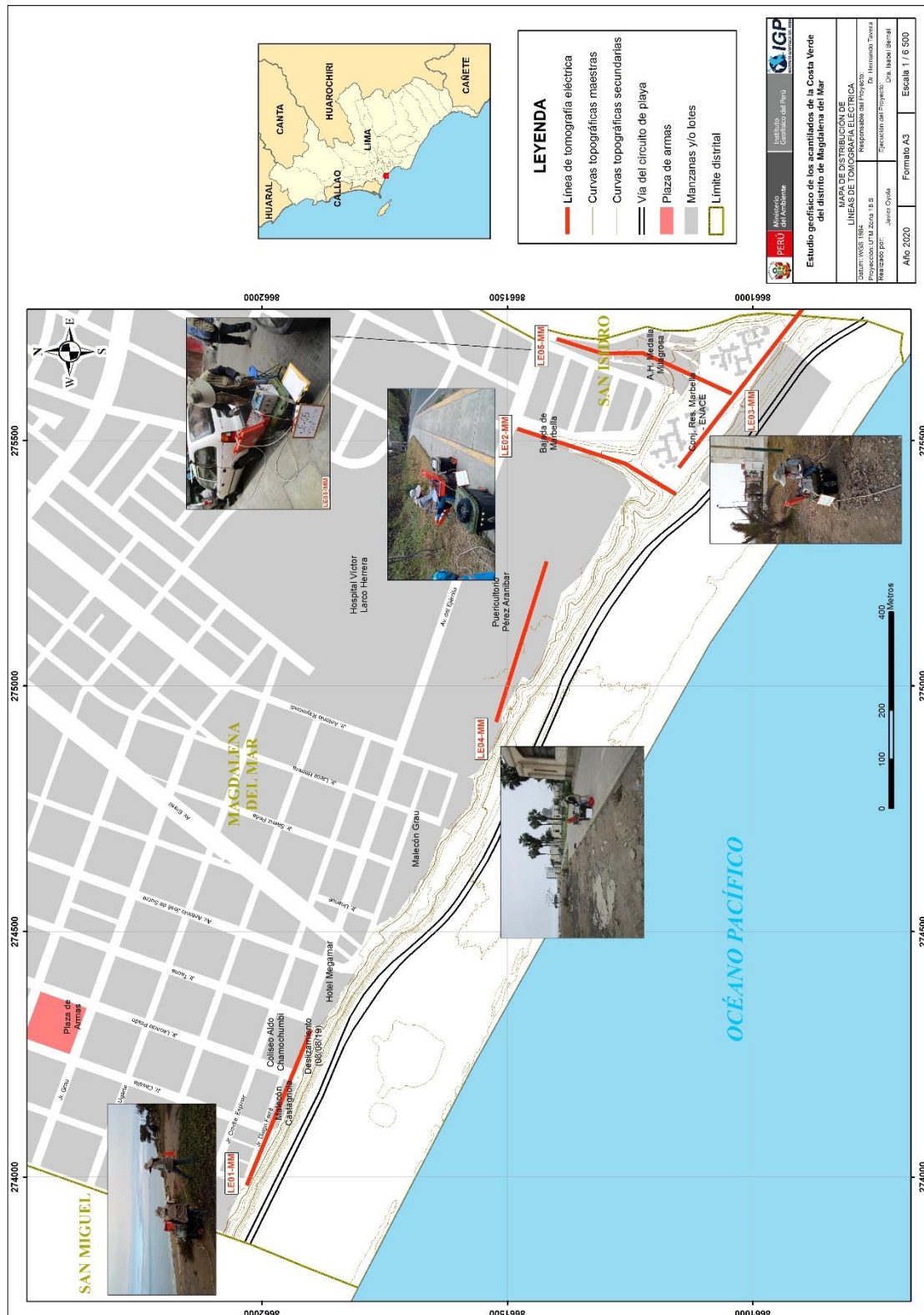


Figura 13. Distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica tomadas en el acantilado del distrito de Magdalena del Mar: LE01-MM, ..., LE05-MM.

3.3.1.- Procesamiento y análisis

Para el procesamiento de los datos recolectados en campo, fue necesario realizar la corrección por efectos de topografía usando algoritmos de inversión propios de métodos geoelectricos y de procesamiento de imágenes. Asimismo, para la interpretación de los resultados obtenidos se debe tener en cuenta que son varios los factores que influyen en las propiedades de los suelos (grado de saturación, porosidad y forma del poro, salinidad del fluido, tipo y composición de la roca, temperatura, procesos geológicos que afectan a los materiales); es decir, el incremento de fluidos en el terreno se verá reflejado por una disminución en los valores de resistividad. En la Tabla 5, se presentan algunos valores de Resistividad relacionados con los distintos tipos de suelos y rocas.

Tabla 5. Valores de resistividad de suelos, rocas y materiales presentes en la naturaleza (Loke, 2004).

Material	Resistividad (ohm.m)
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$
Basalto	$10^3 - 10^6$
Pizarra	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^8$
Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^8$
Yeso	$10^4 - 10^6$
Arenisca	$8 - 4 \times 10^3$
Esquistos	$20 - 2 \times 10^3$
Caliza	$50 - 4 \times 10^2$
Arcilla	1 - 100
Aluvión	10 - 800
Agua dulce	10 - 100
Agua de mar	0.2

3.4.-MÉTODO GRAVIMÉTRICO

En general, los valores de gravedad son influenciados por todas las masas presentes en el subsuelo donde se realizan las mediciones; por lo tanto, sus variaciones permiten conocer la geometría de las capas y la profundidad a la cual se encuentra la interfase suelo-roca.

En el área de estudio, se recolectaron 30 datos gravimétricos distribuidos en 3 líneas con longitudes de 440, 460 y 790 metros; todas orientadas de manera perpendiculares a los acantilados del distrito de Magdalena del Mar (Figura 14). La

distancia entre cada punto de medición fue de 90 metros en promedio. Los valores de gravedad se registraron con un gravímetro LaCoste & Romberg con una precisión $\pm 0,01$ mGal, ver Figura 9. Para realizar las correcciones, se considera como punto de gravedad absoluta la estación de Camacho (978221.3770 mGal), ubicado en las instalaciones del Instituto Geofísico del Perú, distrito de La Molina. En cada punto gravimétrico se determinó la altura elipsoidal referida al WGS84, utilizando un equipo de posicionamiento GPS RTK.

3.4.1.- Procesamiento y análisis

Después de realizar a los datos gravimétricos las correcciones por instrumento, mareas, Aire Libre, Bouguer y topográficas, se obtiene los valores de las anomalías gravimétricas de Bouguer corregidas. El procesamiento y cálculo de las anomalías de Bouguer se realizó con el software Oasis Montaj de Geosoft utilizando una densidad media para las rocas de 2.67 g/cm^3 (Hinze et al., 2005). La corrección topográfica, según la metodología desarrollada por Kane (1962) y Nagy (1966), da como resultado una grilla de corrección, la cual a través de una operación de muestreo, se les asigna el valor de la corrección a cada punto gravimétrico. Culminado, este procesamiento, la anomalía de Bouguer es el resultado del aporte de distintas fuentes y efectos gravimétricos asociados a estructuras de carácter regional (anomalía regional), más el de carácter local y superficial (anomalía residual).

Seguidamente, se realizó el análisis espectral de las residuales siguiendo la metodología propuesta por Spector (1968) y Grant (1970), la misma que permitió determinar en detalle, la profundidad de las anomalías. El método consiste en transformar, la grilla de la anomalía de residuales en el dominio del espacio, al dominio de frecuencias.

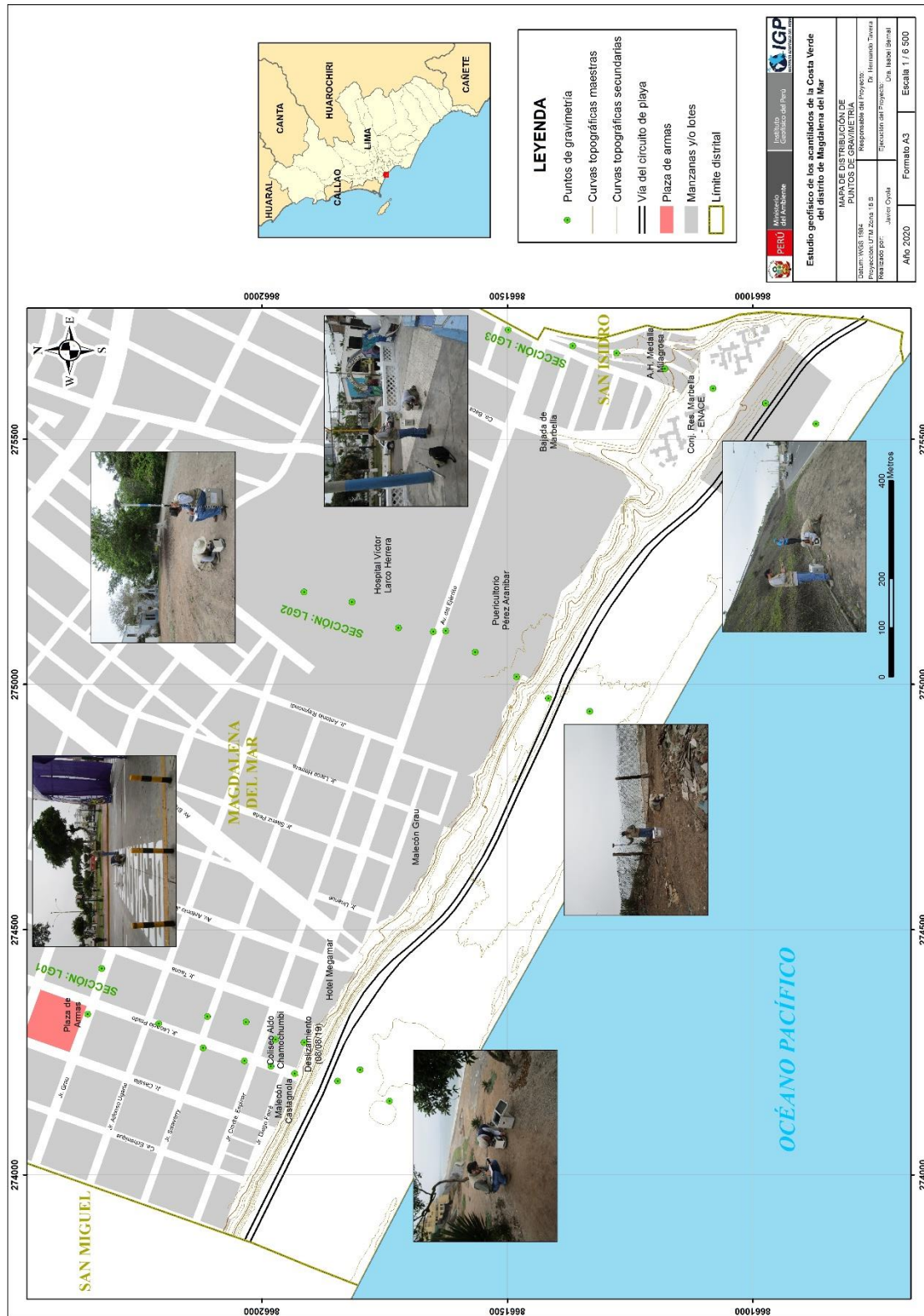


Figura 14. Distribución espacial de los puntos gravimétricos tomados en el acantilado del distrito de Magdalena del Mar.

4.- RESULTADOS

La correlación de los resultados obtenidos con el procesamiento y análisis de los datos recolectados en campo y la aplicación de diversos métodos geofísicos, ha permitido llegar a los siguientes resultados:

4.1.- Razones espectrales (H/V)

En el acantilado de Magdalena del Mar, los suelos responden a dos rangos de frecuencias predominantes: F_0 ($F \leq 2.0$ Hz) y F_1 ($F > 2.0$ Hz); y su distribución espacial muestra que cerca de la zona del acantilado, prevalecen varios picos de frecuencias y conforme uno se aleja en dirección Este, solo aparece un pico de frecuencia. Estas características sugieren que en las cercanías del acantilado (distancia no determinada), los suelos son más heterogéneos (Figura 15).

- **Frecuencias predominantes F_0 :** *En la Figura 15, se muestra el mapa con la distribución espacial de los valores de F_0 , observándose el predominio de valores entre 1.0 a 1.6 Hz (0.6 - 1.0 segundos) representado por un solo pico de frecuencia, principalmente sobre el extremo Este de área de estudio. Contrariamente, conforme se tiende hacia el acantilado, el número de picos de frecuencias se incrementa notablemente, principalmente hacia las altas frecuencias. La distribución espacial de estos valores de frecuencias permitirán zonificar los suelos con diferente comportamiento dinámico.*

En la Figura 16, se muestra ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos MM01-02 y MM02-02, ubicados en la calle Echenique, sobre el Jr. Castilla y Jr. Tacna. En estos espectros, sobresalen picos de frecuencias a 1.28 y 1.6 Hz respectivamente y amplificaciones de 2 y 2.5 veces.

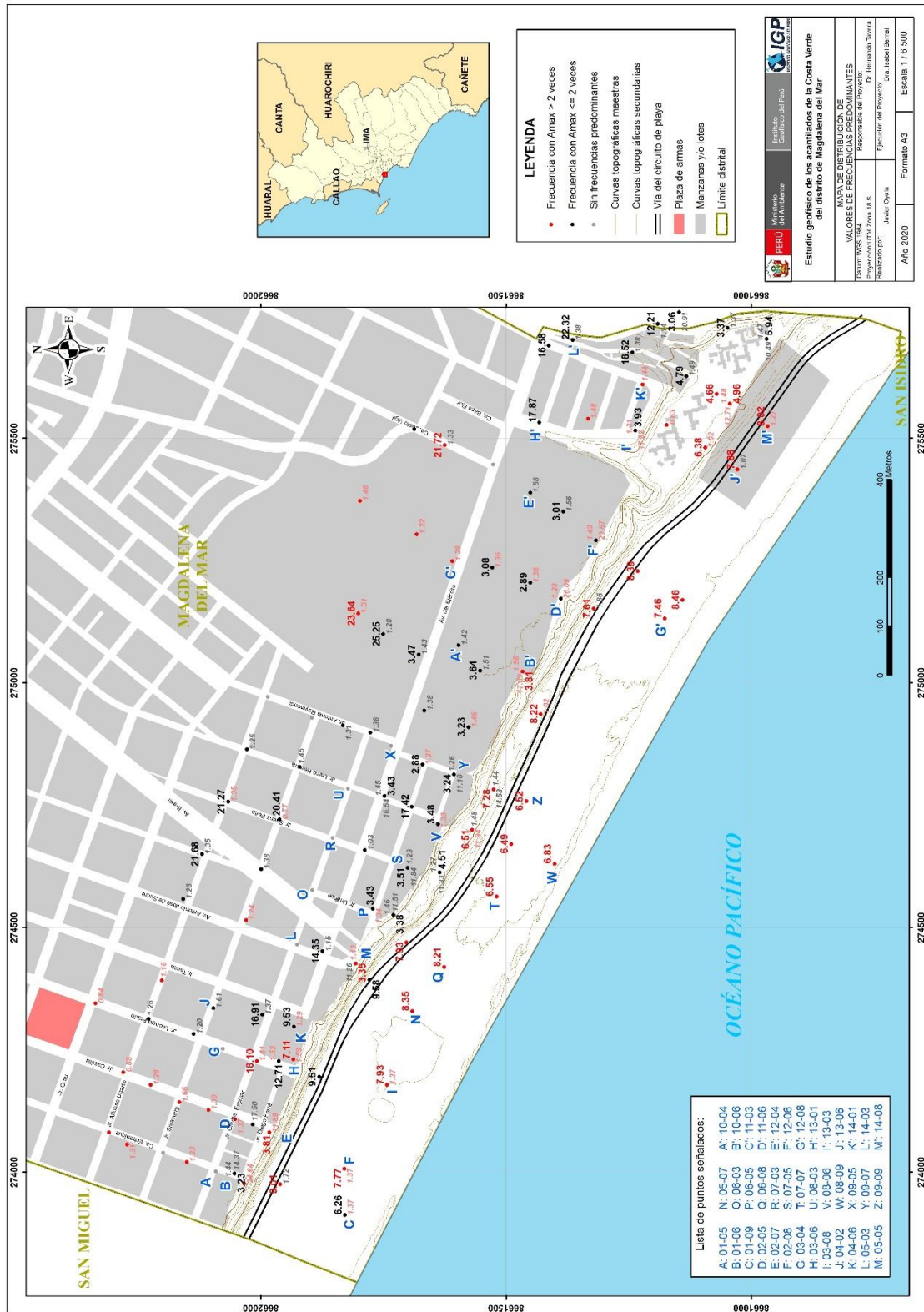
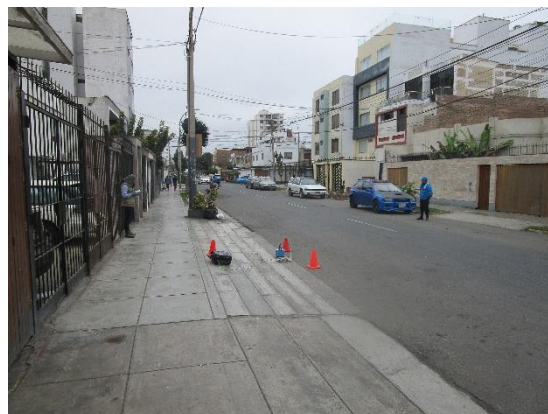
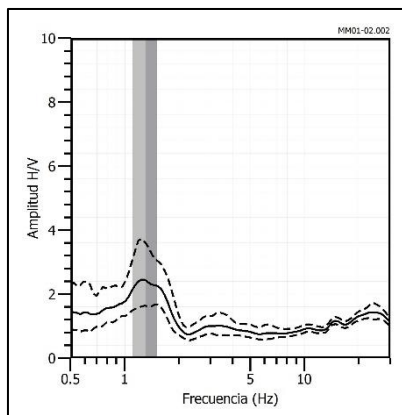


Figura 15. Distribución espacial de las frecuencias F_0 ($F \leq 2.0$ Hz) y F_1 ($F > 2.0$ Hz). Los valores en rojo, corresponden a puntos con amplificaciones mayores a 2 veces. Las letras corresponden a los puntos cuyas razones espectrales son analizadas en el informe.

