



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



**“ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA EXPLORACIÓN DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS MEDIANTE SONDEOS ELÉCTRICOS
VERTICALES EN EL CENTRO POBLADO DE MARCUYO Y LA
COMUNIDAD CAMPESINA CHOJÑACHOJÑANI, DISTRITO DE
PILCUYO, PROVINCIA DE EL COLLAO, REGIÓN PUNO”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. MAGALI ANTONIA CHURATA QUISPE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

A mis padres Agustín y Julia por el apoyo incondicional fundamentalmente en esta etapa de mi formación profesional; por la guía e instrucción constante en mi vida.

Magali Churata



AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida y salud necesaria para permitirme cumplir con las metas y objetivos propuestos a lo largo de mi vida.

A la Universidad Nacional del Altiplano y cada uno de los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, por brindarme los conocimientos que impartieron en los respectivos salones de clase y ayudaron a mi formación académica como ingeniero geólogo.

A mi asesor Dr. Rolando Apaza Campos por la orientación y ayuda brindada a lo largo de la realización de mi tesis.

A los miembros del jurado por sus respectivas recomendaciones.

Magali Churata



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 10

ABSTRACT..... 11

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 12

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 13

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... 13

1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN 14

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES 15

2.2. MARCO TEÓRICO 26

 2.2.1. Propiedades Eléctricas de las Rocas..... 28

 2.2.2. Dispositivos y arreglos electrónicos..... 32

2.3. MARCO CONCEPTUAL 36

2.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 41

 2.4.1. Enfoque de la investigación..... 41

 2.4.2. Diseño de la investigación..... 42

 2.4.3. Tipo de la investigación..... 43

 2.4.4. Población 43

 2.4.5. Muestra..... 43



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. INSTRUMENTO GEOFÍSICO	44
3.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	46

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	48
4.2. ACCESIBILIDAD.....	49
4.3. CLIMA Y METEOROLOGÍA.....	49
4.4. TOPOGRAFÍA Y FISIOGRAFÍA	51
4.5. HIDROGRAFÍA	52
4.6. MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO	54
4.6.1. Geomorfología.....	54
4.6.2. Estratigrafía Regional	59
4.6.3. Geología Local	60

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS EN CAMPO.....	66
VI. CONCLUSIONES.....	80
VII. RECOMENDACIONES	81
VII. REFERENCIAS.....	82
ANEXOS.....	87

Línea de Investigación: Geología Regional

Tema de Investigación: Prospección Geofísica

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 06 de setiembre de 2022



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Métodos geoelectricos de prospección de agua subterránea.....	27
Figura 2: Circuito de emisión y recepción.....	27
Figura 3: Investigación a diferentes distancias y profundidades.....	28
Figura 4: Unidad de resistividad o resistencia específica.....	29
Figura 5: Resistividades de rocas ígneas y metamórficas.....	31
Figura 6: Resistividades de rocas sedimentarias.....	31
Figura 7: Variación de la resistividad de las rocas con agua.....	32
Figura 8: Dispositivo Schlumberger.....	33
Figura 9: Dispositivo Wenner.....	33
Figura 10: Dispositivo Polo-Dipolo.....	34
Figura 11: Dispositivo Dipolo-Dipolo.....	34
Figura 12: Dispositivo Geoelectrico sobre un terreno homogéneo e isótropo..	35
Figura 13: Curvas de resistividad verdadera para diversos cortes geoelectricos.....	36
Figura 14: Acuíferos según su textura	37
Figura 15: Ley de Darcy.....	39
Figura 16: Equipo utilizado para los SEV en la zona de estudio.....	45
Figura 17: Georesistivimetro utilizado para los SEV en la zona de estudio.....	46
Figura 18: Ubicación del C.P. de Marcuyo y C.C. de Chojñachojñani.....	48
Figura 19: Temperatura máxima y mínima promedio.....	50
Figura 20: Humedad máxima y mínima promedio.....	50
Figura 21: Niveles de comodidad de la humedad.....	51
Figura 22: Topografía plana de la zona de estudio.....	52
Figura 23: Río Zapatilla.....	53
Figura 24: Zona de estudio cerca del lago.....	54



Figura 25: Zona de altiplanicie sedimentaria.....	55
Figura 26: Zona de colina y planicie en la zona de estudio.....	56
Figura 27: Zona de colina estructural en roca y vertiente.....	57
Figura 28: Zona de pie de monte aluvial.	58
Figura 29: Zona de área rural.....	59
Figura 30: Zona de sembrío.....	59
Figura 31: Afloramiento rocoso del Grupo Puno y Formación Ayabacas.	61
Figura 32: Arenisca y caliza de la zona de estudio.....	62
Figura 33: Zona de contacto del Grupo Puno.....	63
Figura 34: Alternancia de limos, arcillas y conglomerados.....	65
Figura 35: Columna estratigráfica de la zona de estudio.....	65
Figura 36: Realizando los SEV en la zona de estudio.....	67
Figura 37: Sección de SEV 1 y 2 en el C. P. Marcuyo.....	69
Figura 38: Sección de SEV 3 y 4 en el C. P. Marcuyo.....	70
Figura 39: Sección de SEV 1, 2 y 3 en la C. C. Chojñachojñani.....	72
Figura 40: Sección de SEV 4, 5 y 6 en la C. C. Chojñachojñani.....	73
Figura 41: Diseño técnico preliminar de perforación de pozo exploratorio.....	75



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Coordenadas de Ubicación	48
Tabla 2	Acceso a la zona de estudio	49
Tabla 3	Ubicación de los SEV en el C.P. Marcuyo	66
Tabla 4	Ubicación de los SEV en el C.C. Chojñachojñani.....	66
Tabla 5	Valores de resistividad y espesores geoelectricos en el C.P. Marcuyo	68
Tabla 6	Valores de resistividad y espesores geoelectricos en la C.C. Chojñachojñani .	68
Tabla 7	Coordenadas de ubicación de perforación del pozo	74



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- SEV : Sondaje Eléctrico Vertical
- CE : Calicatas Eléctricas
- PE : Potencial Espontáneo
- PI : Polarización Inducida
- UTM : Universal Transverse Mercator (Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator)
- WGS : World Geodetic System (Sistema geodésica de coordenadas geográficas)
- GPS : Global Positioning System (Sistema de posicionamiento global)
- NI : No Identificado
- CRV : Curva de Resistividades Verdaderas
- C.P. : Centro Poblado
- C.C. : Comunidad Campesina



RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realiza en el centro poblado de Marcuyo y la comunidad campesina Chojñachojñani en el año 2019. El objetivo general es reconocer las formaciones asociadas a las aguas subterráneas a través del estudio geofísico mediante sondeos eléctricos verticales en el centro poblado de Marcuyo y la comunidad campesina Chojñachojñani. Los objetivos específicos son: Determinar los rangos de resistividades de la zona de estudio utilizando el método geofísico de sondeos eléctricos verticales y determinar el espesor de las unidades litoestratigráficas en la zona de estudio mediante la utilización del método de sondeo eléctrico vertical. La presente investigación a desarrollarse se considera cualitativa, no experimental y transversal exploratorio. Se concluye que se distinguen 3 estratos definidos E_0 , E_1 y E_2 con las siguientes características: El estrato E_0 que corresponde a suelos superficiales de sedimentos limo arcillosos con arenas finas. El estrato E_1 que indica la ocurrencia de sedimentos de capas de arena gruesa y grava. El estrato E_2 vendría a conformar el nivel de fondo compuesto de sedimentos estratificados de limos y arcillas con intercalación de capas de arena gruesa.

Palabras Clave: Agua subterránea, estratificación, resistividad, sondeo eléctrico vertical, subsuelo.



ABSTRACT

The present research work is carried out in the town of Marcuyo and the Chojñachojñani peasant community in 2019. The general objective is to recognize the formations associated with groundwater through a geophysical study using vertical electrical surveys in the town of Marcuyo and the Chojñachojñani peasant community. The specific objectives are: To determine the resistivity ranges of the study área using the vertical electrical sounding geophysical method and to determine the thickness of the lithostratigraphic units in the study area using the vertical electrical sounding method. The present investigation to be developed is considered qualitative, non-experimental and transversal exploratory. It is concluded that there are 3 defined strata E_0 , E_1 and E_2 with the following characteristics: Stratum E_0 which corresponds to superficial soils of clayey silt sediments with fine sands. Stratum E_1 indicating the occurrence of coarse sand and gravel layered sediments. Stratum E_2 would come to form the bottom level composed off stratified silt and clay sediments intercalated with layers of coarse sand.

Keywords: Resistivity, stratification, subsoil, underground water, vertical electrical sounding.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El sondaje eléctrico vertical (SEV) es aplicado en investigaciones geotécnicas, ya que son de bajo costo y rápidos de realizar, no alteran la morfología de las zonas de estudio y respetan el medio ambiente; es por ello que estos estudios son aplicados con la finalidad de obtener información detallada del subsuelo. (Toledo, 2015).

El SEV es utilizado por su eficiencia en la localización de estructuras y capas acuíferas, también nos permite determinar la ubicación y profundidad de realizar perforaciones para extracción de agua, haciendo una estimación de la localización de los acuíferos por medio del estudio en superficie del comportamiento de corrientes eléctricas inyectadas en el subsuelo. (Huamán, 2017).

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, la escasez de agua es una problemática mundial; y la demanda de agua por las actividades realizadas es mucho mayor, por lo que es necesario realizar dicho estudio y plantear la posibilidad de la explotación de aguas subterráneas para el beneficio de la población que habita en la zona de estudio.

De esta manera, plantear más adelante proyectos de saneamiento básico y de riego tecnificado por las actividades productivas realizadas; permitiendo la optimización de los recursos escasos, en este caso como es el agua. Debido a la necesidad del recurso hídrico, por existir terrenos para la ampliación de la frontera agrícola y otros.



El costo para la aplicación de este método tiende a ser relativamente bajo en comparación con los demás métodos como la perforación diamantina, excavación de calicatas, etcétera; las cuales requiere de una enorme inversión.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

PROBLEMA GENERAL

¿De qué manera los sondeos eléctricos verticales pueden contribuir en el reconocimiento de las formaciones asociadas a las aguas subterráneas en el centro poblado de Marcuyo y la comunidad campesina de Chojñachojñani?

PROBLEMAS ESPECÍFICOS

¿Cuáles son los rangos de resistividad de la zona de estudio utilizando el método geofísico de sondeos eléctricos verticales?

¿Cuál es el espesor de las unidades litoestratigráficas en la zona de estudio utilizando el método de sondeo eléctrico vertical?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVO GENERAL

Reconocer las formaciones asociadas a las aguas subterráneas a través del estudio geofísico mediante sondeos eléctricos verticales en el centro poblado de Marcuyo y la comunidad campesina de Chojñachojñani.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar los rangos de resistividad de la zona de estudio utilizando el método geofísico de sondeos eléctricos verticales.



