



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú - IGP



## EVALUACIÓN GEOFÍSICA DE LA PISCINA SEMI – OLÍMPICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

Provincia de Mariscal Nieto, Región Moquegua

Lima - Perú  
Marzo, 2020

## **Instituto Geofísico del Perú**

**Presidente Ejecutivo:** Hernando Tavera

**Director Científico:** Danny Scipión

**Director SCTS:** Juan Carlos Gómez

### **Autores**

Isabel Bernal y Hernando Tavera

**Personal de apoyo:** Fabiola Rosado  
Kelly Pari  
Wilfredo Sulla  
Jesús Huarachi

**Personal logística:** Robert Yupanqui

**Personal administrativo:** Marisol Enríquez

## RESUMEN

*La piscina semi-olímpica del complejo deportivo y recreacional de la Universidad Nacional de Moquegua (UNAM), ubicada en el C. P. Chen Chen, distrito de Moquegua, provincia de Mariscal Nieto, región Moquegua, presenta asentamientos del suelo y la formación de grietas y fisuras en sus muros de concreto.*

*El estudio geofísico ejecutado en esta infraestructura de la UNAM, identifica en el subsuelo la existencia de tres capas: la capa superficial presenta espesores de 8 a 9 metros con velocidades de ondas de corte  $V_s$  de 400 m/s, que sugiere la existencia de suelos moderadamente compactos a compactos. Por debajo de esta capa, los suelos son más compactos, lo cual se incrementa en profundidad.*

*En cuanto a los valores de resistividad eléctrica, se identifica una capa superficial de 2-3 m de espesor de baja resistividad (11 a 80 ohm-m), por tanto bajo contenido de humedad, luego continua una capa de 8 a 9 m de espesor, con valores de alta resistividad, que reflejan un alto contenido de humedad probablemente saturados de agua. No se ha delimitado un nivel freático, por lo que se infiere que esta alta humedad está relacionada a agua de infiltración superficial.*

*A pesar de que los suelos por debajo de la piscina muestran buena compactación, pero al encontrarse saturados de agua pierden su capacidad portante, generando inestabilidad del terreno: asentamientos del suelo y grietas.*



## INDICE

### RESUMEN

<b>1.- INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2.- OBJETIVO</b> .....	<b>3</b>
<b>3.- METODOLOGÍA Y DATOS</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1.- MÉTODO DE RAZONES ESPECTRALES (H/V)</b> .....	<b>4</b>
<b>3.2.- MÉTODOS SÍSMICOS</b> .....	<b>7</b>
3.2.1.- TOMOGRAFÍA DE REFRACCIÓN SÍSMICA (SRT) .....	7
3.2.2.- ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW) .....	8
3.2.3.- PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS .....	9
<b>3.3.- MÉTODOS ELÉCTRICOS</b> .....	<b>12</b>
3.3.1.- TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (ERT) .....	12
3.3.2.- SONDAJES ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV).....	13
3.3.3.- PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS .....	14
<b>4.- RESULTADOS</b> .....	<b>17</b>
<b>4.1.- RAZONES ESPECTRALES (H/V)</b> .....	<b>17</b>
<b>4.2.- SECCIONES SRT</b> .....	<b>18</b>
<b>4.3.- PERFILES DE MASW</b> .....	<b>20</b>
<b>4.4.- SECCIONES ERT</b> .....	<b>22</b>
<b>4.5.- PERFILES DE SEV</b> .....	<b>24</b>
<b>5.- DISCUSIÓN</b> .....	<b>26</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>31</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>32</b>
<b>ANEXO I</b> .....	<b>34</b>
<b>ANEXO II</b> .....	<b>39</b>
<b>ANEXO III</b> .....	<b>43</b>
<b>ANEXO IV</b> .....	<b>57</b>

## 1.- INTRODUCCIÓN

El Perú es un país altamente sísmico y los recientes sismos de gran magnitud que han afectado a la región sur del Perú, por ejemplo el sismo del año 2001 (M8.0), ha dejado como lección que ellos solo sacuden el suelo con mayor o menor intensidad y que el daño en ciudades depende básicamente de dos factores, la calidad de los suelos y de las construcciones.

Para conocer el comportamiento dinámico de los suelos ante la demanda sísmica, es necesario realizar estudios geofísicos, geológicos y geotécnicos que permitan elaborar los mapas de “Zonificación Sísmica – Geotécnica de las áreas urbanas y otras de expansión. El Instituto Geofísico del Perú (IGP) por encargo del Ministerio de Economía y Finanzas viene desarrollando, como parte de los proyectos PPR068, dichos estudios. En el año 2017, el IGP realiza el estudio “Zonificación Sísmica – Geotécnica del área urbana de Moquegua” y los resultados más importantes indican que el C.P. Chen Chen se encuentra sobre depósitos aluviales constituidos por gravas y arenas de grano fino a medio. Según la clasificación SUCS, se define el suelo como tipo GP- GM (gravas limosas pobremente gradadas). En cuanto a la zonificación sísmica, este sector es parte de la ZONA 1 con el predominio de suelos Tipo S1 (suelos rígidos) según la Norma E.030.

Sin embargo, los depósitos aluviales de grano fino a medio, compuestos por arenas y limos, son buenas contenedoras de humedad provenientes de alguna fuente natural o artificial. En general, para conocer las características físicas de estos depósitos, así como su profundidad se aplican métodos geofísicos como: razones espectrales (H/V), arreglos sísmicos (SRT y MASW), y eléctricos (ERT y SEV).

A solicitud de la Universidad Nacional de Moquegua (UNAM), en este informe se detallan los resultados obtenidos del estudio geofísico desarrollado en el área que considera la piscina semi-olímpica del complejo deportivo y recreacional de la UNAM, ubicada en el C. P. Chen Chen, distrito de Moquegua, provincia de Mariscal Nieto, región Moquegua (Figura 1). El estudio fue desarrollado debido a que se ha observado en dicha área asentamientos del suelo y la formación de grietas y fisuras en sus muros de concreto armado del complejo deportivo antes indicado.



## 2.- OBJETIVO

El objetivo del presente estudio es determinar las características físicas del suelo donde se construyó la piscina semi – olímpica del complejo deportivo recreacional de la Universidad Nacional de Moquegua (C. P. Chen Chen). Para ello, se aplican los métodos geofísicos de razones espectrales (H/V), arreglos sísmicos (SRT y MASW) y eléctricos (ERT y SEV).

### 3.- METODOLOGÍA Y DATOS

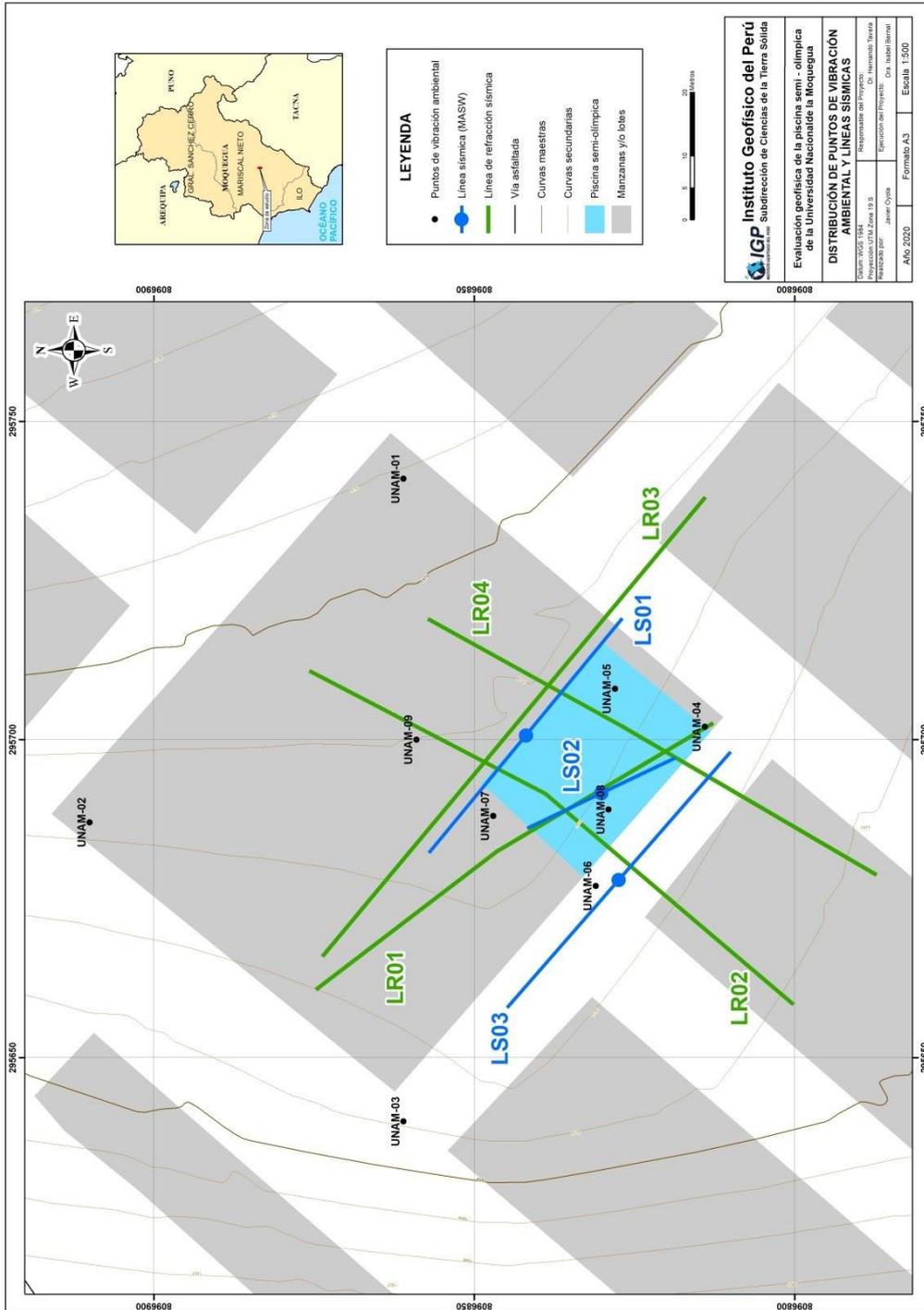
Las características físicas del suelo dependen de los materiales que conforman sus diferentes capas del suelo en profundidad y pueden ser conocidas utilizando diversos métodos geofísicos. El procesamiento de los datos de campo permite tener información para identificar y delimitar los diferentes tipos de suelos, así como sus niveles freáticos y efectos de sitio.

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

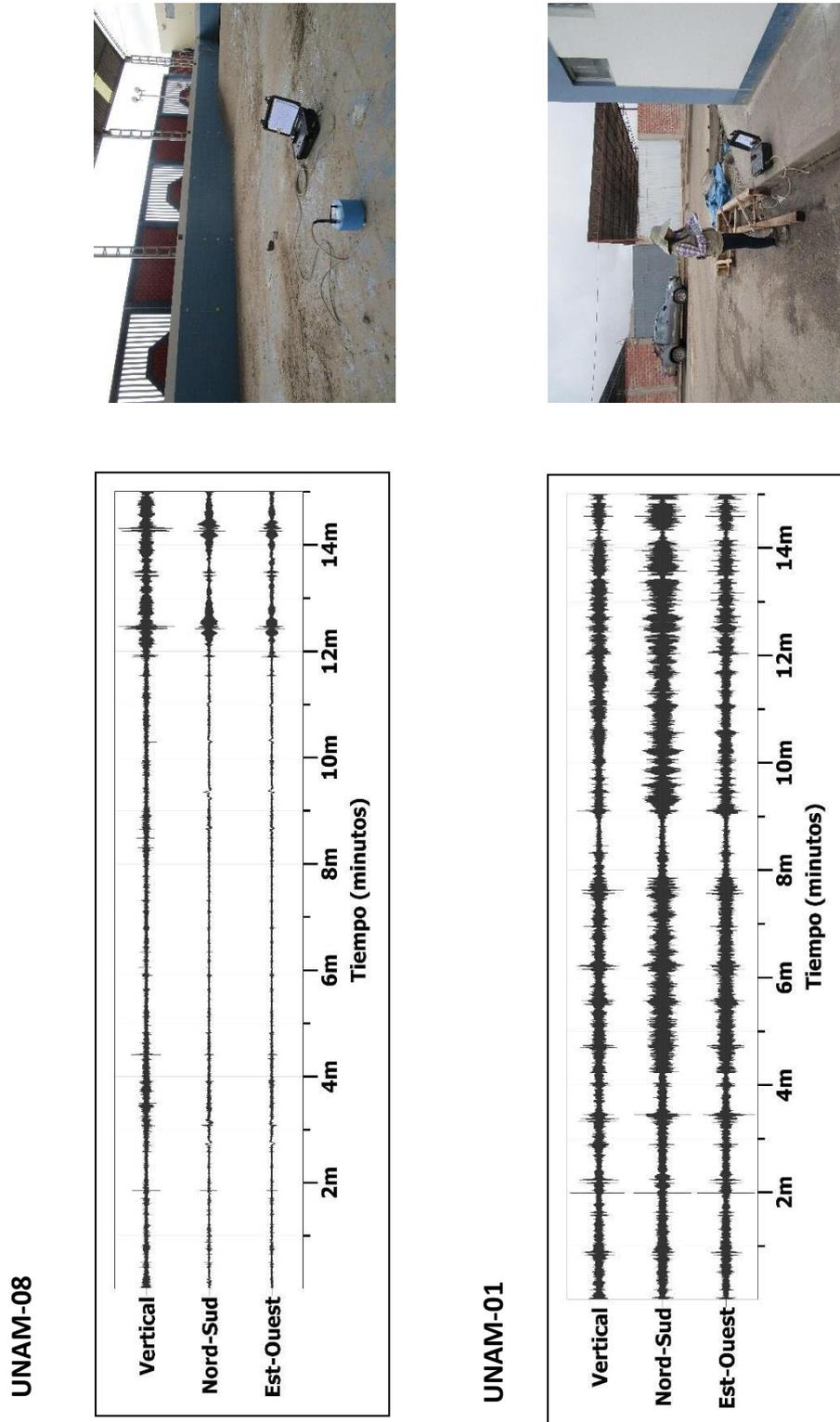
El método de razones espectrales (H/V) fue propuesto por Nakamura (1989) para caracterizar la respuesta dinámica del suelo y en algunos casos, estimar su amplificación ante la sollicitación sísmica. El método hace uso de registros de vibración ambiental que contienen información sobre las características 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 (espesor, geometría y composición litológica) queda definida por su periodo dominante y a la vez, causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes a la ocurrencia de un sismo.

En el área de estudio se recolectaron 09 registros de vibración ambiental utilizando sensores Lennartz y registradores CityShark II (Figura 2). Cada registro 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 obtenidos en un punto con ruido de poca amplitud y constante (UNAM-08), y otro con ruido de fondo intermitente (UNAM-01).

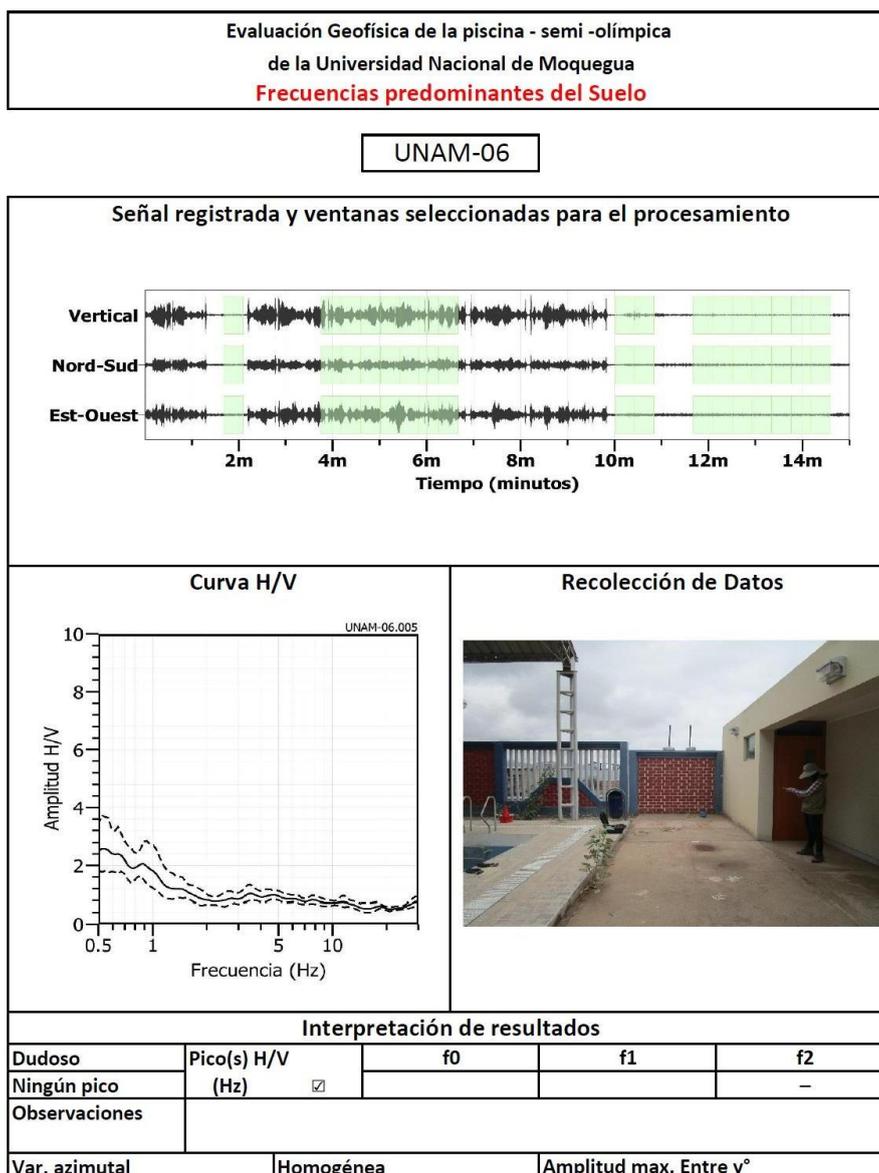
En la Figura 4, se muestra un ejemplo del análisis, procesamiento y resultados obtenidos para el punto UNAM-06. Aquí el registro es sectorizado en ventanas de 20 segundos y analizado individualmente, para luego obtener el promedio espectral para las curvas, y así identificar el rango de las frecuencias 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.