MM01-02



MM02-02

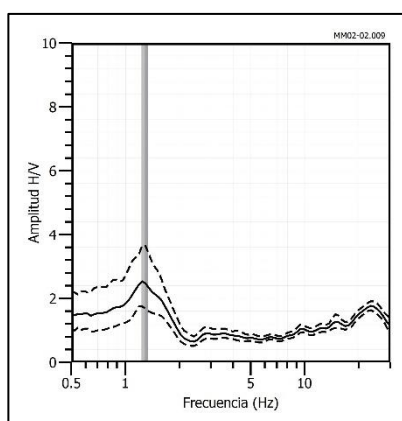


Figura 16. Ejemplos de razones espectrales (H/V) para los puntos MM01-02 y MM02-02. Obsérvese el predominio de picos de frecuencias F_0 ($F < 2.0$ Hz). Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

- **Frecuencias predominantes F1:** En la Figura 15, se muestra la distribución espacial de los valores de F_1 , observándose el predominio de valores entre 3 a 20 Hz (0.1-0.3 segundos) y la presencia de dos o más picos de frecuencias, todos en las proximidades del acantilado. En general, este rango de frecuencias presenta amplificaciones moderadas (<3 veces). Los múltiples picos de frecuencia predominantes en las cercanías del acantilado, se asocian a la presencia de suelos heterogéneos depositados sobre estratos compactos de gran espesor. En la zona que corresponde al circuito de playas, se identifica un pico de frecuencia bien definido entre 6 y 8 Hz; con amplificaciones de hasta 8 veces (Figura 17).

A fin de evaluar el cambio en el comportamiento dinámico del suelo, se analiza la información contenida en cada gráfico de razones espectrales (H/V) correspondiente a los 14 perfiles perpendiculares al acantilado elaborados en este estudio. En la Figura 17, se muestra los gráficos de razones espectrales correspondientes a puntos del perfil P-3 (MM03-02, MM03-06 y MM03-08), ubicados de Este a Oeste, a distancias de 60 y 20 metros del acantilado y el tercero, en el circuito de playas.

Según la Figura 17, para el punto MM03-02 que se encuentra alejado del acantilado, no sobresale ningún pico de frecuencia. Para el punto MM03-06 ubicado en el malecón Castagnola, se observa dos picos a frecuencias de 1.59 y 7.11 Hz con amplificaciones de 2.8 y 2.3 veces respectivamente. Para el tercer punto, ubicado en la vía costanera, sobresale principalmente un pico de frecuencia bien definido a 8.0 Hz con amplificaciones de hasta 5 veces. Esta secuencia de variados valores de frecuencias, permitirán zonificar los suelos con diferente comportamiento dinámico.

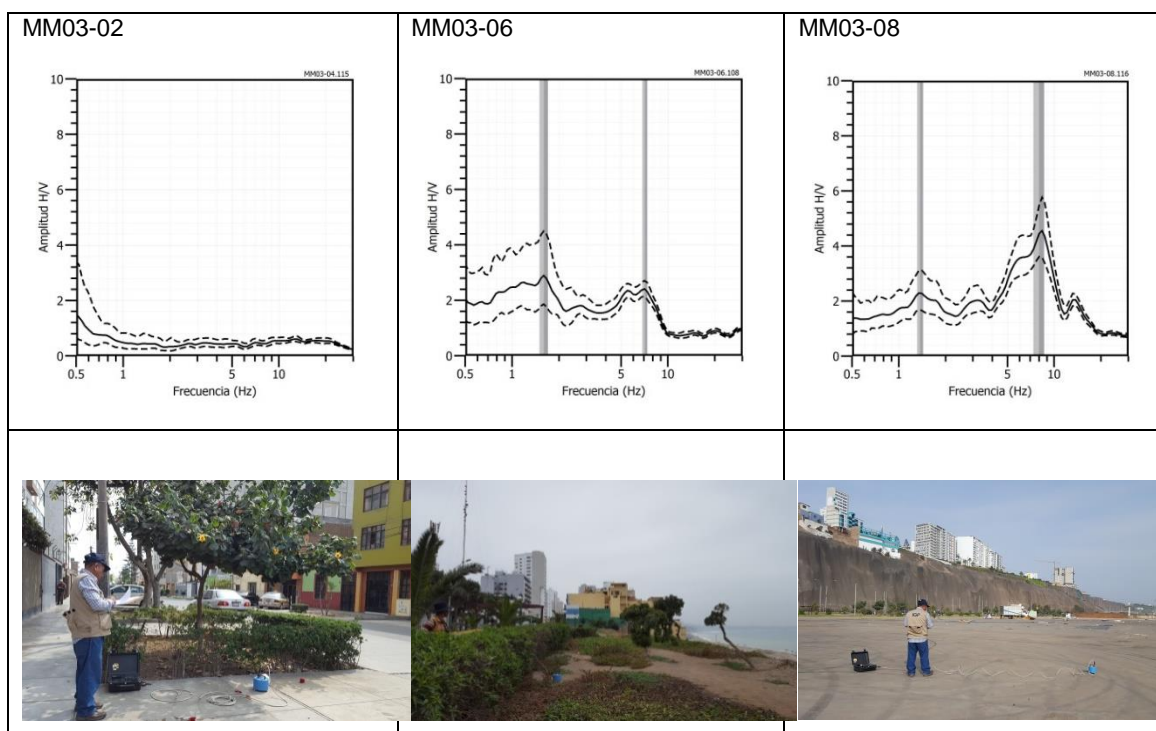


Figura 17. Razones espectrales obtenidas para puntos del perfil P-3 (MM03-02, MM03-06 y MM03-08), ubicados de Este a Oeste, a 60 y 20 metros del acantilado y el tercero en el circuito de playas.

El patrón descrito anteriormente, se repite en todos los perfiles y ellos, pueden ser analizados en el Anexo II.

4.2.- Secciones SRT

En el área de estudio se realizaron 03 líneas de refracción sísmica con la técnica SRT, lográndose conocer, de acuerdo a la longitud del tendido, las velocidades V_p hasta 65 metros de profundidad. Por ejemplo, en la Figura 18, se presenta la sección de tomografía sísmica obtenida para la línea LR01-MM (para el resto de líneas ver Anexo II), llegándose a identificar la existencia de hasta 3 capas en el subsuelo con las siguientes características (Tabla 6):

Tabla 6: Capas sísmicas identificadas para el área de estudio.

Capa sísmica	Velocidad V_p (m/s)	Perfil de suelo	Tipo de material
1	350-1000	Suelo moderadamente rígido a rígido	Material superficial compuesto de gravas y material suelto.
2	1000-1800	Suelo muy rígido	Material compuesto de gravas arenas y limos.
3	1800-2400	Suelo de muy alta rigidez	Material compuesto predominantemente de gravas
Semi-espacio	>2400	Suelo de muy alta rigidez	Material compuesto de gravas y grandes bloques de rocas.

Capa sísmica 1: Esta capa sísmica presenta velocidades V_p entre 350 a 1000 m/s, y espesores que varían entre 5 a 20 metros. Los suelos son moderadamente rígidos en superficie, parámetro que se incrementa en profundidad. El mayor espesor para esta capa, se presenta hacia el extremo suroeste (límite del acantilado) y el menor, conforme se analiza en dirección noreste.

Capa sísmica 2: Capa sísmica de espesor variable, entre 10 a 25 metros, y velocidades V_p entre 1000 a 1800 m/s; las cuales define la presencia de suelos rígidos. El espesor de esta capa es mayor en la parte media y en el extremo suroeste del perfil.

Capa sísmica 3: Esta capa subyace a la anterior. Presenta velocidades V_p entre 1800 a 2400 m/s, valores que considera la presencia de suelos con muy alta rigidez. El espesor de esta capa es variable, entre 10 a 30 metros.

Semi-espacio: Llamado así, debido a que no se llegó a identificar la base rocosa. Presenta velocidades V_p mayores a 2400 m/s y se considera como suelo con muy alta rigidez. Se encuentra a aproximadamente 50 metros de profundidad.

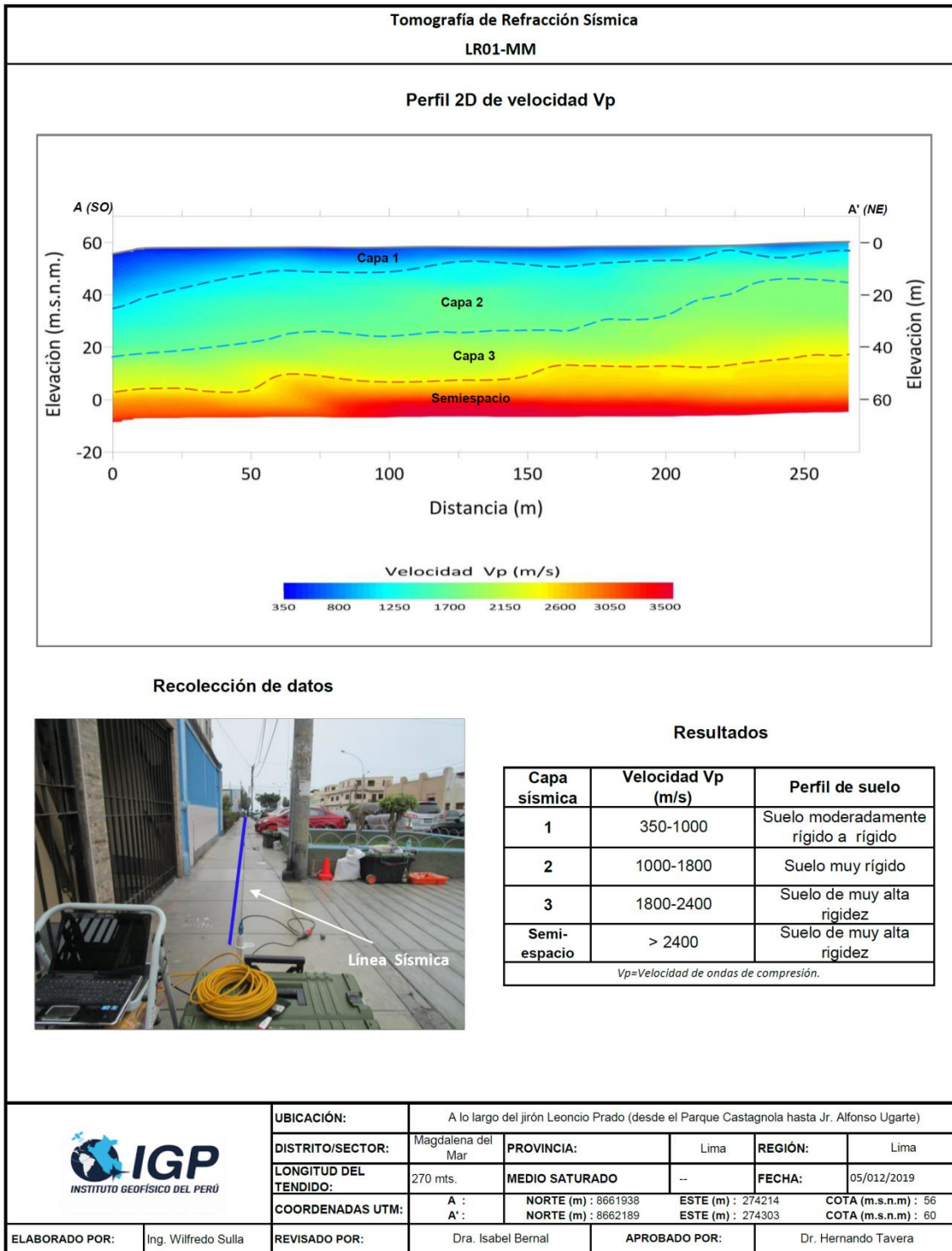


Figura 18. Resultados obtenidos con el ensayo SRT para la línea sísmica LS01-MM.

4.3.- Perfiles de MASW y MAM

En el área de estudio se realizaron 07 líneas sísmicas aplicando la técnica MASW y MAM a fin de identificar las velocidades de las ondas de corte V_s , que de acuerdo a la longitud del tendido, podría lograrse tener mediciones confiables hasta los 85 metros de profundidad. En la Figura 19, se presenta los resultados obtenidos para la línea LS01-MM y para el resto de perfiles, ver Anexo III.

Línea sísmica LS01-MM: Realizada en el conjunto residencial Marbella, zona de estacionamiento junto al acantilado (Figura 19). Esta línea permite identificar la presencia de suelos conformados por tres capas sísmicas: la primera, con velocidades V_s de 279 m/s y espesores de 13 metros; lo que sugiere la existencia de suelos moderadamente rígidos; la segunda capa, con velocidades V_s de 435 m/s y espesores de 10 metros que corresponden a suelo rígidos; la tercera capa, con velocidades V_s de 658 m/s y 11 metros de espesor, que sugieren la presencia de suelos muy rígidos. La superficie de contacto con el semi-espacio presenta velocidades $V_s > 1013$ m/s, indicando la presencia de suelos de muy alta rigidez.

Líneas sísmicas LS02-MM y LS03-MM: Distribuidas en el circuito de playas, en la zona el Metropolitano y la Positiva, respectivamente (ver Anexo). En ellas se identifica la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera con velocidades V_s entre 243 a 251 m/s y espesores de 9 metros que corresponden a suelos moderadamente rígidos. La segunda capa, con velocidades V_s que varían entre 644 a 666 m/s y espesores entre 9 a 14 metros, asociadas a suelos muy rígidos. La superficie de contacto con el semi-espacio, presenta velocidades $V_s > 1014$ m/s, las cuales sugieren la presencia de suelos de muy alta rigidez.

Línea sísmica LS04-MM: Realizada en el Hospital Víctor Larco Herrera, área de estacionamiento (ver Anexo). Se identifica la presencia de suelos conformados por tres capas: la primera de 4 metros de espesor y velocidades V_s de 372 m/s que se asocian a la presencia de suelos rígidos; la segunda, con velocidades V_s de 640 m/s y 47 metros de espesor asociados a suelos muy rígidos. La tercera capa presentan velocidades V_s de 847 y el semi-espacio, > 1021 m/s.

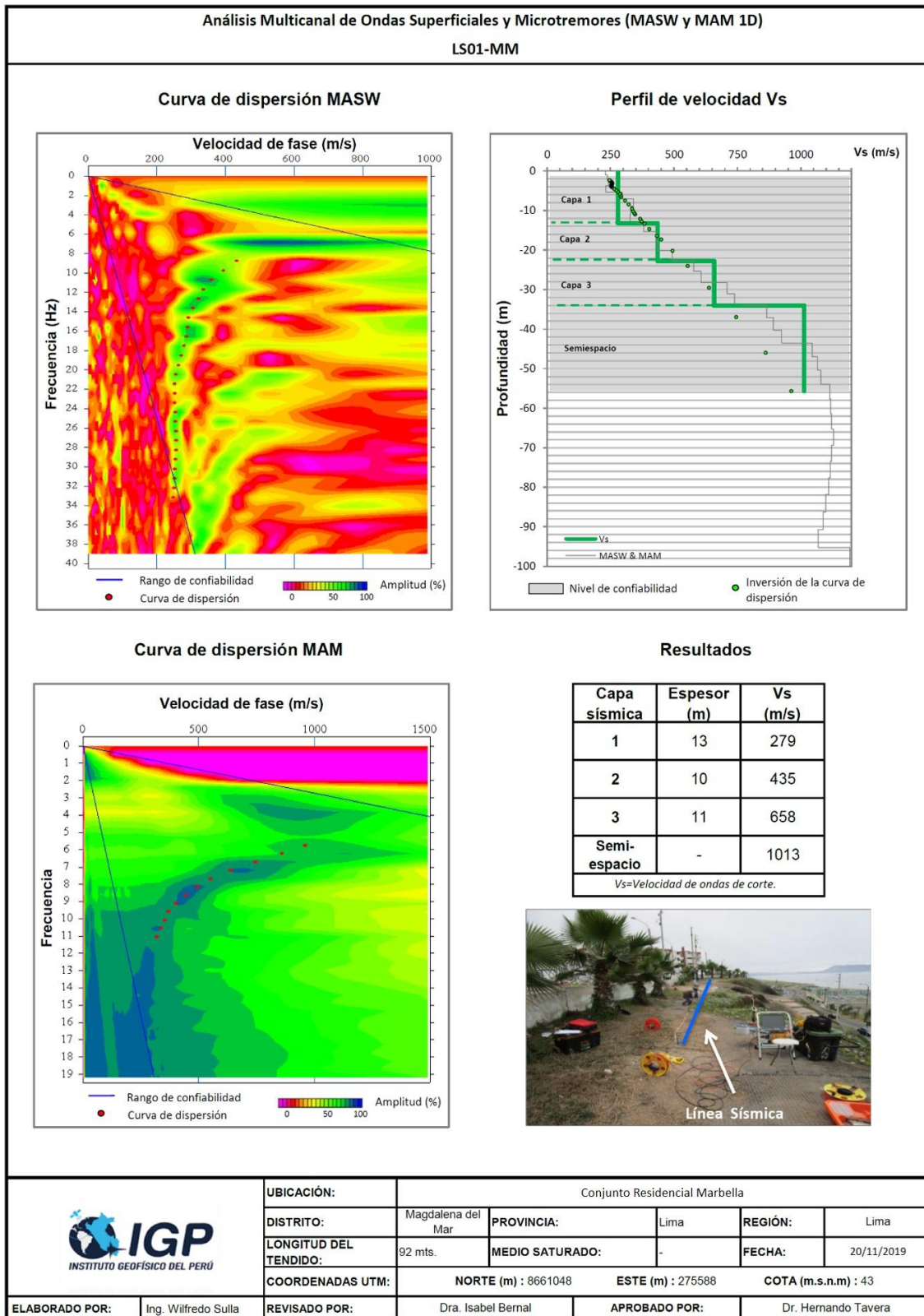


Figura 19. Resultados obtenidos con los ensayos MASW y MAM para la línea sísmica LS01-MM.

Línea sísmica LS05-MM: Realizada en el Puericultorio Pérez Aranibar, zona de estacionamiento junto al acantilado (Figura 9). En ella, se identifica la presencia de suelos conformados por tres capas sísmicas: la primera, de 4 metros de espesor y velocidades V_s de 308 m/s, lo que sugieren la presencia de suelos moderadamente rígidos; la segunda capa, con velocidades V_s de 462 m/s y espesores de 7 metros, que corresponden a suelos rígidos; la tercera capa con velocidades V_s de 631 m/s y 36 metros de espesor que sugieren suelos muy rígidos. La superficie de contacto con el semi-espacio presenta velocidades $V_s > 897$ m/s.

Línea sísmica LS06-MM: Realizada frente al colegio Rosenthal de la Puente, en el Jirón Leoncio Prado (Figura 9). En ella se identifica la presencia de suelos conformados por dos capas: la primera de 4 metros de espesor y velocidades V_s de 348 m/s que corresponden a suelos moderadamente rígidos. La segunda capa, con espesores de 37 metros y velocidades V_s de 686 m/s que se asocian a suelos muy rígidos. La superficie de contacto con el semi-espacio presenta velocidades $V_s > 859$ m/s, las cuales sugieren la presencia de suelos de muy alta rigidez.

Línea sísmica LS07-MM: Realizado en el parque Castagnola, área del reciente deslizamiento (Figura 9). Se identifica la presencia de suelos conformados por tres capas: la primera de 7 metros de espesores y velocidades V_s de 231 m/s que corresponden a suelos moderadamente rígidos. La segunda capa, con espesores de 16 metros y velocidades V_s de 411 m/s que se asocian a suelos rígidos. La tercera capa y el semi-espacio presenta velocidades V_s de 622 y > 764 m/s respectivamente, y en este caso ambas sugieren la presencia de suelos muy rígidos.

