

Hydrogeological Characterization by Electrical Resistivity Tomography (ERT) of the hamlet Viña, district of Magdalena, Cajamarca 2024

Alva Huamán, Daniel Alejandro¹; Portilla Castañeda, Miguel Ricardo¹; Leonardo Delgado, Diana Michelly¹, and Llovera Chunqui, Jose Luis¹

1 Universidad Privada del Norte, Perú. daniel.alva@upn.edu.pe, miguel.portilla@upn.edu.pe, n00230348@upn.pe, lloverachunquijoseluis@gmail.com.

ABSTRACT– *The objective of this research is the hydrogeological characterization by Electrical Resistivity Tomography (ERT) of the hamlet La Viña. It has been perceived that the supply of drinking water is limited, affecting agricultural activities. The research approach is quantitative, applied, descriptive-exploratory and with an experimental design, with a population of geological formations and structures of the hamlet La Viña and with a sample of 7 points of electrical resistivity tomography (ERT), which resulted in the identification of formations such as Chúlec, Pariatambo with limestones and chevron folded shales (flanks N265/53 and N109/73), in NW/SE direction - 40°/60°; Quaternary alluvial deposits are defined by 2 streams with direction N280-N275. From the 7 ERTs, 3 lithostratigraphic units were defined, the first stratum as low porosity and highly resistive rock ranging from 1.6 $\Omega.m$ to 42.00 $\Omega.m$ with thicknesses from 1, 00 m to 60, 00 m and depths from 45, 00 m to 200, 00m. The second stratum has resistivities of 1, 12 $\Omega.m$ to 36 $\Omega.m$ with thicknesses of 3, 5 m to 60, 00 m and depths of 10, 00 to 140, 00 m consists of rocks with clayey soils of low permeability. The third stratum has resistivities of -0, 3 $\Omega.m$ to 29 $\Omega.m$, with thicknesses of 2, 5 m to 20, 00 m, depth ranging from 10, 00 m to 160, 00 m; lithologically they are composed of porous rock formation and groundwater saturation.*

Keywords: *Hydrogeological characterization, groundwater, electrical resistivity tomography, resistivity, lithostratigraphic units.*

Caracterización Hidrogeológica Mediante Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) del caserío La Viña, distrito de Magdalena, Cajamarca 2024

RESUMEN- Esta investigación tiene por objetivo la caracterización hidrogeológica mediante Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) del caserío La Viña, debido al abastecimiento limitado de agua potable, lo que afecta también las actividades agrícolas. El enfoque de la investigación es cuantitativo, aplicado, de nivel descriptivo – exploratorio y con un diseño experimental. La población de estudio corresponde a las formaciones y estructuras geológicas del caserío La Viña, utilizando como muestra siete puntos de tomografía de resistividad eléctrica (ERT). Como resultado, se identificaron formaciones como Chulec y Pariatambo, compuestas por calizas y lutitas plegadas tipo chevron (flancos N265/53 y N109/73), orientadas en dirección Noroeste – sureste (40°/60°). Los depósitos cuaternarios aluviales están definidos por dos quebradas orientadas en dirección N280-N275. A partir de los siete ERT realizados, se definieron tres unidades litoestratigráficas, el primer estrato corresponde a una roca de baja porosidad y alta resistividad, con valores de 1,6 $\Omega.m$ a 42,00 $\Omega.m$, espesores de 1, 00 m a 60, 00 m y profundidades de 45, 00 m a 200, 00m. El segundo estrato presenta resistividades de 1, 12 $\Omega.m$ a 36 $\Omega.m$, espesores entre 3, 5 m a 60, 00 m y profundidades de 10, 00 a 140, 00 m, compuestos por suelos arcillosos de baja permeabilidad. El tercer estrato muestra resistividades de -0, 3 $\Omega.m$ a 29 $\Omega.m$, espesores de 2, 5 m a 20, 00 m, y profundidades de 10, 00 m a 160, 00 m; litológicamente, corresponde a formaciones de roca porosa saturadas de agua subterránea. Los perfiles N° 02, N° 03 - N° 02 Auxiliar, N° 01, presentan buena porosidad primaria saturada, lo cual resulta significativo para la extracción de agua subterránea.

Palabras claves: Caracterización hidrogeológica, aguas subterráneas, tomografía de resistividad eléctrica, resistividad, unidades litoestratigráficas.

I. INTRODUCCIÓN

Según [1], aproximadamente 2 200 millones de personas presentan carencia de acceso a agua potable a nivel mundial, por ello es crucial la gestión sostenible de los recursos hídricos en un mundo que experimenta constantes desarrollo y cambios climáticos [2]. Para [3], el agua subterránea constituye un recurso primordial que abastece tanto a zonas urbanas como rurales, además de ser indispensable para la economía agrícola y el bienestar de los ecosistemas. Durante los periodos de sequía, cuando la disponibilidad de agua superficial disminuye, los acuíferos cumplen un rol vital en la provisión de agua para la población, ya que no se ven afectados fácilmente por condiciones naturales u otros factores, estando suficientemente aislados de contaminantes superficiales debido al efecto de filtración natural que ejercen las capas del subsuelo.

Por estas razones, la identificación de fuentes de agua subterránea representa una opción viable frente a épocas de sequía, contribuyendo a satisfacer las necesidades en cantidad y calidad suficiente [4]. En los últimos años, las variaciones climáticas

experimentadas a nivel global han reducido las precipitaciones fluviales, aumentando así la demanda del recurso hídrico [5]. Además [1] enfatiza que la falta de acceso al agua potable acarrea graves consecuencias en el ámbito del saneamiento e higiene: aproximadamente 2000 millones de personas consumen aguas expuestas a contaminación fecal, lo cual incide en la mortalidad infantil [6], entre las principales enfermedades asociadas destaca la diarrea infantil, la cual, debido a la escasez de agua potable, deficiencias en el saneamiento y la higiene, provoca la muerte de cerca de 1,5 millones de niños al año.

Así mismo [7] señala que incrementar la cobertura de agua potable reduciría las infecciones intrahospitalarias, las transmisiones por vectores como dengue, zika y chikungunya, y disminuiría en un 7,9% los casos de anemia. En las zonas rurales, dos de cada diez niños menores de cinco años sufren de desnutrición, y cinco de cada diez presentan anemia.

En cuanto a la situación nacional, en el Perú actualmente la población asciende a 34 millones 39 mil habitantes, de los cuales el 49,6% son hombres y el 50,4% son mujeres [8]. Según el instituto nacional de estadística e informática (INEI), en el 2023 los hogares que cuentan con servicio de agua por red pública a nivel nacional alcanzaron el 91,0% representando un incremento de 5,1 puntos porcentuales respecto al año 2013 (85,9%) [9].