**Figura 2.** Distribución espacial de los puntos de registros de vibración ambiental (puntos negros), ensayos sísmicos- MASW (líneas azules) y refracción sísmica (líneas verdes)



**Figura 3.** Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales en un punto con ruido de fondo constante UNAM-08 y otro con ruido de fondo intermitente UNAM-01



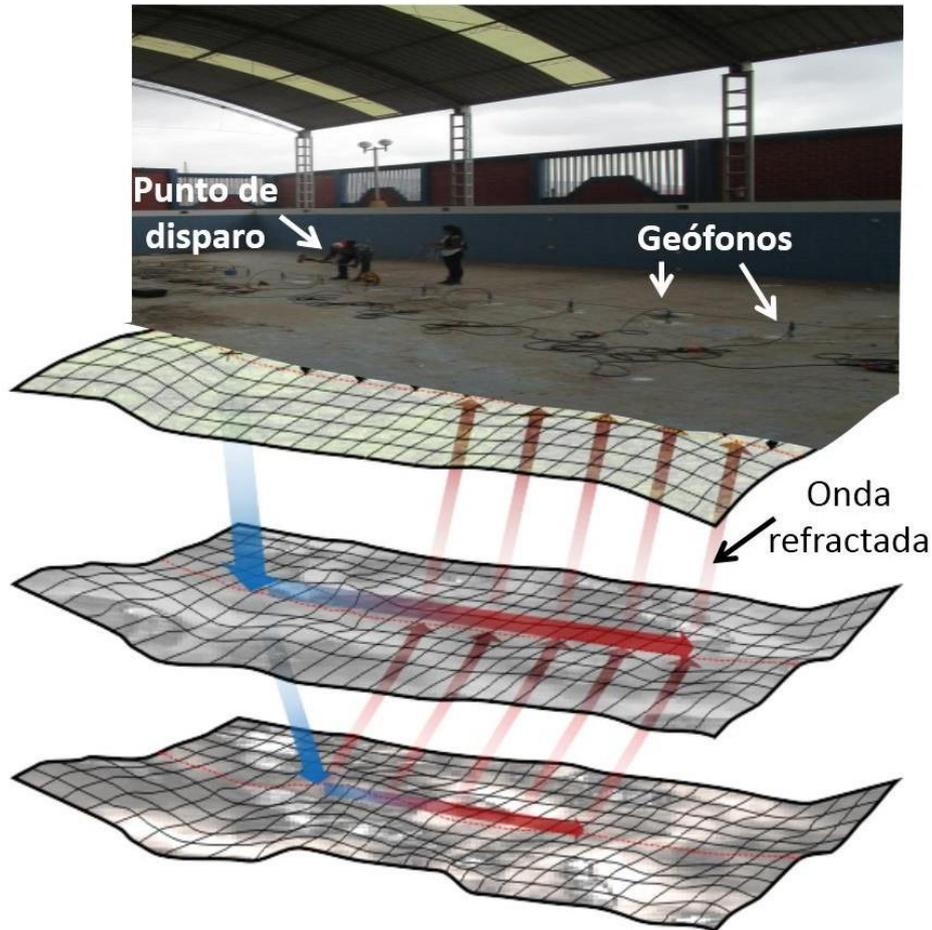
**Figura 4.** Ejemplo de la ficha H/V para el punto UNAM-06 en la cual se recopila los datos registrados y analizados. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en líneas discontinuas.

### 3.2.- Métodos sísmicos

#### 3.2.1.- Tomografía de Refracción Sísmica (SRT)

El método sísmico de tomografía (SRT) permite conocer los parámetros físicos del suelo, como la velocidad de ondas  $V_p$  y espesor de las capas, a partir del contraste de velocidades por efecto de la propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo.

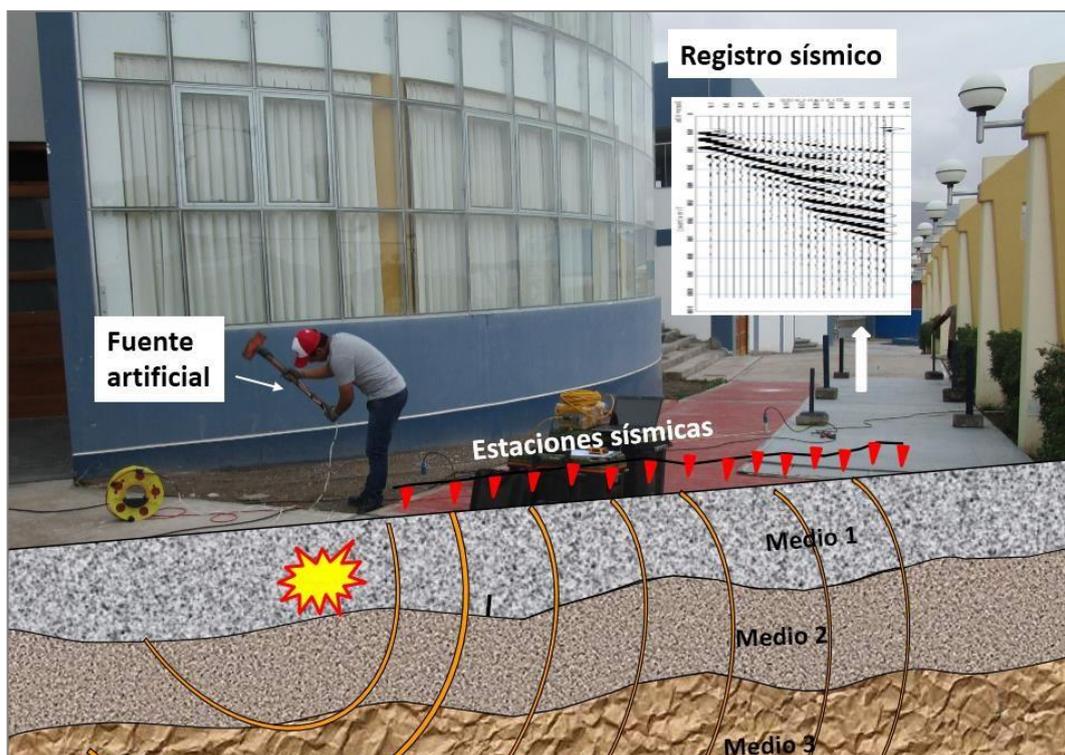
Básicamente, el SRT consiste en generar ondas sísmicas a partir de una fuente artificial (martillo) y medir el tiempo requerido por las ondas para viajar, desde la fuente hacia una serie de geófonos, usualmente dispuestos en línea recta, tal como muestra la Figura 5.



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

### 3.2.2.- Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

El método sísmico MASW permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto, conocer los espesores de las capas y la velocidad de propagación de las ondas de corte ( $V_s$ ) en el subsuelo. El método analiza la dispersión de ondas superficiales (ondas Rayleigh) generadas por una fuente de energía impulsiva y registradas por arreglos lineales de estaciones sísmicas, tal como muestra la Figura 6.



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

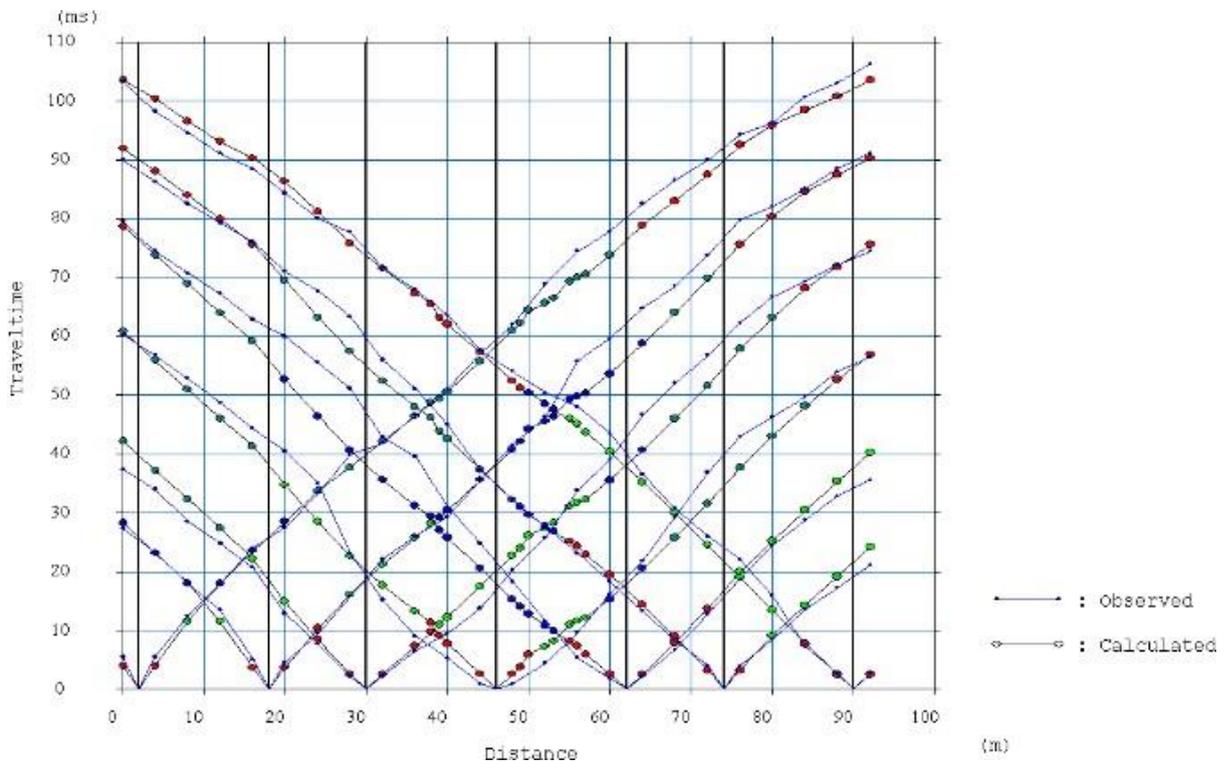
Para el registro de datos SRT y MASW se sigue el mismo procedimiento y para ello se ha utilizado un equipo sísmico multipropósito, modelo GEODE de Geometrics. A solicitud de la UNAM se realizaron 04 líneas de SRT y 03 arreglos lineales MASW, en puntos cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 1 y su distribución espacial en la Figura 2. Los parámetros de registro, tales como la geometría del tendido y el espaciamiento entre geófonos fueron variables, ya que dependió de la geomorfología y accesibilidad a la zona de estudio.

### 3.2.3.- 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 a fin de construir las curvas tiempo vs distancia (dromocronas), tal como se muestra en la Figura 7 (línea sísmica LR02-UNAM). Luego se realiza el proceso de inversión a fin de obtener su perfil 2D del subsuelo.

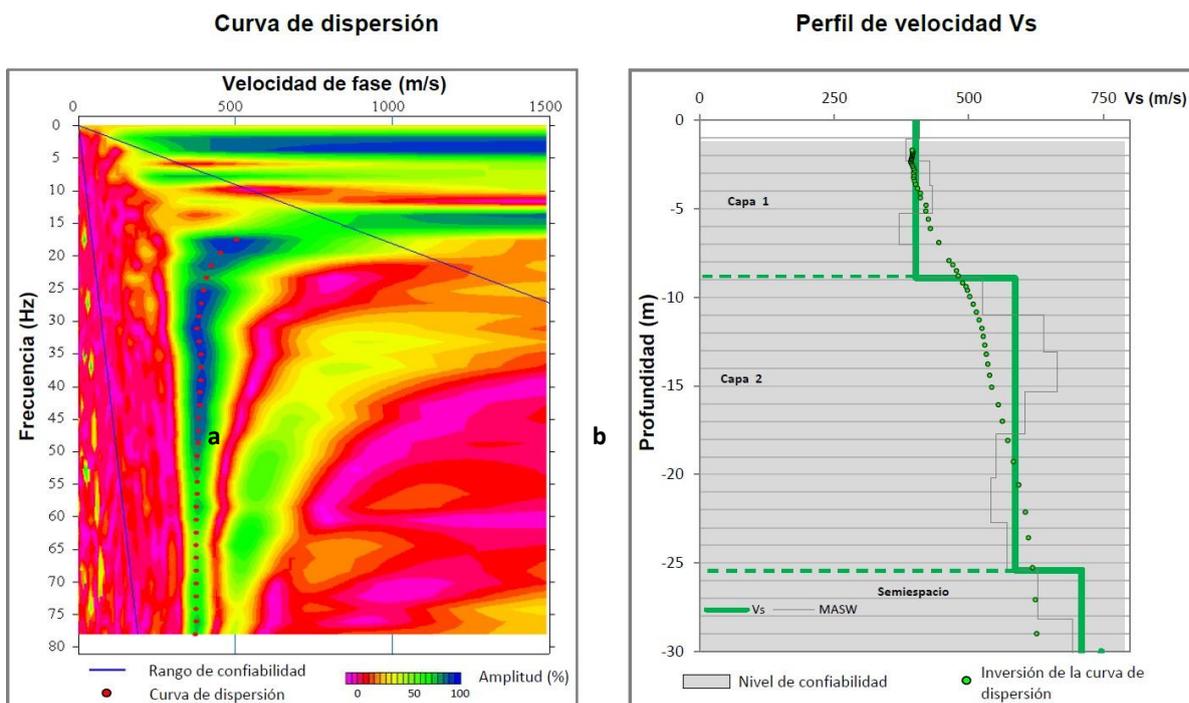
**Tabla 2:** Coordenadas y características de las líneas sísmicas.

Línea Sísmica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total (m)
<b>SRT</b>					
LR01-UNAM	295698	8096811	1513	3.1	75
	295661	8096875	1514		
LR02-UNAM	295658	8096800	1511	4	92
	295711	8096876	1516		
LR03-UNAM	295738	8096814	1514	4	92
	295666	8096874	1514		
LR04-UNAM	295679	8096787	1510	3.5	80.5
	295719	8096857	1516		
<b>MASW</b>					
LS01-UNAM	295719	8096827	1514	2	46
	295682	8096857	1514		
LS02-UNAM	295697	8096819	1503	1.2	27.6
	295686	8096842	1504		
LS03-UNAM	295658	8096845	1501	2.5	57.5
	295698	8096810	1487		



**Figura 7:** Curvas del tiempo de viaje de las ondas P vs distancia, obtenidos para la línea sísmica.

En el caso de los **ensayos MASW**, 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 de ondas de corte  $V_s$  en una dimensión (1D), tal como se muestra en la Figura 8.



**Figura 8.** Curva de dispersión obtenido a partir de MASW (a) y perfil de velocidad  $V_s$  (b).

Para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos con el ensayo SRT, se considera como base los valores de la Tabla 2 que permiten correlacionar las velocidades de propagación de ondas longitudinales ( $V_p$ ) con los diferentes tipos de suelos (CNA, 1993 y ASTM-D5777).

Para los ensayos de MASW, 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, para facilitar su interpretación, los valores obtenidos son representados con colores a fin de facilitar su interpretación (Tabla 3).

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

CNA, 1993		ASTM-D5777	
Velocidad $V_p$ [m/s]	Descripción	Velocidad $V_p$ [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

**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 <sub>3</sub>	Suelo blando	Suelo blando
2	180 m/s a 350 m/s	S <sub>2</sub>	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 <sub>1</sub>	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 <sub>0</sub>	Roca dura	Roca dura

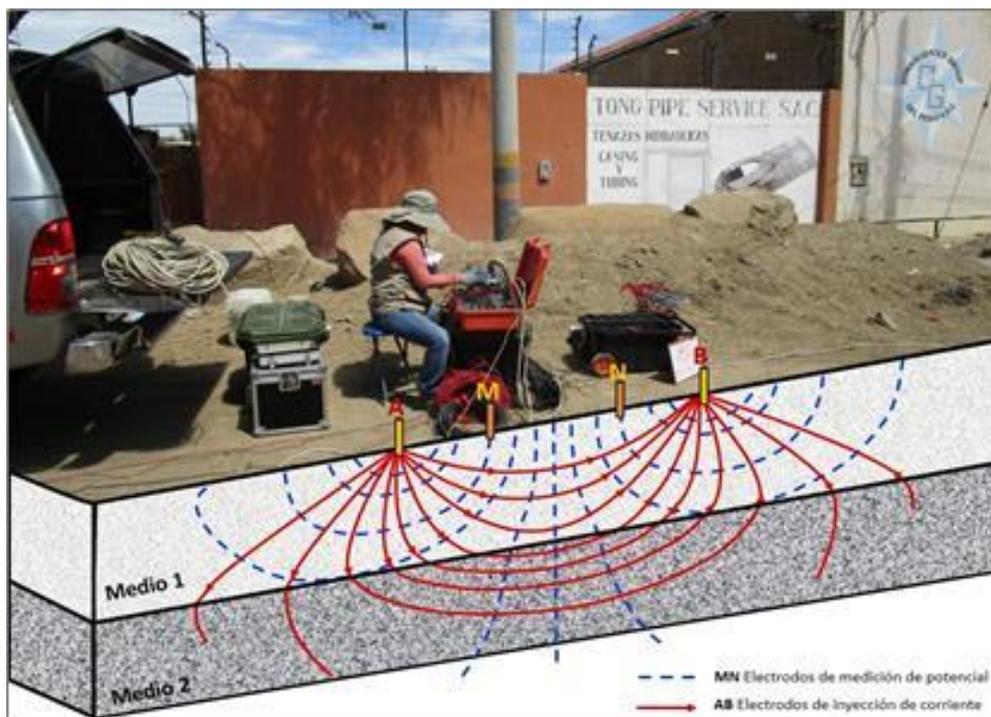
### 3.3.-Métodos eléctricos

#### 3.3.1.- 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, ver Figura 9. En general, los materiales que conforman el subsuelo muestran ciertos rangos de resistividad ( $\rho$ ) 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.

### 3.3.2.- Sondajes eléctricos verticales (SEV)

El ensayo consiste en la inyección de la corriente continua en el terreno mediante un par de electrodos (A y B) y la determinación de la diferencia de potencial mediante otro par de electrodos (M y N), tal como muestra la Figura 9. La magnitud de esta medida depende, entre otras variables de la distribución de resistividades del subsuelo.



**Figura 9.** Propagación de la corriente eléctrica en los estratos del suelo.

Los datos recolectados en campo corresponden al registro de valores de resistividad obtenidos en 13 líneas de ERT y en 03 puntos SEV, tal como se observa en la Figura 10. 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 realizados en el área de estudio. 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.

<b>TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA</b>				
<b>Nombre de la Línea Eléctrica</b>	<b>Separación entre electrodos / Número de Electrodo</b>	<b>Extensión de la línea (m)</b>	<b>Profundidad de investigación (m)</b>	<b>Orientación de la línea</b>
<b>LE01-UNAM</b>	10 m / 13 electrodos	110m	40 m	NO –SE
<b>LE02- UNAM</b>	10m / 13 electrodos	110 m	40 m	NO –SE
<b>LE03- UNAM</b>	10m / 16 electrodos	130 m	40 m	NO - SE
<b>LE04- UNAM</b>	10 m / 16 electrodos	130 m	40 m	NO - SE
<b>LE05- UNAM</b>	10 m / 14 electrodos	110 m	40 m	NO –SE
<b>LE06- UNAM</b>	10 m / 26 electrodos	240 m	40 m	NE –SO
<b>LE07- UNAM</b>	10 m / 12 electrodos	90 m	40 m	NE –SO
<b>LE08- UNAM</b>	10 m / 26 electrodos	240 m	40 m	NE –SO
<b>LE09- UNAM</b>	10 m / 11 electrodos	90 m	40 m	NE –SO
<b>LE10- UNAM</b>	10 m / 26 electrodos	240 m	40 m	NE –SO
<b>LE11- UNAM</b>	10 m / 26 electrodos	240 m	40 m	NE –SO
<b>LE12- UNAM</b>	10 m / 15 electrodos	130 m	40 m	NO –SE
<b>LE13- UNAM</b>	10 m / 12 electrodos	30 m	12 m	NO –SE
<b>SONDAJE ELÉCTRICO VERTICAL</b>				
<b>SEV01</b>	variable/ 4 electrodos	200 m	30 m	-
<b>SEV02</b>	variable/ 4 electrodos	80 m	30 m	-
<b>SEV03</b>	variable/ 4 electrodos	200 m	30 m	-

### 3.3.3.- Procesamiento y análisis

Para realizar el procesamiento de los datos recolectados en campo de ERT y SEV, se selecciona aquellos con ausencia de ruidos que puedan alterar los resultados a obtenerse. Asimismo, se realizó la corrección por efectos de topografía usando algoritmos de inversión de datos geoelectricos y de procesamiento de imágenes.



Figura 10. Distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica y sondajes eléctricos verticales.

Para realizar la interpretación de los resultados obtenidos se debe tener en cuenta que son varios los factores que influyen en las características 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); y por ello, 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 del suelo relacionados a los distintos tipos de suelos y rocas.