En la Tabla 7, se presenta el resumen de los valores obtenidos para los espesores de capas, velocidades V_p y V_s , así como las velocidades para la V_{s30} .

Tabla 7. Valores de espesor y Vs de los perfiles sísmicos obtenidos para el área de estudio.

		Superficie → Profundidad								
Línea Sísmica	N° DE CAPA									
	1		2		3		Semiespacio		VS ₃₀ (m/s)	
	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)		
LS01-MM	279	13	435	10	658	11	1013	-	372	
LS02-MM	251	9	666	17	1014	-	-	-	454	
LS03-MM	243	9	644	9	1099	-	-	-	482	
LS04-MM	372	4	639	47	847	19	1021	-	591	
LS05-MM	308	4	462	7	631	36	897	-	498	
LS06-MM	348	4	686	37	859	-	-	-	611	
LS07-MM	231	7	411	16	622	31	764	-	367	

	Suelo blando (Vs < 180 m/s)
	Suelo moderadamente rígido (180 – 350 m/s)
	Suelo rígido (350 – 500 m/s)
	Suelo muy rígido o roca blanda (500 – 800 m/s)
	Roca moderadamente duro (800 – 1500 m/s)
	Roca dura (Vs > 1500 m/s)

4.4.- Perfiles de Tomografía eléctrica

A continuación, se describe los resultados obtenidos con cada uno de los perfiles geoelectrónicos elaborados para la zona de estudio (Anexo III):

a) Líneas orientadas en dirección NO- SE, paralelas a la línea de costa.

-Línea eléctrica LE01-MM, realizada en el malecón Castagnola, paralela al acantilado y sobre el lugar donde se produjo el deslizamiento del día 08/08/2019 (ver Figura13). En esta línea se observa el predominio de valores medianamente resistivos (> 100 ohm.m) que tiende a disminuir en dirección SE hasta llegar a la zona donde se produjo el deslizamiento (Figura 20).

-Línea eléctrica LE03-MM, realizada en el conjunto residencial Marbella. En esta línea se observa el predominio de valores medianamente resistivos (> 100 ohm.m), y en forma de lentes, valores bajos resistivos (< 100 Ω.m). En profundidad, se observa la presencia de valores resistivos (> 500 ohm.m).

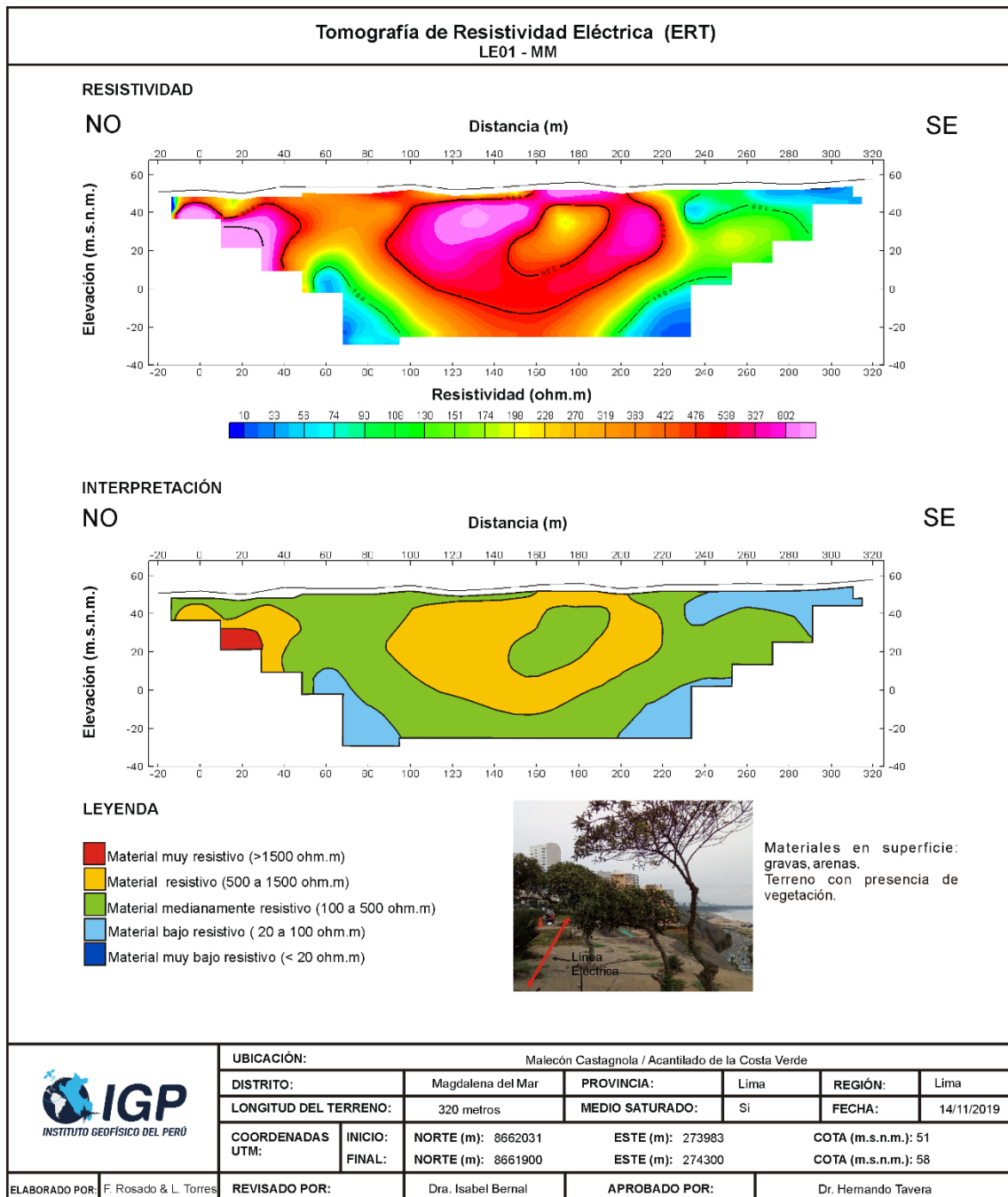


Figura 20. Resultados de tomografía de resistividad eléctrica para la línea LE01-MM.

-Línea eléctrica LE04-MM, realizada en el Puericultorio Pérez Aranibar. Se identifica el predominio de valores resistivos (> 500 ohm.m) que pueden deberse a la presencia de suelos compactos. Asimismo, de manera puntual se identifica la presencia de valores bajo resistivos (< 100 ohm.m) que pueden asociarse a la existencia de zonas de relleno con suelos saturados.

b) Líneas orientadas en dirección NE- SO, perpendiculares a la línea de costa.

-Línea eléctrica LE02-MM, realizada en la bajada Marbella. En ella se observa el predominio de valores medianamente resistivos ($> 100 \text{ ohm.m}$) y bajos resistivos ($< 100 \text{ ohm.m}$) asociados a la presencia de suelos saturados debido al riego de parques y jardines.

-Línea eléctrica LE05-MM, realizada en el A.H. Medalla Milagrosa. En ella se identifica el predominio de valores medianamente resistivos ($> 100 \text{ ohm.m}$) debido a la presencia de materiales compactos; pero que tienden a disminuir en dirección SO, debido a la presencia de suelos saturados.

4.5.- Secciones Gravimétricas

Mediante el módulo GM-SYS del software Oasis Montaj, se realizaron tres secciones gravimétricas codificadas como LG, a partir del mapa de anomalía residual de Bouguer (Figura 21), tal como se observa en la Figura 22. Se utilizaron como datos de entrada: el mapa de residuales, los resultados del análisis espectral, las profundidades calculadas a partir del método sísmico y la topografía del área local.

***Sección gravimétrica LG01-MM:** Realizada en el Jirón Leoncio Prado, desde la zona del deslizamiento (Coliseo Chamochumbi) hasta la plaza Túpac Amaru (Figura 21). La variación de la densidad del material en profundidad ha permitido identificar la existencia de suelos diferenciados en tres capas: la primera considerada como la más superficial, muestra una densidad de 1.39 cm/seg^2 y espesores que varían desde 4 metros en el extremo NE, hasta 20 metros hacia el SO (límite del acantilado). La segunda capa, con una densidad de 1.69 cm/seg^2 , presenta espesores que varían entre 10 a 30 metros. Conforme se incrementa la profundidad (hasta el nivel medio del mar) el valor de densidad aumenta a 1.89 cm/seg^2 , lo que sugiere la presencia de suelos más densos o de mayor rigidez. Por otro lado, hacia el extremo SO de la sección, se identifica la presencia de suelos de muy baja densidad en superficie (1.18 cm/seg^2), y con espesores de hasta 10 metros (Figura 22).*

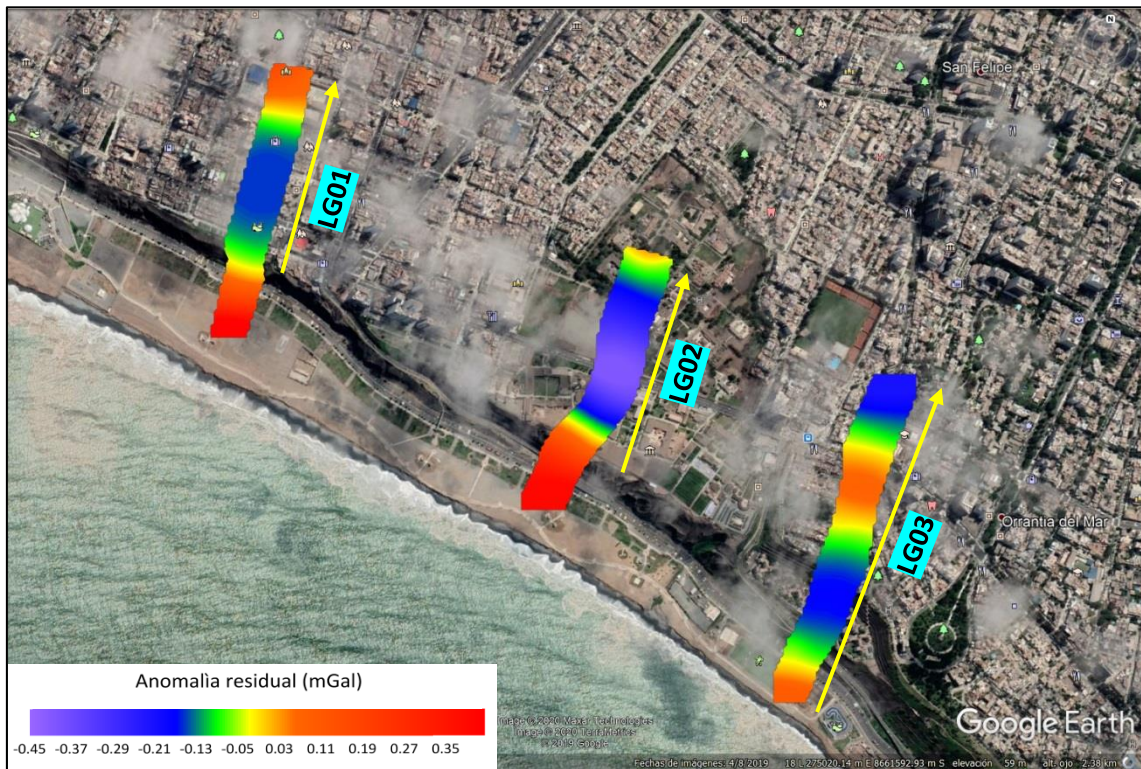


Figura 21. Mapa de anomalía residual de Bouguer.

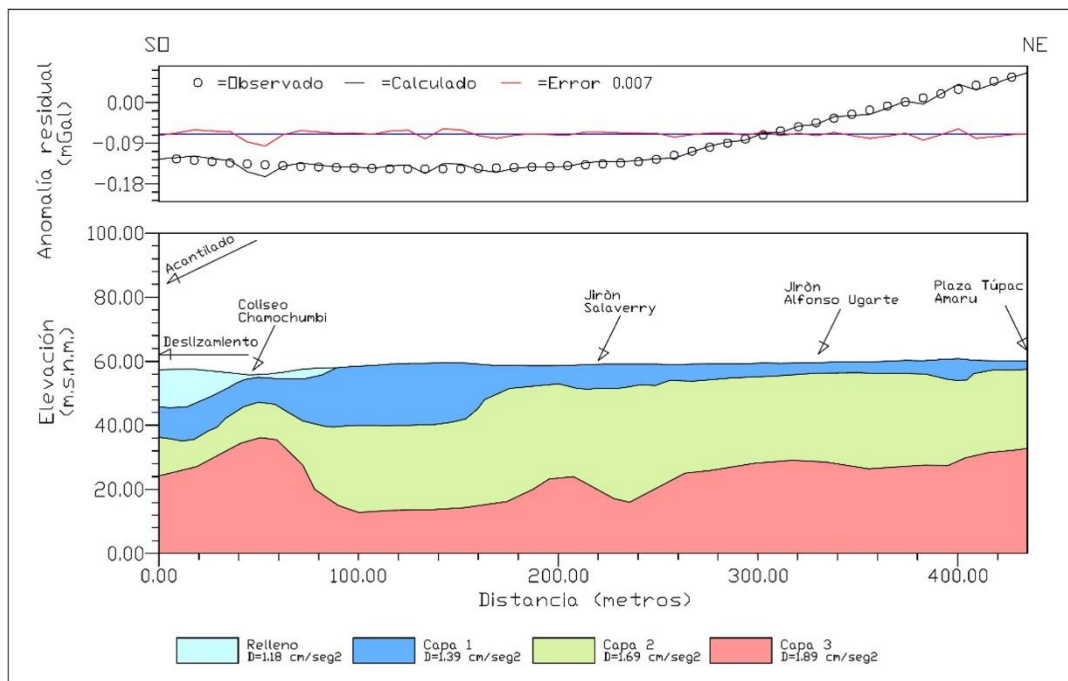


Figura 22. Sección gravimétrica LG01. Dirección SO-NE.

Sección gravimétrica LG02-MM: Esta sección cruza el Puericultorio Pérez Aranibar, la Av. Del Ejército y el Hospital Larco Herrera, ver Figura 21. La distribución de los valores de densidad ha permitido identificar en el subsuelo la presencia de cuatro capas: la primera considerada como la más superficial muestra una densidad de 1.36 cm/seg^2 y espesores que varían de 8 a 12 metros, estando las de mayor espesor por el tramo que corresponde a la Av. del Ejército. La segunda capa, con una densidad de 1.71 cm/seg^2 presenta espesores que varían entre 4 a 20 metros. Asimismo, conforme se incrementa la profundidad (hasta el nivel medio del mar), el valor de densidad aumenta a 1.89 cm/seg^2 , lo cual sugiere la existencia de suelos más densos o de mayor rigidez. Solo en el extremo SO y en profundidad, se ha identificado la presencia de una cuarta capa cuyo valor de densidad (2.2 cm/seg^2) es mayor a los suelos circundantes (Figura 23).

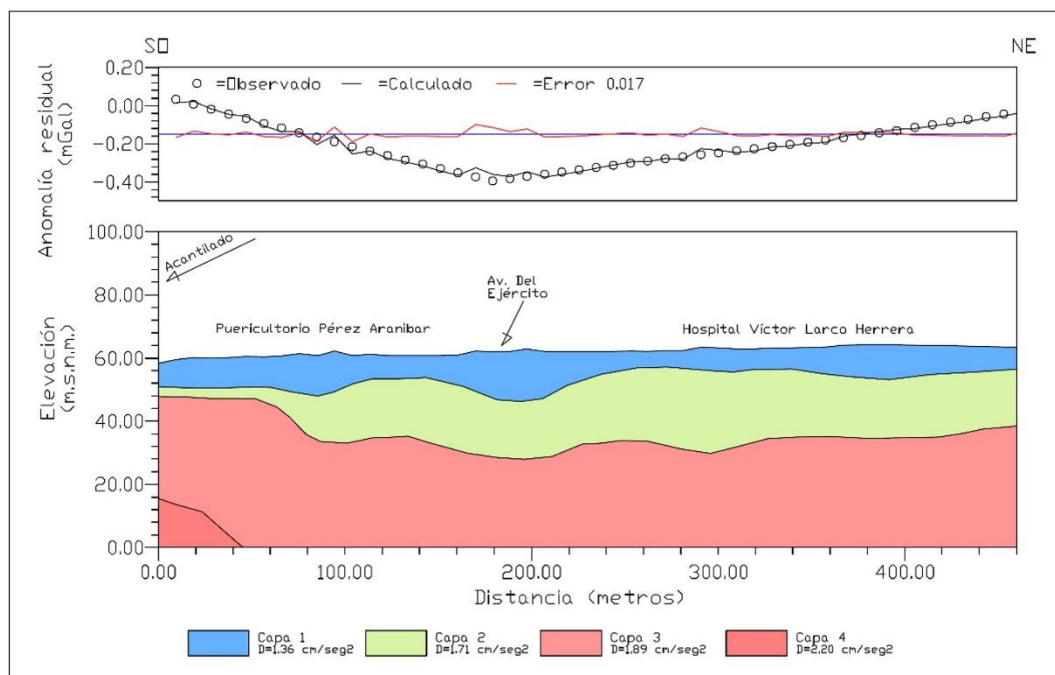


Figura 23. Sección gravimétrica LG02. Dirección SO-NE.

Sección gravimétrica LG03-MM: Esta sección se inicia en la Costa Verde, cruza el Conjunto residencial Marbella, el A.H. Medalla Milagrosa, la Av. Del Ejército y parte de la Av. Juan de Aliaga, ver Figura 21. La distribución de los valores de densidad han permitido identificar la existencia en el subsuelo de tres capas: la primera considerada como la más superficial muestra una densidad de 1.39 cm/seg^2 y espesores que varían de 4 a 20 metros, estando los mayores espesores en el Conjunto Residencial Marbella y en el extremo NE de la sección.

La segunda capa, con una densidad de 1.69 cm/seg^2 presenta espesores que varían entre 10 a 60 metros. Asimismo, conforme se incrementa la profundidad (hasta el nivel medio del mar) el valor de densidad aumenta a 1.9 cm/seg^2 , lo cual sugiere la existencia de suelos con mayor rigidez (Figura 24).