En este contexto, el Estado Peruano. Mediante la Ley N° 29338 de Recursos Hídricos [10], establece principios de gestión integrada para el uso sostenible de los recursos hídricos, como la valoración del agua, la participación ciudadana y la promoción de una cultura del agua. De igual manera, la Política Nacional del Agua N° 33, respaldada por el Foro Nacional, reafirma el compromiso de proteger el agua como un patrimonio y derecho fundamental de cada ser humano para el acceso del agua potable, indispensable para la vida y el desarrollo de las generaciones presentes y futuras [11].

El objetivo general del presente estudio es caracterizar hidrogeológicamente el área de interés, proporcionando información crítica para la comprensión, evaluación y gestión eficiente de los acuíferos subterráneos.

II. METÓDO

El enfoque de la investigación es cuantitativo, se centra en la recolección y análisis de datos numéricos, como las resistividades medidas en los perfiles ERTs; de este modo interpretar de manera objetiva las propiedades hidrogeológicas, a partir de los valores resistivos obtenidos. La información recopilada facilita la delineación de la estructura y composición del subsuelo, identificando capas geológicas, con presencia de agua subterránea y zonas de fracturas [12].

Es del tipo aplicativo, esto implica que los resultados se aplican directamente para proponer soluciones específicas o informar la gestión del recurso hídrico en la zona.

Para el desarrollo del análisis hidrogeológico, se realizaron mediciones de tomografía de resistividad eléctrica (ERT) en siete secciones estratégicamente seleccionadas en el caserío La Viña, distrito de Magdalena, departamento de Cajamarca.

Como técnica inicial, se aplicó la observación directa a través de una inspección preliminar del área de estudio, con el objetivo de definir las ubicaciones más adecuadas para la instalación de las líneas de tomografía eléctrica.

Posteriormente, para la recopilación de información geológica, se realizó un cartografiado de campo, que permitió reconocer las formaciones geológicas, estructuras y litología. Para el levantamiento topográfico, se empleó un dron DJI Phantom 4 Pro como se muestra en la figura 1, utilizando el software DJI GO para el sobrevuelo y los programas AGISOFT y METASHAPE para el procesamiento de las imágenes capturadas, generando modelos topográficos de alta resolución.

Además, se utilizó el método empírico de radiestesia, con ayuda de dos varillas de bronce antes de ejecutar las tomografías, como se aprecia en la figura 2. En el aspecto geofísico, se utilizó el equipo ADMT 500Sx-16D acompañado de su software de adquisición y procesamiento Aidu Ground Water (AGW) como de aprecia en la figura 1. La ejecución de las líneas de tomografía incluyó el uso de electrodos de cobre, martillos de peso para la fijación, y una wincha de 100 metros para garantizar el espaciado preciso entre electrodos, ver la figura 2.

Como instrumentos complementarios se usó una laptop Toshiba Core i7, GPS Garmin eTrex 10, brújula, picota, HCl al 10%, rayador, lupa, libreta de campo y colores. También se contó con personal de apoyo especializado y transporte para los equipos.

A. Procedimiento

El procedimiento se desarrolló en tres etapas: gabinete, campo y post campo. En la primera, se recopiló y analizó información previa de fuentes académicas bibliográficas confiables como Scopus, Web of Science, Google Académico y Renati que portaron la base fundamental teórica. Como apoyo para la cartografía, geología, topografía se acudió a la plataforma web GEOCATMIN, desarrollado por el Instituto Geológico, Minero y metalúrgico del Perú (INGEMMET), Así mismo se descargaron imágenes satelitales georreferenciadas de SASPlanet y Google Earth. Previo a la salida a campo se verificó y definió el área de investigación, predeterminando las líneas de tomografía; de la misma manera, se elaboraron mapas base de la topografía, geología y ubicación geográfica.

En la etapa de campo, se realizó el mapeo geológico clasificación de rocas, levantamiento topográfico con dron, identificación y registro de la codificación de puntos, coordenadas, cota, equidistancia, extensión, profundidad y orientación en donde se ejecutó cada prueba geofísica, tal como se muestra en la tabla I y II.

Finalmente, en la etapa post campo, los datos obtenidos fueron procesados e interpretados mediante software especializado, mapas temáticos, generando perfiles de resistividad,

cortes geológicos, distribución de perfiles ERT en el lugar de estudio, véase la figura 3.



Fig. 1 Levantamiento topográfico con dron DJI Phantom 4 Pro y equipo geofísico ADMT 3000SX – 2D más electrodos.

TABLA I
REGISTRO DE DATOS DE MUESTREO

COORDENADAS DE LOS PUNTOS ESTUDIADOS DATUM WGS - 84			
Punto	Este	Norte	Cota (m.s.n.m)
(P 01)	754029.00 m E	9199857.00 m N	1212.00
(P 02)	754047.00 m E	9199841.00 m N	1205.00
(P 03)	754033.00 m E	9199798.00 m N	1199.00
(P 04)	754044.00 m E	9199780.00 m N	1199.00
(P 01 Aux.)	754192.00 m E	9200140.00 m N	1266.00
(P 02 Aux.)	754270.00 m E	9200031.00 m N	1263.00
(P 03 Aux.)	754090.00 m E	9199924.00 m N	1220.00

En la tabla I, se muestran las coordenadas UTM de los puntos tomados en la Zona 17S.

TABLA II
CONSIDERACIONES PARA LA MEDICIÓN DE TOMAGRÁFICA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Nombre de la línea	Separación entre electrodos (m)	Extensión de la línea (m)	Profundidad de muestreo (m)	Orientación
ERT N°01 (P01)	2	28	100 - 200	NW - SE
ERT N°02 (P02)	2	28	100 - 200	NW - SE
ERT N°03 (P03)	2	28	100 - 200	NW - SE
ERT N°04 (P04)	2	28	100 - 200	NW - SE
(P 01 Aux.)	2	28	100	W - E
(P 02 Aux.)	2	28	100	W - E
(P 03 Aux.)	2	28	100	W - E

En la tabla II, se muestra los parámetros de las líneas de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT), equidistancia entre electrodos, extensión y profundidad de muestreo, así como también la orientación.



Fig. 2 Ejecución de la ERT, y aplicación de método de radiestesia en la zona de investigación



Fig. 3 Ubicación de perfiles ERT

B. Análisis de Datos

La información de cada tomografía de resistividad eléctrica se introdujo al Software Aidu Ground Wáter (AGW) y RESIXP versión 6.1. Para datos de topografía en Agisoft Metashape; para los datos respecto al sistemas de información geográfica se usó ArcGIS, AutoCAD y Excel, estos nos servirán para la elaboración de perfiles geoelectricos y perfiles litológicos.