**Tabla 5.** Valores de resistividad de suelos y roca (UNC, 2000).

Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000 $\Omega\text{m}$
Basamento. Roca fracturada	1500-5000 $\Omega\text{m}$
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000 $\Omega\text{m}$
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	50-100 $\Omega\text{m}$
Gruss parcialmente saturado	500-1000 $\Omega\text{m}$
Gruss saturado	40-60 $\Omega\text{m}$
Saprolito parcialmente saturado	200-500 $\Omega\text{m}$
Saprolito saturado	40-100 $\Omega\text{m}$
Gravas parcialmente saturadas	500-2000 $\Omega\text{m}$
Gravas saturadas	300-500 $\Omega\text{m}$
Arenas parcialmente saturadas	400-700 $\Omega\text{m}$
Arenas saturadas	100-200 $\Omega\text{m}$
Limos parcialmente saturados	100-200 $\Omega\text{m}$
Limos saturados	20-100 $\Omega\text{m}$
Limos saturados con agua salada	5-15 $\Omega\text{m}$
Arcillas parcialmente saturadas	20-40 $\Omega\text{m}$
Arcillas saturadas	5-20 $\Omega\text{m}$
Arcillas saturadas con agua salada	1-10 $\Omega\text{m}$
Ceniza volcánica seca	1000-2000 $\Omega\text{m}$
Ceniza volcánica húmeda	300-1000 $\Omega\text{m}$
Ceniza volcánica saturada	100-300 $\Omega\text{m}$

#### 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 la Figura 11, se muestra como ejemplo un gráfico de razones espectrales característico de la zona de estudio. En dicho grafico se observa que no existe ningún pico predominante con amplificaciones que superen las 2 veces en el rango de interés, entre 1.0 a 15 Hz. Estos resultados indican la existencia de suelos consistentes en el área de estudio.

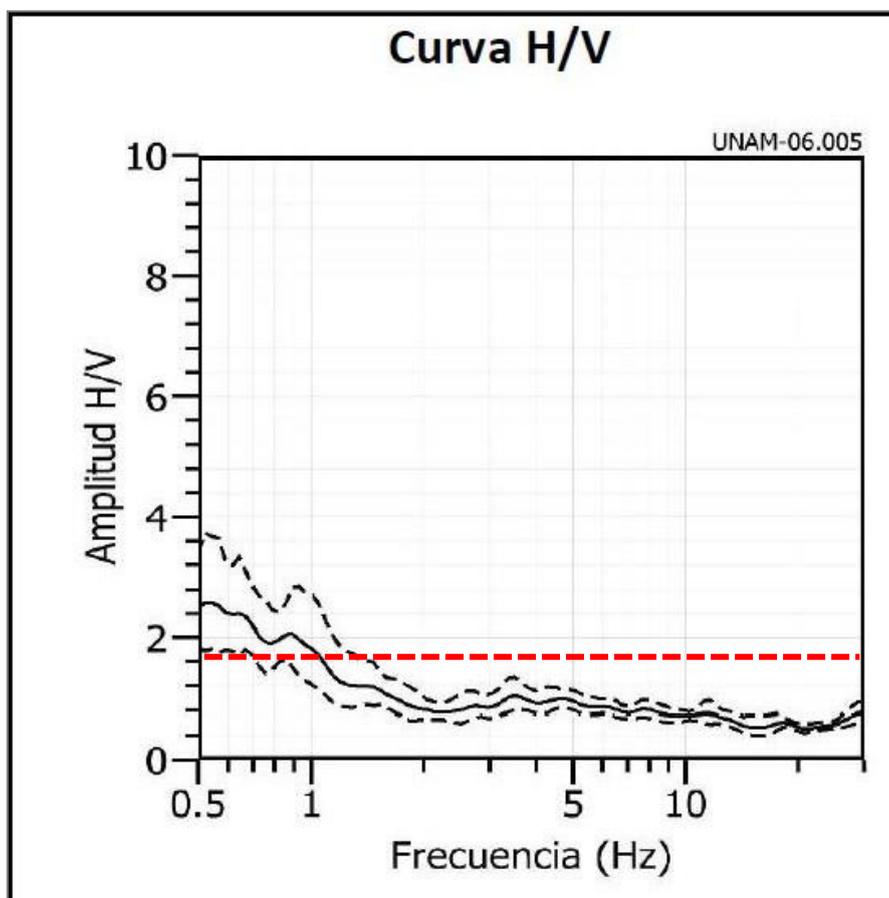


Figura 11. Ejemplo de la curva de H/V tipo, obtenido para el área de estudio.

## 4.2.- Secciones SRT

En el área de estudio se realizaron 04 líneas de SRT con longitudes que permitieron tener confiabilidad en los valores de velocidades VP hasta los 30 metros de profundidad. En la Figura 12, se presenta la sección de tomografía sísmica obtenido para la línea LR01-UNAM (el resto de líneas ver Anexo I), llegándose a identificar la existencia de 03 capas sísmicas.

**Capa sísmica 1:** *Presenta espesores que varían entre 5 a 10 metros y velocidades Vp entre 350 a 850 m/s, que indican la existencia de suelos moderadamente rígidos en superficie, incrementándose la rigidez en la base de la capa sísmica. La capa presenta mayor espesor por debajo de la piscina olímpica y hacia el extremo suroeste del complejo deportivo de la UNAM. Por otro lado, el incremento de las velocidades, a distancias de entre 50 y 70 metros de distancia del perfil, se asocia a las estructuras construidas en superficie, como parte de las graderías (Figura 12).*

**Capa sísmica 2:** *Tiene un espesor variable entre 5 a 8 metros y velocidades Vp entre 850 a 1150 m/s, que define la existencia de suelos rígidos a muy rígidos. La capa presenta mayores espesores hacia el extremo suroeste del complejo deportivo.*

**Capa sísmica 3:** *Subyace a la capa anterior, y presenta espesores variables entre 5 y 15 metros con velocidades Vp entre 1150 a 1400 m/s, que son debidos a la presencia de suelo de mayor rigidez.*

**Semi-espacio:** *Llamado así, por no haberse identificado la base de la capa sísmica. Presenta una velocidad Vp mayor a los 1400 m/s y se considerada como suelo muy rígido. Se encuentra aproximadamente a los 25 metros de profundidad.*

En la Tabla 6, se resume el tipo de perfil de suelo identificado en cada capa sísmica.

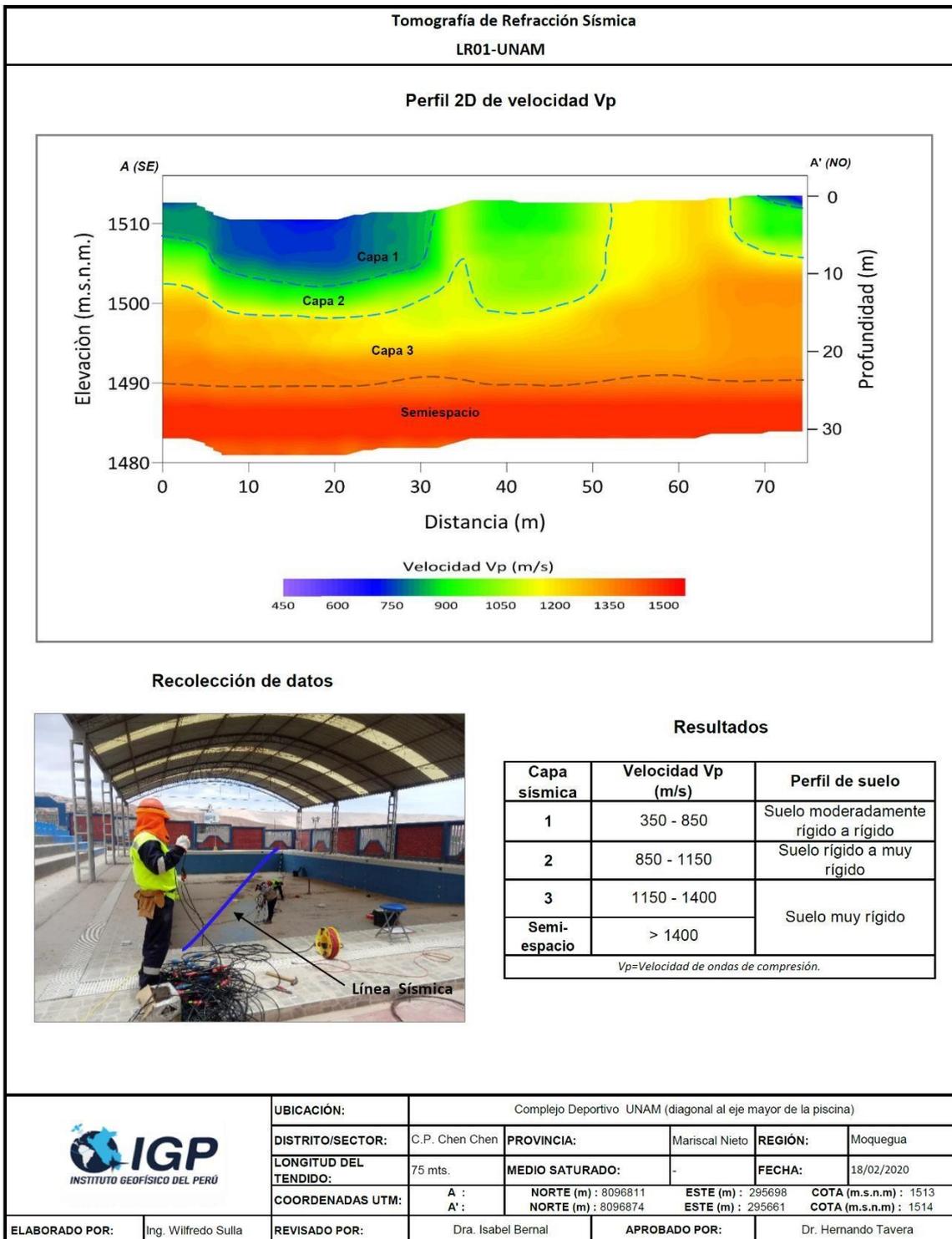


Figura 12. Resultados obtenidos con el ensayo SRT para la línea sísmica LR01-UNAM.

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

Capa sísmica	Velocidad Vp (m/s)	Perfil de suelo
1	350 - 850	Suelo moderadamente rígido a rígido
2	850 - 1150	Suelo rígido a muy rígido
3	1150 - 1400	Suelo muy rígido
Semi-espacio	>1400	Suelo muy rígido

### 4.3.- Perfiles de MASW

En el área de estudio se realizaron 03 líneas sísmicas MASW con distancias que permitieron tener velocidades Vs confiables de hasta los 30 metros de profundidad. En la Figura 13, se presenta los resultados obtenidos para la línea LS01-UNAM y en el Anexo II para las líneas restantes.

**Línea sísmica LS01-UNAM:** Realizada en el extremo noreste de la piscina, paralela a su eje mayor (Figura 2), y en ella se identifica la presencia de suelos conformados por tres capas sísmicas: la primera, de 2 metros de espesor y velocidades Vs de 308 m/s lo que sugiere la existencia de suelos moderadamente rígidos; la segunda capa, de 9 metros de espesor con velocidades Vs de 444 m/s, correspondiendo a la presencia de suelos rígidos. La tercera capa y el semiespacio presentan velocidades Vs de 557 m/s y > 694 m/s respectivamente, ambas capas sugieren a existencia de suelos muy rígidos.

**Línea sísmica LS02-UNAM:** Realizada en el centro de la piscina (Figura 2), y ha permitido identificar la presencia de suelos conformados por dos capas sísmicas: la primera, de 9 metros de espesor y velocidades Vs de 402 m/s, sugiriendo la presencia de suelos rígidos; la segunda capa y el semiespacio, presentan velocidades Vs de 586 m/s y > 694 m/s respectivamente, ambas capas sugieren la existencia de suelos muy rígidos.

**Línea sísmica LS03-UNAM:** Realizada en el extremo suroeste de la piscina, paralelo a su eje mayor (Figura 2), y en ella se identifica la presencia de dos capas: la primera de 2 metros de espesor y velocidades Vs de 282 m/s que

indican la existencia de suelos moderadamente rígidos; la segunda, de 13 metros de espesor y con velocidades  $V_s$  de 454 m/s que corresponden a suelos rígidos. Por debajo, el semiespacio presenta velocidades  $V_s > 619$  m/s que sugieren la presencia de suelos muy rígidos.

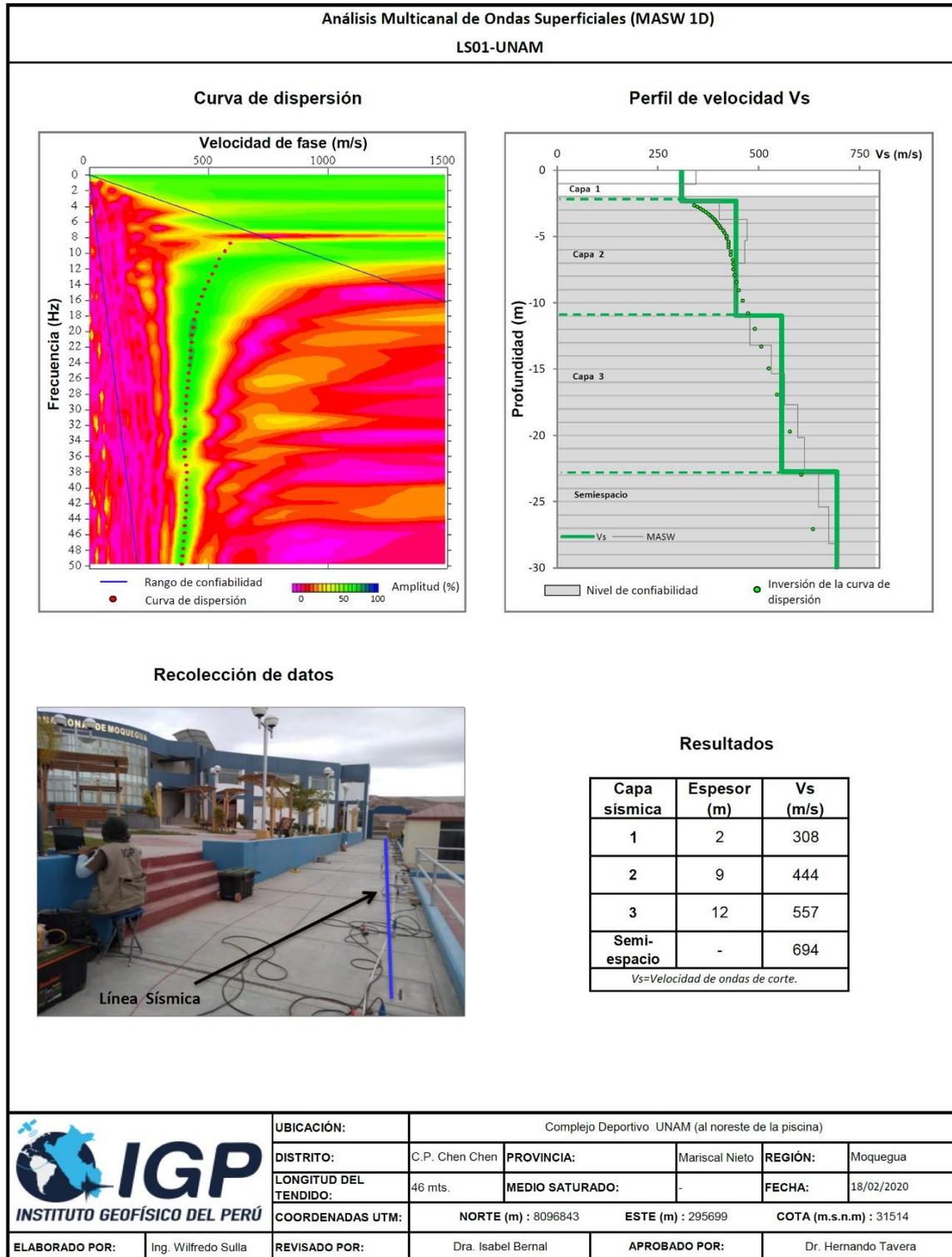


Figura 13. Resultados obtenidos con los ensayos MASW para la línea sísmica LS01-UNAM.

En la Tabla 7, se resume los valores de velocidades de ondas de corte Vs y VS30 para los perfiles de suelo obtenidos en el área de estudio.

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

Línea Sísmica	Superficie → Profundidad						N° DE CAPA		VS30 (m/s)
	1		2		3		Semiespacio		
	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vs (m/s)	Esp. (m)	
LS01-UNAM	308	2	444	9	557	12	694	-	511
LS02-UNAM	402	9	586	17	710	-	-	-	521
LS03-UNAM	282	2	454	13	619	-	-	-	497

<span style="display:inline-block; width:15px; height:10px; background-color:orange; border:1px solid black;"></span>	Suelo moderadamente rígido (180 – 350 m/s)
<span style="display:inline-block; width:15px; height:10px; background-color:yellow; border:1px solid black;"></span>	Suelo rígido (350 – 500 m/s)
<span style="display:inline-block; width:15px; height:10px; background-color:lightgreen; border:1px solid black;"></span>	Suelo muy rígido o roca blanda (500 – 800 m/s)

#### 4.4.- Secciones ERT

A continuación, se describe los resultados obtenidos para cada una de las secciones geoelectricas realizadas en la zona de estudio. En la Figura 14, se muestra la línea LE01-UNAM (en el Anexo III el resto de las líneas):

a) Líneas orientadas en dirección NO- SE.

*.- Las Líneas eléctricas LE01-UNAM, LE02-UNAM, LE03-UNAM, LE04-UNAM, LE05-UNAM, LE12-UNAM y LE13-UNAM, son paralelas entre sí a excepción de la LE12-UNAM (Figura 10). En todas ellas se identifica el predominio de valores medianamente resistivos (> 100 ohm.m) y en forma de lentes, se identifica valores bajos resistivos (< 100 Ω.m). En profundidad se observa la presencia de valores resistivos (> 500 ohm.m): líneas LE01-UNAM, LE02-UNAM, LE04-UNAM, LE05-UNAM.*

b) Líneas orientadas en dirección NE- SO.

*.- En las Líneas eléctricas LE06-UNAM, LE07-UNAM, LE08-UNAM, LE09-UNAM, LE10-UNAM y LE11-UNAM, se ha identificado la presencia de valores bajos resistivos (<100 ohm.m) a lo largo de casi toda la línea. Excepto en un sector*

angosto, donde se observa la presencia de valores medianamente resistivos (> 100  $\Omega.m$ ).