Determinar el espesor de las unidades litoestratigráficas en la zona de estudio mediante la utilización del método de sondeo eléctrico vertical.

1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

HIPÓTESIS GENERAL

El método de sondeo eléctrico vertical (SEV), contribuirá en el reconocimiento de las formaciones asociadas a aguas subterráneas en el centro poblado de Marcuyo y la comunidad campesina de Chojñachojñani.

HIPÓTESIS ESPECÍFICOS

Los rangos de resistividad nos permitirán identificar los estratos húmedos favorables en la zona de estudio.

El espesor de los estratos del suelo nos ayudará a ubicar el acuífero y el pozo tubular a realizarse.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

Internacionales

Según Subsuelo3D (2016) (Bogotá – Colombia) en su informe titulado “Estudio de geoelectrónica para prospección y exploración de agua subterránea en la cabecera municipal de Jerusalén – Departamento de Cundinamarca” señala que existe un potencial para la producción de agua subterránea determinado por dos acuíferos que fueron identificados en este estudio: El Acuífero San Juan de Río Seco y el Acuífero Hoyón; ambas unidades cenozoicas con niveles importantes de arenas que pueden almacenar agua subterránea. El área se caracteriza por su complejidad tectónica, debido a que corresponde a la parte final del Sinclinal de Guaduas y el despegue de la Falla de Guataquí. La presencia de numerosas fallas en superficie, refleja la segmentación que se esperaría en el subsuelo. Este alto grado de fallamiento podría significar una continuidad limitada de los acuíferos. El efecto del fallamiento es notable en el área de interés, conocida como el predio El Cuadro. En este estudio se determinó una falla inversa que hace que la Formación Hoyón (arenas) se superponga sobre la Formación Santa Teresa (arcillas). Esta falla fue interpretada a partir de la diferencia de las curvas de resistividad de los SEVs 1 y 2 con respecto al SEV-3, así como en la Tomografía Eléctrica 3. Esta falla podría limitar la extensión del acuífero y últimamente el potencial hidrogeológico del predio de interés. Los depósitos cuaternarios no son relevantes a la hora de servir como posibles acuíferos. Estos depósitos rellenan la paleotopografía generada por el juego de fallas que se encuentran entre las quebradas Acuatá y La Limba. Por esta razón los depósitos



cuaternarios son variables tanto en litología como en espesor, por lo cual su potencial hidrogeológico estaría limitado a los depósitos más gruesos (arenas y conglomerados) de la zona de estudio.

Según López (2015) (México) en su tesis titulado “Exploración geofísica para la prospección hidrogeológica del sistema Pool Tunich Solidaridad, Quintana Roo, México” señala que los sondeos eléctricos verticales son útiles para la detección de la profundidad de la interfase salina y el nivel freático en zonas kársticas costeras. Indica que es necesario verificar siempre la información obtenida por medio de los SEV con perfiles de la geología del lugar y métodos directos (perfiles de conductividad eléctrica en cenotes, perforación de pozos, espeleología, etc.) con los que se corroboren los resultados obtenidos por los métodos geofísicos. Para el análisis de sistemas kársticos costeros se sugiere aplicar el concepto de volumen elemental representativo con el fin de obtener el volumen mínimo necesario que sea representativo de las propiedades hidrogeológicas del acuífero a estudiar, y de esta manera poder incluir las heterogeneidades como un todo. Es posible detectar cavernas con este tipo de métodos (sondeos eléctricos verticales) aunque se recomienda utilizar un método en 2D y 3D si ese fuese el objetivo.

Según Auge (2008) (Buenos Aires – Argentina) en su artículo titulado “Métodos Geoeléctricos para la prospección de Agua Subterránea” señala que algunos métodos geofísicos de prospección resultan de gran utilidad para descifrar el comportamiento del agua subterránea. Entre ellos, los de uso más generalizados son los eléctricos o geoeléctricos y en particular los sondeos eléctricos verticales (SEV) y las calicatas eléctricas (CE). En los últimos tiempos se ha incorporado el método de la imagen o tomografía eléctrica, que emplea 20 o más electrodos, unidos con un cable “inteligente”, que permite, a través de un software, modificar la disposición y el distanciamiento entre



electrodos, sin necesidad de moverlos. Esto permite la medición de una cantidad mucho mayor de resistividades por unidad de tiempo, que los logrados con los SEV. Los métodos basados en el potencial espontáneo (PE) y en la polarización inducida (PI) poseen menor definición hidrogeológica y su utilidad óptima se da en la exploración de yacimientos metalíferos. Cualquiera sea el método geofísico de prospección empleado, para que información y resultados interpretables, debe existir un buen contraste en la propiedad del subsuelo investigada (resistividad, elasticidad, magnetismo, densidad). El conocimiento previo sobre el comportamiento geológico e hidrogeológico del subsuelo, aunque sea de carácter preliminar a través de un modelo de tipo conceptual, constituye un elemento fundamental para comprender con mayor precisión los resultados derivados del empleo de métodos geofísicos de exploración. En el caso de los métodos geoelectricos, los SEV brindan buena definición cuando existen contrastes apreciables de la resistividad en profundidad. Al respecto resultan de gran utilidad para identificar la interfase agua dulce – salada en acuíferos costeros o continentales. De igual forma para ubicar el contacto entre el aluvio y el basamento, constituido por rocas cristalinas. Inclusive pueden lograrse buenos resultados con los SEV en la ubicación de paleocauces labrados en sedimentos pelíticos. A pesar de que existe una creencia generalizada de que los SEV son útiles para establecer la posición de la superficie freática, la realidad muestra que no es así, fundamentalmente debido a la variación en el contenido de agua que caracteriza a la zona subsaturada. Las calicatas eléctricas (CE) se emplean para detectar cambios naturales de facies litológicas o artificiales de salinidad, como las plumas de contaminación generadas por los basurales. Los mejores resultados de la prospección geoelectrica se logran con la aplicación conjunta de SEV y CE.

Según el Instituto Geológico y Minero de España (2005) (Tres Cantos – España) en su informe titulado “Tomografía Geoelectrica: Desarrollo para la caracterización de



acuíferos” señala que la resistividad de las rocas está relacionada con la porosidad y contenido en agua, por lo que es un parámetro de gran utilidad para la determinación de la geometría de los acuíferos, y para la evaluación de la calidad de las aguas. Existen muchas formas de explorar geoelectricamente el subsuelo, siendo las de mayor resolución las denominadas técnicas tomográficas, en las que los dispositivos de medición y el proceso de datos facilita la obtención de una imagen o sección de la variación de la resistividad con gran continuidad vertical y lateral. Esta metodología precisa aun de desarrollo a fin de optimizar la toma de datos en campo, su tratamiento e interpretación. Por otra parte, la utilización de métodos de corriente continua, o de métodos electromagnéticos y magnetotelúricos para la obtención de las imágenes de resistividad del subsuelo, es necesario llevar a cabo trabajos de investigación para optimizar la definición de los límites de aplicación de cada tipo de variación eléctrica del terreno, así como para su mejor integración en la resolución de temas hidrogeofísicos en los que sea necesario resolver cuestiones tanto superficiales como a mayor profundidad.

Según Solana (2014) en su proyecto titulado “Comparación de técnicas geofísicas para determinación de contaminación de suelos agrícolas” señala que la utilidad de las técnicas geofísicas eléctricas está limitados frente a variaciones laterales bruscas por lo que las técnicas tomográficas presentan una mayor caracterización en esos casos. Dentro de las distintas técnicas eléctricas, la posibilidad de realizar junto con la tomografía de resistividad, la sección de cargabilidad a partir de los valores de polarización inducida en el dominio del tiempo, puede permitir la diferenciación más allá de las litologías existentes o la porosidad de las formaciones de la zona estudiada. Es por ello que debe señalarse que para el desarrollo de estas secciones es crucial que tanto los ajustes de los parámetros de medición como el procesado de los datos medidos sean mucho más elaborados que el necesario para la obtención de secciones de resistividad. De igual



manera, los sondeos de resonancia magnética representan una opción de gran utilidad para la determinación de ciertos parámetros hidráulicos de los acuíferos superficiales, pero no proporcionan una resolución vertical suficiente como para diferenciar niveles acuíferos similares, delimitando en este caso únicamente los paquetes de características parecidas como las calizas fracturadas de conjunto de medios granulares.

Nacionales

Según Ríos y Sánchez (2020) en su tesis titulada “Estudio geofísico mediante sondeos eléctricos verticales (Wenner - Schlumberger) para determinar la características del suelo del sector la Planicie, Morales 2020” señala que al determinar el estado situacional del sector La Planicie esto fue beneficioso pues fue una alternativa para futuros proyectos sabiendo que el enfoque social fue direccionado para personas de escasos recursos que se encuentran dentro de este sector. Con esta investigación, se ha demostrado la factibilidad de caracterización de suelos mediante sondeos eléctricos verticales para el uso en diferentes proyectos de ingeniería; mediante la medición de rangos de resistividad y conductividad, que esta es la inversa de la resistividad en los materiales, además que los contenidos de agua presente en los estratos de suelo determinan su continuidad, ya que esto afecta directamente a su movilidad. Se concluye que los resultados obtenidos indican que la resistividad presenta variaciones sensibles con respecto al contenido de humedad, esto sin importar el estrato y la característica del mismo, además se corrobora la resistividad medida en laboratorio se correlaciona mediante una función potencial.

Según Paredes (2019) en su tesis titulada “Potencial acuífero mediante el sondeo eléctrico vertical (SEV) en las unidades litoestratigráficas en la zona de Agocucho 2019” señala que se determinó 3 horizontes bien definidos H1, H2 y H3 con características



diferentes de resistividades y espesores. El horizonte H1, presenta un espesor promedio de 15,00 m. con resistividades entre 65,94 a 84,10 Ω .m. Constituido por arenas y gravas, además se encuentra en estado húmedo. En cuanto al horizonte H2, presenta alta resistividad de 187,03 a 302,83 Ω .m con un espesor de 23,00 a 80,00 metros de espesor, litológicamente está representado por materiales no consolidados con una permeabilidad media a alta, encontrándose en estado parcialmente saturado y vendría a conformar el acuífero productivo. En el horizonte H3, se presenta alta resistividad de 513,94 a 895,30 Ω .m con un espesor de 25,00 a 95,00 m. Representado por areniscas cuarzosa. El potencial acuífero se encontró en el horizonte 2 conformando los depósitos aluviales por lo que se presenta mayor potencia y mejores resistividades, a través de él se puede diseñar obras de captación subterránea. Con los datos obtenidos se elaboró el modelo hidrogeológico y el perfil geológico para identificar el acuífero en los depósitos aluviales. La zona más favorable para la captación de agua subterránea se encuentra ubicado en la sección B-B', porque presenta mayor permeabilidad.