Para los estudios hidrogeológicos, se sigue la normativa de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), basada en la Ley de Recursos Hídricos N° 29338 y el Decreto Supremo N° 001-2010-AG, que establece disposiciones para la gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos [13]. En segundo lugar, se considera la Ley General del Ambiente N° 28611, promulgada por el Ministerio del Ambiente (MINAM), que define principios y directrices para la protección, conservación y uso sostenible del medio ambiente, así como las responsabilidades del estado y las entidades públicas y privadas en materia ambiental [14]. Ambas leyes constituyen pilares esenciales del marco legal ambiental en Perú, promoviendo un desarrollo sostenible y la conservación de los recursos naturales del país. En nuestra investigación nos sometimos a tales normativas, ya que usamos una técnica no invasiva libre de modificar el subsuelo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.2 Caracterización geológica del área de investigación

La geología local del caserío La viña está caracterizada por las siguientes formaciones geológicas: La formación Chúlec, Pariatambo (Ki-pt), como se muestra en la figura 4, esta última se encuentran plegadas, clasificadas como tipo chevron (Rumbo e inclinación de flancos N265/53 y N109/73), véase la figura 5, y finalmente se encuentran emplazados los depositos cuaternarios del tipo aluvial (Q-al). Para comprender mejor la distribución de los formaciones y estructuras geológicas se ha elaborado el plano geológico a partir del plano base previo, cartografía, levantamiento topográfico, véase la Figura 6 y 7.



Fig. 4 Unidades geológicas de área de estudio



Fig. 5 Plegamiento tipo chevron en la formación Pariatambo

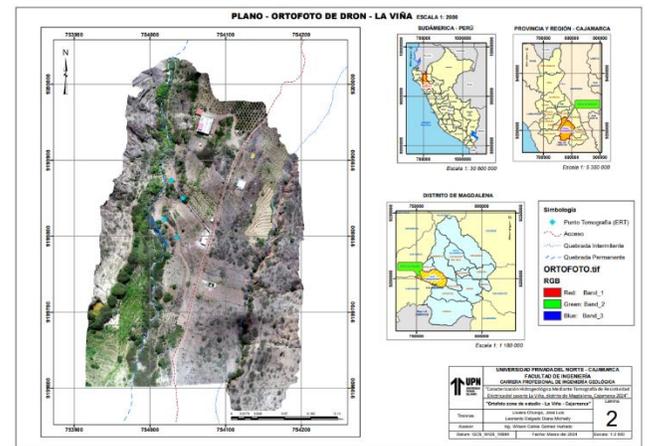


Fig. 6 Ortofotografía y ubicación geográfica del caserío La Viña

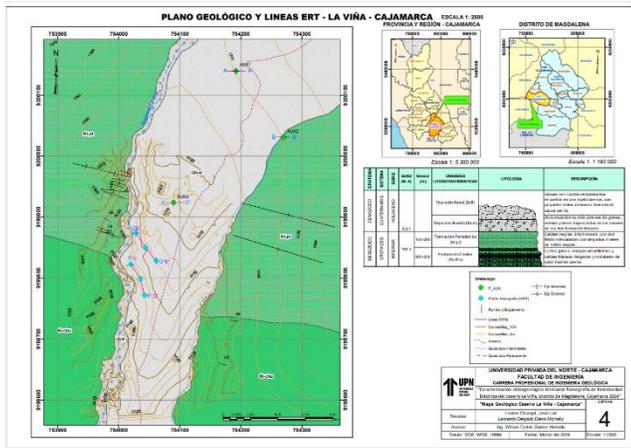


Fig. 7 Plano geológico y líneas ERT del caserío La Viña

3.2 Análisis hidrometeorológico del distrito de Magdalena

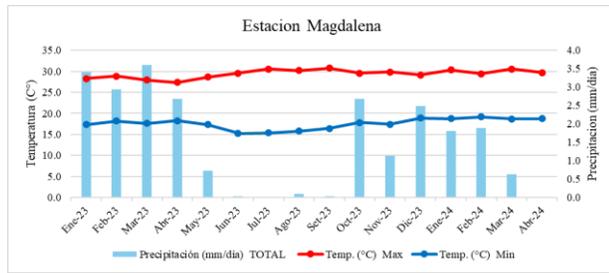


Fig. 8 Datos Hidrometeorológicos distrito de Magdalena

Nota: La figura 4 plasma variaciones de temperatura y la precipitación en el distrito de Magdalena desde enero del 2023 a abril del 2024, siendo las precipitaciones más elevadas en el mes de abril disminuyendo hasta el mes de diciembre en adelante hasta el 2024. Fuente: SENAMHI (2023-2024).

3.3 Análisis de los Tomografías de Resistividad Eléctrica

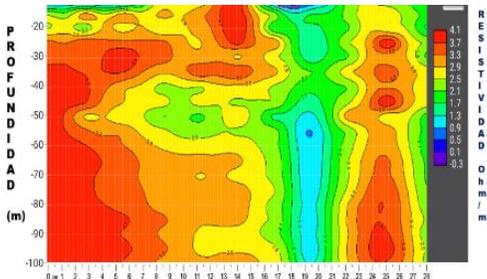


Fig. 9 Valoración grafica del ERT N° 01 (100 metros de profundidad)
Nota. Ancho 28 metros – evaluación 2 metros de equidistancia, estrato de porosidad media entre 5 y 15 metros de profundidad. Véase interpretaciones adicionales en la tabla III.

TABLA III
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS RESISTENCIAS DEL ERT 1 A
100 M DE PROFUNDIDAD

CAPA	DESCRIPCIÓN Y ATRIBUCIONES LITOLÓGICAS	Resistividad (aparentes) ($\Omega.m$)	h (espesor) en m	H (profundidad) en m
1	Suelo arenisco, grava y rocas grandes, zonas con medianas cantidades de agua subterránea	-0.3 - 0.9	7.00	5 - 15
2	Rocas intermedias permeables con cantidades de arcilla	1.3 - 1.7	9.00	16.00

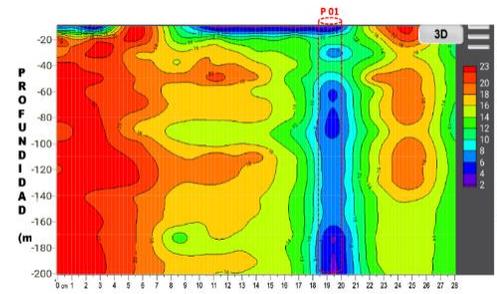


Fig. 10 Valoración grafica del ERT N° 01 (200 metros de profundidad)
Nota. Ancho 28 metros – evaluación 2 m de equidistancia, estrato de porosidad media entre 5 – 15 y debajo de los 170 metros de profundidad. Véase interpretaciones adicionales en la tabla IV.