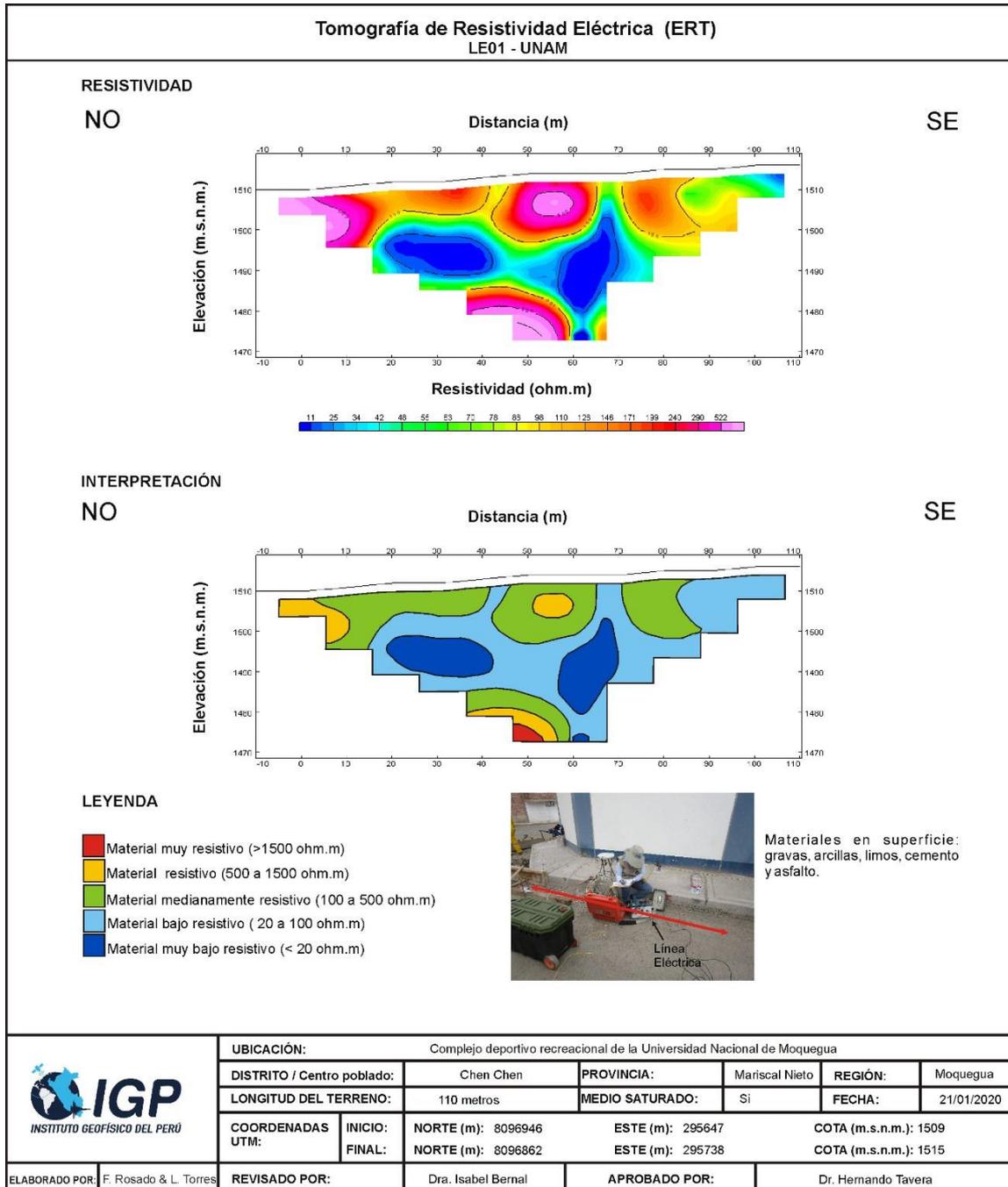
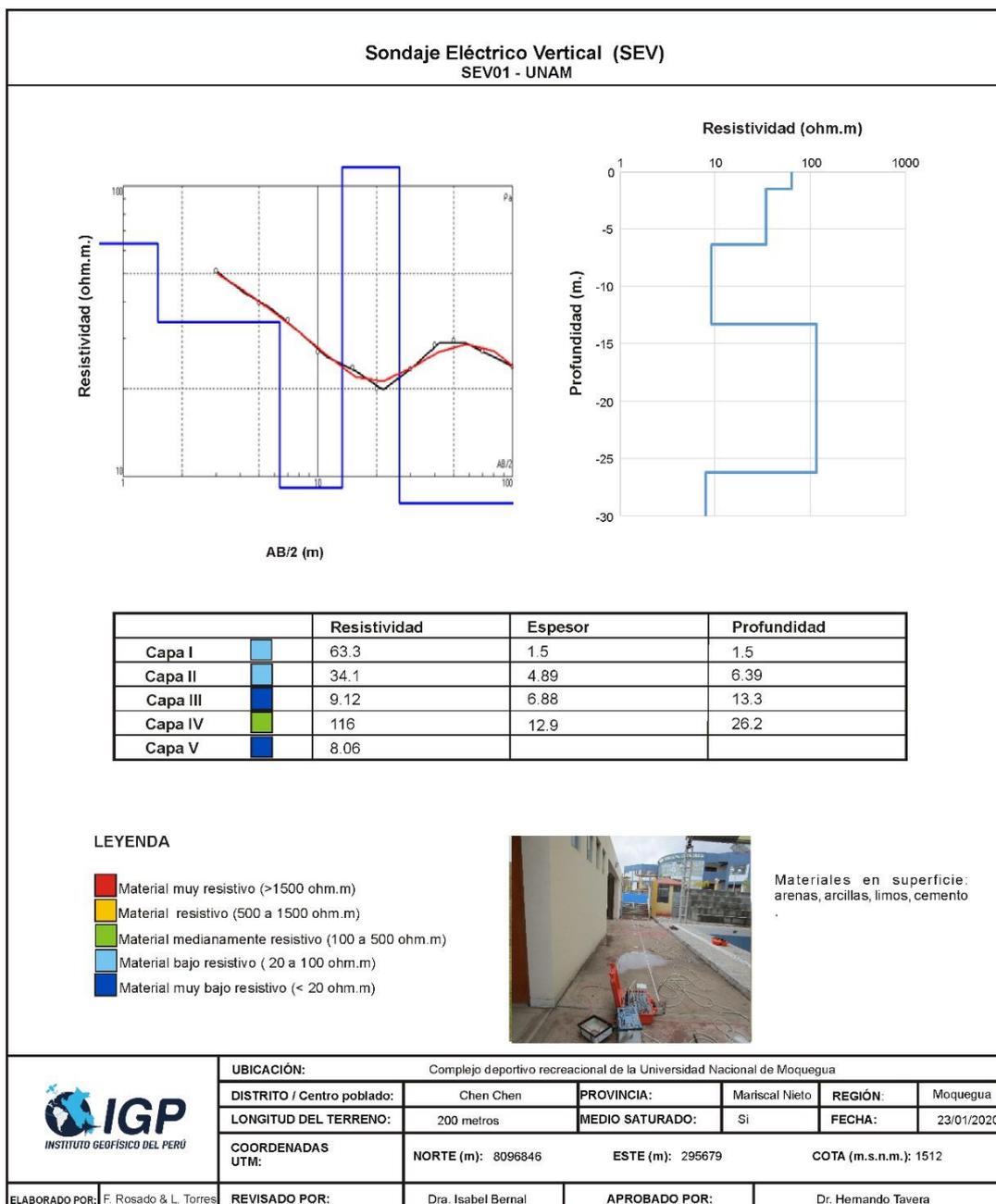


Figura 14. Resultados de tomografía de resistividad eléctrica para la línea LE01-UNAM.

#### 4.5.- Perfiles de SEV

A continuación, se describe los resultados obtenidos en cada uno de los perfiles de SEV realizados en la zona de estudio. En la Figura 15, se muestra la línea SEV01-UNAM y en el Anexo IV, para el resto de las líneas.



**Figura 15.** Resultados del sondaje eléctrico vertical para el ensayo SEV01-UNAM.

Perfil **SEV01-UNAM**: realizado en el extremo noroeste de la piscina (parte superior). Aquí se identifica la presencia de cinco capas geoelectricas con valores de resistividad que varían entre 9.12 a 116 ohm.m., y espesores entre 1.5 y 13 metros .

Perfil **SEV02-UNAM**; realizado en el centro de la piscina y permitio identificar la presencia de cuatro capas geoelectricas con resistividades que varían entre 2.29 y 150 ohm.m, y espesores de hasta 16 metros.

Perfil **SEV03-UNAM**: realizado en el extremo sureste de la piscina y en ella se identifica la presencia de cinco capas geoelectricas con valores de resistividad que varían entre 47.9 y 353 ohm.m., y espesores entre 2 y 6 metros.

## 5.-DISCUSIÓN

El procesamiento y análisis de la información geofísica obtenida para el área de la piscina de la UNAM y su correlación con la geología local, ha permitido conocer las características físicas y dinámicas del suelo sobre el cual se construyó la piscina semi-olímpica de la UNAM. Previamente, es importante recordar que esta estructura, se construyó sobre una superficie plana, pero ligeramente inclinada y cuya altura disminuye conforme se avance hacia su extremo suroeste.

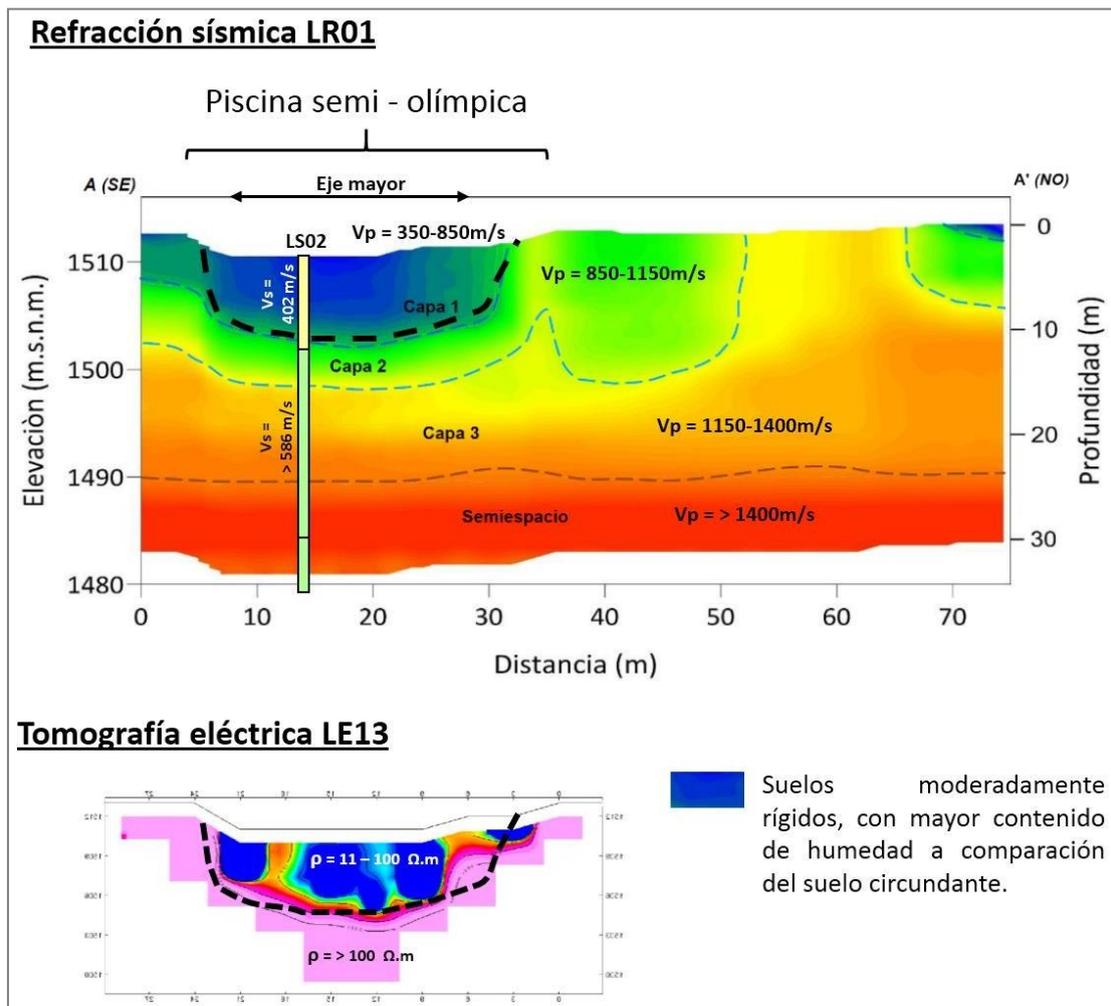
En la Figura 16, se muestra la correlación de los resultados obtenidos con los métodos de refracción sísmica, MASW y tomografía eléctrica, debido a que sus líneas de adquisición de datos, cruzan la piscina de SE a NO. Los tres métodos definen la existencia de una capa superficial de 6 y 8 metros de espesor, con velocidades de  $V_p$  que varían entre 350 a 850 m/s y  $V_s$  de 402 m/s; además de valores de resistividad que varían entre 11 a 100  $\Omega.m$ . Estos resultados indican la presencia de una capa superficial conformada por suelos semi-rígidos, moderadamente saturado de agua. Por debajo, de esta capa subyacen suelos con velocidades  $V_p$  que varían entre 1150 a 1400 m/s, velocidades  $V_s$  de 586 m/s y resistividades mayores a 100  $\Omega.m$ , cuyos resultados sugieren la presencia de suelos más consistente y con poca humedad.

En esta capa, el sector con mayor grado de saturación por la presencia de agua, se encuentra por debajo de la piscina y menor en los suelos circundantes, diferencias que deben ser confirmados debido a que estas ultima corresponden a áreas con suelo conteniendo concreto (canchas deportivas) y que al final, durante la toma de datos no permitieron tener contacto directo con el suelo.

En la Figura 17, se presenta los resultados obtenidos con los ensayos de sísmica y eléctrica realizados con una orientación SO a NE. Estos resultados indican la existencia de una capa superficial de 8 a 9 metros de espesor con  $V_s$  de 400 m/s, que sugieren la existencia de suelos moderadamente rígidos a rígidos. Además, a niveles más superficiales (2 a 3 metros) esta capa presenta valores bajos de resistivos (11 a 80  $\text{ohm.m}$ ); por lo tanto, presenta alta saturación que podría tener su origen en procesos de infiltración de agua por riego y otras fuentes secundarias. Conforme se incrementa la profundidad (30 metros), la rigidez aumenta y por lo tanto, prevalecen suelos rígidos que presentan poca humedad.

De acuerdo a las velocidades de ondas de corte ( $V_{s30}$ ), en el área de estudio existen Suelos Tipo S1, con la característica que no responden a ninguna frecuencia predominante; por lo tanto, su comportamiento dinámico ante la ocurrencia de un sismo sería óptimo. Sin embargo, habría que considerar que este podría verse alterado debido a que los suelos están permanentemente saturados por la infiltración del agua.

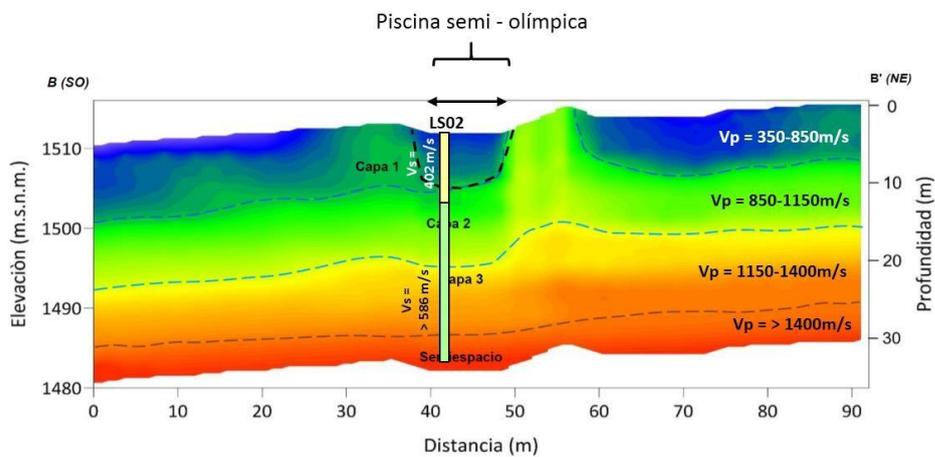
En la Figura 18, se considera una secuencia de perfiles geoelectricos (LE06, LE08, LE10 y LE11), orientados paralelos al eje mayor de la piscina. Aquí se observa claramente que los suelos con valores más resistivos (sin presencia de agua) se encuentran en dirección SO; mientras que, en la parte céntrica predominan los suelos con bajas resistividades sugiriendo la presencia de suelos saturados por agua. Estos suelos debido a su contenido de arenas y/o limos (material fino), pueden contener el agua filtrada. Estos suelos se distribuyen de manera heterogénea y a diferentes niveles de profundidad y contenidos de saturación de agua.



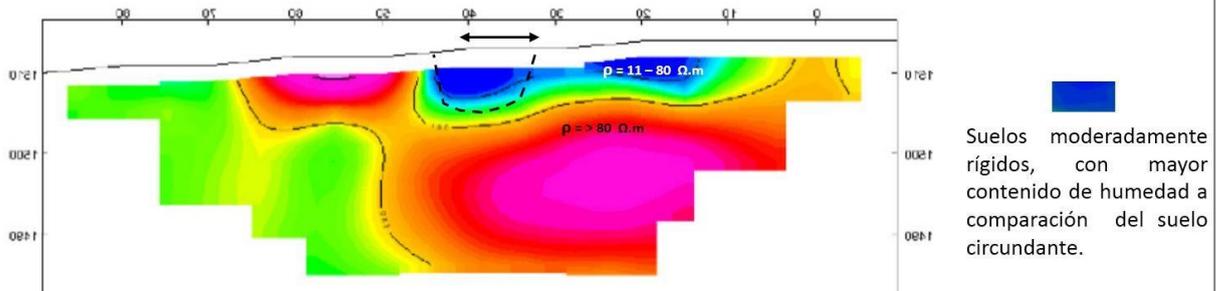
**Figura 16.** Correlación entre los métodos geofísicos refracción sísmica, MASW y tomografía eléctrica. Ensayos geofísicos ejecutados en dirección paralelo al eje mayor.



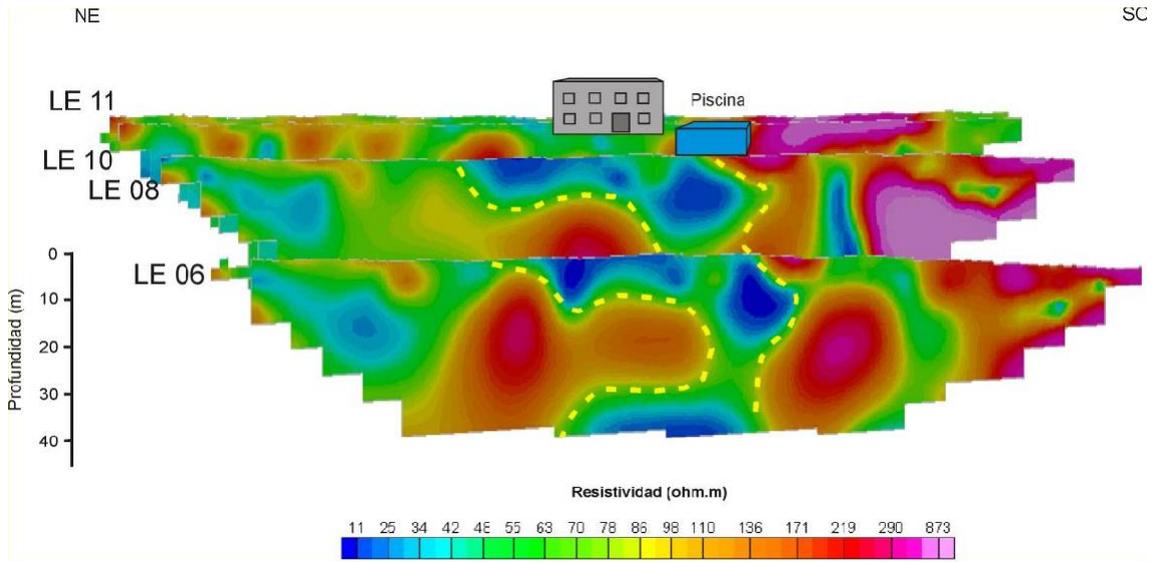
**Refracción sísmica LR02**



**Tomografía eléctrica LE09**



**Figura 17.** Correlación entre los métodos geofísicos refracción sísmica, MASW y tomografía eléctrica. Ensayos geofísicos ejecutados en dirección perpendicular al eje mayor.