Según Chumbe (2018) en su tesis titulada “Aplicación de métodos geofísicos en los estudios geotécnicos para centrales hidroeléctricas” señala que el empleo de los métodos sísmicos (refracción sísmica, tomografía de refracción sísmica, MASW y MAM) y geoelectrónicos (tomografía eléctrica), nos da la correcta descripción del perfil del terreno. Métodos sísmicos: Zonificación geomecánica, detección de fallas (Tomografía de refracción sísmica), definir contactos suelo – roca, buena correlación entre los métodos MASW y MAM, que conjuntamente dan profundidades de hasta 80 m a comparación de la refracción sísmica que llega a 40 m. Métodos geoelectrónicos: Siendo eficientes en la detección de fallas, localización de zonas kársticas, zonas de humedad y niveles freáticos.



Según Alarcón y Moreno (2018) en su tesis titulada “Estudio geofísico mediante sondeos eléctricos verticales con fines de uso poblacional en sectores del distrito de José Leonardo Ortiz,, Lambayeque 2018” señala que la ejecución, análisis e interpretación de los 26 SEVs, se ha determinado por sector 2 cortes geoelectricos los cuales son: Sector 1: sección A-A: SEV 5-3-4 y sección B-B: SEV 2-1-4 Sector 2: sección A-A: SEV 6-9-10 y sección B-B: SEV 8-9-7 Sector 3: sección A-A: SEV 13-15-11 y sección B-B: SEV 12-14-15-11 Sector 4: sección A-A: SEV 16-19-17 y sección B-B: SEV 18-20-17 Sector 5: sección A-A: SEV 21-26-25 y sección B-B: SEV 23-22-24. Se distinguen 4 horizontes específicos los cuales son: Primer horizonte: Entre 9 a 10m, resistividades bajas. Segundo horizonte: Entre 24 a 28 m. variando sus resistividades entre 18 a 25 Ohm.m. Tercer horizonte: Entre 34 a 37 m, resistividades eléctricas entre 6 a 10 Ohm.m Cuarto horizonte: Presenta resistividades entre 5 a 8 Ohm.m y espesor no definido. En los 5 sectores de estudio dan un total de 17 pozos de los cuales 5 son a tajo abierto, 2 mixto y 10 tubulares. Las resistividades en su mayoría son bajas, resultando que en las zonas donde se obtuvo resistividades altas de 18 a 20, es donde la calidad del agua está garantizada los SEVs son SEV 3, 6, 14, 20 y 22.

Según Reyes, Coras y Arteaga (2017) Las técnicas geofísicas empleadas para identificar formaciones permeables, semi permeables e impermeables son idóneas, ya que permiten localizar puntos clave para la perforación de pozos profundos, todo esto acompañado de un adecuado reconocimiento geológico superficial. Siendo la tomografía eléctrica una técnica multielectrónica, donde el proceso de adquisición de datos es automatizado. Esto nos permite realizar un gran número de medidas, tanto en profundidad como lateralmente, en espacio de tiempo cortos (del orden de 500 medidas en una hora y media), obteniendo modelos 2D de gran resolución. La única desventaja es la profundidad que abarca, por lo que se recomienda el uso de los SEV para complementar la



información, esto en caso de no contar con el cableado que permita el estudio a profundidades mayores de 100 m debido a que a esa profundidad se detectó la zona del acuífero. La información obtenida con los sondeos eléctricos verticales no fue concluyente para determinar la presencia de formaciones permeables, se detectó capas de arcilla de gran espesor (menos de $10 \Omega\text{-m}$) imposibles de contener agua subterránea, sin embargo se tiene una prueba real que existe agua subterránea, ahí están los pozos emplazados en esa formación obteniendo gastos de 55 y 22 lps., antes de hacer la tomografía en los mismos sitios, se interpretó la presencia de agua debido a fracturamiento cizallante de la formación ya que es una zona de distensión donde ocurren fallas normales secuenciadas, se asociaron a fracturamiento en tobas arcillosas, con el tomógrafo, a pesar de estar en superficie fue más evidente la identificación de estratos permeables que pudieran contener el agua subterránea, desafortunadamente la profundidad de exploración no ayuda a realizar una adecuada correlación de datos, se asume que si se tuvieran más carretes y electrodos para duplicar la distancia AB se podría profundizar más, por otro lado la información que proporciona el tomógrafo es continua y la que proporcionan los SEV es discreta, sin embargo con apoyo de los dos equipos se pueden realizar una adecuada investigación y determinación de las condiciones acuíferas que se están explorando. El uso del tomógrafo es adecuado para aplicaciones del tránsito de plumas de contaminación, de la superficie al acuífero, estudios de la zona no saturada, formas de recarga vertical del acuífero, identificación de cimentaciones, o cualquier estudios más superficial. La aparición de la Tomografía eléctrica ha permitido un desarrollo muy interesante con respecto a los métodos de resistividad convencionales, técnicas que, aunque se han estado utilizando durante varias décadas en estudios de filtración de agua, su limitada resolución 2-D les confería en general un papel secundario frente a otras técnicas. En cambio, el método de Tomografía eléctrica es una técnica



multielectrónica, en el que todo el proceso de adquisición de datos está totalmente automatizado.

Local

Según Pari (2019) en su tesis titulado “Aplicación de la resistividad para la exploración de aguas subterráneas en la microcuenca Yanamayo - Azángaro” señala que en la microcuenca Yanamayo se realizaron 19 SEV, la profundidad investigada hasta 250m. De los 19 sondeos; las resistividades óptimas para inferir que existe agua subterránea están en el SEV-2 con estrato saturado de 11m y resistividad de $12\Omega.m$, SEV-3 25m de espesor y resistividad $9\Omega.m$, SEV-4 espesor del horizonte saturado de 19m y resistividad $6\Omega.m$, SEV-5, espesor saturado de 68m y resistividad de $10\Omega.m$, SEV-6 con espesor saturado de 8 m con resistividad de $\Omega.m$, SEV-10 con espesor de 20m y resistividad de $9\Omega.m$ y por último el SEV-11 con 6m de espesor saturado y resistividad de $15\Omega.m$. - Se dispone ubicar el pozo en el SEV-5, compuesto de 5 estratos, la litología es; el H-1 se asocia a un suelo residual fino de arcilla de resistividad $50\Omega.m$, H-2 con capas de material granular fino semi-compactas de resistividad $16\Omega.m$, el H-3 se asocia a material fino de limos y arcillas de resistividad $30\Omega.m$, el H-4 húmeda se encuentra a partir de los 30 a 98m de profundidad aproximadamente está asociada material granular fino con resistividad de $1\Omega.m$ y por último El H-5 con presencia de material pelítico confinado de arcillas y limos de resistividad $23\Omega.m$. Volumen total es $41\ 595\ 000m^3$. Caudal en arena arcillosa es 1.5 l/s, arena 1.0 l/s, arena media de 2.1 l/s y arena gruesa es 2.74 l/s. - Respecto a los parámetros hidrogeoquímicos, en el diagrama de Piper se determina que las muestras se distribuyen en dos tipos de aguas: Sulfatadas cálcicas y Cloruradas sulfatadas. El diagrama de Schoeller-Berkaloff se identificó que superan los límites en calcio, magnesio y sodio. El diagrama de Wilcox se tiene que la clase de agua



predominante se localiza en la zona C3S2 con contenido alto de salinidad y alcalinidad media. Finalmente el diagrama de Stiff se denomina agua subterránea natural.

Según Chura (2015) en su tesis titulado “Evaluación de agua subterránea a través de pozos con fines de riego en la comunidad de Quenapajja - Acora” señala que la Conductividad Hidráulica se evaluó con la aplicación de tres métodos (Ernest y Lefranc), que nos permiten el cálculo de la conductividad hidráulica tomando en cuenta el diámetro del pozo, el área de la región filtrante, el tiempo de ascenso del freático, y diferencia de presiones para un intervalo de tiempo, entre los métodos aplicados hay una ligera diferencia. Los valores de la conductividad hidráulica obtenidos varían desde 0.34 m/día hasta 0.72 m/día estos datos comparados con los cuadros N° 02 corresponde a una clasificación de media a baja o moderadamente lenta, conformado por arena limosa y franco arenoso y la porosidad efectiva es la cantidad de agua que está disponible para explotar en un medio poroso, los valores de porosidad efectiva se calcularon para cada pozo bombeado por el método desarrollado por Van Beers, los valores obtenidos varían desde 5.80 % hasta 8.48 %, corresponde a una estructura prismática y columnar, y una textura de arena limosa y franco arenoso y arcilla. El comportamiento de la capa freática en el periodo estudiado, nos indica que las principales fuentes de recarga del acuífero provienen de las partes altas de la microcuena los cuales se deben principalmente a precipitaciones pluviales que se presentan durante el año; la velocidad aparente del agua subterránea es de 0.080 m/día, la forma de distribución de las curvas isohypsas indican las zonas de recarga las partes altas; y zonas de drenaje las partes bajas de la microcuena; por otro lado, la dirección de flujo es de las partes altas a las partes bajas influenciado por la gravedad terrestre, en las zonas más próximas y alejadas del nivel freático, los hidrogramas de cada pozo tienden a la misma curva, en el Hidrograma se observa una amplitud de 0.66 m promedio el nivel freático se aproxima más a la superficie del terreno.



Según el Dr. Apaza y Calcina (2014) en su investigación titulado “Contaminación natural de aguas subterráneas por arsénico en la zona de Carancas y Huata, Puno” señala que según los indicadores analizados e interpretados en función de las condiciones hidrogeológicas de las áreas de estudio, la movilidad de arsénico en aguas subterráneas está relacionado a dos posibles causas: En Carancas estaría relacionado a la ocurrencia de arsénico está asociado a un ambiente reductor del acuífero confinado, muestra que a valores bajos de oxígeno disuelto (menores a 1 mg/L) se presentan altas concentraciones de arsénico hasta de 500 µg/L evidenciando condiciones de ambiente reductor; así mismo los valores altos de arsénico están acompañados de niveles altos de hierro disuelto mayores a 0.3mg/L. En la zona de Huata, el arsénico está presente en un medio oxidantes debido a la poca profundidad de la superficie freática donde el oxígeno disuelto está presente en mayor concentración. La correlación de datos evidencia que en el rango de valores entre 2 a 6.85 mg/L de OD, se presentan concentraciones de arsénico entre 10 µg/L a 250 µg/L en la forma de As+5. En cuanto a la calidad de las aguas, en la zona de Carancas, se tiene buena oferta de aguas subterráneas del acuífero libre, sin embargo son de mala calidad fisicoquímica, debido a los niveles altos de sales disueltas alcanzando valores de conductividad eléctrica que sobre pasan los 1500µS/cm en varios pozos, a esto se añade la presencia de arsénico en concentraciones en un rango de 0-50 µg/L. Así mismo, las aguas del acuífero confinado de esta zona son de mala calidad fisicoquímica, debido al sabor desagradable y presencia de gases como CO₂, a esto se añade los altos niveles de arsénico, en concentraciones entre 100 a 500µg/L. En cambio en la zona de Huata, predominan aguas subterráneas de mala calidad, la conductividad eléctrica varía en el rango entre 800µS/cm a extremadamente altos mayores a 4000 µS/cm, los niveles de dureza también son altas hasta 660 ppm. En cuanto a la ocurrencia de arsénico,



predominan concentraciones en el rango 10 ìg/L a 50 ìg/L en 14 pozos evaluados, y en 3 pozos las concentraciones se encuentran en el rango de 50 ìg/L a 250ìg/L.