TABLA IV
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS RESISTENCIAS DEL ERT 1 A
200 M DE PROFUNDIDAD

CAPA N°	DESCRIPCIÓN Y ATRIBUCIONES LITOLÓGICAS	Resistividad (aparentes) ($\Omega.m$)	h (espesor) en m	H (profundidad) en m
1	Suelo arenisco, grava y rocas grandes, zonas con medianas cantidades de agua subterránea	2 - 8	2.50	170
2	Rocas intermedias permeables con cantidades de arcilla	2 - 10	3.50	15 - 55
3	Formación rocosa con suelo arcilloso de baja permeabilidad	12	4.50	20 - 45

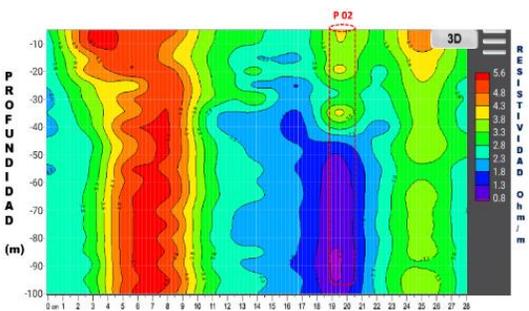


Fig. 11 Valoración grafica del ERT N° 02 (100 metros de profundidad)
Nota. Ancho 28 metros – evaluación 2 m de equidistancia, estrato de porosidad primaria entre 50 y más de 100 metros de profundidad. Véase interpretaciones adicionales en la tabla V.

TABLA V
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS RESISTENCIAS DEL ERT 2 A
100 M DE PROFUNDIDAD.

CAPA N°	DESCRIPCIÓN Y ATRIBUCIONES LITOLÓGICAS	Resistividad (aparentes) ($\Omega.m$)	h (espesor) en m	H (profundidad) en m
1	Formación rocosa con suelo arcilloso de baja permeabilidad	3.3 - 4.3	1.00	0 - 10
2	Rocas intermedias permeables con cantidades de arcilla	0.8 - 2.8	10.00	40 - 42
3	Suelo arenisco, grava y rocas grandes, zonas con medianas cantidades de agua subterránea	0.8 - 2.3	5.00	50 - 100

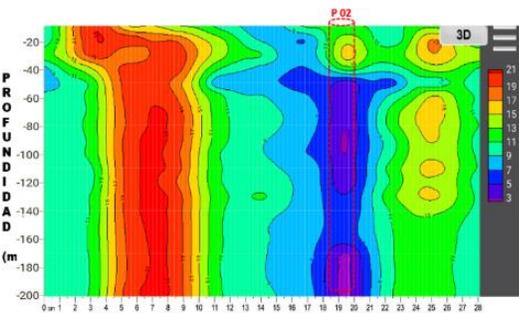


Fig. 12 Valoración grafica del ERT N° 02 (200 metros de profundidad)
Nota. Ancho 28 metros – evaluación 2 m de equidistancia, estrato de porosidad primaria entre 50 - 120 y debajo de 160 metros de profundidad. Véase interpretaciones adicionales en la tabla VI.

TABLA VI
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS RESISTENCIAS DEL ERT 2 A
200 M DE PROFUNDIDAD.

CAPA N°	DESCRIPCIÓN Y ATRIBUCIONES LITOLÓGICAS	Resistividad (aparentes) ($\Omega.m$)	h (espesor) en m	H (profundidad) en m
1	Rocas intermedias permeables con cantidades de arcilla	3 - 11	11.00	40.00
2	Formación rocosa con suelo arcilloso de baja permeabilidad	13 - 17	1.00	25 - 30
3	Suelo arenisco, grava y rocas grandes, zonas con medianas cantidades de agua subterránea	3 - 9	7.5	160

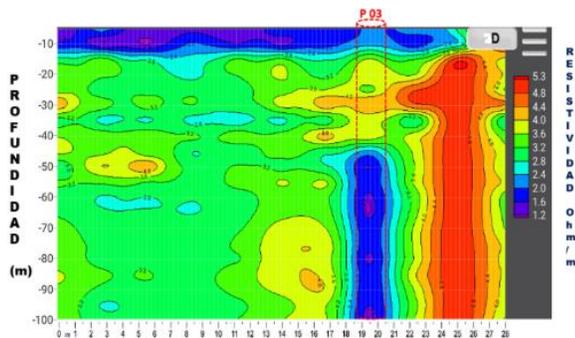


Fig. 13 Valoración grafica del ERT N° 03 (100 metros de profundidad)

Nota. Ancho 28 metros – evaluación 2 m de equidistancia, estrato de porosidad primaria entre 5 – 12 metros y porosidad primaria entre 60 y 95 metros de profundidad. Véase interpretaciones adicionales en la tabla VII.

TABLA VII
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS RESISTENCIAS DEL ERT 3 A
100 M DE PROFUNDIDAD

CAPA N°	DESCRIPCIÓN Y ATRIBUCIONES LITOLÓGICAS	Resistividad (aparentes) ($\Omega.m$)	h (espesor) en m	H (profundidad) en m
1	Suelo arenisco, grava y rocas grandes, zonas con medianas cantidades de agua subterránea	1.2 - 2.4	2.5	60 - 95
2	Rocas intermedias permeables con cantidades de arcilla	1.2 - 2.8	3.5	5 - 12
3	Formación rocosa con suelo arcilloso de baja permeabilidad	3.2 - 4	6.5	12 - 45
4	Formación rocosa de mediana a gran fuerza, no se puede obtener agua en estas zonas	4.4	1.5	25 - 30

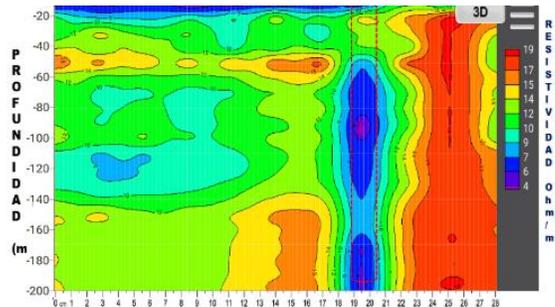


Fig. 14 Valoración grafica del ERT N° 03 (200 metros de profundidad)
Nota. Ancho 28 metros – evaluación 2 m de equidistancia, estrato de porosidad media entre 5 – 12 metros y porosidad primaria entre 95 y 170 metros de profundidad. Véase interpretaciones adicionales en la tabla VIII.