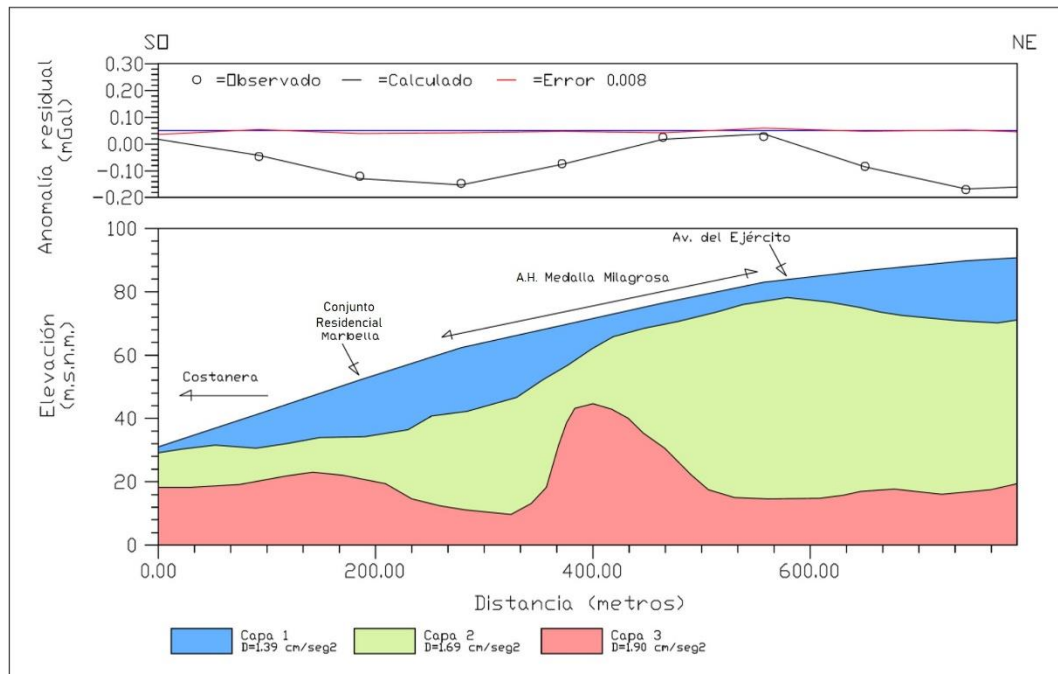


Figura 24. Sección gravimétrica LG03. Dirección SO-NE.

5.-ZONIFICACIÓN GEOFÍSICA DE LOS ACANTILADOS

El distrito de Magdalena del Mar, se asienta sobre una terraza conformada por depósitos aluviales, cuyo cambio topográfico más resaltante lo conforman los acantilados de la Costa Verde. En este escenario, la recolección de datos geofísicos en la parte alta del acantilado, y su posterior procesamiento y análisis, han permitido evaluar el comportamiento dinámico de los suelos e identificar espacialmente, la ubicación de la línea de falla paralela al acantilado, que separa los suelos estables de los inestables que podrían experimentar asentamientos diferenciales y/o deslizarse ante la posible ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud.

Para la mejor comprensión de los resultados obtenidos en este estudio, la zona del acantilado del distrito de Magdalena del Mar, ha sido sectorizada en 3 zonas, cuyas características son las siguientes (Figura 25):

SECTOR I.

Considera el área del acantilado, entre la calle Echenique (extremo norte) y el Jr. Antonio Raymondi (extremo Sur). En este sector el límite que separa, en superficie, los suelos con diferente comportamiento dinámico, se encuentra a 60 metros del acantilado, el mismo que se incrementa progresivamente a 100 metros hacia su extremo Sur. A continuación, se indican las características geofísicas de este sector:

-El periodo (T_0) de vibración del suelo varía de Este a Oeste; mientras que, de Norte a Sur, el número de periodos de respuesta del suelo se incrementa de 2 (T_0 : 0.1 y 0.7 segundos.) a 3 (T_0 : 0.1, 0.3 y 0.7 segundos), lo cual sugiere que estos últimos corresponden a suelos más heterogéneos.

- Se ha identificado la presencia de tres capas sísmicas: la primera de 7 metros de espesor y velocidades de $V_s=230\text{m/s}$ y $V_p=350-1000\text{ m/s}$. La segunda, de 16 metros de espesor y velocidades de $V_s= 400\text{ m/s}$; $V_p=1000-1800\text{ m/s}$, asentadas sobre una capa de mayor consistencia, de 30 metros de espesor con velocidades $V_s=620\text{m/s}$ y $V_p=1800-2400\text{ m/s}$ y el semi-espacio con $V_s>760\text{ m/s}$ (Figura 26). De acuerdo a las velocidades V_p y V_s , ellas se incrementan en profundidad, lo cual sugiere que los suelos son más compactos en profundidad.

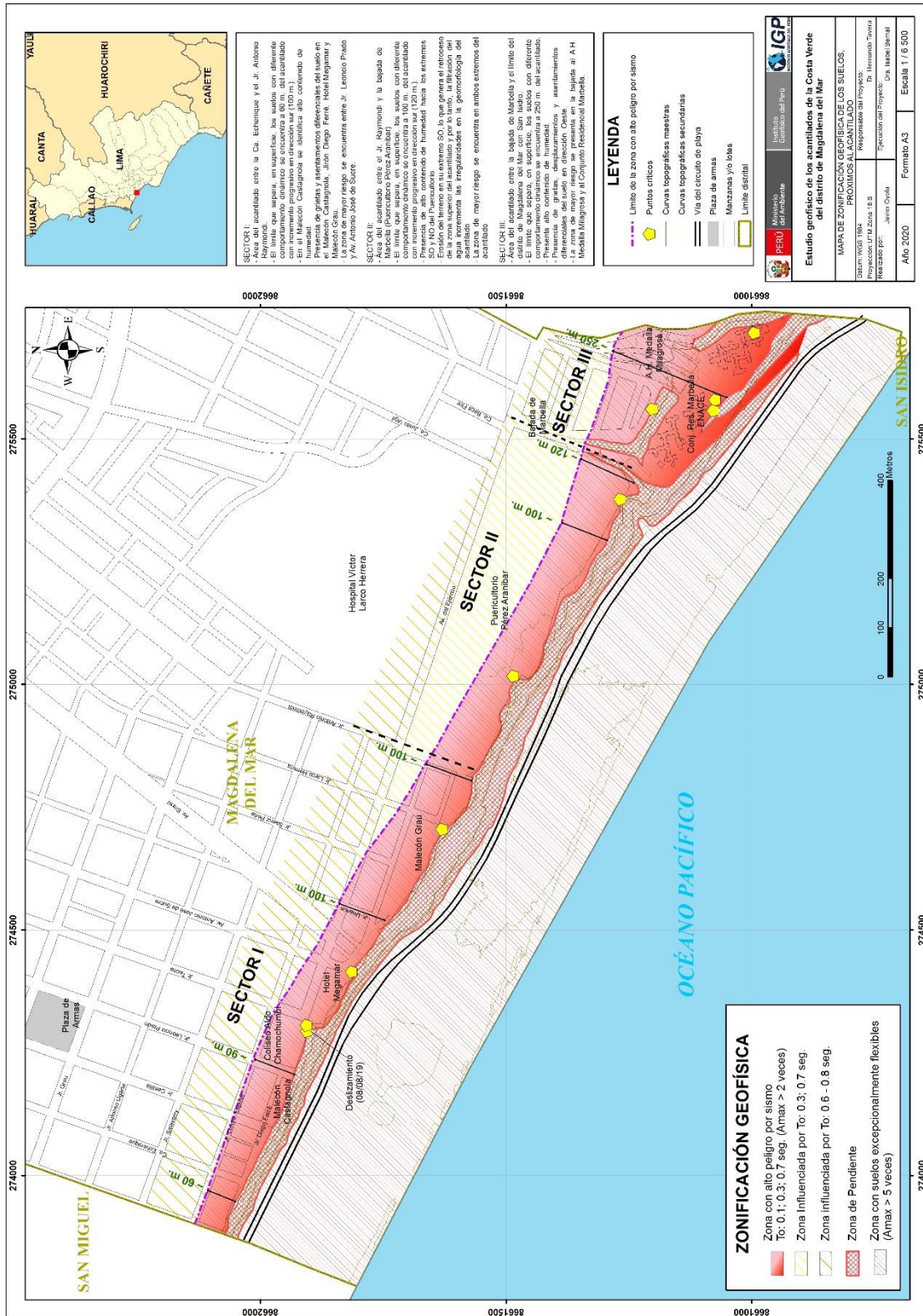


Figura 25. Delimitación de la plataforma superior del acantilado de la Costa Verde en el distrito de Magdalena del Mar. Los Sectores I, II y III, comprenden áreas con similares características físicas.

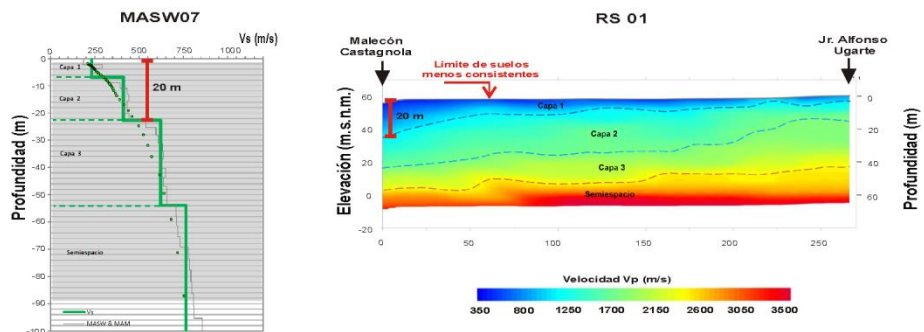
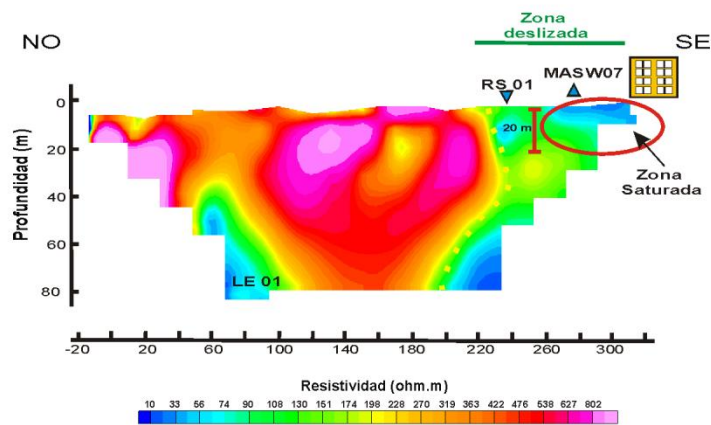


Figura 26. Resultados geofísicos obtenidos en el Sector I, ver Figura 25.

- Presencia de suelos saturados en el Malecón Castagnola hasta los 10 metros de profundidad. Aquí ocurrió el deslizamiento del día 8 de agosto del 2019.

-Presencia de grietas y asentamientos diferenciales en el suelo en: Malecón Castagnola, Jirón Diego Ferre, Hotel Megamar y Malecón Grau.

-La zona de mayor riesgo se encuentra entre el Jr. Leoncio Prado y la Av. Antonio José de Sucre, debido a la alta saturación existente a nivel superficial.

En general, el escenario descrito es producto de la existencia de suelos con un estrato superficial de relleno afectado por el riego y filtración de agua que genera, en algunas zonas, la presencia de suelos saturados.

SECTOR II.

Considera el área que corresponde al Puericultorio Pérez Aranibar, desde el Jr. Raymondi hasta la bajada de Marbella. En este sector, el límite que separa en superficie, los suelos con diferente comportamiento dinámico, se encuentra a 100 metros del acantilado, el mismo que se incrementa progresivamente a 120 metros hacia su extremo Sur. Asimismo, en el extremo Este de la línea límite, se identifica la presencia de una franja angosta de aproximadamente 50 metros de ancho, donde los suelos responden claramente a periodos de 0.3 segundos, evidenciando que los suelos superficiales aún predominan por ese sector, a pesar que presentan bajas amplificaciones. A continuación se indica las características geofísicas de este sector (Figura 27):

-El periodo (T_0) de vibración del suelo es, principalmente de 0.3 y 0.7 segundos.

- Se tiene la presencia de tres capas sísmicas: la primera de 5 metros de espesor y velocidades de $V_s=300$ m/s. La segunda, de 8 metros de espesor y velocidades de $V_s=400$ m/s, asentadas sobre una capa más consistente de 35 metros de espesor con velocidades de $V_s=600$ m/s y un semi-espacio con velocidades de $V_s>800$ m/s (Figura 27). Los incrementos en velocidad en función de la profundidad, sugieren que los suelos son más compactos a mayor profundidad.

- Presencia de suelos saturados, principalmente hacia los extremos SO y NO del Puericultorio Pérez Aranibar.

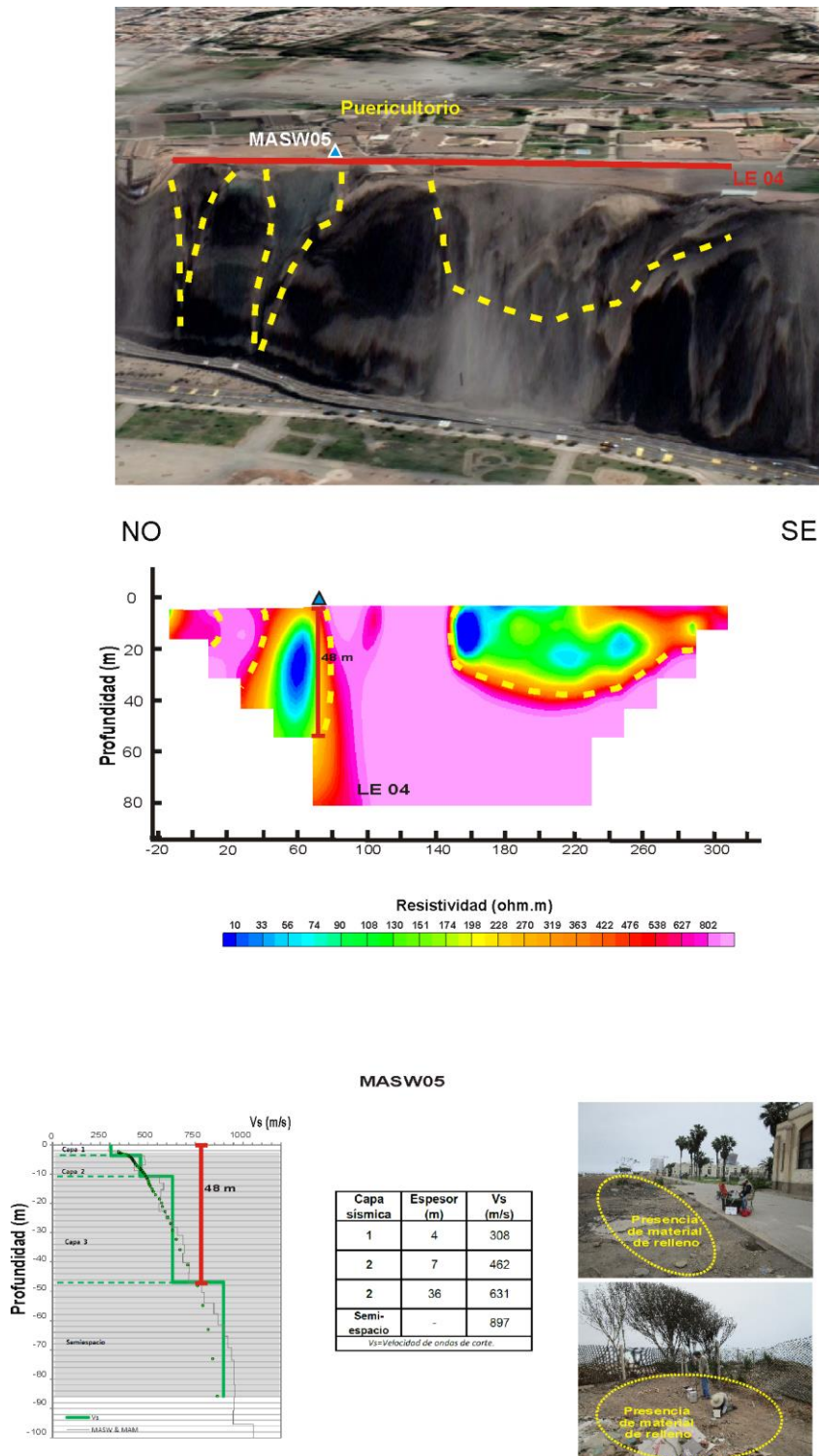


Figura 27. Resultados geofísicos obtenidos en el Sector II, ver Figura 25.

-Importante erosión del terreno en su extremo SO que genera el retroceso de la parte superior del acantilado.

-La zona de mayor peligro se encuentra en ambos extremos del acantilado.

En general, el escenario descrito es producto de la existencia de suelos con un estrato superficial de relleno con alto grado de saturación del suelo, principalmente a ambos extremos del Puericultorio Pérez Aranibar.

SECTOR III.

Considera el sector del acantilado, desde la baja de Marbella hasta el límite del distrito de Magdalena del Mar con el de San Isidro. En este sector, el límite que separa en superficie y a lo largo del acantilado, los suelos con diferente comportamiento dinámico, se encuentra a 120 metros del acantilado, el mismo que se incrementa progresivamente hasta 250 metros en dirección Sur. A continuación, se indica las características geofísicas de este sector (Figura 28):

-El periodo (T_0) de vibración del suelo se incrementa, de Oeste a Este, con valores de 0.1, 0.2, 0.3 y 0.7 segundos.

- Se tiene la presencia de tres capas sísmicas: la primera de 15 metros de espesor y velocidades de $V_s=280\text{m/s}$ y $V_p=350-1000\text{ m/s}$. La segunda, de 10 metros de espesor y velocidades de $V_s= 430\text{ m/s}$; $V_p=1000-1800\text{ m/s}$, la tercera de 12 metros de espesor y velocidades $V_s=660\text{m/s}$ y $V_p=1800-2400\text{ m/s}$, todas asentadas sobre un semi-espacio con velocidades de $V_s>1000\text{ m/s}$ (Figura 28). Estas variaciones en profundidad de las velocidades, sugiere a mayor profundidad la existencia de suelos compacto.

- Presenta suelos saturados, principalmente en la zona baja de este sector que se encuentra a menor altura con respecto al nivel medio del mar.

-Presencia de grietas, desplazamientos y asentamientos diferenciales del suelo en dirección Oeste.



NO

SE

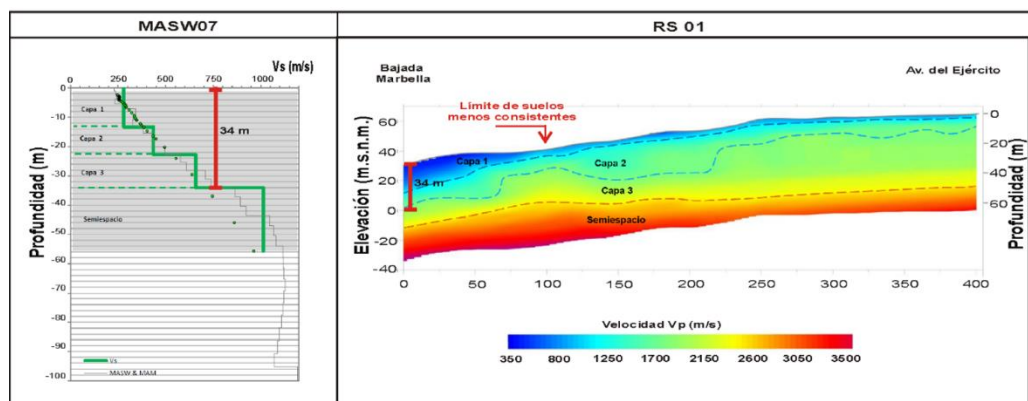
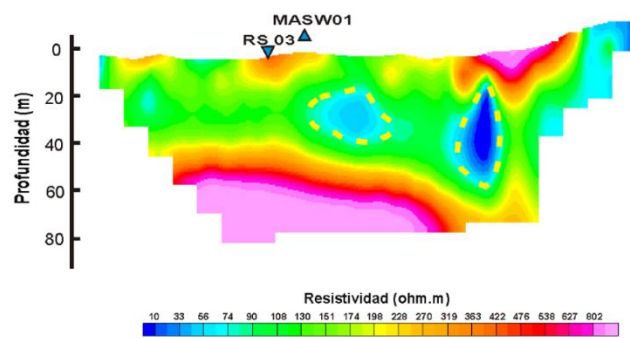


Figura 28. Resultados geofísicos obtenidos en el Sector III, ver Figura 25.