**Figura 18.** Vista de los perfiles de tomografía de resistividad eléctrica LE06, LE08, LE10 y LE11.

## CONCLUSIONES

*El análisis geofísico del suelo presente bajo la piscina semi-olímpica del complejo deportivo de la Universidad Nacional de Moquegua, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:*

- .- El suelo, sobre el cual se ubica la piscina, no muestra sensibilidad a ninguna frecuencia y/o periodo dominante, evidenciando la existencia de suelos consistentes.*
- .- En el subsuelo se ha identificado la existencia de tres capas: la capa superficial presenta espesores de 8 a 9 metros con velocidades de ondas de corte Vs de 400 m/s, que sugiere la existencia de suelos moderadamente rígidos a rígidos. Por debajo de esta capa, los suelos son rígidos y conforme incrementa la profundidad, aumenta su rigidez.*
- .- Los valores bajos de resistividad que presentan los suelos, indican la existencia de una capa superficial de 8 a 9 metros de espesor, con la presencia de suelos saturados por agua. Asimismo, esta capa a niveles más superficiales (2 a 3 metros) presenta valores bajos de resistivos (11 a 80 ohm.m); por lo tanto, presenta muy alta saturación que podría tener su origen en procesos de infiltración de agua por riego y otras fuentes secundarias. Estos suelos, debido a su contenido de arenas y/o limos (material fino) pueden contener el agua filtrada y se distribuye de manera heterogénea a diferentes niveles de profundidad y contenidos de saturación de agua.*
- .- Los suelos por debajo de la piscina muestran buena consistencia, pero al encontrarse saturados de agua pierden su capacidad portante, generándose inestabilidad del terreno, asentamientos y grietas.*

### **RECOMENDACIONES**

*-Se recomienda realizar estudios geotécnicos a fin de determinar el tipo de suelo y resistencia para mejorar su comportamiento dinámico.*

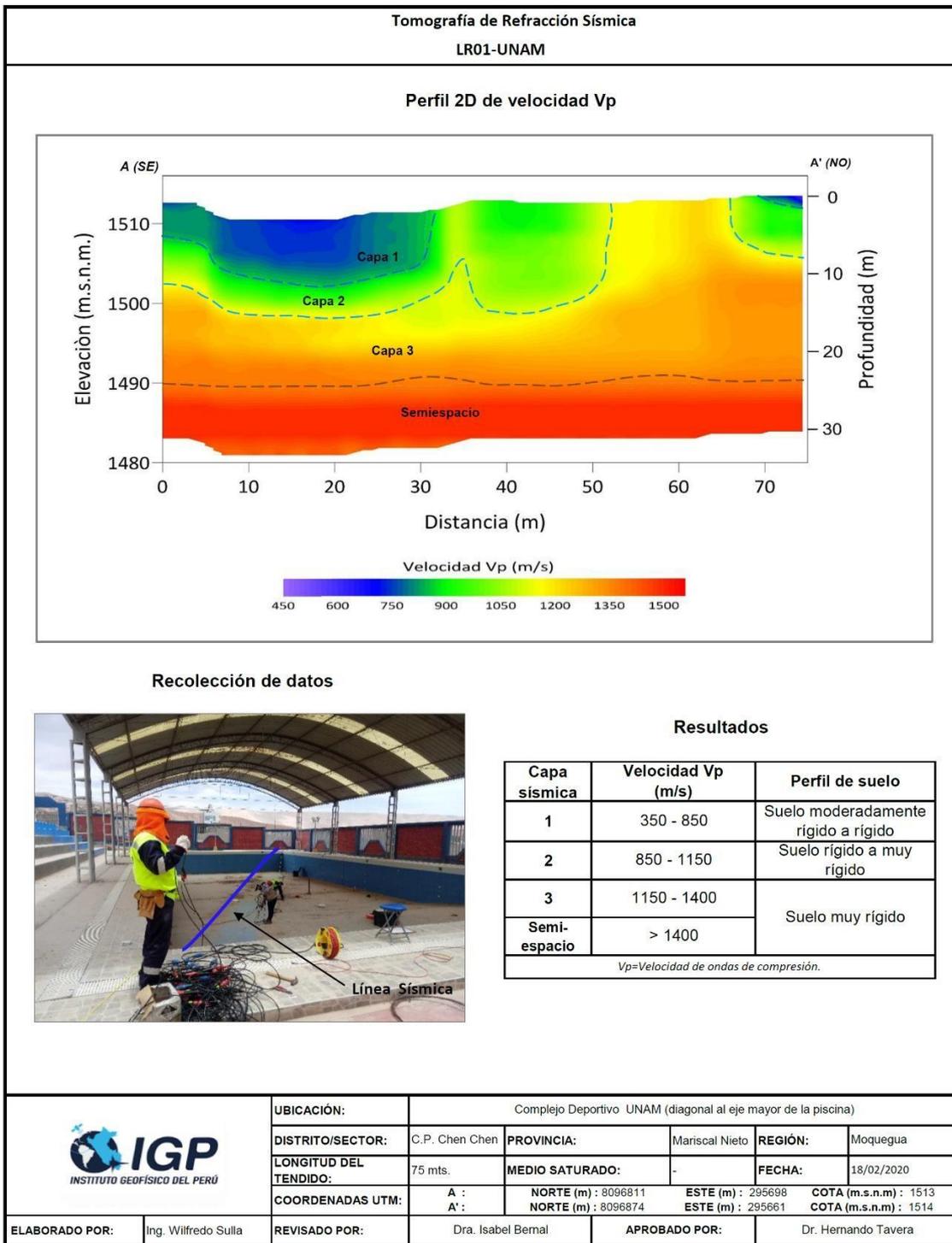
*-Considerando que el material que conforma estos suelos, tiene la capacidad de saturarse por la presencia de agua, es importante utilizar el riego tecnificado en jardines, a fin de disminuir la saturación del terreno.*

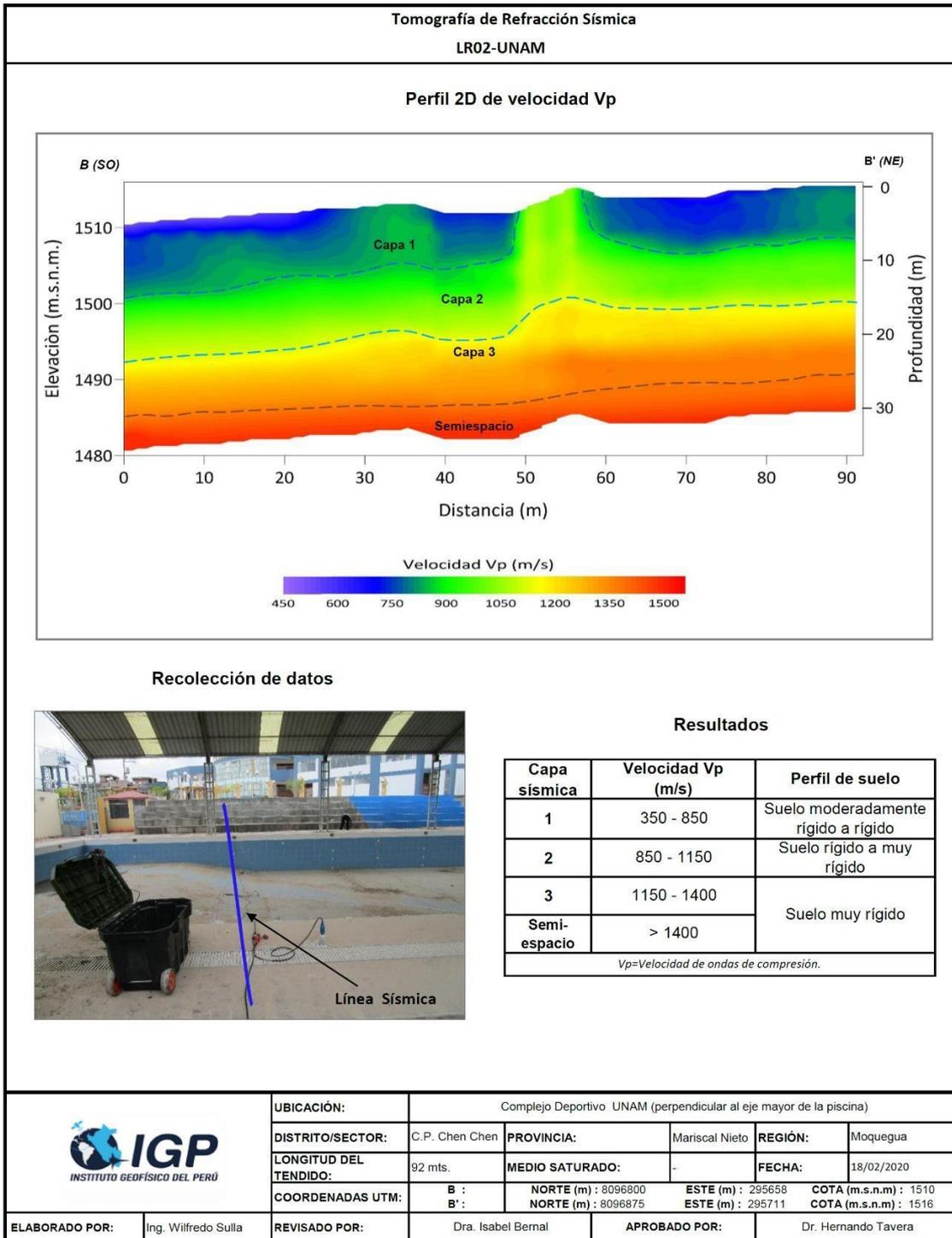
## REFERENCIAS

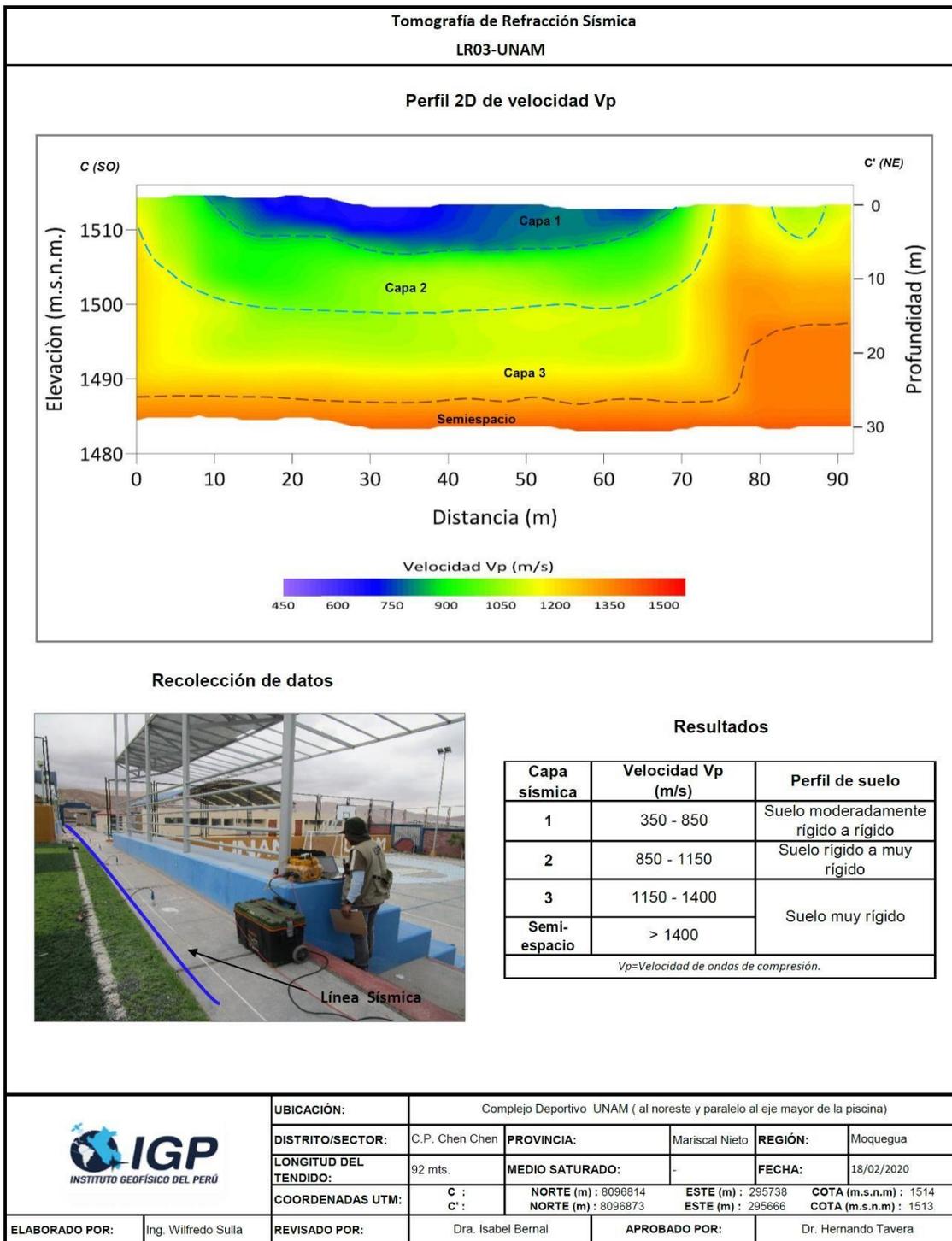
- ASTM D5777, Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation.
- Bernal, I. (2006). Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Tlaxcala – México. Tesis de Maestría, II-UNAM, México.
- Bernal, Y. et al. (2017), Microzonificación Sísmica Geotécnica de Moquegua. Informe técnico. Instituto Geofísico del Perú. IGP.
- Loke M.H. (1996-2004). Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys
- 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.
- 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.
- Universidad Nacional de Colombia. (2000). Investigación de Aguas Subterráneas Región Valles de San Nicolás, Medellín.