TABLA VIII
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS RESISTENCIAS DEL ERT 3 A
100 M DE PROFUNDIDAD

CAPA N°	DESCRIPCIÓN Y ATRIBUCIONES LITOLÓGICAS	Resistividad (aparentes) ($\Omega.m$)	h (espesor) en m	H (profundidad) en m
1	Suelo arenisco, grava y rocas grandes, zona con pequeñas cantidades de agua subterránea	4 - 10	20	20
2	Formación rocosa con suelo arcilloso de baja permeabilidad	10 - 14	20 - 60	140
3	Rocas permeables con movimiento de agua subterránea explotable	4 - 7	3 - 20	125
4	Roca de alta competencias y baja permeabilidad	14 - 19	7 - 6	180

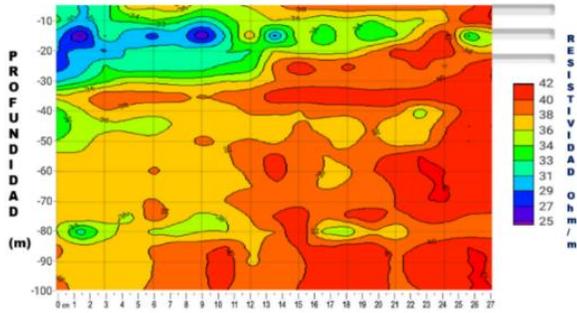


Fig. 15 Valoración grafica del ERT N° 04 (100 metros de profundidad)
 Nota. Ancho 27 metros – evaluación 2 m de equidistancia, estrato de porosidad muy baja entre 10 – 30 metros y el resto es zona impermeable. Véase interpretaciones adicionales en la tabla IX.

TABLA IX
 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS RESISTENCIAS DEL ERT 4 A
 100 M DE PROFUNDIDAD

CAPA N°	DESCRIPCIÓN Y ATRIBUCIONES LITOLÓGICAS	Resistividad (aparentes) ($\Omega.m$)	h (espesor) en m	H (profundidad) en m
1	Suelo arenoso roca mediana y grande zona permeable con medianas filtraciones	31 - 36	10	10
2	Zona de movimiento de agua subterránea en roca permeable, un primer ingreso entre los 10 a 30 m	25 - 31	18	25
3	Zona de roca medianamente impermeable con cantidades de arcillas	33 - 36	5 - 15	50
4	Zona de roca competente de baja permeabilidad, actúa como capa permeable	36 - 42	80	100

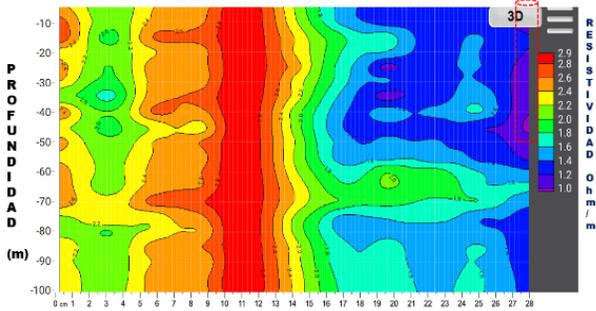


Fig. 16 Valoración grafica del ERT N° 01 Aux. (100 metros de profundidad)

Nota. Medida pie de un reservorio, ancho de 28 metros – evaluación 2 m de equidistancia, estrato poroso con mediano contenido de agua subterránea entre 40 – 50 metros de profundidad. Véase interpretaciones adicionales en la tabla X.

TABLA X
 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS RESISTENCIAS DEL ERT
 AUXILIAR 1 A 100 M DE PROFUNDIDAD

CAPA N°	DESCRIPCIÓN Y ATRIBUCIONES LITOLÓGICAS	Resistividad (aparentes) ($\Omega.m$)	h (espesor) en m	H (profundidad) en m
1	Suelo con roca grande y mediana con contenido de arcilla	1 - 1.6	10	10

2	Zona permeable con gran contenido de agua subterránea	1 - 1.8	11	90
3	Zona de material arcilloso poco permeable	1.8 - 2.2	2 - 3	70
4	Zona sin agua subterránea, conformada por roca impermeable	2.4 - 2.9	1.5 - 11	90

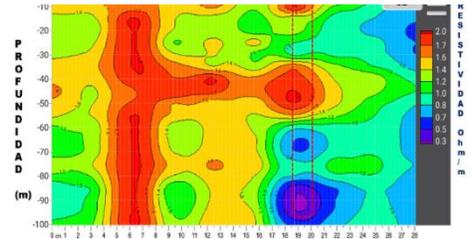


Fig. 17 Valoración grafica del ERT N° 02 Aux. (100 metros de profundidad)

Nota. Medida cerca edificación, ancho de 28 metros – evaluación de 2 m de equidistancia, estrato poroso con mediano contenido de agua subterránea entre 85 – 95 metros de profundidad. véase interpretaciones adicionales en la tabla XI.

TABLA XI
 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS RESISTENCIAS DEL ERT
 AUXILIAR 2 A 100M DE PROFUNDIDAD

CAPA N°	DESCRIPCIÓN Y ATRIBUCIONES LITOLÓGICAS	Resistividad (aparentes) ($\Omega.m$)	h (espesor) en m	H (profundidad) en m
1	Suelo con roca grande y mediana	1.4 - 1.7	15	15.00
2	Zona de roca impermeable	1.6 - 2	4 - 5	90.00
3	Suelo con material seco arcillas compactas y rocas grandes	1 - 1.4	4	80.00
4	Zona de roca altamente permeable con considerable agua subterránea	0.3 - 0.8	6	18 -60

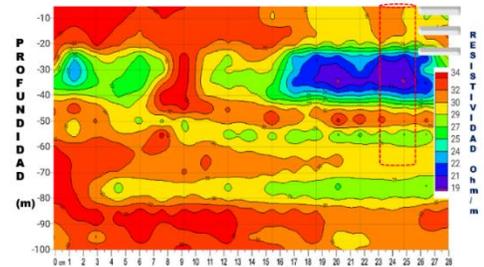


Fig. 18 Valoración grafica del ERT N° 02 Aux. (100 metros de profundidad)

Nota. Medida pasando la quebrada, ancho de 28 metros – evaluación de 2 m de equidistancia, estrato poroso con escasa agua subterránea entre 30 y 40 metros de profundidad. Véase interpretaciones adicionales en la tabla XII.