El escenario descrito, es producto de la existencia en el sector, de suelos de relleno, material utilizado a fin de ganar terreno para construir viviendas. En la actualidad, estos terrenos se ven afectados por la filtración del agua que genera sobrecarga a los niveles de saturación. El A.H. Medalla Milagrosa y el conjunto residencial Marbella, presentan un alto riesgo a la ocurrencia de un sismo.

CONCLUSIONES

El análisis geofísico de los suelos presentes en los acantilados de la Costa Verde, distrito de Magdalena del Mar, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- *El análisis y evaluación de las características físicas y dinámicas del suelo, en la zona del acantilado, permitió definir en superficie y a lo largo del acantilado de la Costa Verde, el límite que separa los suelos estables de los inestables y cuyo comportamiento dinámico presenta un alto peligro ante sismos de gran magnitud. Este límite se encuentra a distancias de 60 a 120 metros de los acantilados, excepto en la zona de Medalla Milagrosa, que alcanza distancias de hasta 250 metros. En esta zona los suelos no compactos presentan un mayor número de periodos de respuesta, lo cual evidencia la complejidad en su respuesta dinámica ante la ocurrencia de un evento sísmico. Asimismo, estos suelos presentan un alto contenido de humedad.*
- *A lo largo del acantilado, los valores de velocidades de ondas V_p (350-1000 m/s) y V_s (240 a 400 m/s), definen la existencia de suelos menos consistente con espesores del orden de 10 a 20 metros, estando los de mayor espesor por el parque Castagnola (área del reciente deslizamiento), Puericultorio Pérez Aranibar y por el conjunto residencial Marbella. El espesor de esta capa decrece en dirección Este, hacia tierra adentro. Asimismo, conforme se incrementa la profundidad, el grado de rigidez del suelo aumenta considerablemente, indicando la mayor consistencia de material gravoso.*
- *Según su comportamiento dinámico, los suelos en la Costa Verde, responden principalmente a dos rangos de periodos: de 0.1-0.3 segundos y 0.6-0.8 segundos. Próximos al acantilado, los suelos responden a más de dos picos con valores entre 0.1-0.8 segundos, evidenciando la presencia de suelos heterogéneos e inestables. A mayor distancia, en dirección este, los suelos responden a un único pico de periodo (0.6 - 0.8 segundos) con bajas amplificaciones y en muchos casos, no se identifica ningún periodo, evidenciando la presencia de suelos homogéneos.*
- *El estudio gravimétrico ha permitido identificar tres capas de suelos caracterizados por un valor de densidad que varía de 1.2 a 2.0 cm/seg^2 . La capa más superficial*

presenta menor densidad, con espesores entre 4 a 20 metros, estando los de mayor espesor emplazados por el Coliseo Chamocho, Puericultorio Pérez Aranibar y por el Conjunto residencial Marbella.

- *En base a la respuesta dinámica de los suelos, se ha identificado la existencia de 3 sectores con similares características físicas. Los Sectores I y II se encuentran desde el límite de Magdalena del Mar con San Miguel, hasta la bajada de Marbella, donde se define el límite que separa los suelos con diferente comportamiento dinámico a distancias, desde el acantilado, de 60 a 100 metros en el Sector I; entre 90 y 120 metros en el Sector II; y el Sector III, se encuentra entre la bajada de Marbella y el límite con el distrito de San Isidro, donde se define este límite a 250 metros. Este último, evidencia mayores problemas geotécnicos.*
- *Finalmente, las zonas con mayor probabilidad a sufrir daños ante la posible ocurrencia de sismos debido a la inestabilidad del terreno al borde del acantilado, entre el Jr. Leoncio Pardo y Antonio José de Sucre: Malecón Castagnola, el borde del Malecón Grau, en el Puericultorio Pérez Aranibar y en algunos sectores del conjunto residencial Marbella*

REFERENCIAS

- ASTM D5777, Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation.
- Bernal, I. (2006). Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Tlaxcala – México. Tesis de Maestría, II-UNAM, México.
- Bernal, I. (2019). Condiciones geo-ambientales y su influencia en el comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Ica. Tesis de doctorado, UNMSM.
- COEN agosto 2019., Reporte de peligro inminente N°086-29/08/2019/COEN-INDECI (Reporte N°01).
- CISMID (2017). Microzonificación sísmica del distrito de Magdalena del Mar. Universidad Nacional de Ingeniería, Informe técnico del Centro Peruano–Japonés de investigaciones sísmicas y mitigación de desastres, 23 pp.
- Díaz, J. (2008). Estabilización del talud de la costa verde en la zona del distrito de Magdalena. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú, 99 pp.
- Hinze, W., (2005). New standards for reducing gravity data. The North American gravity database. GEOPHYSICS, vol. 70, N° 4, J25-J32 pp.
- INDECI-PNUD (2014). Estudio PCS “Mapas de peligros, vulnerabilidad y riesgos, plan de usos del suelo ante desastres, proyectos y medidas de mitigación de la Costa Verde”. Proyecto de la Municipalidad de Lima – PNUD y Ciudades sostenibles INDECI-PNUD
- INGEMMET (2019). Evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa en el malecón Castagnola - acantilado de la Costa Verde (distrito Magdalena del Mar, provincia Lima, región Lima). Informe técnico A6930, Instituto geológico, minero y metalúrgico, 26 pp.
- Kane, M., (1962). A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer. Geophysics, 27(4) 455-462.
- Loke M.H. (1996-2004). Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys .
- Nagy D., (1966). The prism method for terrain corrections using digital computers. Pure Appl. Geophys. 63, 31-39, pp 10.
- Nakamura, Y., (1989): A Method of Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface. Railways Technol. Res. Inst. Quaterly Reports, 30(1): 25-33.
- Raygada Rojas (2011). Análisis de estabilidad y deformaciones en el acantilado de la Costa Verde. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Reynolds, J.M. (2011). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2nd ed., 712 pp.
- SESAME. Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations, Research Report WP12, Available online at: <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm>.2004.

- Spector, A., (1968). Espectral analysis of aeromagnetic maps: Ph.D. tesis, dept. of physics, University of Toronto.
- Spector, A., Grant, F.S., (1970): Statistical methods for interpreting aeromagnetic data. Geophysics, 35, 293-302 pp.

ANEXO I

Puntos críticos



Identificación puntos críticos afectados por problemas geotécnicos						
Pto 01	Ubicación: Malecón Castagnola (Parque de Juegos infantiles)					Elevación (m.s.n.m)
Región	Lima	Provincia	Lima	Distrito	Magdalena del Mar	
Coordenadas UTM						
Zona	18 S WGS-84	Norte (m)	8661907	Este (m)	274294	77
Observaciones: -Figura A: Derrumbe del acantilado ocurrido el 08 de agosto del 2019 en el malecón Castagnola, afectó el pase vehicular en la vía Costanera. El volumen del material desprendido fue de aproximadamente 450 m ³ . -Figura B: Se evidencia el desarrollo de asentamientos diferenciales en el suelo por presencia de rellenos antropóicos. Parque de juegos infantiles ubicado a 8 m aproximadamente del derrumbe en el malecón Castagnola (Figura A). -Figura C: Colocación de nueva geomalla, post derrumbe, en el malecón Castagnola (setiembre 2019).						



PERÚ

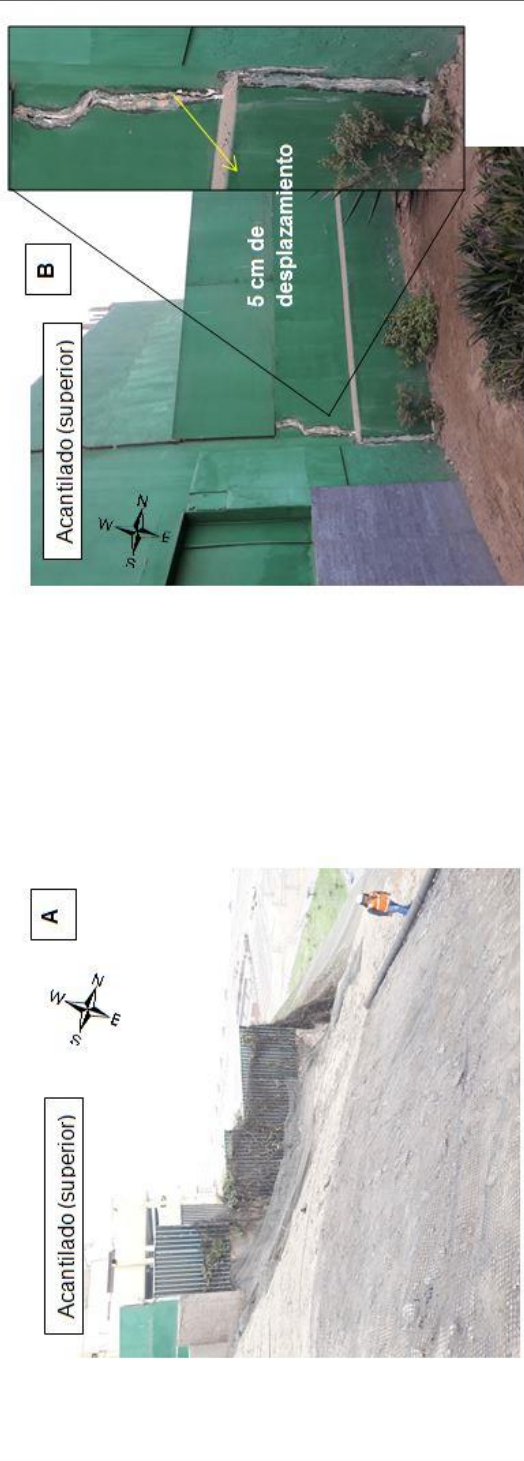
Ministerio del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú - IGP



Identificación puntos críticos afectados por problemas geotécnicos

Pto 02		Ubicación : Jirón Diego Ferre					
Región	Lima	Provincia	Lima	Distrito	Magdalena del Mar		
	Coordenadas UTM						
Zona	18 S WGS-84	Norte (m)	8661908	Este (m)	274306	Elevación (m.s.n.m)	78



Observaciones:
 - Figura A: Bases de edificio multifamiliar asentado sobre terreno conformado por presencia de rellenos antrópicos.
 - Figura B: En el muro de un edificio multifamiliar se evidencia la existencia de fisuras con desplazamiento de 5 cm aproximadamente (escarpa del acantilado).






PERÚ

Ministerio del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú - IGP



Identificación puntos críticos afectados por problemas geotécnicos									
Pto 03		Ubicación: Avenida Antonio José de Sucre 175 (Hotel Megamar)							
Región	Lima	Provincia	Lima	Distrito	Magdalena del Mar				
Coordenadas UTM									
Zona	18 S WGS-84	Norte (m)	8661816	Este (m)	274415	Elevación (m.s.n.m)	78		
 <p>Acantilado (superior)</p>					 <p>Acantilado (superior)</p>				
<p>-Figuras: Fisuramiento y asentamiento diferencial en las bases de Hotel Megamar. El terreno sobre el cual se asienta la construcción está conformado por rellenos antrópicos.</p>									



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú - IGP



Identificación puntos críticos afectados por problemas geotécnicos

Pto 04	Ubicación: Malecón Grau					Magdalena del Mar
Región	Lima	Provincia	Lima	Distrito		
Coordenadas UTM						
Zona	18 S WGS-84	Norte (m)	8661632	Este (m)	274705	Elevación (m.s.n.m)
						77
<p>Observaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Figura A: En el acantilado se observa material conformado por rellenos antrópicos. Edificio multifamiliar en proceso de construcción al borde del acantilado. - Figura B: Grieta (línea roja) en la pared de una vivienda la abertura es de 4 cm desde la base hasta donde inicia el segundo piso. Vivienda sentada sobre material de relleno antrópico al borde del acantilado. Zona susceptible a derrumbe. 						



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú - IGP



Identificación puntos críticos afectados por problemas geotécnicos									
Pto 05	Ubicación: Detrás del Puericultorio “Pérez Aranibar” borde del acantilado								
Región	Lima	Provincia	Lima	Distrito	Magdalena del Mar				
Coordenadas UTM									
Zona	18 S WGS-84	Norte (m)	8661489	Este (m)	275012	Elevación (m.s.n.m)	65		
Observaciones:									
-Figura A: A 7 cm del acantilado, se observa la presencia de grietas de 0.50 m de longitud, aberturas de 2 cm y profundidad de 5 cm. -Figura B: Se evidenció la presencia de desechos antrópicos que forman parte del relleno en el acantilado.									





PERÚ

Ministerio del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú - IGP



Identificación puntos críticos afectados por problemas geotécnicos									
Pto 06		Ubicación: Caída de Marbella (detrás del local de Puericultorio Pérez Aranibar)							
Región	Lima	Provincia	Lima	Distrito	Magdalena del Mar				
Coordenadas UTM									
Zona	18 S WGS-84	Norte (m)	8661257	Este (m)	275384	Elevación (m.s.n.m)	26		
<p>Acantillado (superior)</p> <p>A</p>		<p>Acantillado (superior)</p> <p>B</p>							
Observaciones									
<ul style="list-style-type: none"> - Figura A: Aforamiento de agua (natural) en la cárcava de la parte media del acantilado, con desembocadura en el Océano Pacífico. En círculo rojo se indica la tubería de desfogue de agua en las horas de la tarde (pm). - Figura B: Tubería de desfogue de agua (círculo rojo) proveniente de las instalaciones de Puericultorio Pérez Aranibar. El agua provoca la erosión (retroceso de acantilado) de la zona superior del acantilado y a futuro, puede provocar daños a la infraestructura física de la institución, la cual se encuentra a 3 m del borde de acantilado. 									

Identificación puntos críticos afectados por problemas geotécnicos									
Pto 07	Ubicación: Condominio Marbella - ENACE, zona de parqueo								
Región	Lima	Provincia	Lima	Distrito	Magdalena del Mar				
Coordenadas UTM									
Zona	18 S WGS-84	Norte (m)	8661076	Este (m)	275580	Elevación (m.s.n.m)	54		
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Acantilado (superior) A</p> <p>Grietas</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>									
Observaciones: - En la zona del estacionamiento del Condominio Marbella se observa la presencia de grietas de 70 cm de longitud, abertura de 7 cm y profundidad de 5 cm. Estas grietas se encuentran a 10 metros del borde del acantilado.									



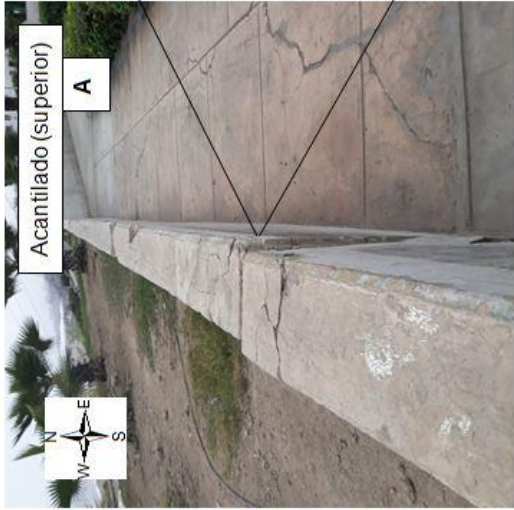

PERÚ

Ministerio del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú - IGP



Identificación puntos críticos afectados por problemas geotécnicos

Pto 08	Ubicación: Condominio Marbella- ENACE, zona de parqueo					Magdalena del Mar
Región	Lima	Provincia	Lima	Distrito		
Coordenadas UTM						
Zona	18 S WGS-84	Norte (m)	8661021	Este (m)	275614	Elevación (m.s.n.m)
						54
						
Observaciones: <ul style="list-style-type: none"> Figura A: En el muro de mampostería de la zona de parqueo de ENACE, se observa desplazamientos y asentamientos diferenciales de 2 cm en dirección oeste. El muro se encuentra a 5 m del borde del acantilado. 						

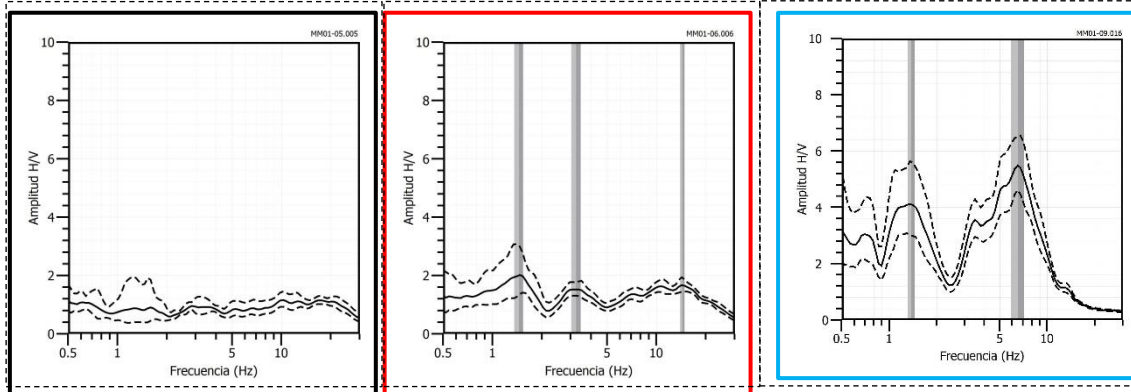
ANEXO II

Razones espectrales obtenidas para puntos ubicados a lo largo de los 14 perfiles. El cambio en la respuesta dinámica y física de los suelos puede ser analizado en base a la ubicación de los gráficos de H/V, según el siguiente detalle.