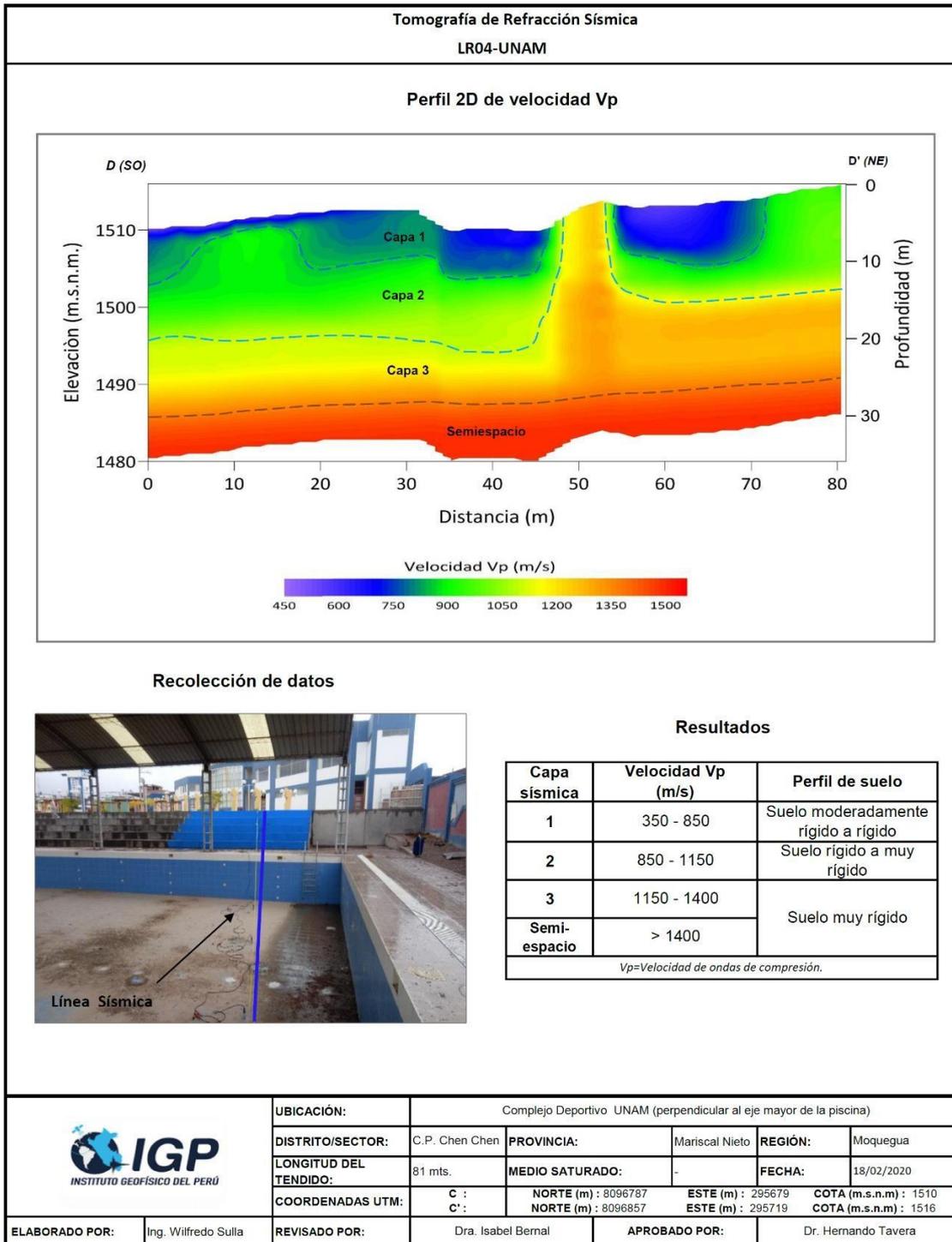
## **ANEXO I**

### **Resultados obtenidos con Refracción Sísmica**



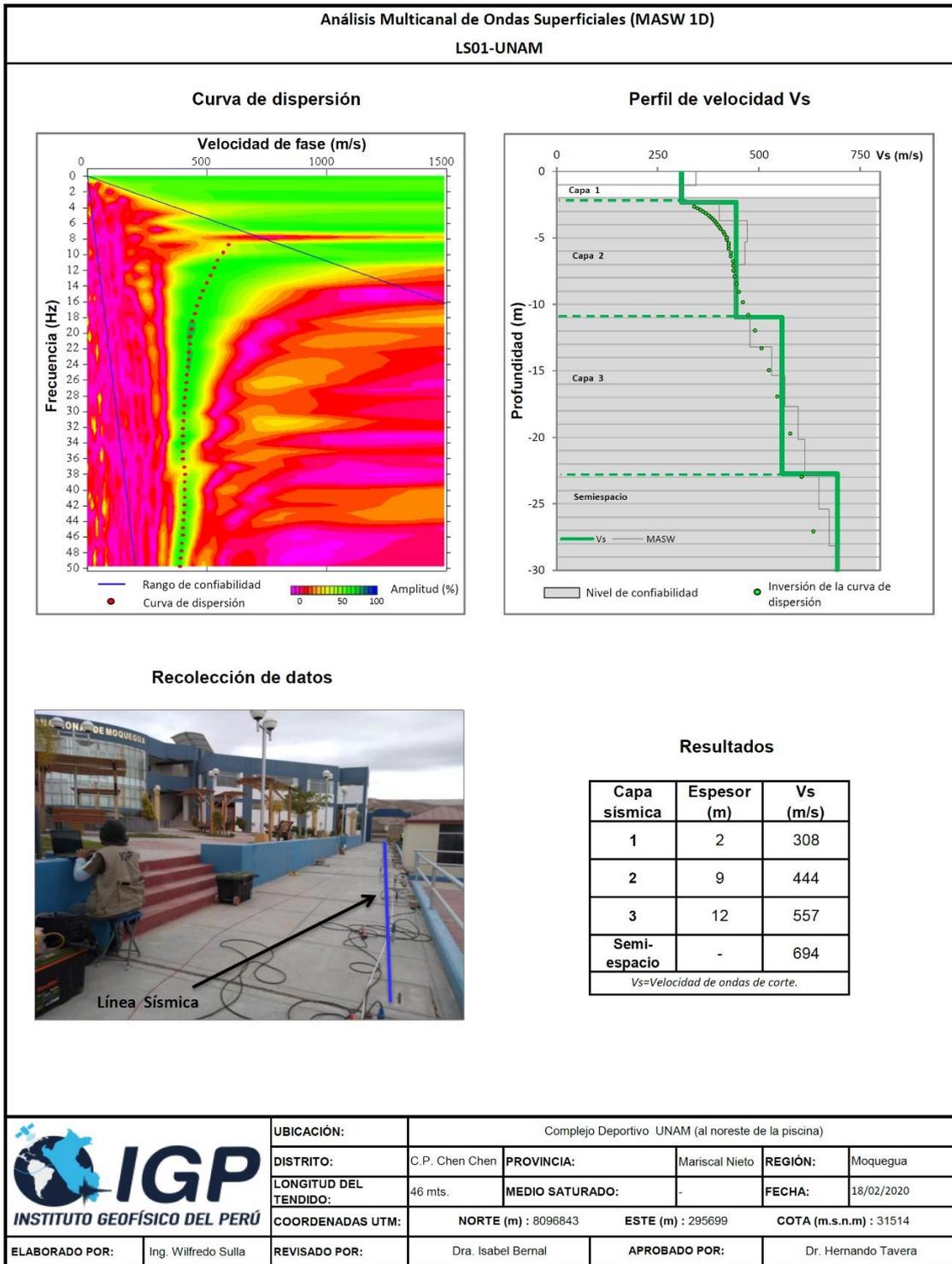


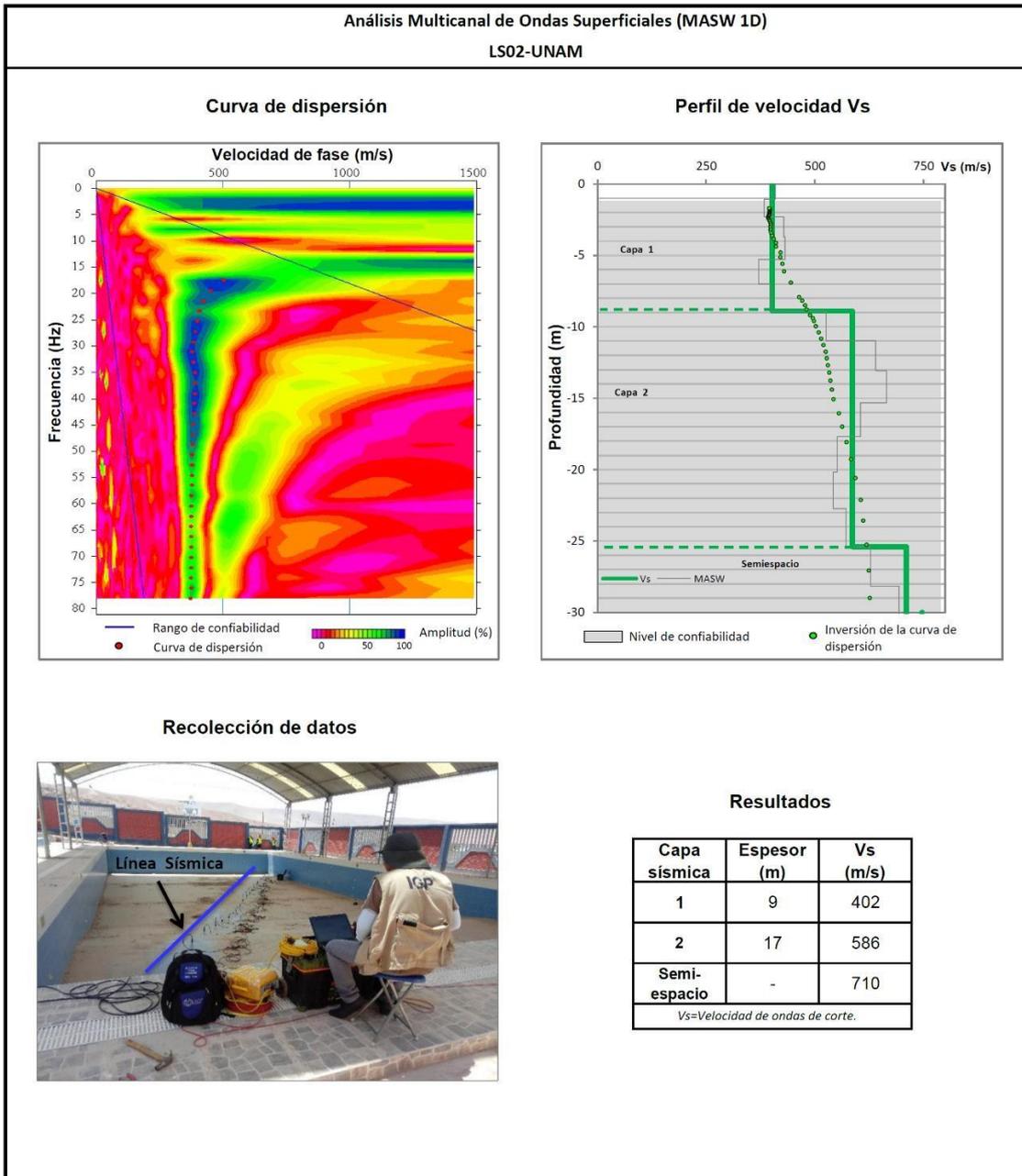




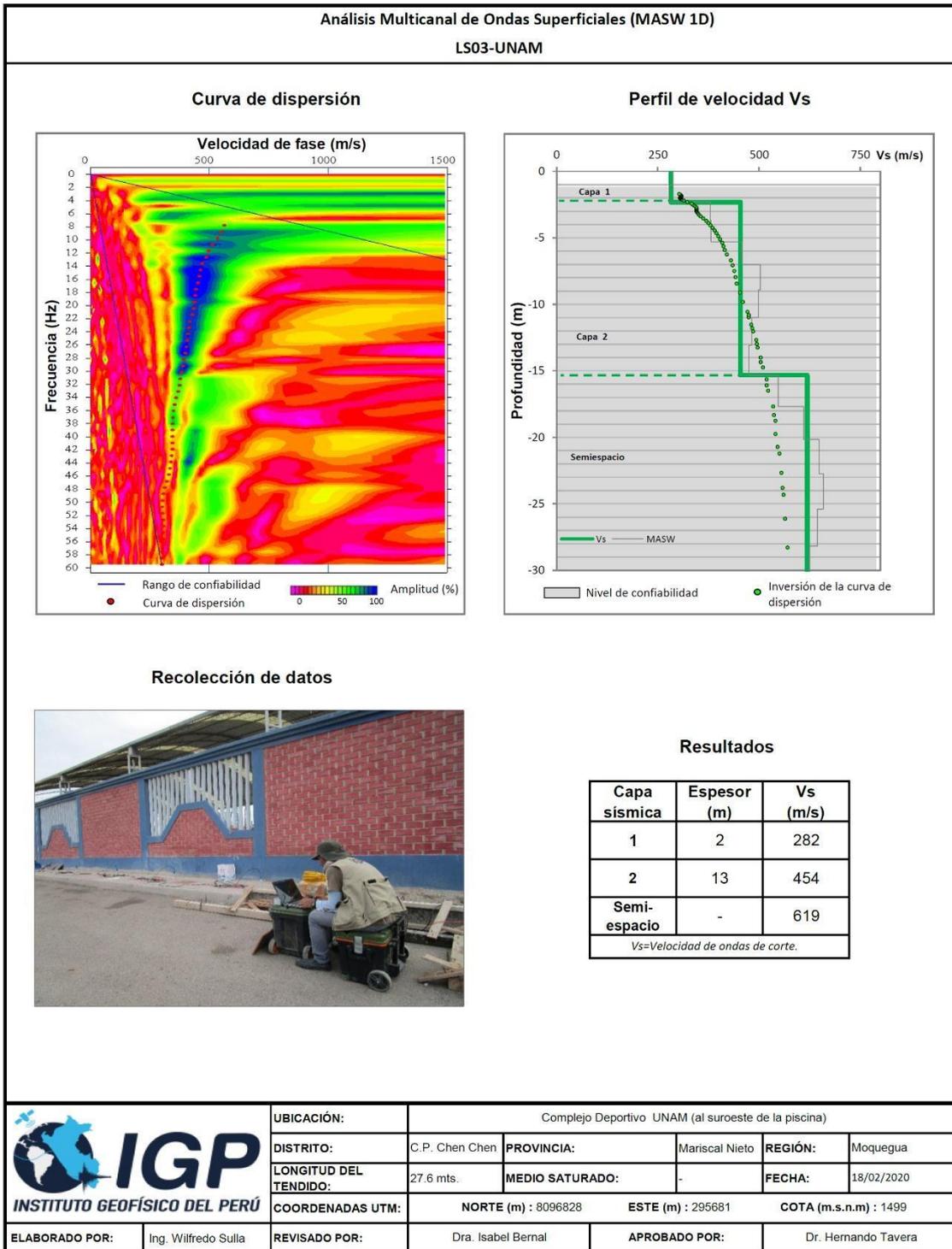
## **ANEXO II**

### **Resultados obtenidos con el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales**



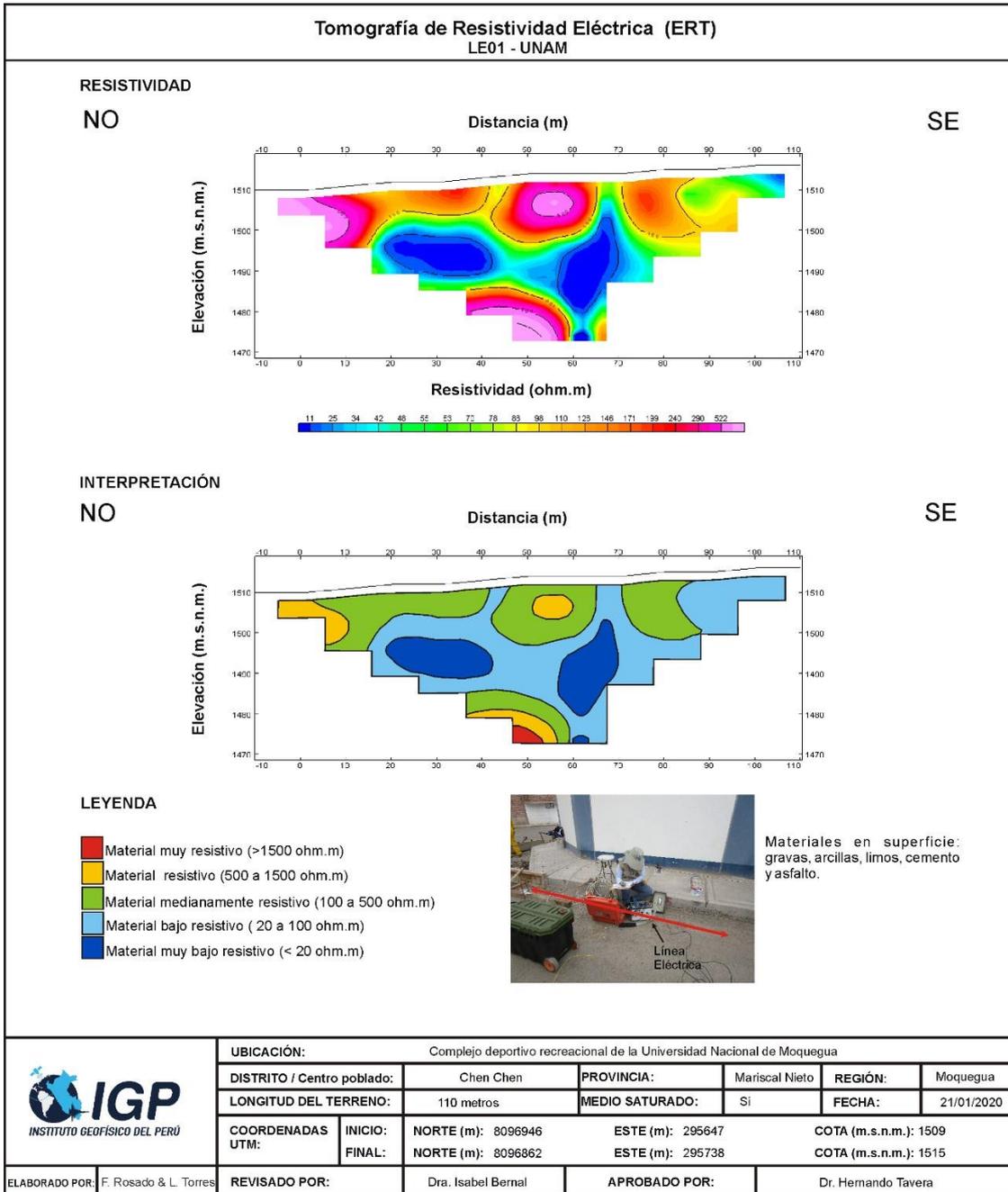


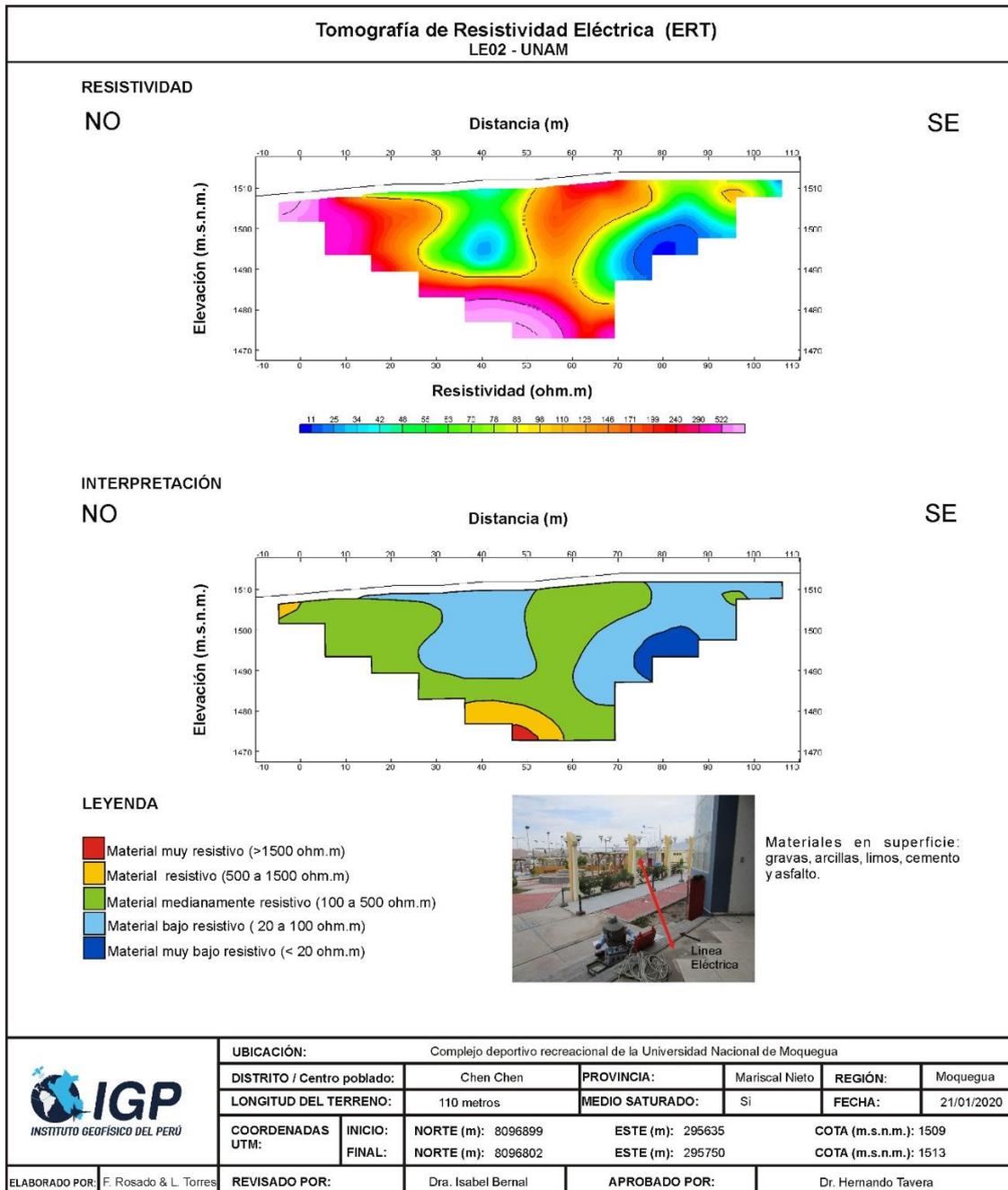
	<b>UBICACIÓN:</b> Complejo Deportivo UNAM (punto central de la piscina)				
	<b>DISTRITO:</b> C.P. Chen Chen	<b>PROVINCIA:</b> Mariscal Nieto	<b>REGIÓN:</b> Moquegua		
	<b>LONGITUD DEL TENDIDO:</b> 27.6 mts.	<b>MEDIO SATURADO:</b> -	<b>FECHA:</b> 18/02/2020		
	<b>COORDENADAS UTM:</b> NORTE (m) : 8096830    ESTE (m) : 295691		<b>COTA (m.s.n.m) :</b> 1503		
<b>ELABORADO POR:</b> Ing. Wilfredo Sullá	<b>REVISADO POR:</b> Dra. Isabel Bernal	<b>APROBADO POR:</b>	Dr. Hernando Tavera		