Según Ramos (2012) en su tesis titulado “Determinación del potencial de agua subterránea en la Microcuenca Central Huayta - Lampa” señala que El volumen total de agua en la Microcuenca es de 8805.5352 m³. El volumen de infiltración de la Microcuenca es de 6568400.99 m³ y el consumo es de 10729.13 m³, el volumen total infiltrado en el acuífero es 4064304.06 M³ anual, y el volumen escurrido por la Microcuenca es de 4055498.525 m³ al año. El acuífero está compuesto por 4 capas claramente visibles que son, depósitos clásticos superficiales, arenas y finos orgánicos, depósitos clásticos gravas arenas y limos. Depósitos clásticos rodados, gravas y conglomerados. Depósitos clásticos arenas, gravas y limos, respectivamente. Con los análisis físicos químicos el Acuífero no es apto para el consumo pero si es apto para uso agrícola.

2.2. MARCO TEÓRICO

Según Auge (2008) Ya que existen diferentes métodos geofísicos, uno de ellos es la Prospección Eléctrica que a la vez tiene técnicas mucho más precisas y modernas. Los métodos geoelectricos más empleados en Hidrogeología se basan en la inyección artificial de corriente eléctrica: SEV y Calicatas Eléctricas (CE), Tomografía eléctrica Vertical y el Potencial Espontáneo (PE) (*Ver figura 01*).

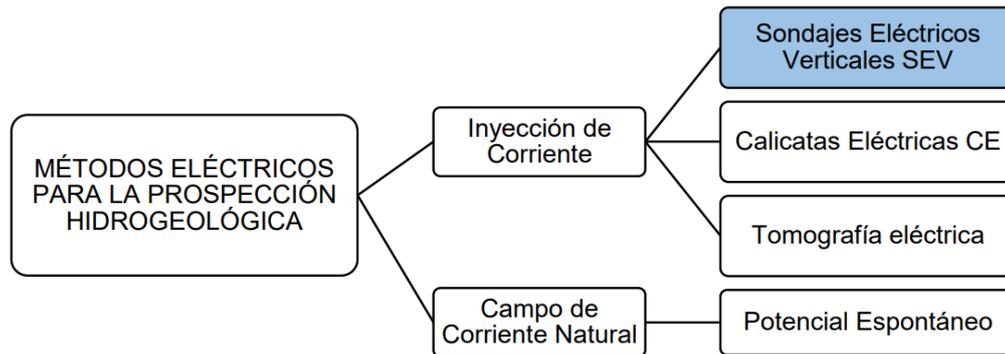


Figura 1: Métodos geoelectrónicos de prospección de agua subterránea. Los sondajes eléctricos verticales son un método eléctrico para la prospección hidrogeológica basada en la inyección de corriente. Fuente Métodos Geoelectrónicas para la Prospección de agua subterránea por Miguel Auge, 2008.

Según Orellana (1982) Los parámetros medibles son: la diferencia de potencial y la intensidad de corriente eléctrica; pero el parámetro físico básico es la resistividad del suelo, una capacitancia y una inductancia. Si se colocan los electrodos A y B, en una superficie plana y se hace circular corriente eléctrica continua (líneas de corriente) de intensidad (I), se registra la caída de potencial (ΔV) que existe, entre dos puntos del terreno. Puede conocerse la resistividad de los terrenos involucrados en el circuito (Ver figura 02).

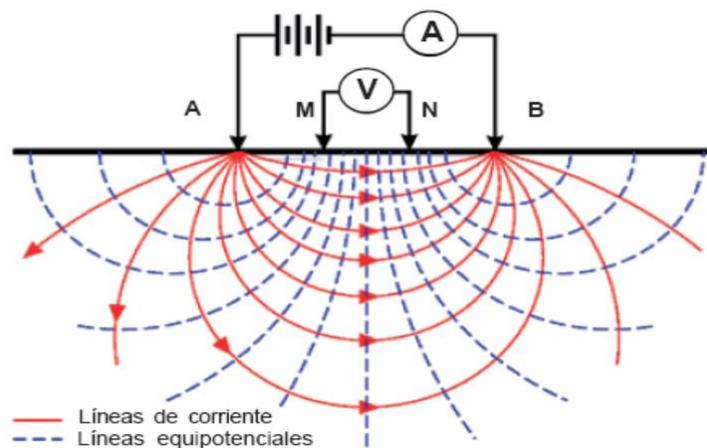


Figura 2: Circuito de emisión y recepción. Fuente Prospección Geoelectrónica en corriente continua por Ernesto Orellana, 1982.

Donde:

A y B = Electrodos de corriente

M y N = Electrodo de potencial

En la figura 03 se observa que a mayor separación de los electrodos A y B, se produce una mayor penetración en el subsuelo. Se muestran los siguientes casos:

- El caso (a) muestra separaciones pequeñas de electrodos, la corriente está virtualmente confinada a la zona (ρ_1) superficialmente.
- El caso (b), cuando los electrodos se dispersan, se alarga la distancia entre los dispositivos y la penetración en el subsuelo se incrementa, proporcionando información sobre (ρ_2).

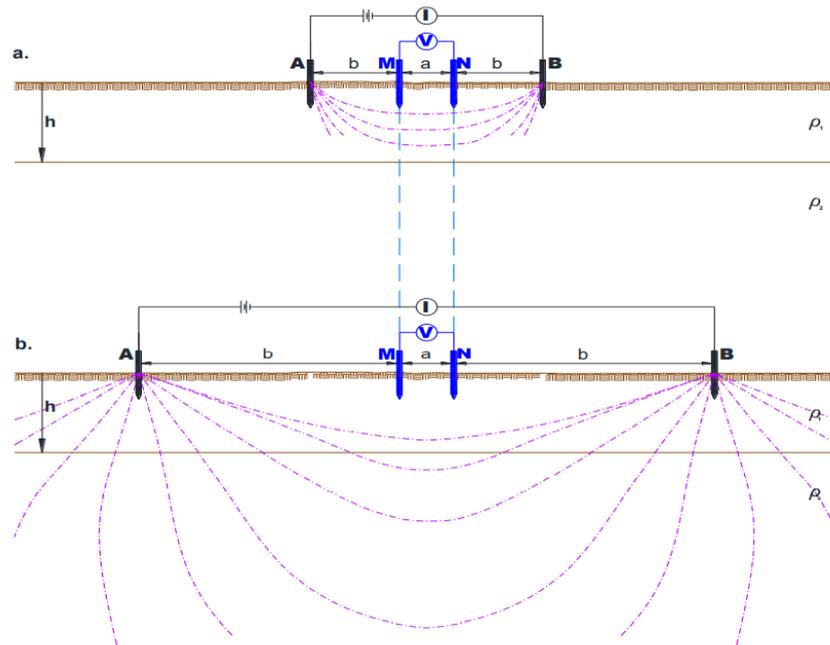


Figura 3: Investigación a diferentes distancias y profundidades. Nota a. Investigación a menor profundidad b. Investigación a mayor profundidad. Tomado de Groundwater Geophysics SPRINGER por Kirsch, Reinhard, 2006.

2.2.1. Propiedades Eléctricas de las Rocas

Dobrin (1969) En la prospección eléctrica se conoce tres propiedades fundamentales de las rocas. Una es la resistividad, otra es la actividad electroquímica y su constante dieléctrica.

Resistividad Eléctrica (ρ): Propiedad del suelo para conducir electricidad (Ver figura 04).

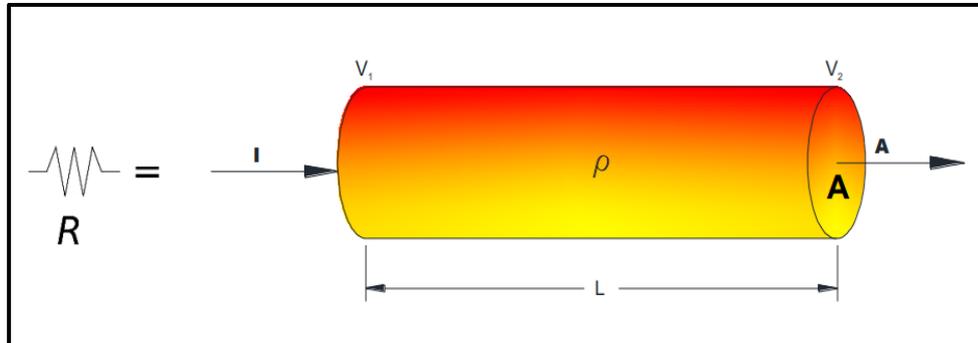


Figura 4: Unidad de resistividad o resistencia específica. El gráfico representa la resistencia de un cilindro. Tomado de Groundwater Geophysics SPRINGER por Kirsch, Reinhard, 2006.

$$\rho = \frac{RS}{L}, R = \rho \frac{L}{A}$$

Donde:

R = Resistencia eléctrica (Ω)

ρ = Resistencia del medio (Ωm)

L = Longitud de la muestra (m)

A = Área de la muestra (m^2)

S = Sección de área (cm^2)

Cantos Figuerola, J. (1987) La ley de Ohm expresa que la Resistencia R es directamente proporcional a la diferencia de potencial ΔV entre los extremos del material e inversamente proporcional a la intensidad I del flujo de corriente.

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

Donde:



R = Resistencia eléctrica (Ω)

ΔV = Diferencia de potencial (voltios)

I = Corriente (amperios)

Según Telford, Geldart & Sheriff (1976) La resistividad de los materiales naturales varía y también la resistividad de las rocas varía en función de los siguientes factores:

- Salinidad y la movilidad de los iones
- La resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de las rocas;
- La humedad de la roca
- La porosidad de la roca
- La permeabilidad de la roca
- La textura de la roca, y la forma y la distribución de sus poros
- Los procesos que ocurren en el contacto de los líquidos de los poros y el esqueleto mineral.
- Porcentaje de saturación
- Temperatura
- Presión

Las rocas ígneas y metamórficas tienen valores altos de resistividad. La resistividad de estas rocas dependen del grado y el porcentaje de fracturas rellenas con aguas subterráneas. (Ver figura 05 y 06).