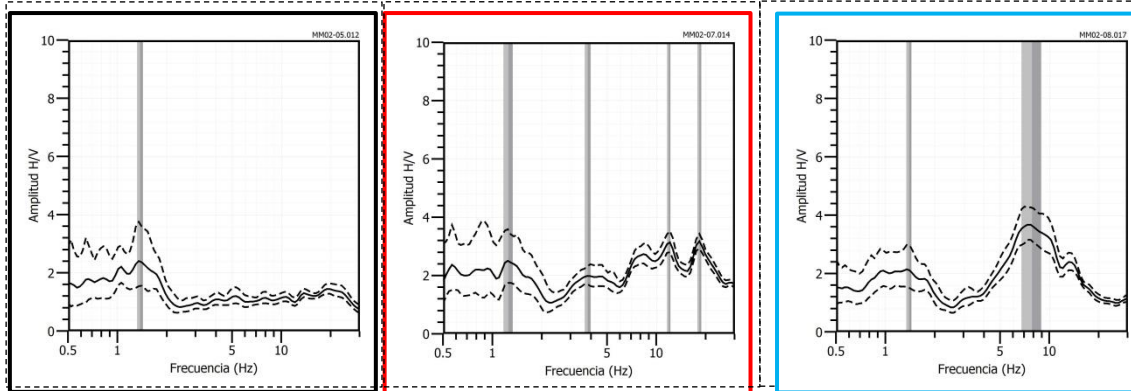
- Izquierda: puntos ubicados a más de 60 metros de acantilado (negro).
- Centro: puntos ubicados a próximos al acantilado (rojo).
- Derecha: puntos ubicados en la zona baja del acantilado, vía costanera (celeste).

En cada gráfico, las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante y secundaria.