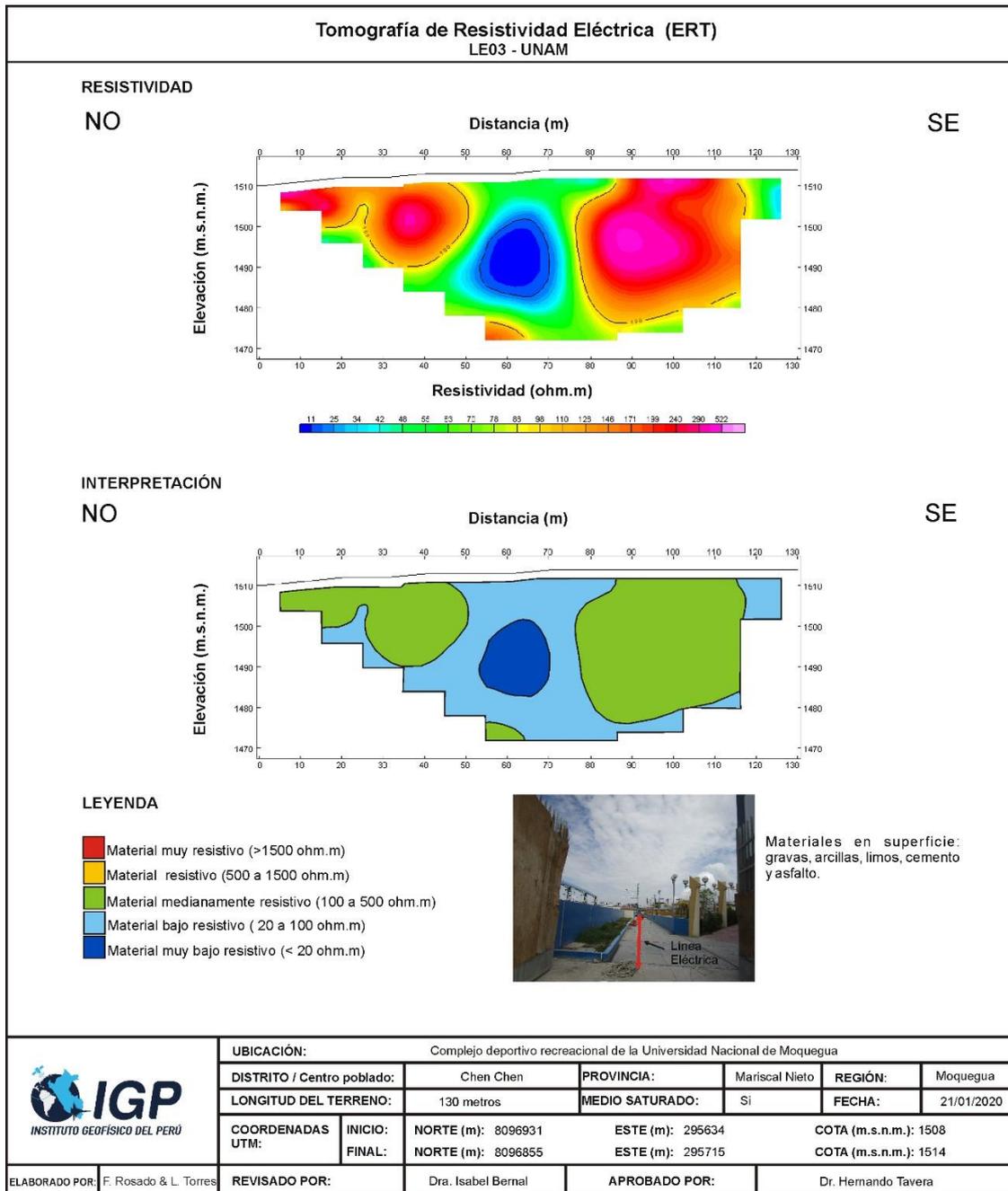


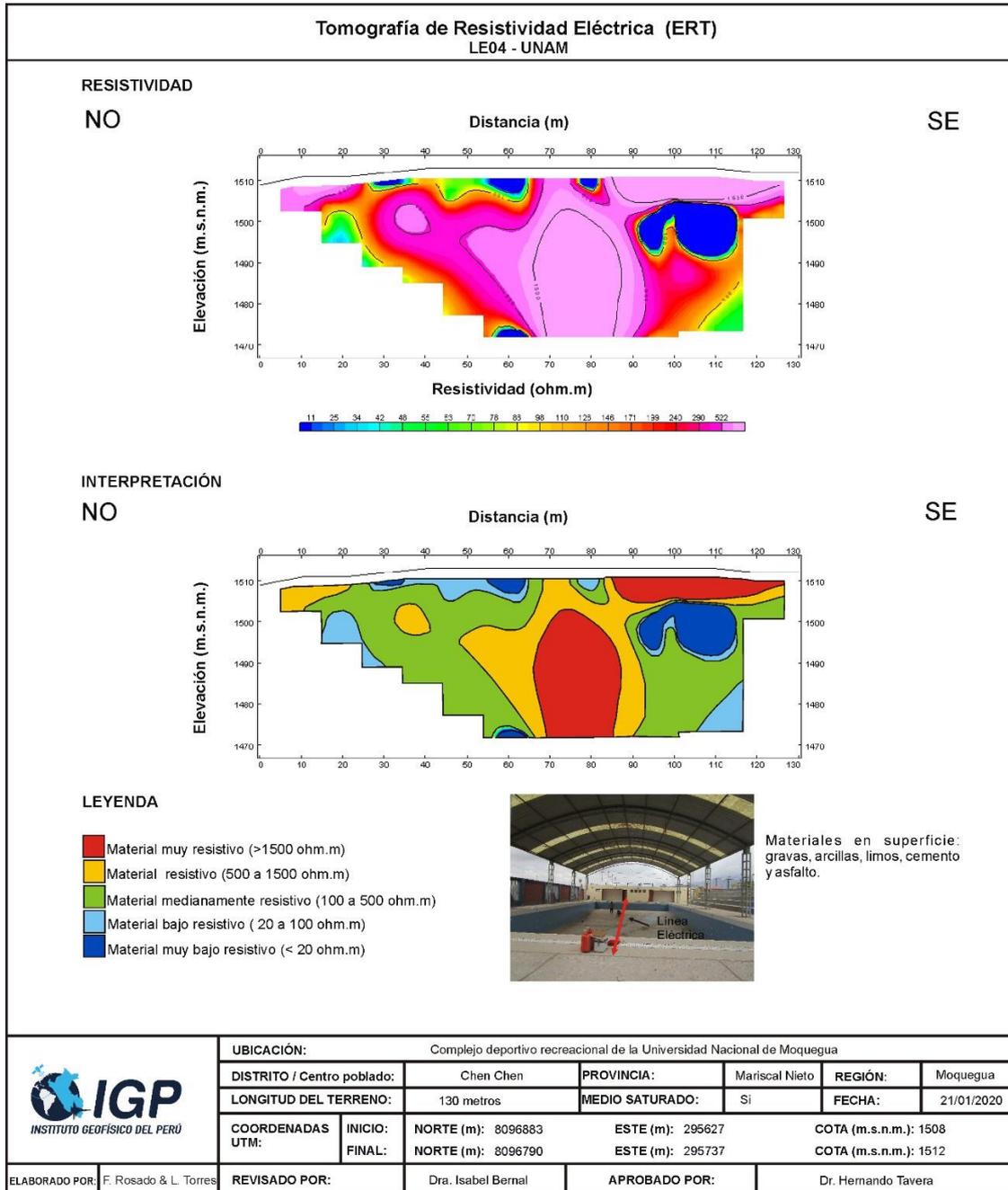
## **ANEXO III**

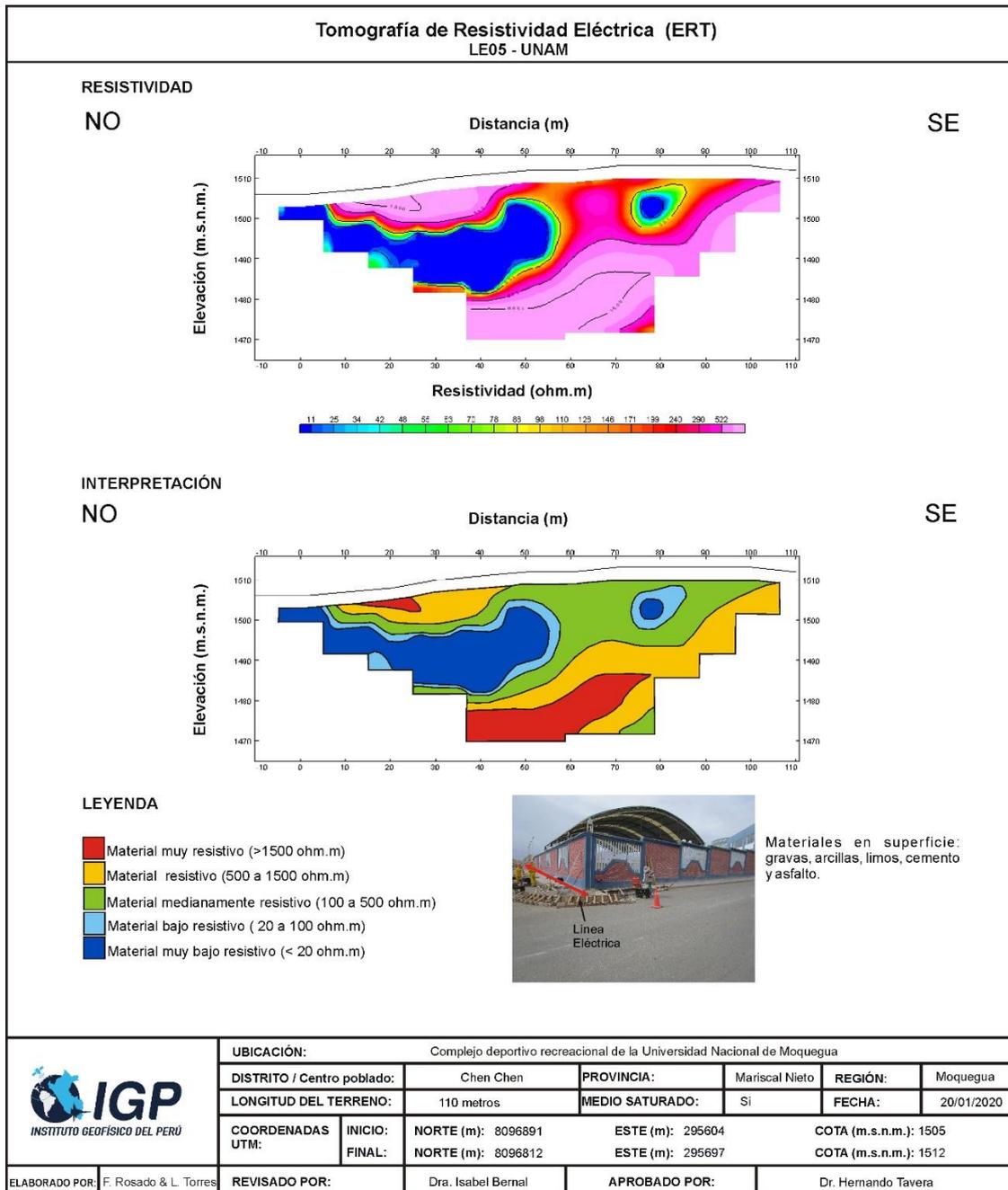
### **Resultados obtenidos de la Tomografía de Resistividad Eléctrica**