Tipo de Roca	Intervalo de resistividades (ohm-m)
Sienita	10^2 a 10^6
Diorita	10^4 a 10^5
Pórfido de diorita	1.9×10^3 (húmedo) a 2.8×10^4 (seco)
Diorita cuarzosa	2×10^4 a 2×10^6 (hum) a 1.8×10^5 (seco)
Dacita	2×10^4 (húmedo)
Andesita	4.5×10^4 a 1.7×10^2 (seco)
Pórfido de diábase	10^3 (húmedo) a 1.7×10^5 (seco)
Diabasa (varios)	201 a 5×10^7
Lavas	10^2 a 5×10^4
Gabro	10^3 a 10^6
Basalto	10 a 1.3×10^7 (seco)
Esquistos	201 a 10^4
Tobas	2×10^3 (húmedo) a 10^5 (seco)
Lajas (varios)	6×10^2 a 4×10^7
Gneises (varios)	6.8×10^4 (húmedo) a 3×10^6 (seco)
Cuarzitas (varias)	10 a 2×10^8

Figura 5: Resistividades de rocas ígneas y metamórficas. Resistividades de algunas rocas en húmedo y en seco. Tomado de Applied Geophysics por Telford, W. M.; Geldart, L. P. & Sheriff, R. E. 1976

Tipo de roca	Intervalo de resistividad (ohm-m)
Lutitas consolidadas	20 a 2×10^3
Argilitas	10 a 8×10^2
Conglomerados	2×10^3 a 10^2
Areniscas	1 a 6.4×10^8
Lutitas	50 a 10^7
Dolomias	3.5×10^2 a 5×10^3
Arcillas saturadas no consolidadas	20
Margas	3 a 70
Arcillas	1 a 100
Aluviones y arenas	10 a 800
Arenas con petróleo	4 a 800

Figura 6: Resistividades de rocas sedimentarias. Tomado de Applied Geophysics por Telford, W. M.; Geldart, L. P. & Sheriff, R. E. 1976

La resistividad depende del grado de saturación, una grava saturada puede tener una resistividad similar a la de una arena seca, o bien que un limo desecado puede ser igual que una arena saturada tal como se observa en la figura 07. (Cantos, J. 1987)

Roca	H2O (%)	ρ (ohm-m)
Arenisca grano grueso	0.39	9.6×10^5
Arenisca grano grueso	0.18	10^8
Arenisca grano mediano	1	4.2×10^3
Arenisca grano mediano	1.67	3.2×10^6
Arenisca grano mediano	0.1	1.4×10^8
Grauvaca arenisca	1.16	4.7×10^3
Grauvaca arenisca	0.45	5.8×10^4
Arcosa arenisca	1.26	10^3
Arcosa arenisca	1	1.4×10^3
Lutita orgánica	11	0.6×10^3
Dolomias	2	5.3×10^3
Dolomias	1.3	6×10^3
Dolomias	0.96	8×10^3
Peridotita	0.1	3×10^3
Peridotita	0.03	2×10^4
Peridotita	0.016	10^6
Peridotita	0	1.8×10^7
Pirofilita	0.76	6×10^6
Pirofilita	0.72	5×10^7
Pirofilita	0.7	2×10^8
Pirofilita	0	10^{11}
Granito	0.31	4.4×10^3
Granito	0.19	1.8×10^6
Granito	0.06	1.3×10^8
Granito	0	10^{10}
Diorita	0.02	5.8×10^5
Diorita	0	6×10^6
Basalto	0.95	4×10^4
Basalto	0.49	9×10^5
Basalto	0.26	3×10^7
Basalto	0	1.3×10^8

Figura 7: Variación de la resistividad de las rocas con agua. Tomado de Applied Geophysics por Telford, W. M.; Geldart, L. P. & Sheriff, R. E. 1976

Resistividad Aparente.- Según Cárdenas y Galvis (2011), es el valor de resistividad obtenida de una medición directa del terreno (suelo heterogéneo), resulta de una mezcla de las resistividades de los diferentes materiales existentes en el terreno.

2.2.2. Dispositivos y arreglos electródicos

Según Custodio & Llamas (1996) En cualquier dispositivo electródico, si conocemos el factor geométrico (K), la corriente eléctrica (I) inyectada por los

electrodos A y B, y la diferencia de potencial entre los electrodos M y N, podemos calcular la resistividad aparente por los dispositivos tetraelectródicos lineales:

- **Dispositivo Schlumberger:** Se ubican simétricamente los electrodos AMNB dispuestos en línea, donde la distancia MN es menor a comparación de la distancia de los inyectores AB. Generalmente AB debe ser mayor o igual a 5 MN (*Ver figura 08*).

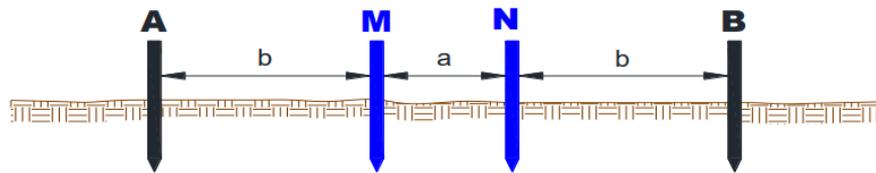


Figura 8: Dispositivo Schlumberger. Tomado de Applied Geophysics por Telford, W. M.; Geldart, L. P. & Sheriff, R. E. 1976.

Los valores de la resistividad aparente se representan en función de $AB/2$.

El factor geométrico del dispositivo en este caso es: $K = \pi (b+a)/ a$

- **Dispositivo Wenner:** Los dispositivos se sitúan equidistantes sobre una línea en el orden AMNB (*Ver figura 09*).

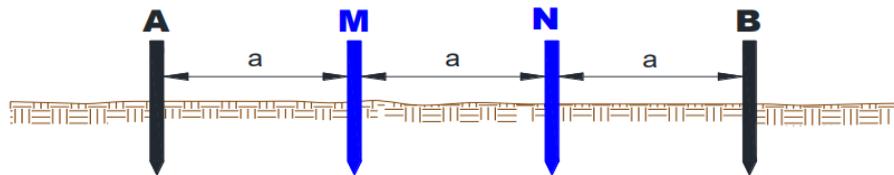


Figura 9: Dispositivo Wenner. Tomado de Applied Geophysics por Telford, W. M.; Geldart, L. P. & Sheriff, R. E. 1976.

El factor geométrico del dispositivo en este caso es: $K = 2\pi a$

- **Dispositivo Polo-Dipolo:** En este caso el electrodo B es mucho mayor que los otros tres (en teoría, al infinito) (*Ver figura 10*).

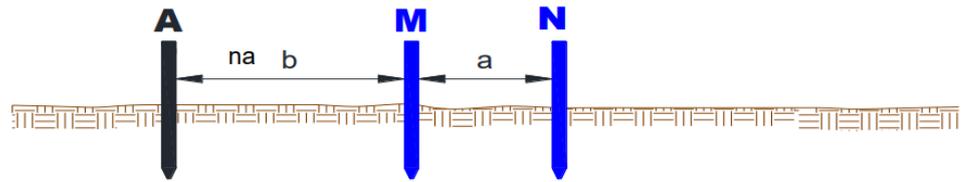


Figura 10: Dispositivo Polo-Dipolo. Tomado de Applied Geophysics por Telford, W. M.; Geldart, L. P. & Sheriff, R. E. 1976.

El factor geométrico del dispositivo en este caso es: $K = 2\pi n(n + 1) a$

- **Dispositivo Dipolo-Dipolo:** Los electrodos se ubican en el orden ABMN formando un doble dipolo (Ver figura 11).

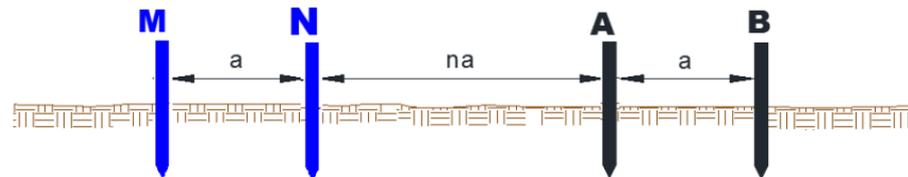


Figura 11: Dispositivo Dipolo-Dipolo. Tomado de Applied Geophysics por Telford, W. M.; Geldart, L. P. & Sheriff, R. E. 1976.

El factor geométrico del dispositivo en este caso es: $K = (n + 1)(n + 2) a$

Según Telford, Geldart & Sheriff (1976) Para el estudio mediante métodos geoelectricos, se define habitualmente el terreno mediante los siguientes modelos:

Modelo unidimensionales 1-D: En este modelo la resistividad del subsuelo varía sólo con la profundidad (coordenada z). Equivalente a un modelo bidimensional de capas horizontales. Mediante este modelo se estudian los terrenos estratificados horizontalmente, aplicando sondeos eléctricos verticales generalmente en dispositivo Schlumberger.

Modelo bidimensionales 2-D: en estos modelos la resistividad varía lateralmente (coordenada x) y en profundidad (coordenada z). Es el modelo

más aplicado en la práctica, para el estudio de túneles, cimentaciones, aguas subterráneas, detección de cuevas, etc. Se emplea con dispositivo tipo Dipolo-dipolo o Wenner (*Ver figura 12*).

Modelo tridimensionales 3-D: la resistividad varía en las tres dimensiones del espacio. Son modelos complejos, se emplean para problemas muy específicos en los que no es suficiente una modelación 2-D. La realización de registros de resistividad eléctrica 1-D (SEV, etc.), conlleva la realización de 10 a 20 lecturas.

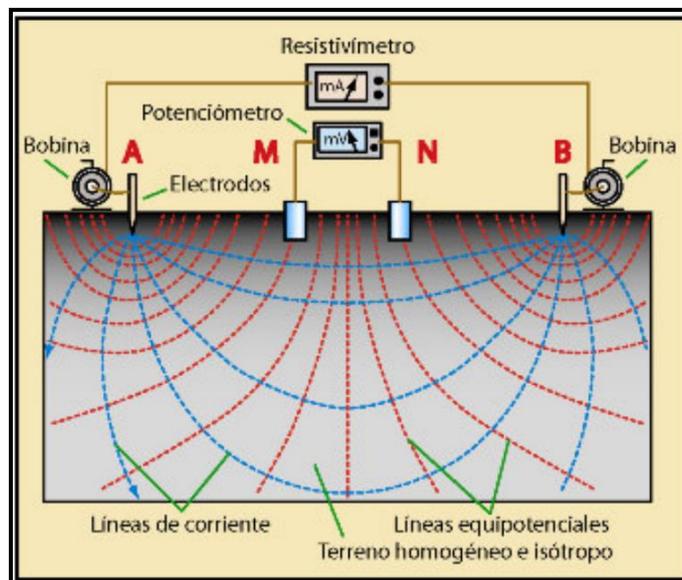


Figura 12: Dispositivo Geoelectrico sobre un terreno homogéneo e isotrópico. Tomado de Hidrología subterránea por E. Custodio & M. R. Llamas, 1996.