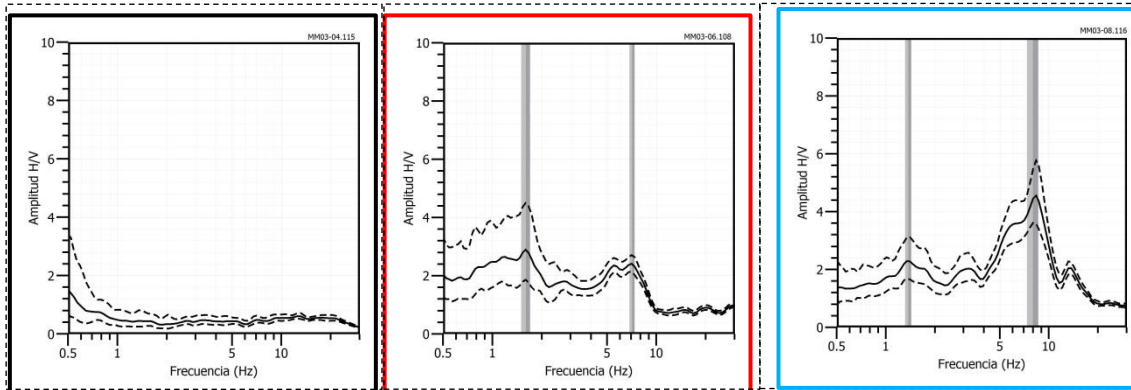
Perfil 1



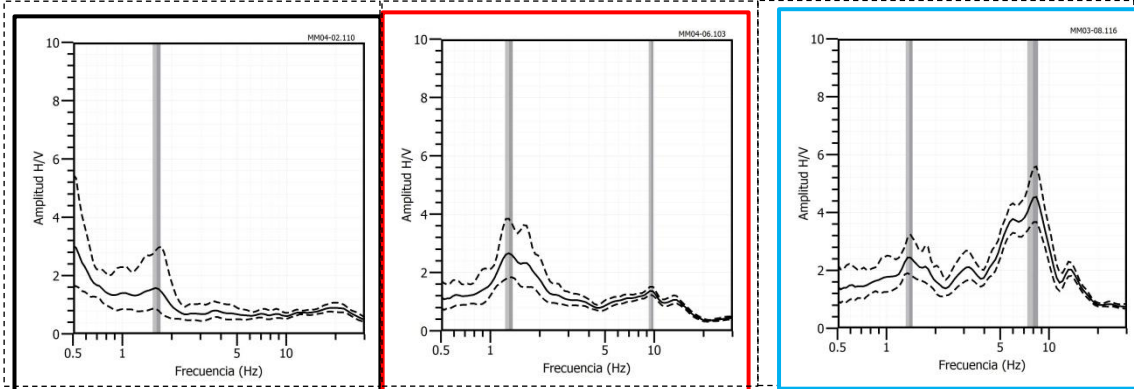
Perfil 2



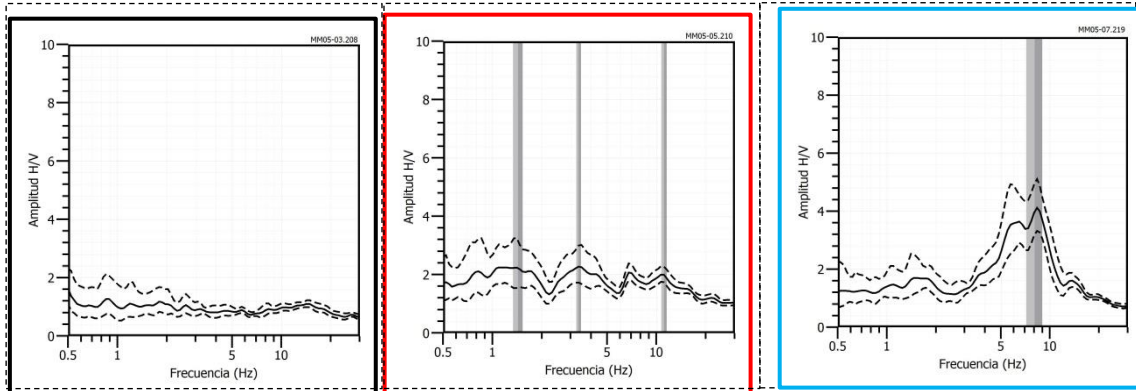
Perfil 3



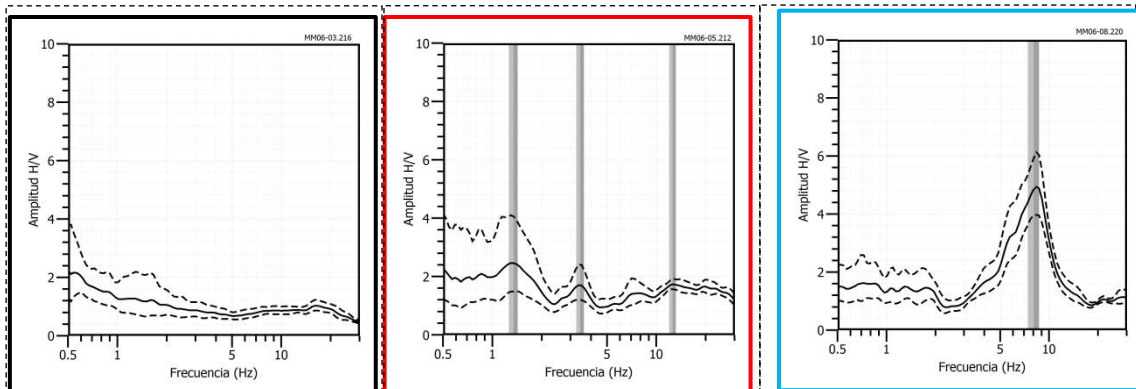
Perfil 4



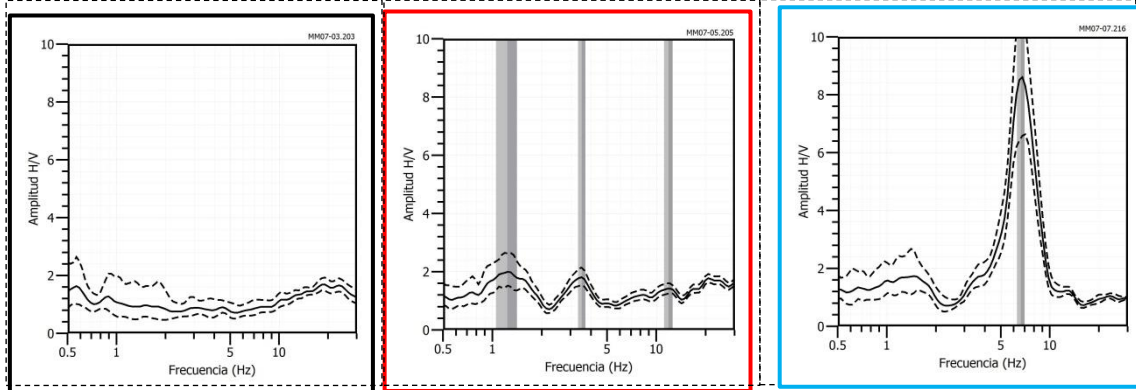
Perfil 5



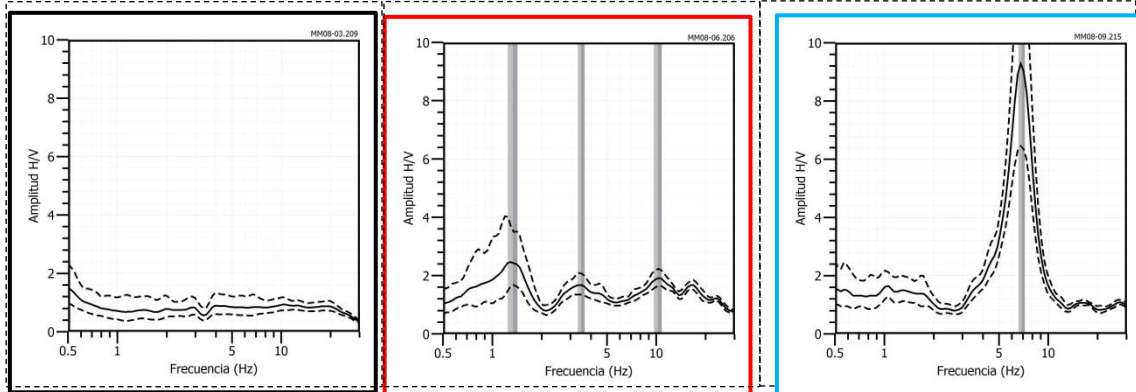
Perfil 6



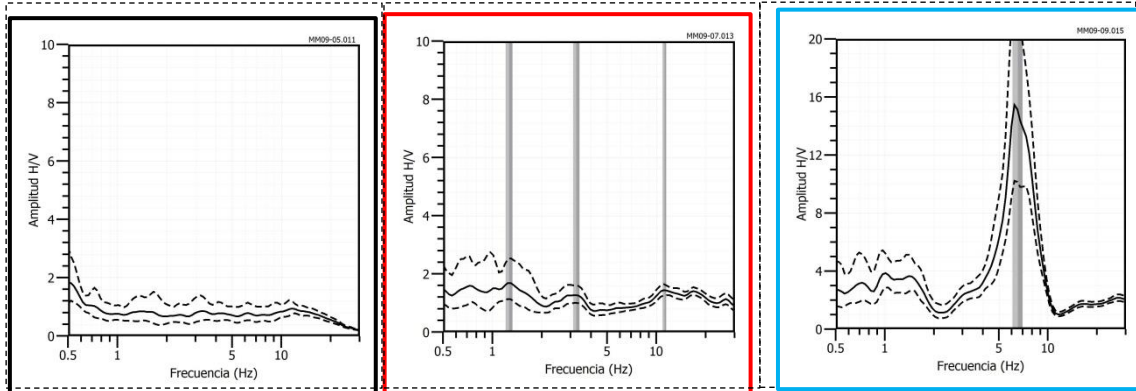
Perfil 7



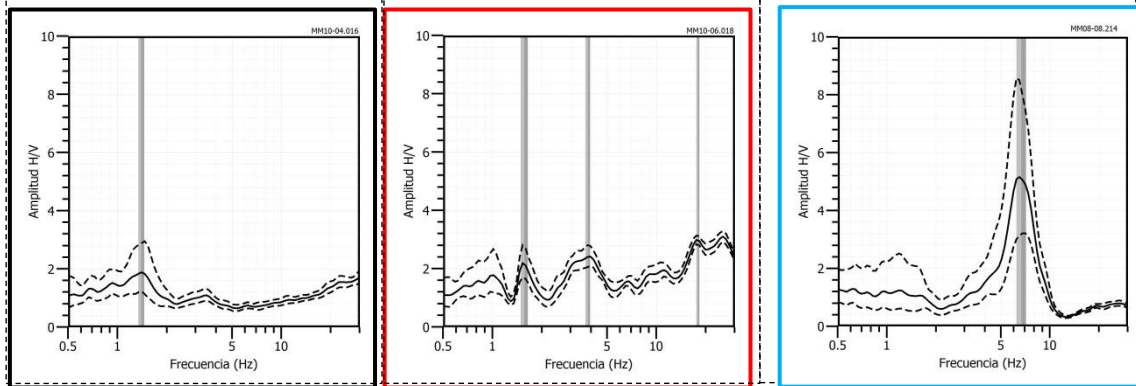
Perfil 8



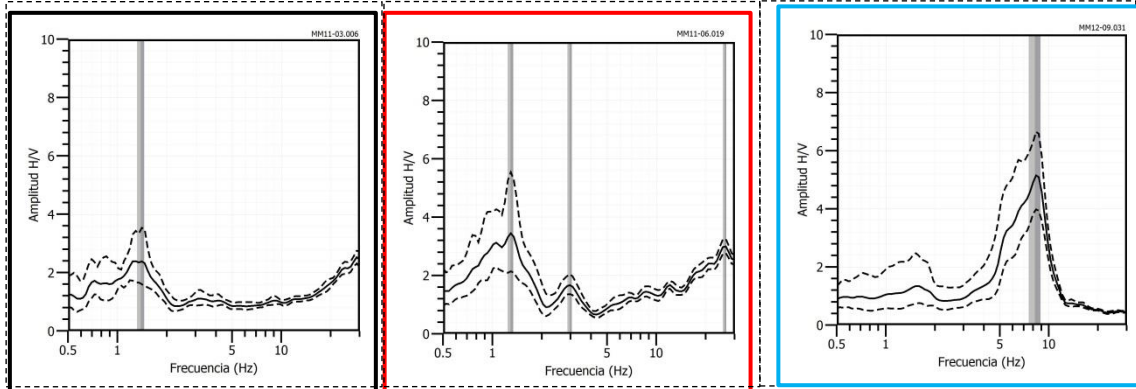
Perfil 9



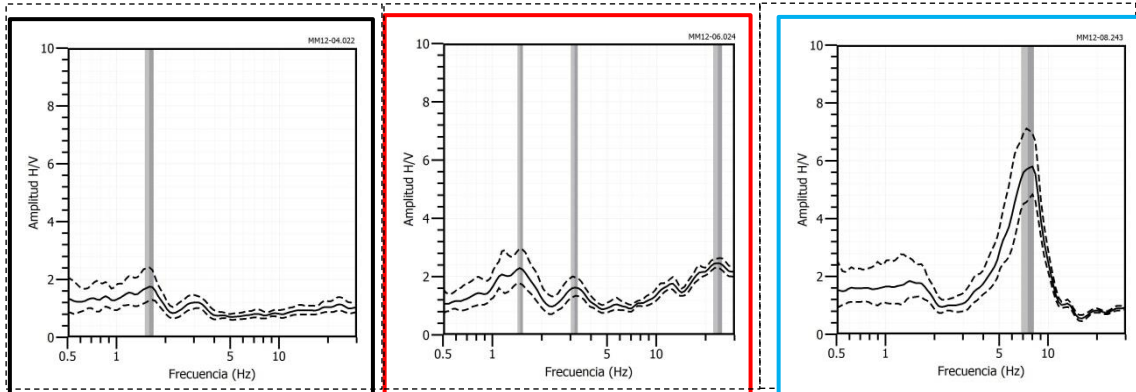
Perfil 10



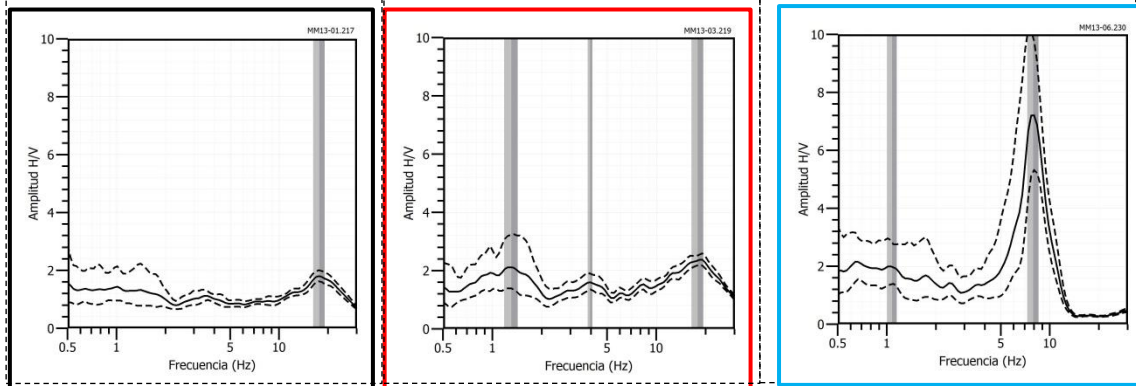
Perfil 11



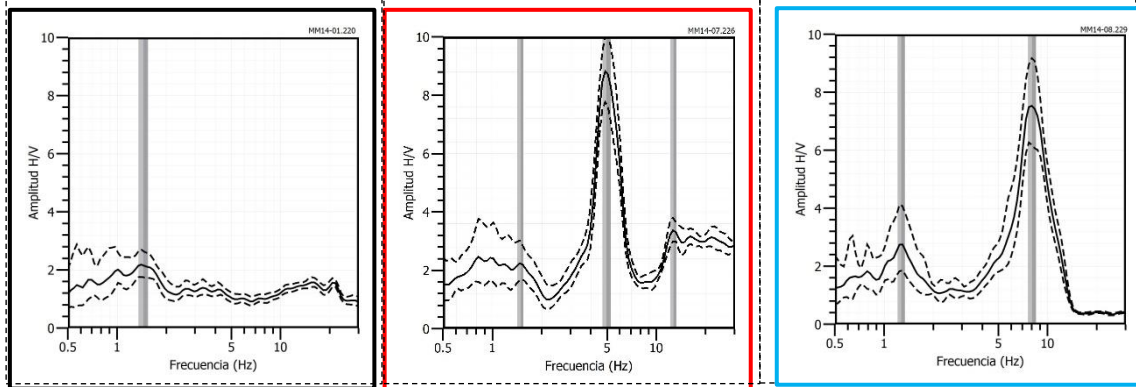
Perfil 12



Perfil 13

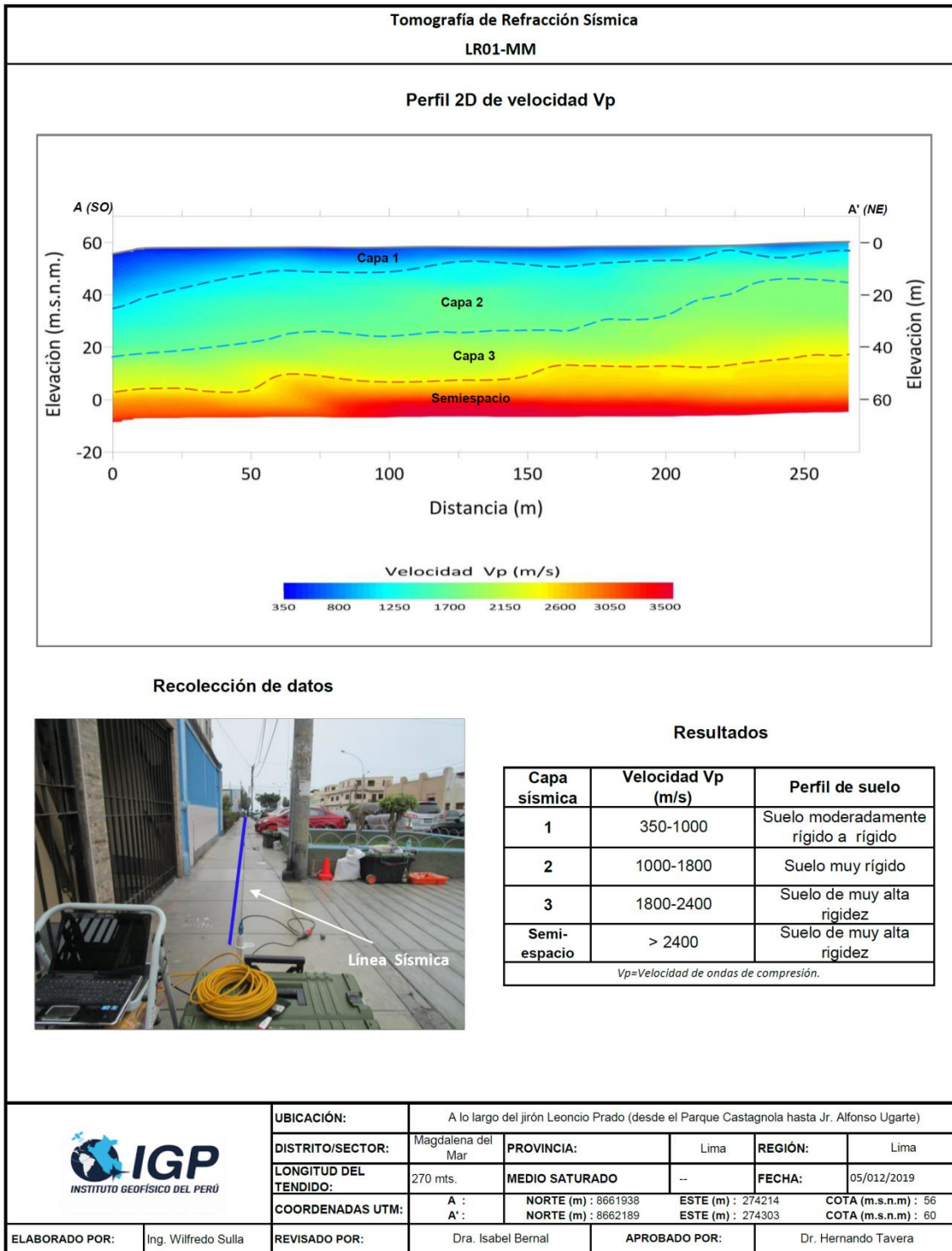


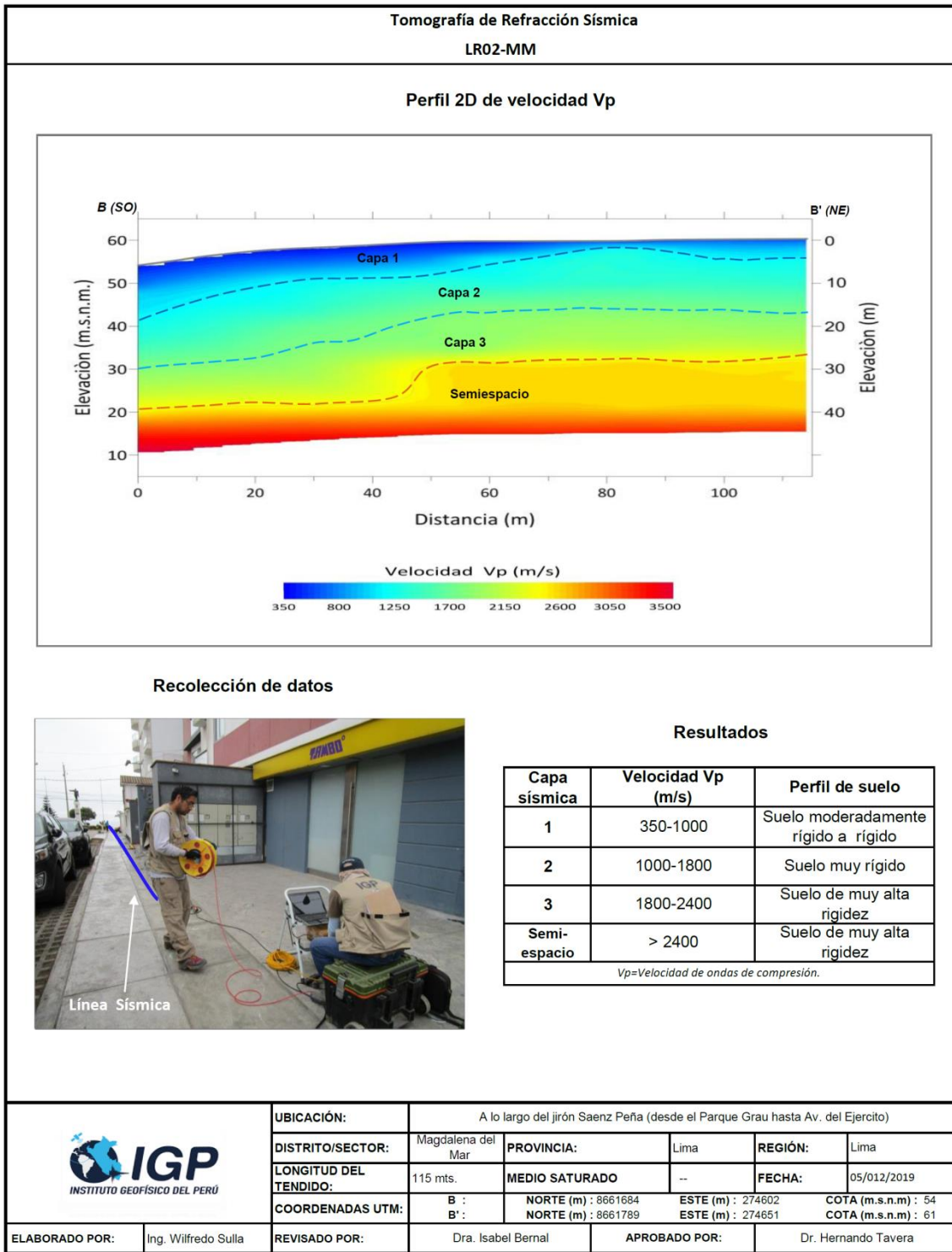
Perfil 14

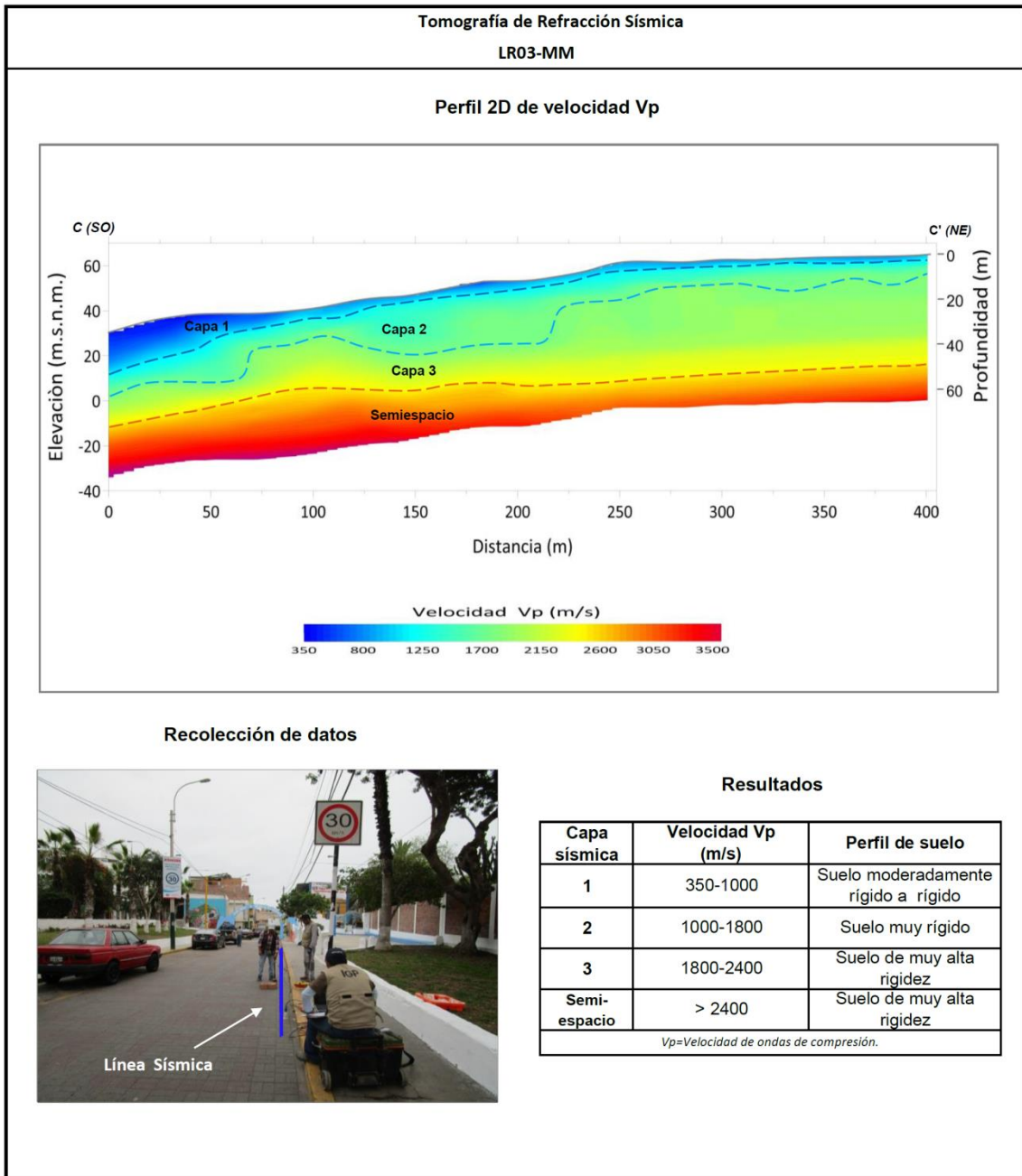


ANEXO III

Resultados obtenidos con Tomografía de Refracción Sísmica



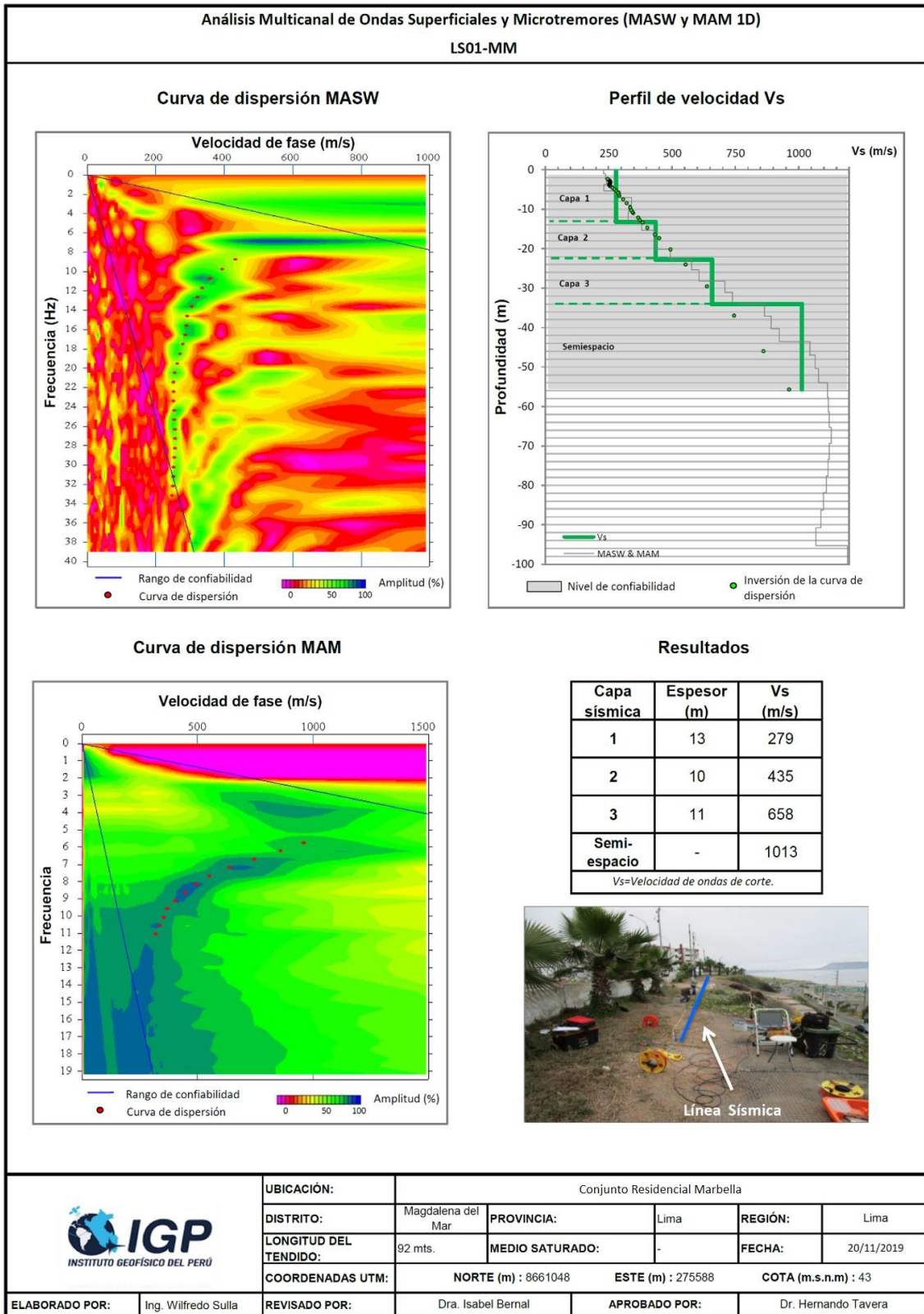