TABLA XII
 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS RESISTENCIAS DEL ERT
 AUXILIAR 3 A 100M DE PROFUNDIDAD

CAPA N°	DESCRIPCIÓN Y ATRIBUCIONES LITOLÓGICAS	Resistividad (aparentes) ($\Omega.m$)	h (espesor) en m	H (profundidad) en m
1	Suelo con roca grande y mediana con contenido de arcilla	1 - 1.6	10	10

1	Suelo con roca grande y mediana	29 - 30	10	10
2	Zona de roca poco permeable de alta resistividad	29 - 34	20 - 28	90
3	Zona rocosa con presencia de aguas subterráneas	19 - 24	10	20 - 40
4	Zona material impermeable con contenidos de arcillas	24 - 29	7-14	20 -70

3.2 Secciones geológicas a partir de ERT a profundidades de 100m y 200m

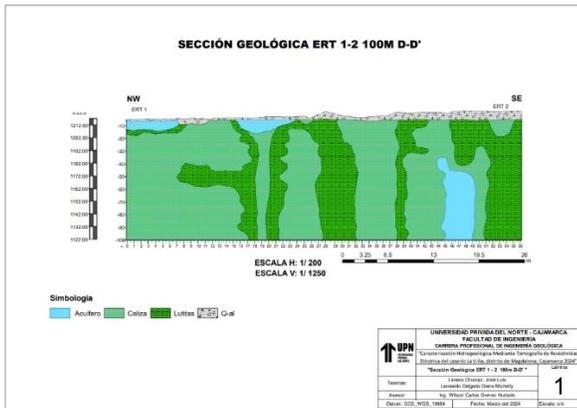


Fig. 19 Perfil geológico a partir de las valoraciones ERT 1 y 2 a 100m de profundidad

Nota. Caracterización de unidades litológicas de la sección D – D’ con dirección NW-SE, conformada por los ERT 1 y 2, evaluada a 100, 00 metros de profundidad y 56, 00 metros de longitud. Se hallaron 3 fuentes a aguas subterráneas, dos están a profundidades de 15, 00 m, emplazadas en depósitos cuaternarios aluviales (gravas y arenas) y otra a partir de los 40, 00 m aproximadamente alargándose a mayores profundidades de hasta 100, 00 m en rocas calizas de alta permeabilidad, pertenecientes a la formación pariatambo (Ki-pt).

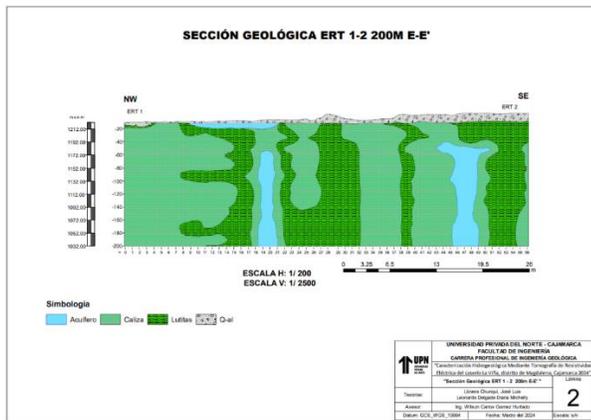


Fig. 20 Perfil geológico a partir de las valoraciones ERT 1 y 2 a 200m de profundidad

Nota. Caracterización de unidades litológicas de la sección E – E’ con dirección NW-SE, conformada por los ERT 1 y 2, evaluada a 200, 00 metros de profundidad y 56, 00 metros de longitud. Se hallaron 3 fuentes a aguas subterráneas, la primera más somera a 10, 00 m de profundidad aproximadamente emplazada en depósitos cuaternarios (gravas y arenas), dos están a profundidades de entre 45, 00 m y 60, 00 m aproximadamente

alargándose a mayores profundidades de hasta 200, 00 m, alojadas en calizas de alta porosidad y permeabilidad pertenecientes a la formación pariatambo (Ki-pt).

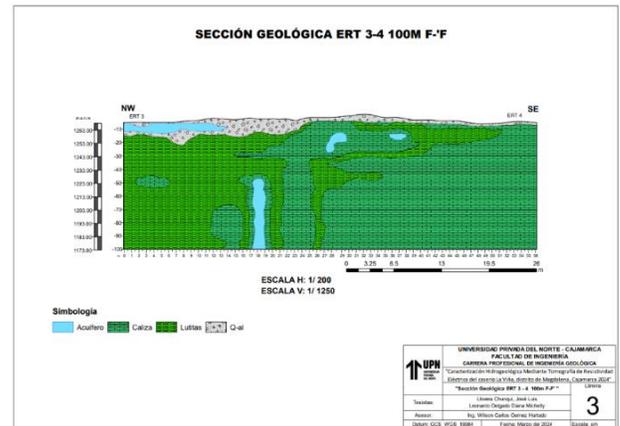


Fig. 21 Perfil geológico a partir de las valoraciones ERT 3 y 4 a 100m de profundidad

Nota. Caracterización de unidades litológicas de la sección F – F’ con dirección NW-SE, conformada por los ERT 3 y 4, evaluada a 100, 00 metros de profundidad y 56, 00 metros de longitud. Se hallaron 2 fuentes a aguas subterráneas, la primera es somera a profundidades de 10, 00 a 15, 00 m, emplazadas en depósitos cuaternarios aluviales (gravas y arenas) y otra a partir de los 50, 00 m aproximadamente alargándose a mayores profundidades de hasta 100, 00 m en rocas calizas de alta permeabilidad, pertenecientes a la formación Chúlec (Ki-chu).

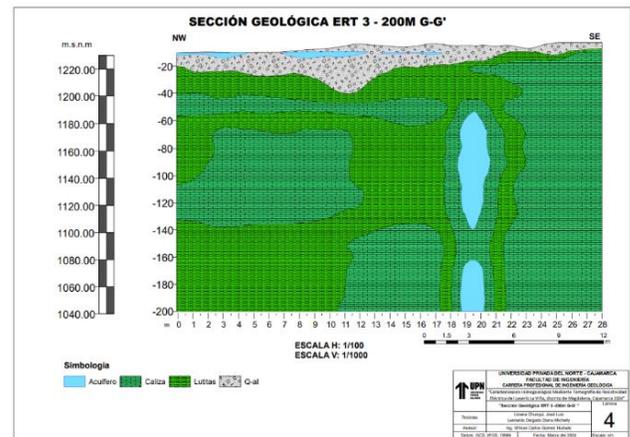


Fig. 22 Perfil geológico a partir de la valoración del ERT 3 a 200m de profundidad

Nota. Caracterización de unidades litológicas de la sección G – G’ con dirección NW-SE, interpretada de la ERT 3 evaluada a 200, 00 metros de profundidad y 28, 00 metros de longitud. Se hallaron 3 fuentes a aguas subterráneas, la primera más somera de menor caudal alrededor de a 10, 00 m de profundidad, emplazada en depósitos cuaternarios (gravas y arenas), la segunda permanece a profundidades de entre 50, 00 m y 140, 00 de profundidad; por último, se tiene otra fuente alojada aproximadamente a 165, 00 m de profundidad, en calizas permeables pertenecientes a la formación Chúlec (Ki-chu).