Entonces, la finalidad del SEV es averiguar la distribución vertical de resistividades bajo el punto sondeado; establecer los parámetros de la curva de resistividades verdaderas (CRV) por medio de relaciones teóricas (*Ver figura 13*).

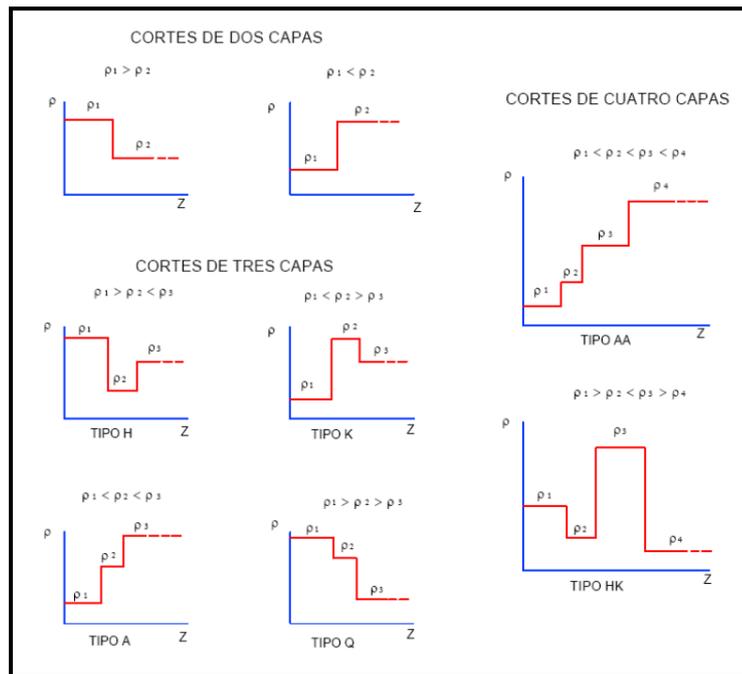


Figura 13: Curvas de resistividad verdadera para diversos cortes geoelectricos. Tomado de Prospección Geoelectrica en corriente continua por Ernesto Orellana, 1982.

2.3. MARCO CONCEPTUAL

Los conceptos descritos en adelante, son según Benitez, A. (1963); Dávila (1992) & Johnson (1975):

Acuífero

Roca porosa y permeable que permite la retención del agua en cantidades suficientes para su posteriormente extraerlo. Los acuíferos se clasifican en: acuíferos confinados, acuíferos artesianos, acuíferos semiartesianos, acuíferos termales, etc.

Estrato o formación geológica permeable que posibilita la circulación y el almacenamiento del agua subterránea por sus poros o grietas. Dentro de estas formaciones encontramos materiales muy variados como gravas de rio, limo, calizas muy agrietadas, areniscas porosas poco cementadas, arenas de playa, alunas formaciones volcánicas, depósitos de dunas e incluso ciertos tipos de arcilla.

Formación geológica de la cual se extrae agua, posee aberturas entre las partículas que lo constituyen o bien fisuras o fracturas, en ocasiones canales o cavernas de disolución o aberturas resultantes de la contracción de la roca.

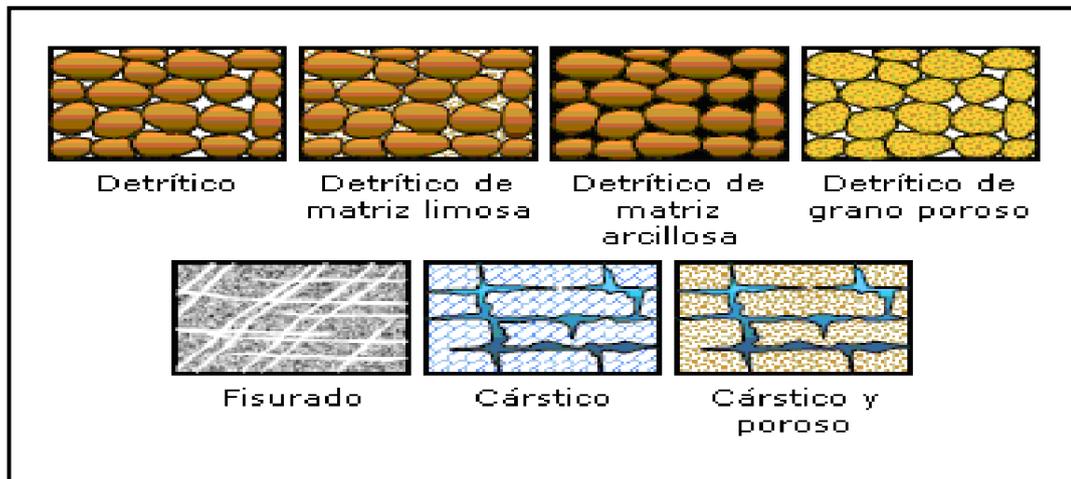


Figura 14: Acuíferos según su textura. Tomado de Hidrología subterránea por E. Custodio & M. R. Llamas, 1996.

Agua subterránea

Es el agua que se encuentra en el subsuelo, ocupando los espacios porosos o fracturas de las rocas. Las aguas subterráneas explotadas constituyen el abastecimiento principal para el desarrollo de las ciudades, industrias, agronomía, etc. El agua subterránea puede ser confinada a cierta profundidad de la superficie y el acuífero se halla limitado entre dos capas o rocas impermeables.

Densidad

Es la relación existente entre el peso de un material y su volumen. La densidad está relacionada a la ley de atracción de los cuerpos: “La atracción de dos cuerpos es directamente proporcional a su densidades”.



Densidad hidrográfica

Relación existente entre el número de cursos de agua o de ríos y el área ocupada de una cuenca hidrográfica. Este índice se calcula dividiendo la longitud total de los canales por el área de la cuenca hidrográfica.

Humedad del suelo

Cantidad de agua por volumen de tierra que hay en un lugar determinado. Humedad existente en la parte del suelo situada por encima de la capa freática, incluyendo el vapor de agua presente en los poros del terreno. Se expresa en tanto por ciento respecto a la masa del suelo seco.

Nivel freático

El nivel hidrostático de una roca, varía según la cantidad de agua que recibe. Este nivel puede ser superior (en épocas de lluvia) o inferior (en épocas de sequía).

Permeabilidad

Se refiere a la facultad que tiene un acuífero en dejar pasar el agua a través del mismo. Depende de las características del medio (porosidad, tamaño, forma y arreglo de las partículas, compactación) y del fluido (viscosidad).

Propiedad de los terrenos porosos y permeables de dejar pasar el agua fácilmente siguiendo las leyes hidrostáticas. Es la cantidad de agua que permite pasar una roca a través de una sección (volumétrica) en un tiempo determinado.

Las gravas, las areniscas, los limos son permeables. Las arcillas son porosas pero no son permeables, pues una vez saturadas de agua no la dejan pasar.

Darcy (1856) propuso la siguiente ecuación para conocer el movimiento del agua en medios porosos.

$$Q = K \cdot i \cdot S$$

Donde:

Q : Caudal que circula por un medio poroso ($m^3/día$)

K : Coeficiente de permeabilidad del suelo ($m/día$)

i : Gradiente hidráulico, $(h_1 - h_2)/L$ (adimensional)

S : Sección (m^2). Generalmente sección unitaria; “ b ” (espesor)*1

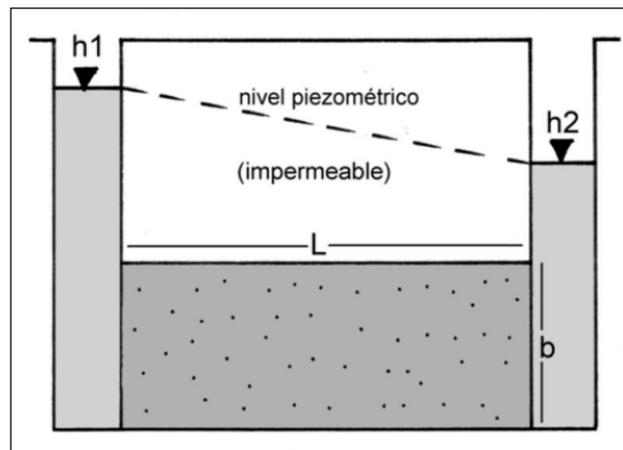


Figura 15: Ley de Darcy. Tomado de Hidrología subterránea por E. Custodio & M. R. Llamas, 1996.

Porosidad

Es la relación existente entre el volumen de los intersticios porosos y el volumen total de la roca o suelo. Expresado en porcentaje.

Son porosas las rocas clásticas como las arcillas, los limos, las areniscas, las gravas, los conglomerados.



Las rocas volcánicas piroclásticas también son porosas, de igual forma que las rocas volcánicas lávicas.

Las rocas masivas no son porosas, pero considerando las fracturas como espacios porosos; Por lo tanto, se considera porosidad al volumen de los intersticios de las fracturas.

Existen rocas porosas y permeables en el caso de las fragmentarias y no permeables en el caso de las volcánicas lávicas, y las arcillas.

La porosidad de un terreno se define como la relación entre el volumen de aberturas, cavidades y el volumen total que lo contiene, en porcentaje.

$$n = \frac{V_p}{V_t} \times 100$$

Presión

Para rocas sedimentarias, a mayor presión aumenta el grado de compactación, disminuyendo la porosidad y aumentando potencialmente la resistividad. Mientras que para rocas muy compactas (rocas ígneas y metamórficas) la presión provoca fracturamiento, disminuyendo potencialmente la resistividad de las rocas.

Resistencia

Es la capacidad de las rocas, minerales y materiales de oponerse a la deformación ante los diferentes tipos de esfuerzos, tales como erosivos, cortantes, elásticos, presiones, etc.



Resistividad

Resistencia de las rocas, minerales y materiales de dimensiones unitarias de un determinado material al flujo de una corriente eléctrica.

Temperatura

Propiedad básica de un equilibrio térmico, medido por varias escalas (Kelvin, Celsius, Fahrenheit, Rankine) basado en los cambios de volumen, resistencia eléctrica, fuerza termal electromotiva o longitud. Sistemas que se hallan en equilibrio termal en cada una de las escalas que tienen la misma temperatura.

A mayor temperatura disminuye la viscosidad de las soluciones acuosas, facilitando la movilidad de los iones y, por lo tanto, disminuye la resistividad.