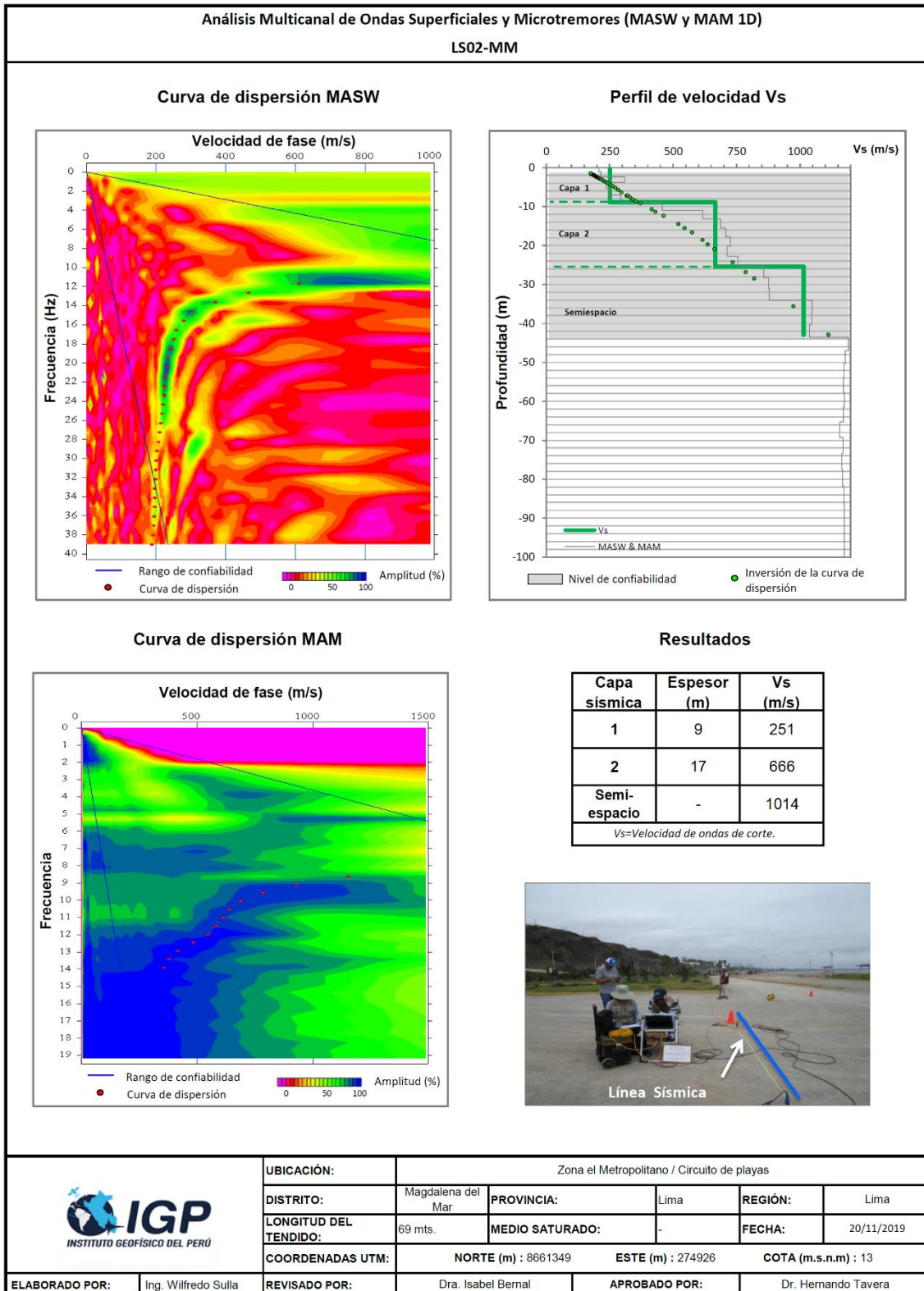


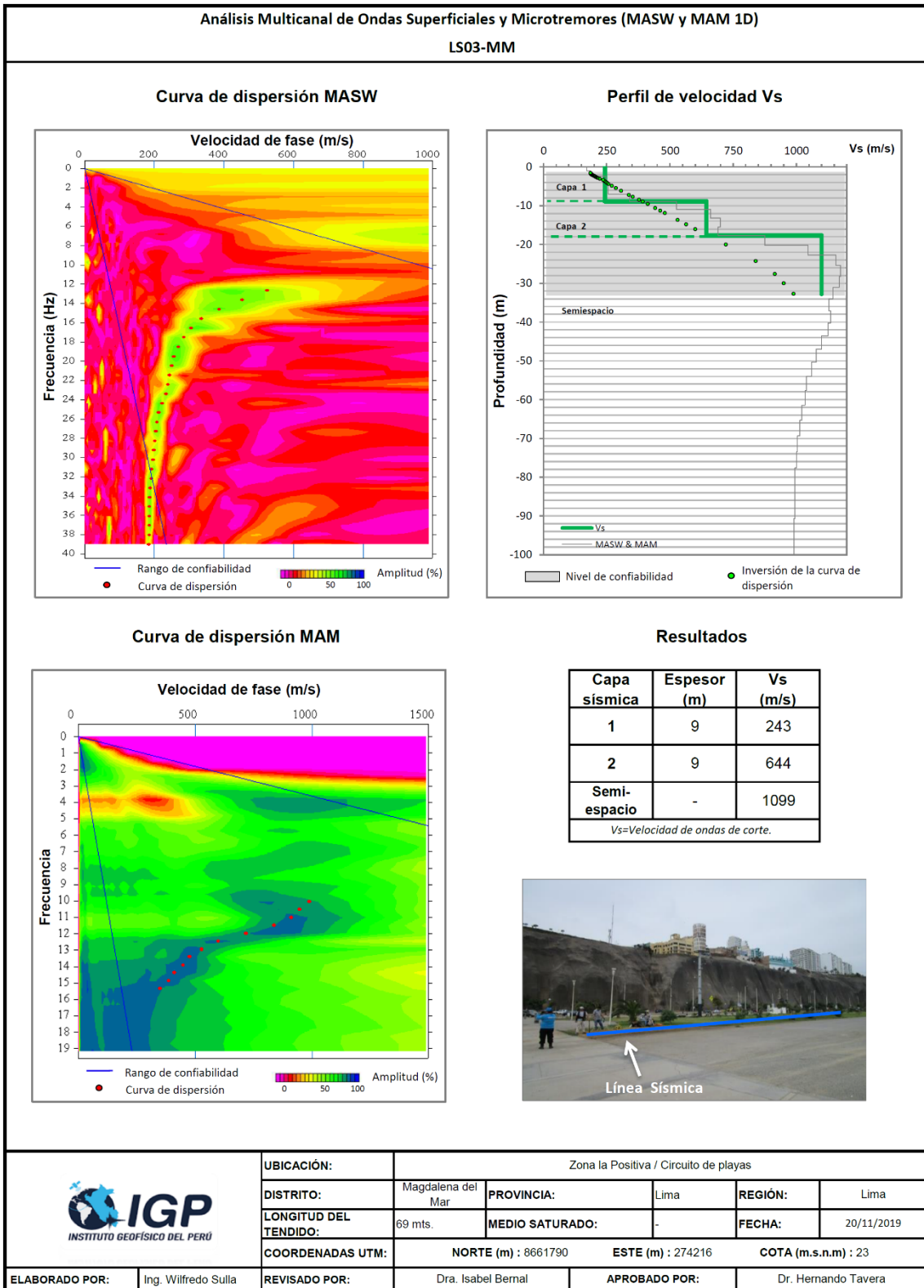
	UBICACIÓN: A lo largo de la calle Alberto Yabar (Residencia Marbella - Urb. Medalla Milagrosa)				
	DISTRITO/SECTOR: Magdalena del Mar	PROVINCIA: Lima	REGIÓN: Lima		
	LONGITUD DEL TENDIDO: 402 mts.	MEDIO SATURADO: --	FECHA: 05/012/2019		
	COORDENADAS UTM:		C : NORTE (m) : 8661049	ESTE (m) : 275655	COTA (m.s.n.m.) : 30
		C' : NORTE (m) : 8661394	ESTE (m) : 275697	COTA (m.s.n.m.) : 65	
ELABORADO POR: Ing. Wilfredo Sullá	REVISADO POR: Dra. Isabel Bernal	APROBADO POR: Dr. Hernando Tavera			

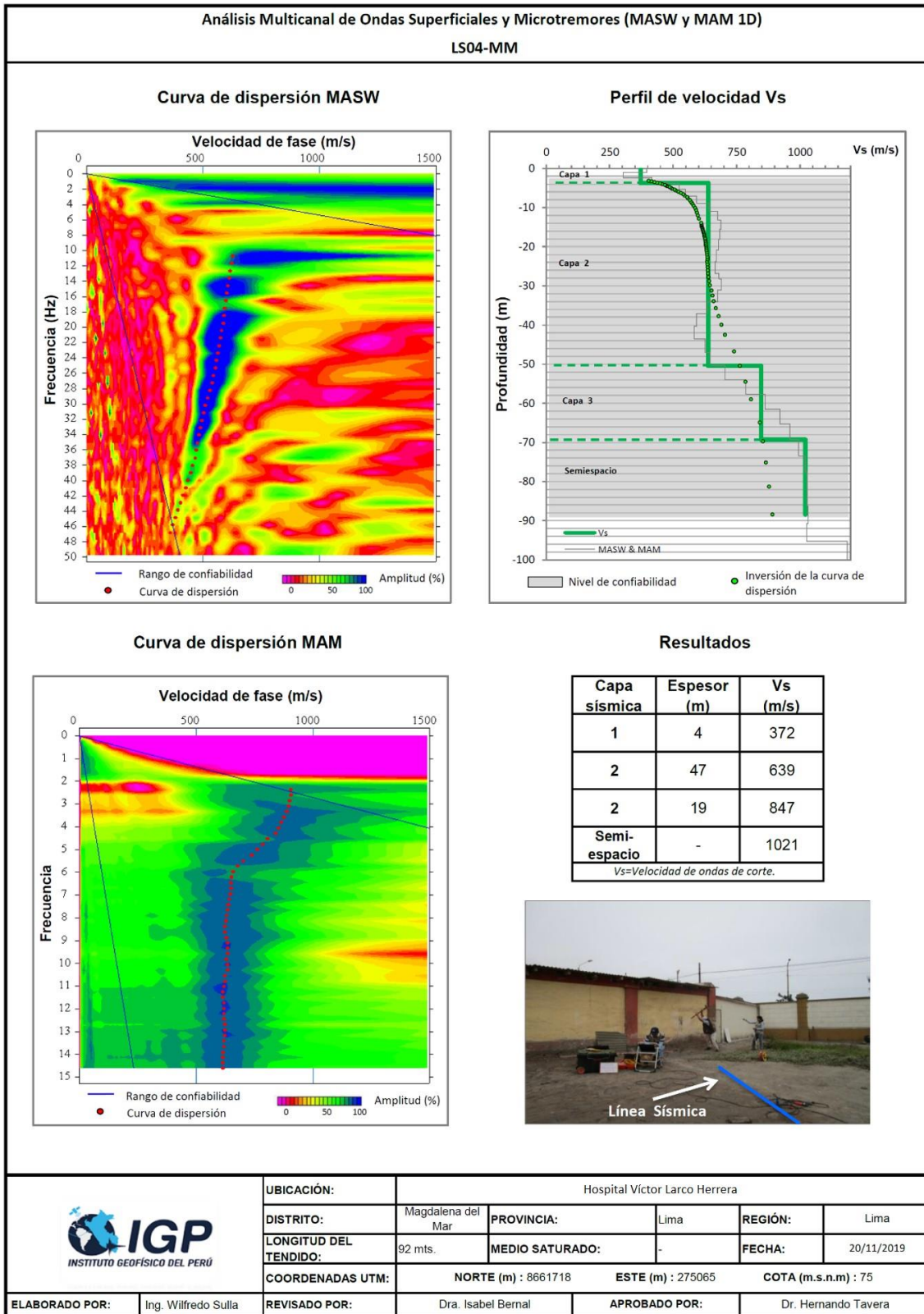
ANEXO IV

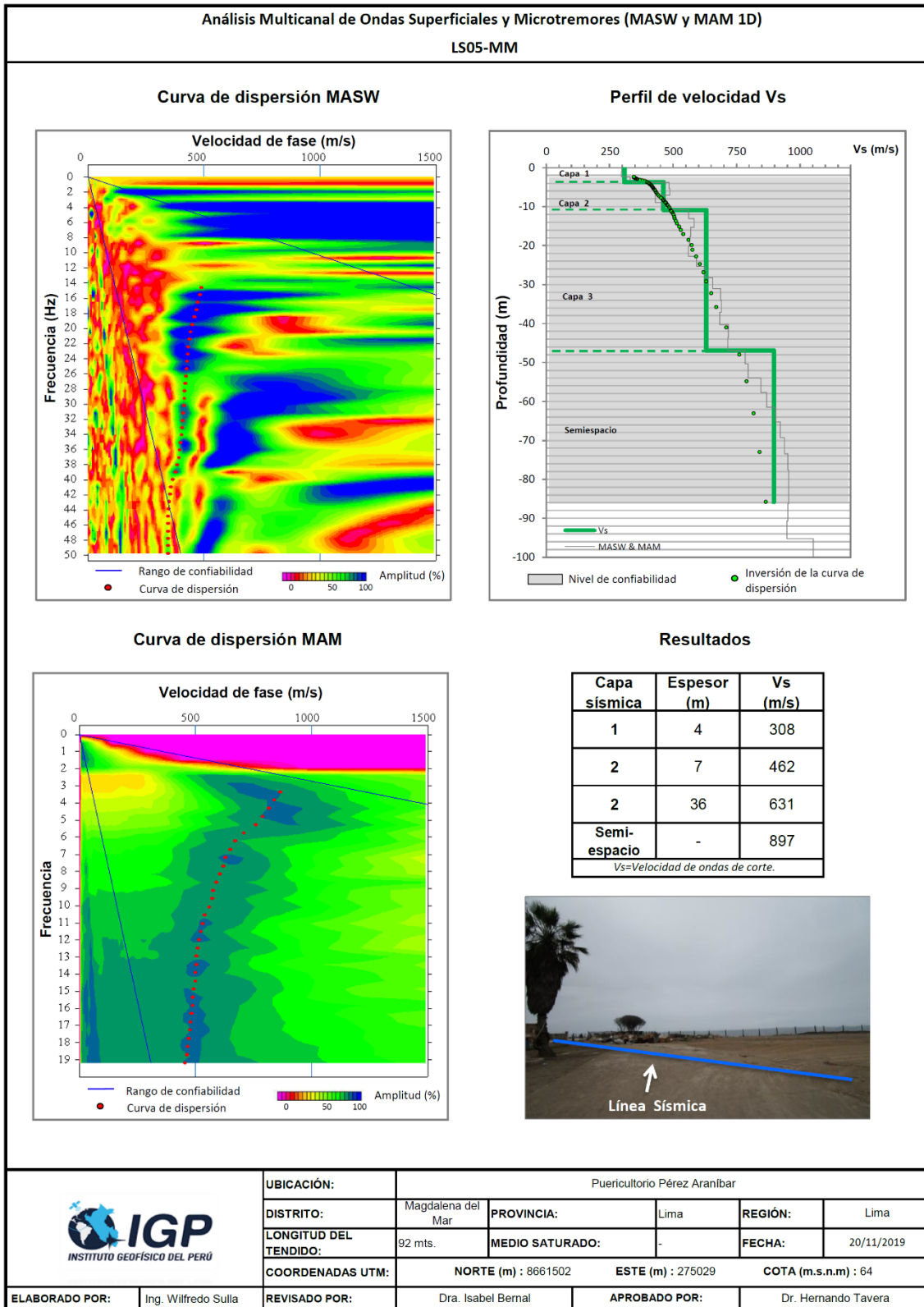
Resultados obtenidos con el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales

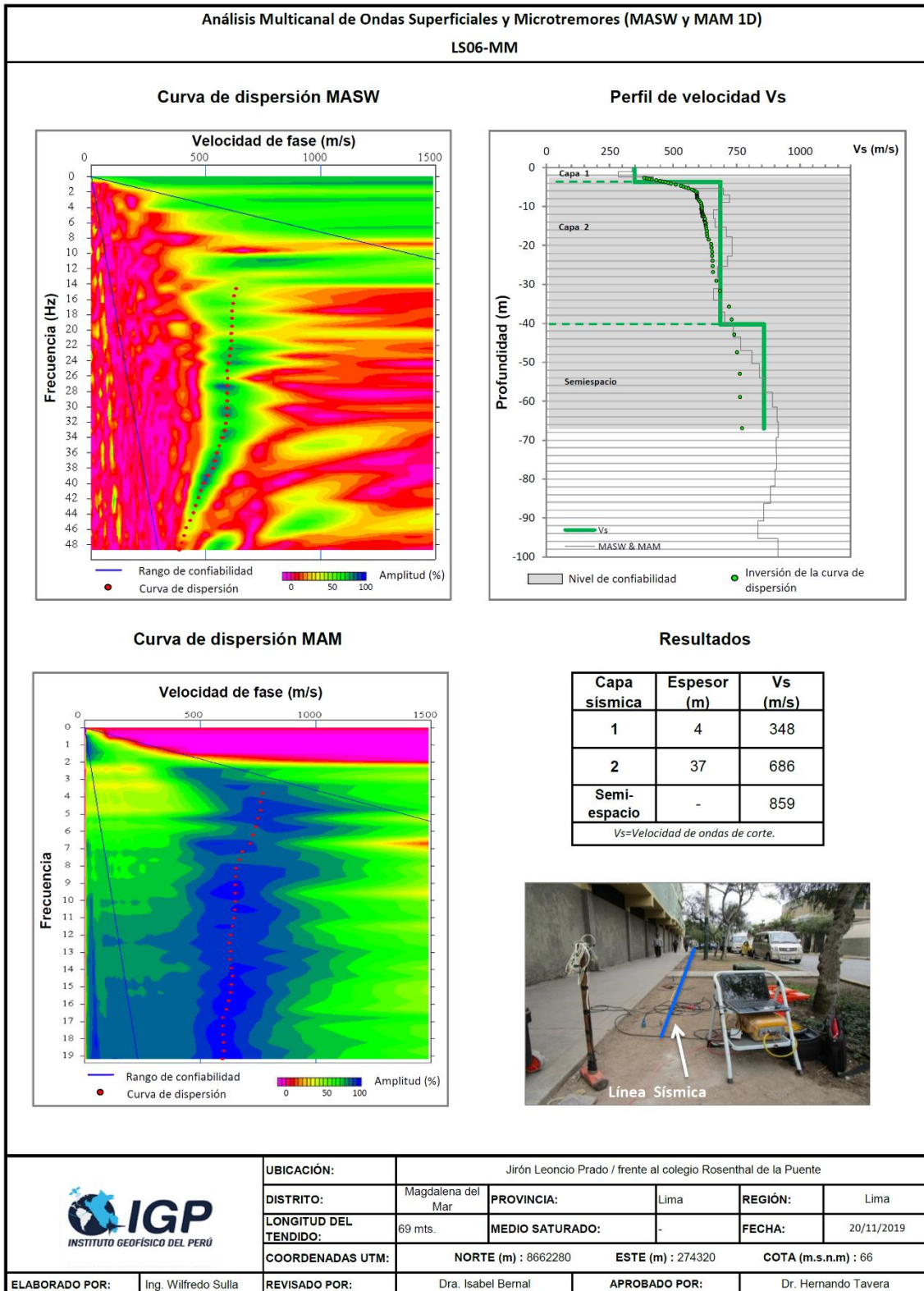


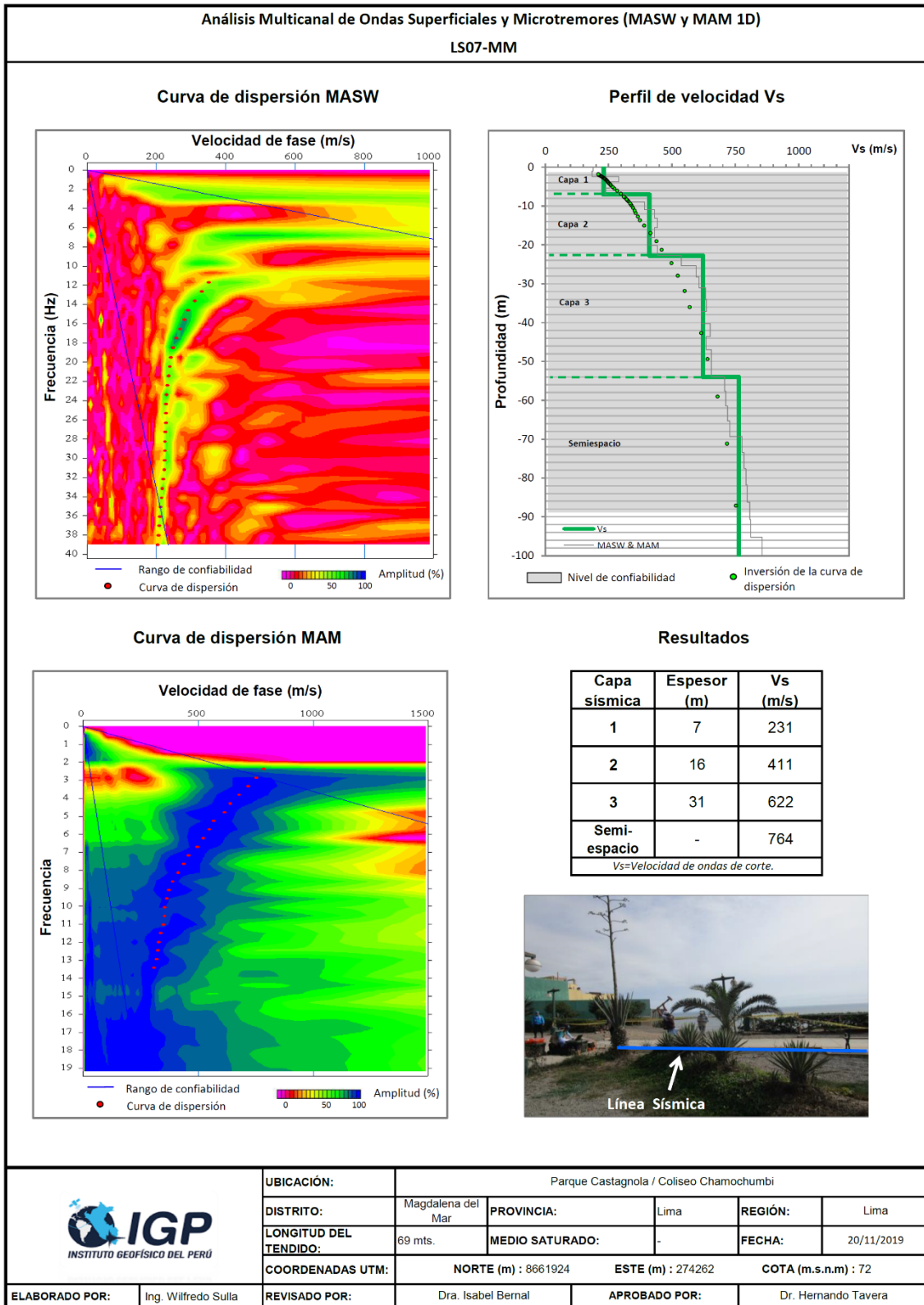












ANEXO V

Resultados obtenidos de la Tomografía de Resistividad Eléctrica