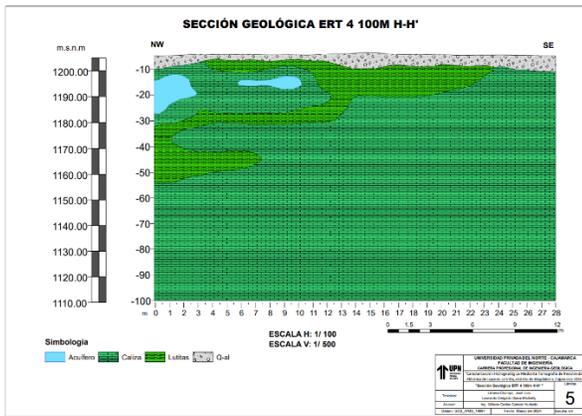


Fig. 23 Perfil geológico a partir de la valoración del ERT 4 a 100m de profundidad

Nota. Caracterización de unidades litológicas de la sección H – H' con dirección NW-SE, a partir del ERT 4, evaluada a 100, 00 metros de profundidad y 28, 00 metros de longitud. Se hallaron 2 fuentes a aguas subterráneas, la primera de mayor magnitud que está a partir de los 10, 00 a 28, 00 m, emplazada en calizas permeables y otra más reducida a partir de los 15, 00 hasta 20, 00 m en el mismo material geológico pertenecientes a la formación Chúlec (Ki-chu). Adicionalmente esta sección delimita como una capa permeable para las aguas subterráneas encontradas al NE.

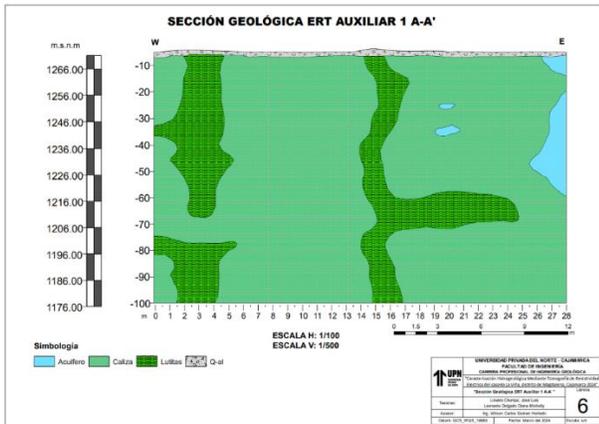


Fig. 24 Perfil geológico a partir de la valoración del ERT auxiliar 1 a 100m de profundidad

Nota. Caracterización de unidades litológicas de la sección A – A' con dirección W-E, a partir del ERT auxiliar 1, evaluada a 100, 00 metros de profundidad y 28, 00 metros de longitud. Se halló una gran fuente de aguas subterráneas, que está a partir de los 10, 00 a 60, 00 m, emplazada en calizas pertenecientes a la formación Pariatambo (Ki-pt).

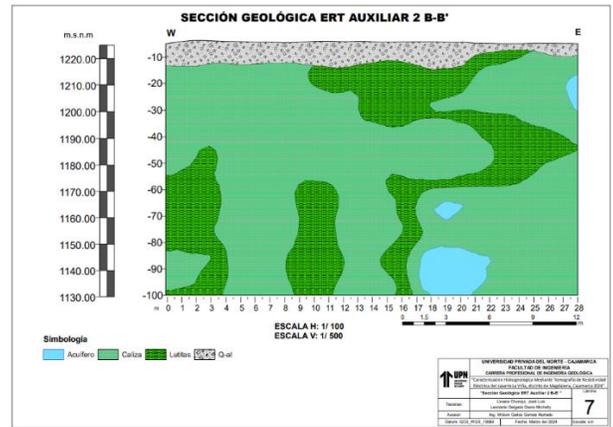


Fig. 25 Perfil geológico a partir de la valoración del ERT auxiliar 2 a 100m de profundidad

Nota. Caracterización de unidades litológicas de la sección B – B' con dirección W-E, a partir del ERT auxiliar 2, evaluada a 100, 00 metros de profundidad y 28, 00 metros de longitud. Se halló una fuente de agua subterránea, que está a partir de los 80, 00 m aproximadamente, emplazada en calizas pertenecientes a la formación Pariatambo (Ki-pt).

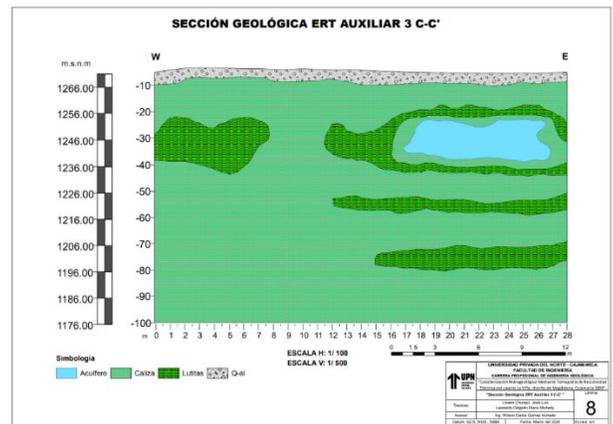


Fig. 26 Perfil geológico a partir de la valoración del ERT auxiliar 3 a 100m de profundidad

Nota. Caracterización de unidades litológicas de la sección C – C' con dirección W-E, a partir del ERT auxiliar 3, evaluada a 100, 00 m de profundidad y 28, 00 m de longitud. Se halló una fuente de agua subterránea, que está a partir de los 22, 00 hasta los 40, 00 m aproximadamente, emplazada en calizas pertenecientes a la formación Pariatambo (Ki-pt).

IV. Conclusiones

La Viña, a escala local presenta formaciones geológicas con dirección NW/SE, pertenecientes al cretáceo inferior como la formación Chúlec, litológicamente está compuesta por calizas fosilíferas gris parduzcas, la formación Pariatambo representa aproximadamente más del 50% del área de interés; compuesta por calizas bituminosas y alteración de lutitas de color negruzco, del mismo modo ha sufrido plegamientos a causa de las fuerzas de convergencia y divergencia ocurridas en un cierto tiempo geológico, formando plegamientos tipo chevron de flancos semirectos con dirección NW/SE – NE/SW y ángulos de buzamiento que varían de 60° a 70°. La formación Yumagual se distingue por tener estratos de calizas nodulares de tonalidad gris parduzca, margas e intercalación de Lutitas. Además, se logró

identificar depósitos cuaternarios aluviales, emplazado sobre las formaciones mencionadas, consta de material poco consolidado con clastos de origen volcánico, específicamente andesitas de textura porfírica, pertenecientes a la formación San Pablo. Tenemos la certeza que estos materiales son ideales para la deposición de agua subterráneas.