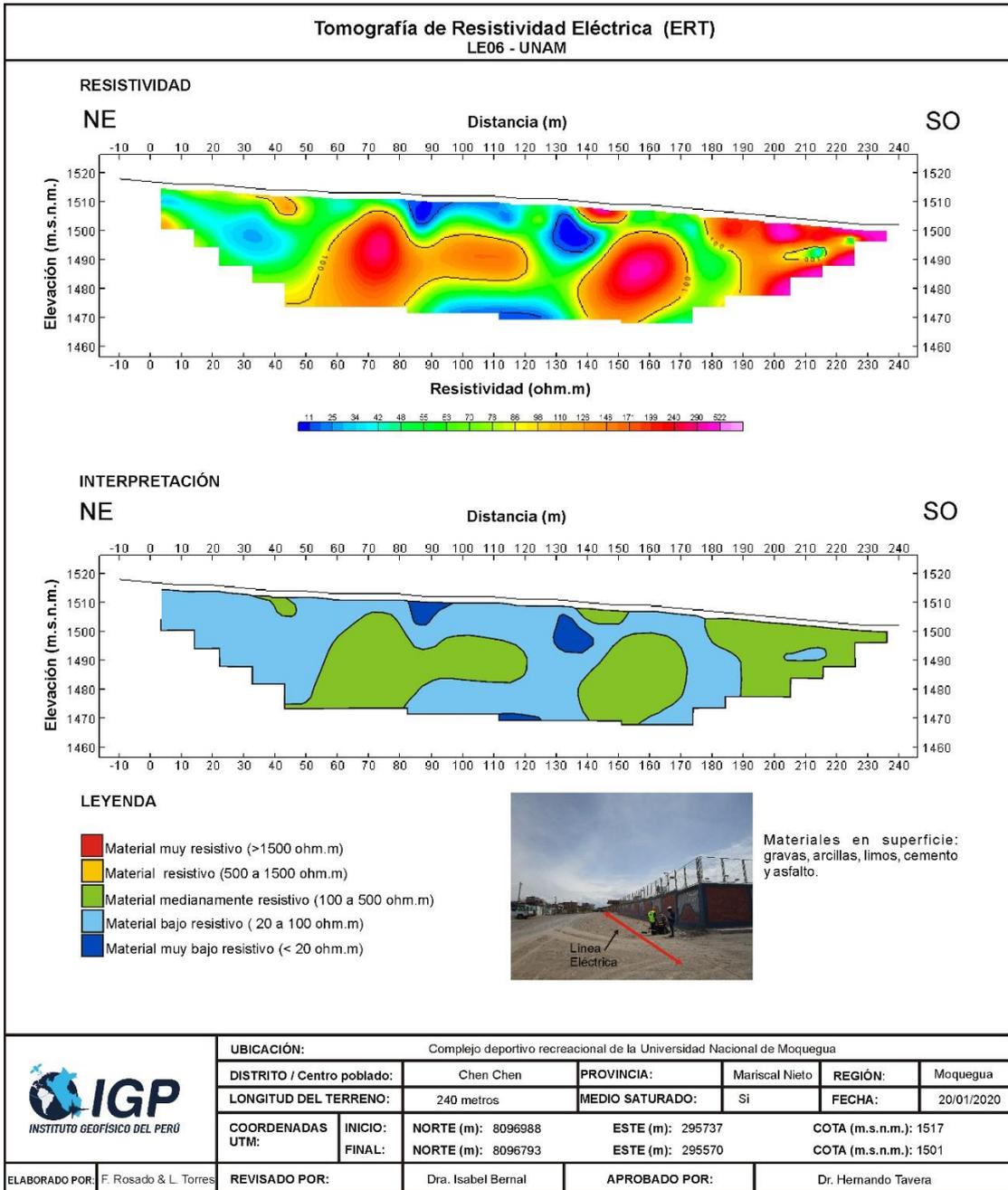


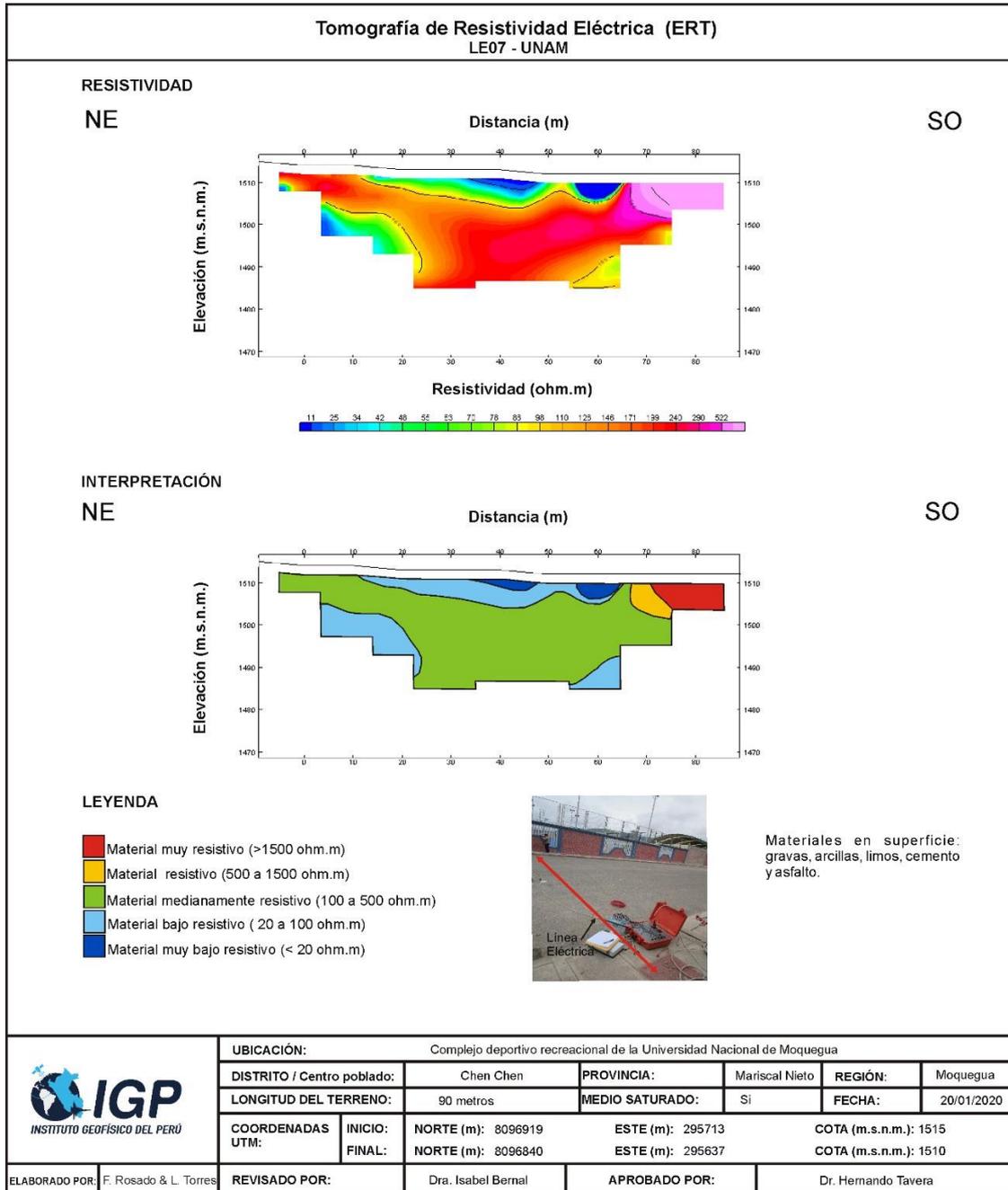


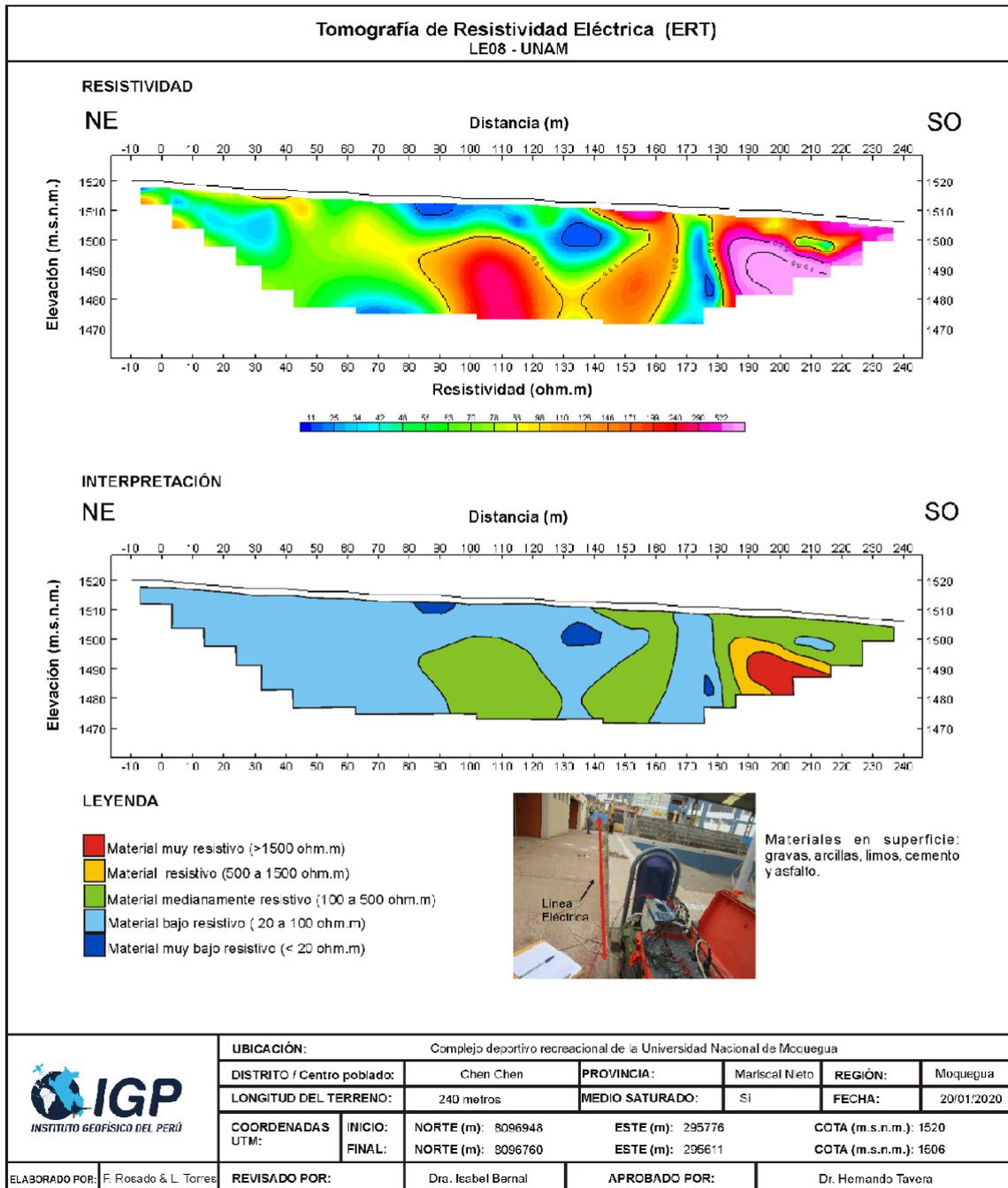


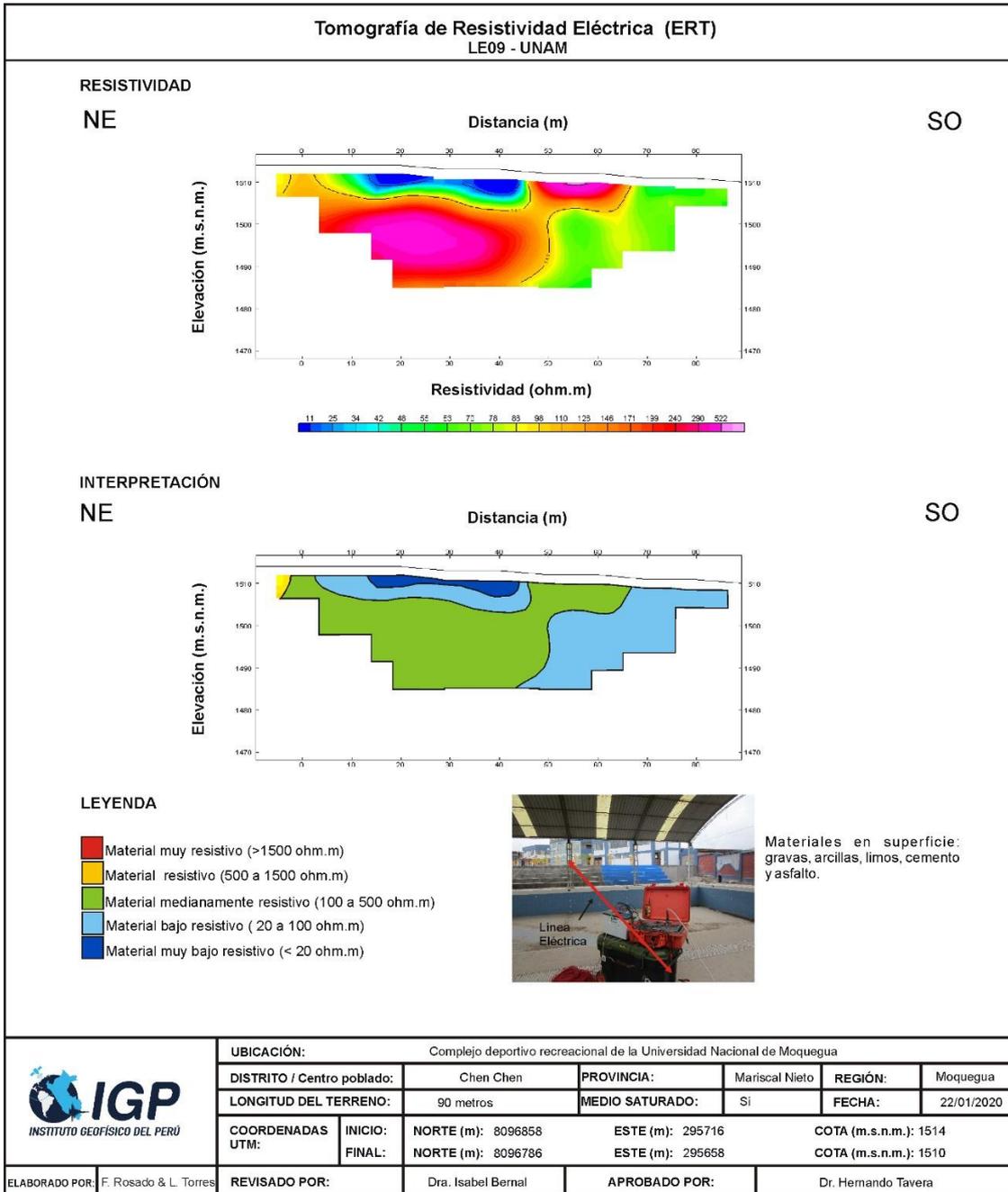


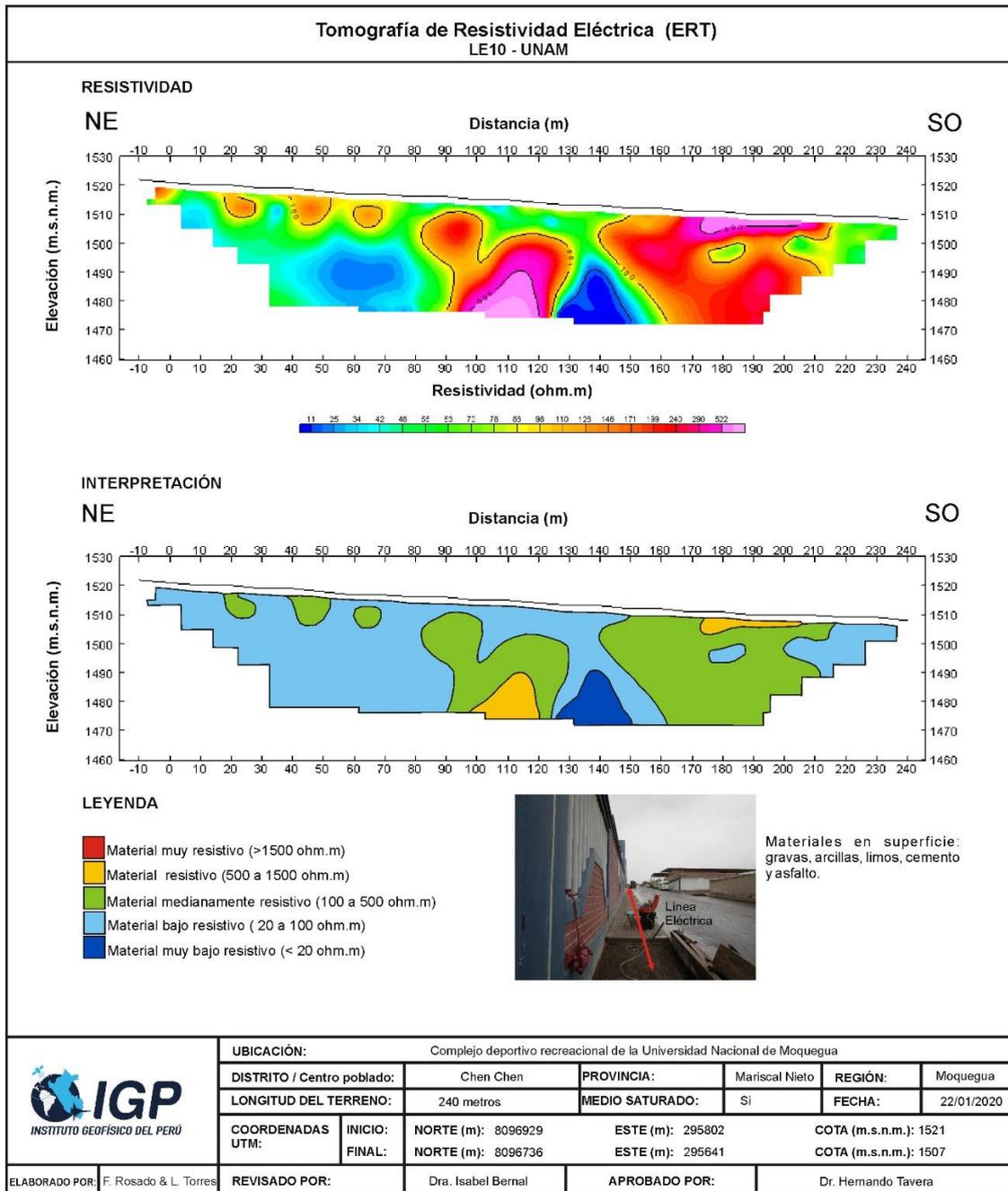


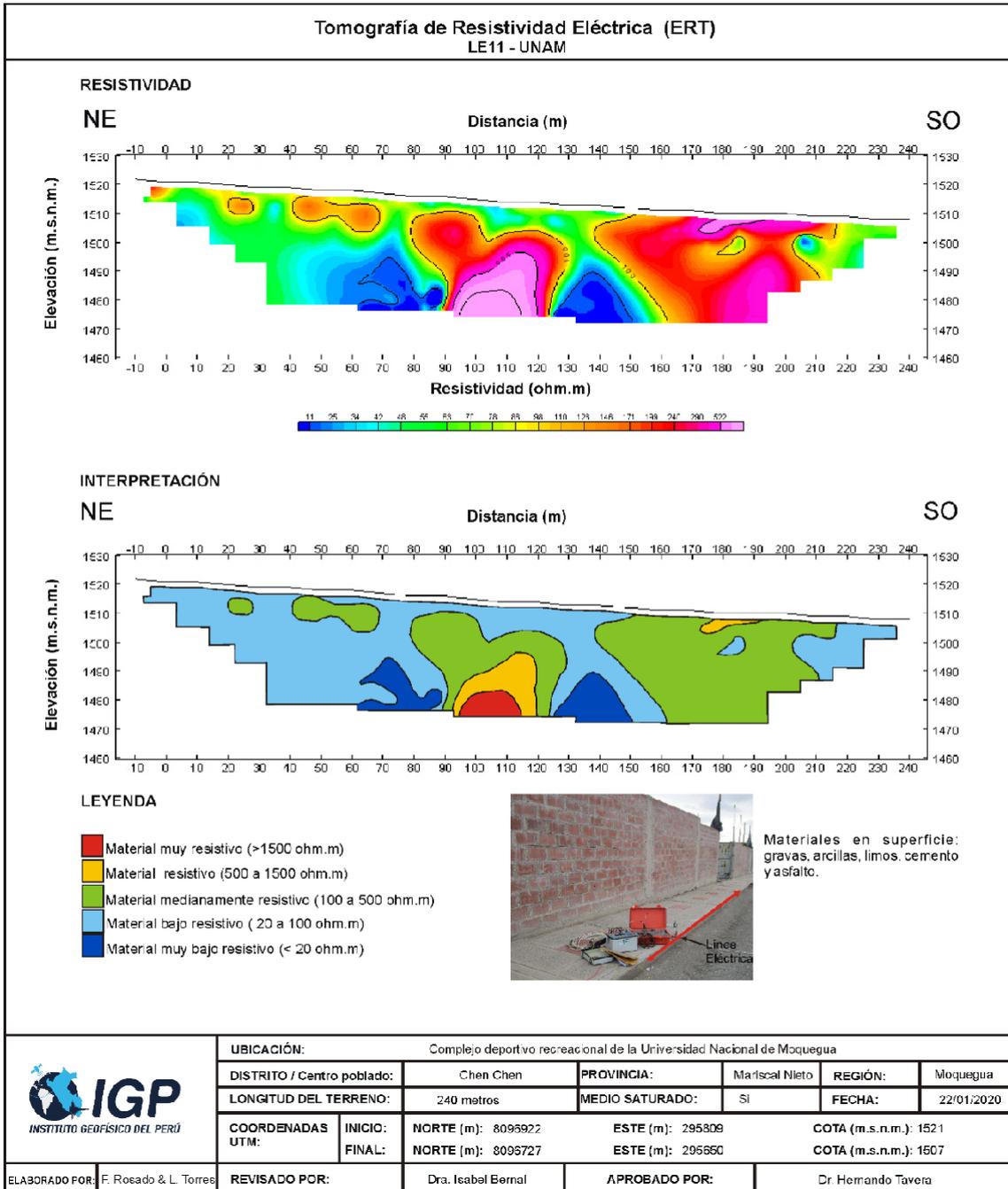


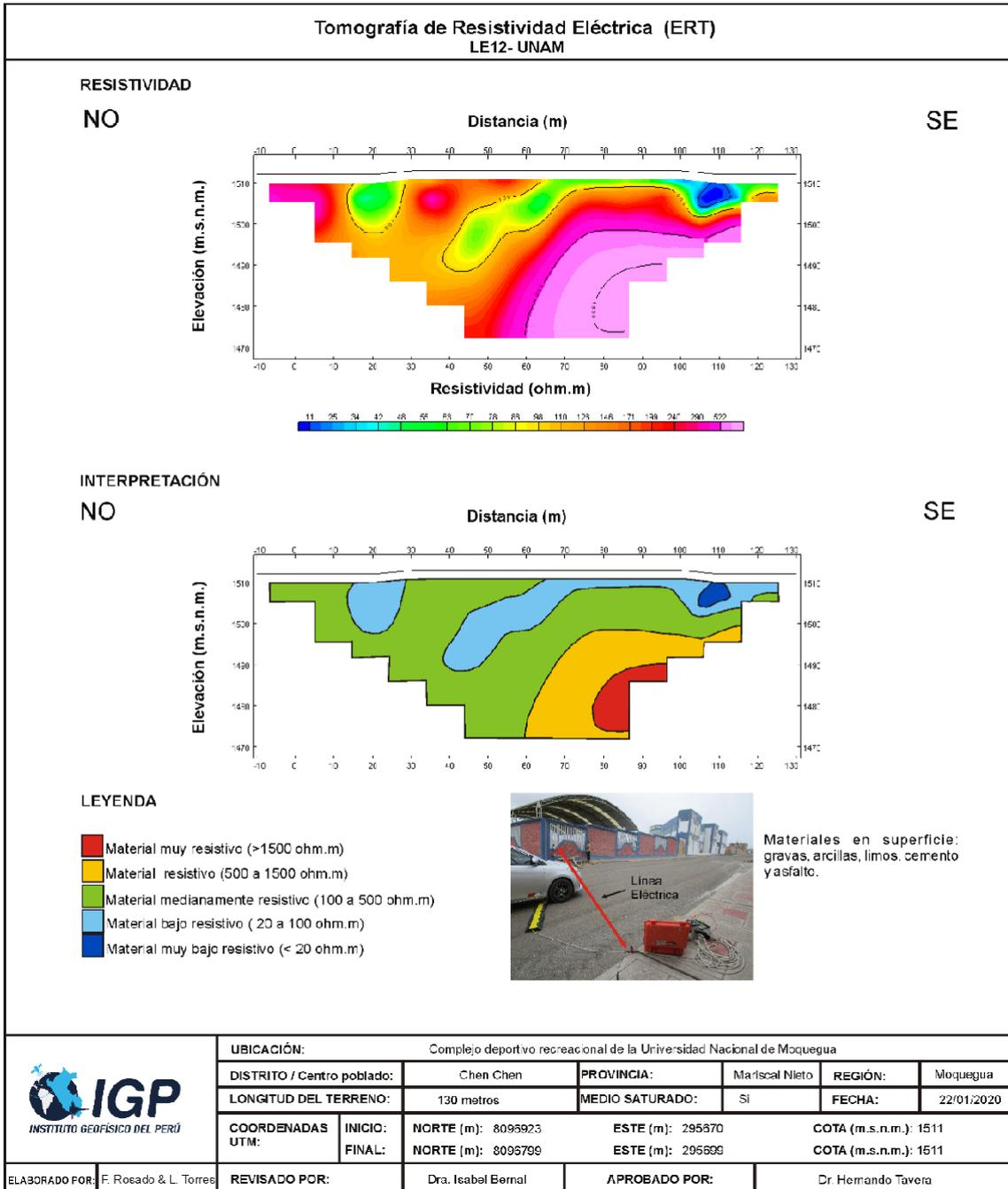


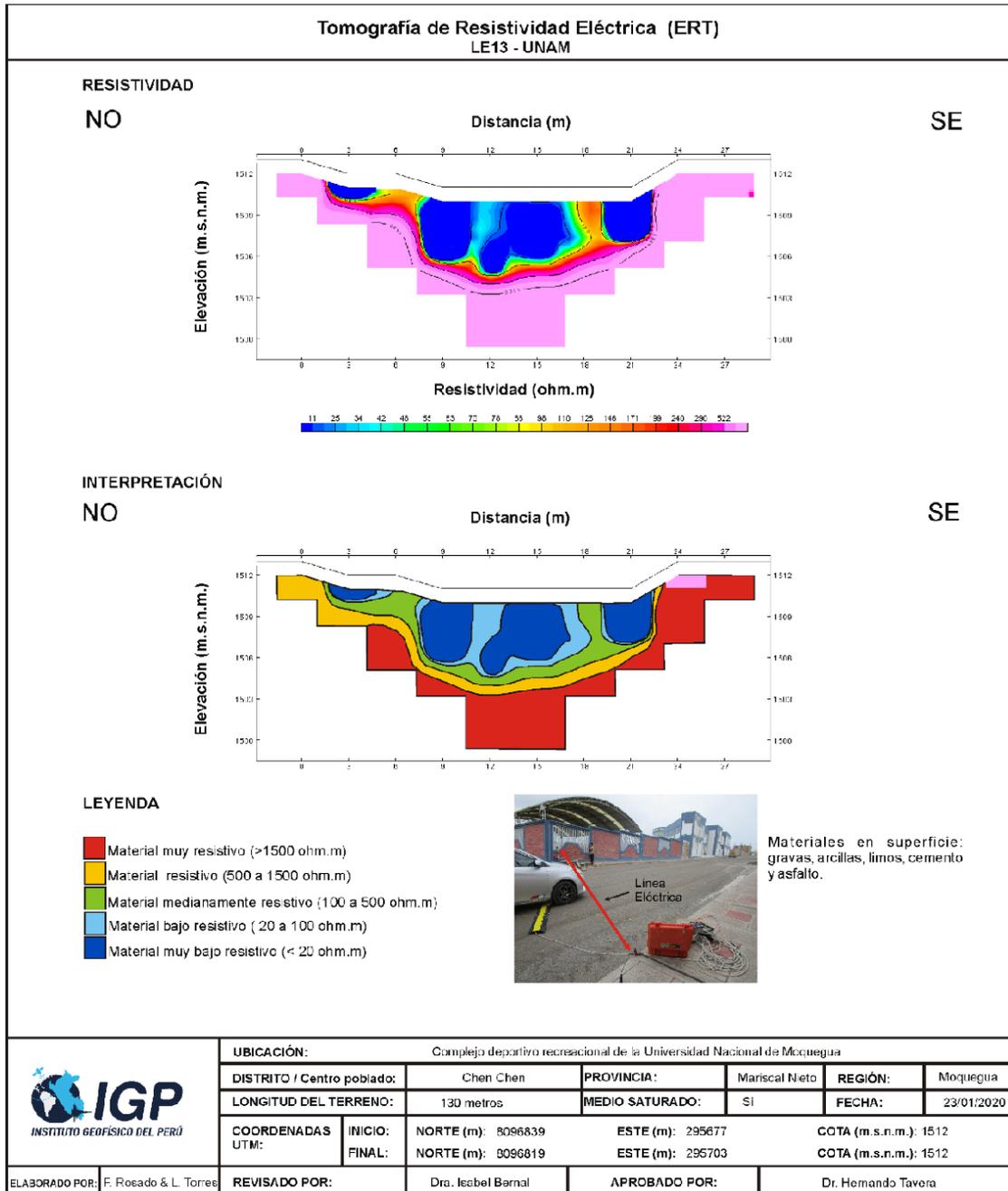












## **ANEXO IV**

### **Resultados obtenidos en los Sondajes Eléctricos Verticales**