2.4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.4.1. Enfoque de la investigación

Según Hernández R., Fernández C. & Baptista P., (2019) El enfoque de la investigación del proyecto de tesis “Estudio geofísico para la exploración de aguas subterráneas mediante sondeos eléctricos verticales en el centro poblado de Marcuyo y la comunidad campesina Chojñachojñani, distrito de Pilcuyo, Provincia de El Collao, Región Puno” es cualitativo, ya que el enfoque se basa en métodos de recolección de datos no estandarizados ni completamente predeterminados para la exploración de aguas subterráneas para así poder determinar si es apto para el riego tecnificado.

Parte de una idea, una vez delimitada; se derivan objetivos y preguntas de investigación y se construye un marco o perspectiva teórica. De las preguntas se



establecen hipótesis y determinan variables; se desarrolla un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas, y se establece una serie de conclusiones respecto de las hipótesis.

Debido a que anteceden a las demás investigaciones, sirven para familiarizarnos con fenómenos relativamente desconocidos; determinan tendencias, identifican áreas, ambientes, contextos y situaciones de estudio, relaciones potenciales entre variables; son estudios exploratorios que se caracterizan por ser más flexibles y más amplias y dispersas.

2.4.2. Diseño de la investigación

La investigación no experimental es sistemática y empírica en la que las variables independientes no se manipulan porque ya han sucedido. Las inferencias sobre las relaciones entre variables se realizan sin intervención o influencia directa, y dichas relaciones se observan tal como se han dado en su contexto natural. En un estudio no experimental no se generan ninguna situación, sino que se observan situaciones ya existentes, no provocadas intencionalmente en la investigación por quien la realiza.

En la investigación no experimental sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para después analizarlos.

En algunas ocasiones la investigación se centra en:

- a) analizar cuál es el nivel o modalidad de una o diversas variables en un momento dado;



- b) evaluar una situación, comunidad, evento, fenómeno o contexto en un punto del tiempo y/o;
- c) determinar o ubicar cual es la relación entre un conjunto de variables en un momento.

2.4.3. Tipo de la investigación

Los diseños transeccional o transversal recolectan datos en un solo momento, en un tiempo único. Su propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado.

Los diseños transeccionales exploratorios constan en comenzar a conocer una variable o un conjunto de variables, una comunidad, un contexto, un evento, una situación, etc. Se trata de una exploración inicial en un momento específico; se aplican a problemas de investigación nuevos o poco conocidos.

2.4.4. Población

La población está constituida por la superficie del C.P. Marcuyo y la C.C. Chojñachojñani, las unidades geológicas y geomorfológicas que se presentan en la zona de estudio y las características de ellas que nos ayudan a determinar si son posibles suelos con acuíferos.

2.4.5. Muestra

En esta investigación la muestra la constituyen 10 sondajes eléctricos verticales que están ubicados en lugares estratégicos para obtener datos relevantes con la finalidad de ubicar y plantear una zona accesible para la exploración y explotación de aguas subterráneas para el riego tecnificado.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. INSTRUMENTO GEOFÍSICO

a. Equipo y Accesorios

En el presente estudio se ha empleado un equipo de resistividad cuyas características son:

Generador de corriente

Tipo de máquina	: 6500(D) DC
Modelo	: 1 cilindro, 4 tiempos
Tiempo de operación	: 9hrs
Carga de voltaje	: 12
Carga de corriente	: 8.3
Voltaje	: 110 / 220 / 230 / 240
Tensión de salida	: 5Kw
Tensión máxima	: 5.5Kw

Transmisor de corriente

Potencia	: 5000W
Corriente máxima	: 10Amp
Voltaje de salida	: 200-3000V referenciales
Voltaje de entrada	: 220 Vac trifásico
Frecuencia	: 60Hz
Dominio de tiempo	: 1, 2, 4 y 8 seg
Resolución de Amp	: 10

Receptor

Marca	: Iris Instrument, ELREC PRO
Canales	: 10
Cargabilidad	: 20 ventanas
Display	: LCD gráfico
Lecturas	: 21000

Accesorios

- 01 Georesistivímetro
- 02 Carretes de bobina de cable eléctrico de 300 metros c/u
- 04 Electrodo de acero
- 01 Multitéster digital
- Cables de conexiones



Figura 16: Equipo utilizado para los SEV en la zona de estudio. Fuente fotografía propia



Figura 17: Georesistivmetro utilizado para los SEV en la zona de estudio. Fuente fotografía propia

3.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se describe a continuación la metodología usada:

- Revisión de bibliografía.- Se examina la información existente de la zona de estudio; boletines, informes y cartas geológicas.
- Recolección de datos.- Es la búsqueda y recopilación de información relacionada a los trabajos realizados en la zona de estudio, así como información de los métodos a utilizar.
- Reconocimiento de la zona de estudio.- Consiste en conocer visualmente las características del terreno, evaluando la accesibilidad El resultado de este proceso es mejorar y hasta replantear la ubicación y dirección de los SEVs.



- Instalación de equipos.- En este proceso se ubica el equipo de transmisión y de medida, ubicar los electrodos de acuerdo a la medida del dipolo. De la misma forma se procede a instalar los cables en campo.
- Toma de datos.- Etapa en la que se induce corriente al terreno a través de un grupo de electrodos en cada estación, para realizar las lecturas de diferencia de potencial.
- Procesamiento de datos.- Al adquirir la información obtenida en campo, en gabinete se procesa la base de datos de la resistividad eléctrica y por último se realiza el análisis, interpretación, correlación con la geología local. Las capas se relacionó con la litología de la zona de estudio, así como las resistividades aparentes y así obtener las resistividades reales de los sondeos eléctricos verticales.
- Interpretación y presentación de resultados.- El análisis de los datos y su comportamiento en el terreno, así como la relación que hay con las diferentes propiedades físicas, los resultados son presentados en planos a una escala adecuada y de fácil visibilidad.

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El proyecto se encuentra en el distrito de Pilcuyo, Provincia de El Collao, Región de Puno. Geográficamente la localización del área de estudio se encuentra ubicado en el sector sur este de la ciudad de Ilave. A unos 15km desde la ciudad de Ilave aproximadamente.

Tabla 1

Coordenadas de Ubicación

PROYECTO	ESTE WGS-84 UTM	NORTE WGS-84 UTM
Marcuyo	442838.4	8215902.7
Chojñachojñani	439700.2	8216699.6

Fuente: Elaboración propia

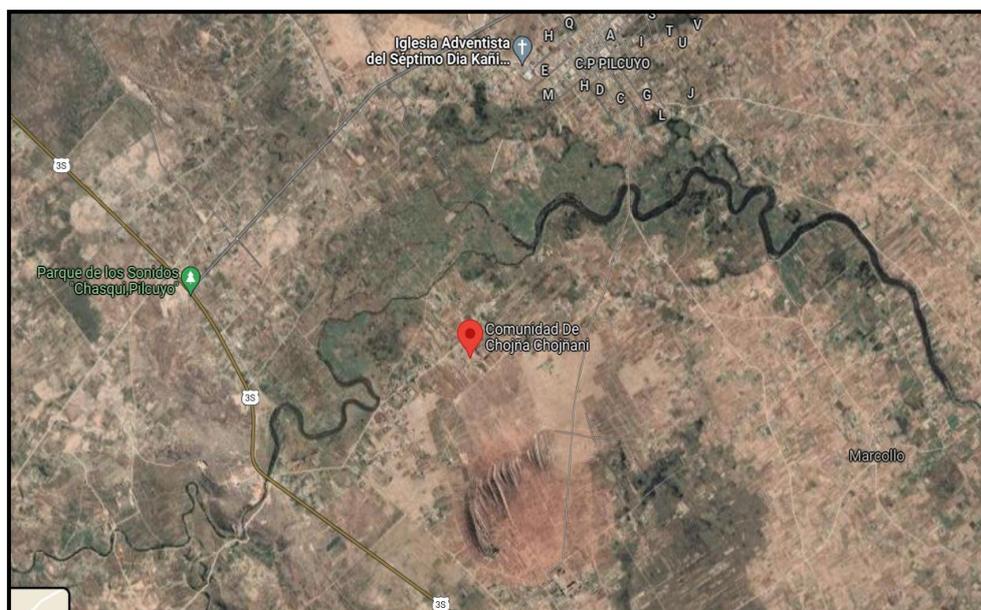


Figura 18: Ubicación del C.P. de Marcuyo y C.C. de Chojñachojñani. Fuente google maps

4.2. ACCESIBILIDAD

Es accesible por la carretera asfaltada Puno-Desaguadero, (a 500 metros del centro poblado de Chucaraya) desvío hasta el lugar de estudio 02km trocha carrozable. Altitud promedio 3849 m.s.n.m.

Tabla 2

Acceso a la zona de estudio

PARTIDA-FIN	DISTANCIA	TIEMPO	TIPO DE VÍA	ESTADO DE VÍA
Puno - llave	55.8km	50 min	Carretera Asfaltada	Regular
llave – C.P. Marcuyo	16km	20 min	Asfaltada y Trocha	Regular
llave – C. Chojñachojñani	11km	15 min	Asfaltada y Trocha	Regular

Fuente: Elaboración propia

4.3. CLIMA Y METEOROLOGÍA

La zona de estudio tiene un clima típicamente frío y semi-húmedo. La presencia del Lago Titicaca es un factor de regulación térmica en las áreas cercanas al litoral, se logra mantener temperaturas ligeramente más altas que el resto del altiplano. Se percibe con mayor claridad en la menor variación de las temperaturas mínimas y por tanto en la presencia de heladas menos frecuentes en un radio determinado alrededor del lago, donde está ubicado el proyecto.

La temperatura mínima promedio generalmente varía de -3°C a -1°C . La temperatura máxima promedio de 17°C a 19°C .

La temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diario.