El análisis detallado de las características hidrogeológicas del caserío La Viña ha mostrado una compleja interacción entre formaciones sedimentarias y volcánicas que influye significativamente en la recarga y el almacenamiento de los acuíferos locales. Los suelos, compuestos principalmente por lutitas, calizas y depósitos aluviales, presentan una gran variabilidad en cuanto a porosidad y conductividad hidráulica. De esta manera hay que tener en cuenta que las lutitas presentan una porosidad que varía entre 2% y 10-5, con una conductividad eléctrica entre 10-10 y 10-6 m/día, mientras que las calizas muestran porosidades de 5% a 50% y conductividades hidráulicas entre 0.1 y 107 m/día [15]. Además, afecta en la disponibilidad y calidad del agua subterránea. Por otra parte, las precipitaciones estacionales son la principal fuente de recarga hídrica, con registros que van desde 0.2 hasta 3.6 mm/día esto según el SENAMHI (2024). Es así, que este estudio destaca la importancia de una gestión integral y adaptable de los recursos hídricos que tenga en cuenta tanto las características geológicas como las condiciones climáticas locales. Así como también el comprender detalladamente las características hidrogeológicas es fundamental para desarrollar estrategias efectivas de explotación y conservación de los recursos hídricos en el caserío La Viña. La recarga de los acuíferos es proveniente de las laderas aguas arriba con pendientes que varían de entre 36° a 65° de inclinación, también se presentan 2 quebradas, la primera ubicada al NW, con dirección N280 y la segunda al SE con dirección N275.

Se definieron 3 unidades litoestratigráficas, a partir de cada ERT, el primer estrato como roca de baja porosidad y altamente resistiva que van de 1,6 Ω .m a 42,00 Ω .m con espesores de 1, 00 m a 60, 00 m y profundidades de 45, 00 m a 200, 00m. El segundo estrato presenta resistividades de 1, 12 Ω .m a 36 Ω .m con espesores de 3, 5 m a 60 m y profundidad de 10, 00 a 140, 00 m litológicamente consta de rocas de fuerza mayor con suelos arcillosos de baja permeabilidad. El tercer estrato posee unas resistividades de -0, 3 Ω .m a 29 Ω .m, con espesores de 2, 5 m a 20, 00 m, de profundidad que va de 10, 00 m a 160, 00 m; litológicamente están compuestos por formación de roca porosa y saturada de agua subterránea.

Con referente al análisis, los perfiles ERT N° 01 Y N° 03 presentan un estrato de baja porosidad parcialmente saturado entre 5 y 15 metros de profundidad. La baja porosidad parcial indica que estos no son ideales para almacenar grandes cantidades de agua, aunque pueden contener agua en poros más finos. En cuanto a los perfiles N° 02, N° 03 - N° 02 Aux, N° 01 Aux; se observa un estrato de porosidad primaria saturado entre 50 y 120 metros de profundidad. Además, se identificó un segundo estrato saturado por debajo de los 170 metros de profundidad. La porosidad primaria saturada sugiere la existencia de un acuífero productivo a estas profundidades, lo cual es significativo para la extracción de agua subterránea. De los perfiles ERT N° 04 - N° 03 Aux; mostraron un estrato impermeable de muy baja porosidad con resistividades muy altas. Es así como las resistividades y baja porosidad indican que estos son esencialmente impermeables, descartando la posibilidad de encontrar agua subterránea en estas secciones. Ante ello los resultados de la presente investigación se han estimado con un margen de confianza del 93%, es así como

este alto nivel de confianza asegura que los datos y las interpretaciones realizadas son sólidos y pueden ser utilizados como base fiable para la toma de decisiones por parte de los interesados.

Agradecimiento

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Privada del Norte por el respaldo académico y las facilidades brindadas durante el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- [1] Organización Mundial de La Salud. (2023, sep 13). Agua para Consumo Humano. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- [2] J. Samaniego. "La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe Paradojas y desafíos del desarrollo sostenible". In *ECLAC*. 2015.
- [3] J. W. Borchers, V. K. Grabert, M. Carpenter, B. Dalgish, and D. Cannon, "Land Subsidence from Groundwater Use in California," *California Water Foundation*, vol. 4, no. April 2014.
- [4] L. T. A., "Geophysical Investigation For Groundwater Using Electrical Resistivity Method - A Case Study Of Annunciation Grammar School, Ikere Lga, Ekiti State, South-Western Nigeria," *IOSR Journal of Applied Physics*, vol. 2, no. 1, 2012, doi: 10.9790/4861-0210106.
- [5] I. Herms *et al.*, "Identification of natural and anthropogenic geochemical processes determining the groundwater quality in port del comte high mountain karst aquifer (Se, pyrenees)," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 20, 2021, doi: 10.3390/w13202891.
- [6] A. Arispe. (2023, marzo 23). UNICEF: En el mundo, más de 1.000 niños menores de cinco años mueren cada día por enfermedades relacionadas con servicios inadecuados de agua. [En línea]. Available: <https://www.un.org/en/sdgmideazone/programme>
- [7] M. Gutiérrez, "La multidimensionalidad del agua y el saneamiento en el Desarrollo Humano", *Las Caras del Agua*, 2023. [En Línea]. Available: <https://www.gob.pe/es/n/781301>
- [8] P. Abad, et al., "Situación de la Población Peruana, 2024. Una mirada de la diversidad étnica", julio 2024. [En Línea]. Available: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6616587/5751291-situacion-de-la-poblacion-peruana-2024-una-mirada-de-la-diversidad-etnica.pdf?v=1720728622>
- [9] P. J. Abad, et al., "Acceso a los Servicios Básicos en el Perú 2023", INEI, 2023. [En Línea]. Available: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1970/index.htm
- [10] E. Guevara, "Ética y Educación Ambiental", *"Agua y más" – Publicaciones. Autoridad Nacional del Agua*, vol 2, pp 32-39, agosto 2017. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/2617>
- [11] Autoridad Nacional del Agua, "Ley de Recursos Hídricos LEY N° 29338", MINAGRI, mar. 2019. [En línea]. Available: <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/228/ANA0000044.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [12] M.H. Loke, "Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. A practical Guide to 2-D and 3-D Surveys", *Scirp.org*, 2000.
- [13] Autoridad Nacional del Agua, "Glosario de Términos de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos y su Reglamento aprobado mediante Decreto Supremo N° 001-2010-AG", 2010.
- [14] Ministerio de Ambiente, "Ley General del Ambiente: Ley No 28611", 2005.
- [15] L. Sanders, "A manual of Field Hydrogeology". *Prentice-Hall*, 381 pp, 1998.