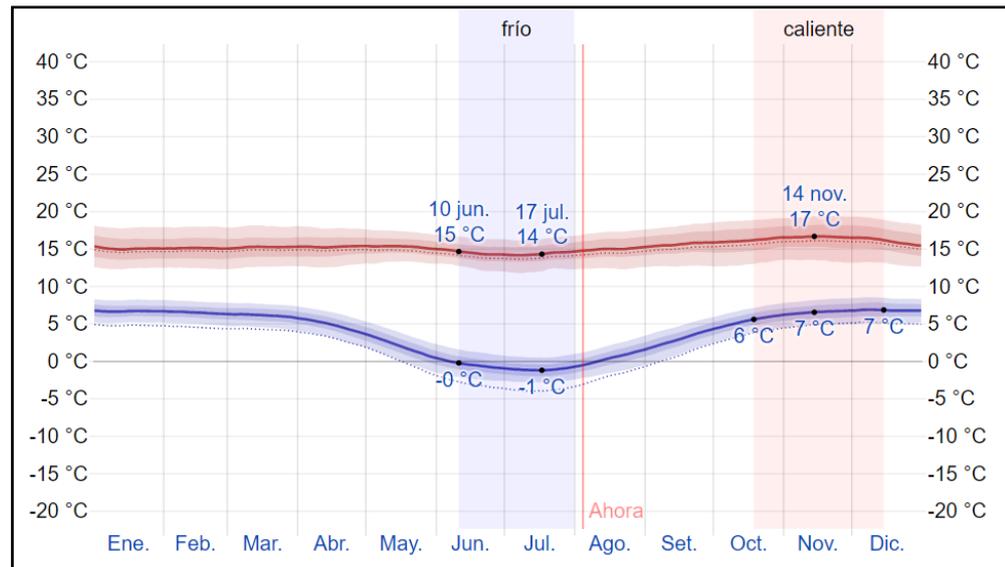


Figura 19: Temperatura máxima y mínima promedio. Fuente <https://es.weatherspark.com/>

La precipitación pluvial en el área de estudio, está influenciada por su cercanía al lago, que constituye una fuente de humedad permanente, es por ello que en la zona de estudio se produce mayor precipitación que en todo el altiplano. La precipitación pluvial se presenta también en forma de granizo, nieve y lluvia. La probabilidad mínima de un día mojado es del 1% en la temporada seca; y en la temporada con precipitación, la probabilidad máxima de un día mojado es del 41%.

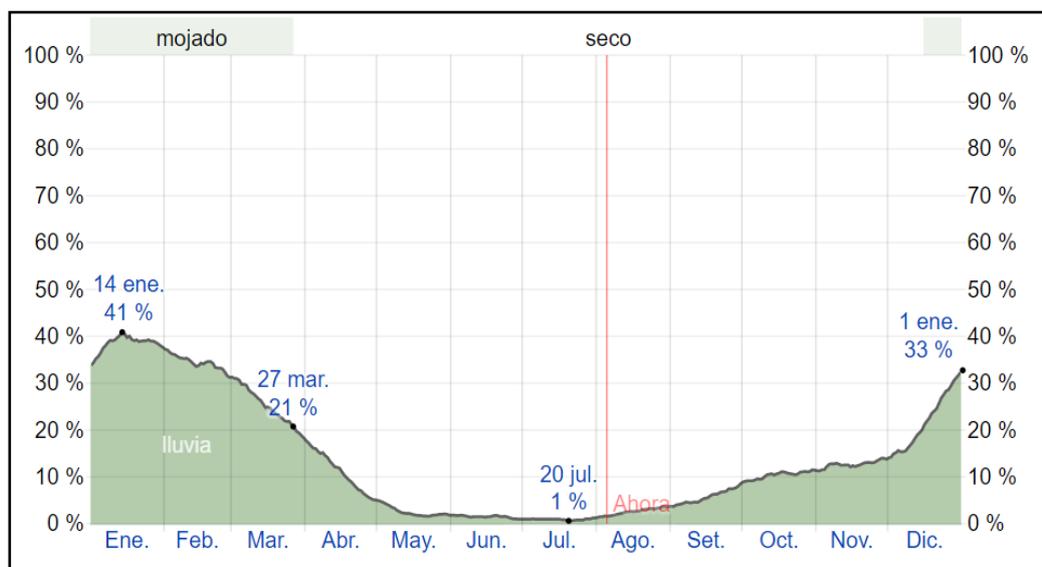


Figura 20: Humedad máxima y mínima promedio. Fuente <https://es.weatherspark.com/>

El nivel de humedad percibido en la zona del proyecto, medido por el porcentaje de tiempo, no varía considerablemente durante el año, y permanece prácticamente constante en 0%.

Se observa que la mayor humedad relativa se presenta coincidentemente con el periodo más lluvioso, en cambio la menor humedad se produce en la temporada de sequía.

El aire de la zona de estudio es seco, existe poca saturación lo que es favorable para una evaporación alta.

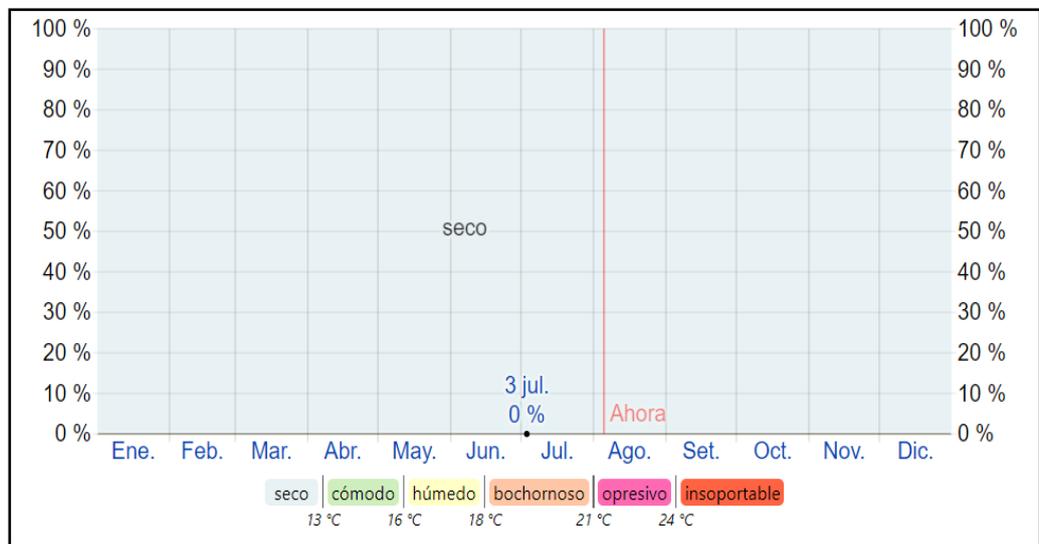


Figura 21: Niveles de comodidad de la humedad. Fuente <https://es.weatherspark.com/>

4.4. TOPOGRAFÍA Y FISIOGRAFÍA

Los suelos forman un relieve plano de pendiente variable entre 1 y 3%, siendo más pronunciada hacia el extremo superior donde se inicia las laderas y decrece hacia el lago. Debido a la baja pendiente se presentan dificultades para la evacuación de las aguas superficiales, pero son adecuadas para las labores agrícolas y no requieren muchas labores de acondicionamiento para el riego.

La topografía plana y la escasa elevación de las tierras con respecto al nivel del lago, así como la proximidad del río Ilave y Zapatilla, contribuyen a mantener el nivel freático alto en la mayor parte del área de estudio, especialmente en las zonas próximas al litoral.



Figura 22: Topografía plana de la zona de estudio. Fuente Fotografía propia

La zona del proyecto está conformada por depósitos fluvio-glaciares del cuaternario reciente que ha rellenado las grandes planicies del área de Pilcuyo y están constituidos por arenas, limos y arcillas. Fisiográficamente es una planicie aluvial-lacustre, que se desarrolla entre los ríos Ilave y Zapatilla en la península de Ilave. Tiene como límite hacia el este el litoral del Lago Titicaca, a 3808 msnm que es el extremo más bajo y 3830 hacia el extremo más alto conformado por pequeñas colinas en el lado Oeste.

4.5. HIDROGRAFÍA

Los recursos hídricos de la zona de estudio provienen de las siguientes fuentes:

- Escorrentía superficial del río Ilave y Zapatilla
- Precipitación fluvial
- Agua subterránea

Escorrentía superficial.- El río Ilave es uno de los principales afluentes del Lago Titicaca y está conformado por los ríos Huenque y Aguas calientes que se unen al oeste de la ciudad de Ilave y después de discurrir en dirección Oeste-Este, desemboca en el Lago Titicaca. Debido a la baja pendiente del cauce, en su tramo inferior presenta meandros de sección amplia y poco profunda; siendo esta la causa de frecuentes inundaciones de las tierras de ambos márgenes, afectando parte del área del proyecto que está ubicada en su margen derecha.



Figura 23: Río Zapatilla. Fuente fotografía propia

Precipitación fluvial.- A nivel de la cuenca del río Ilave, la precipitación es muy variada, cerca del lago se presentan los valores más altos y va decreciendo hacia el Sur y Oeste en la divisoria más alejada de la cuenca, lo que indica que la mayor escorrentía se produce en el nivel medio e inferior de la cuenca.



Figura 24: Zona de estudio cerca del lago. Fuente fotografía propia

Agua subterránea. – Este recurso proveniente de la recarga del río Ilave y Zapatilla, de la precipitación pluvial en la zona de estudio y la escorrentía superficial de las áreas vecinas más altas constituye un problema en época de lluvias donde el nivel freático se hace casi superficial, pero también representa un recurso potencial que puede emplearse en el mantenimiento de una agricultura intensiva a través de un adecuado manejo con el establecimiento de un sistema de drenaje superficial.

4.6. MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

4.6.1. Geomorfología

La geomorfología trata sobre el origen y características morfológicas que sobresalen en el área de estudio, los procesos erosivos que actualmente las modifican, la relación de estas unidades con ciertos recursos que promueven actividades de aprovechamiento económico y sobre la detección de procesos erosivos naturales y antrópicos que ponen en peligro el medio ambiente y

seguridad de los habitantes y centros poblados que se emplazan en el área de interés.

El área de estudio se encuentra por encima de los 3800 m.s.n.m. por lo que comprende geoformas propias de este sector. La variedad de formas fisiográficas y de procesos erosivos se debe al desarrollo de las siguientes unidades geomorfológicas:

Altiplanicie sedimentaria.- Ocupa una gran parte de la superficie del territorio de la zona de estudio; porción de terreno relativamente elevada, extensa, plana, comúnmente limitada por lo menos en un lado por una caída brusca a terrenos más bajos y por otro lado a geoformas existentes a su alrededor.



Figura 25: Zona de altiplanicie sedimentaria. Fuente fotografía propia

Planicies y valles aluviales.- Franja de terreno extensa, plana y de posición baja con pendiente suave. Se presentan a lado de los cauces fluviales. Se formó como producto del desplazamiento lateral del río dentro de su llanura aluvial y controlada por un lado por la zona de pie de monte.

Geoforma que evidencia zona de desagüe de las partes montañosas y muy poco afectados por los eventos orogénicos, donde el espacio es permisible y ocupadas por cultivos.



Figura 26: Zona de colina y planicie en la zona de estudio. Fuente fotografía propia

Colina estructural en roca.- Son relieves elevados que se caracterizan por presentar pendientes entre 8% y más de 50% con altura variables, pero que no pasan los 150 metros sobre los llanos circundantes. Son geoformas originadas por periodos de disección reciente, que han variado sus resultados morfológicos principalmente en función de los factores litológicos locales, es por ello que las colinas se clasifican de acuerdo a su altura, grado de disección y edad de los tipos litológicos dominantes.

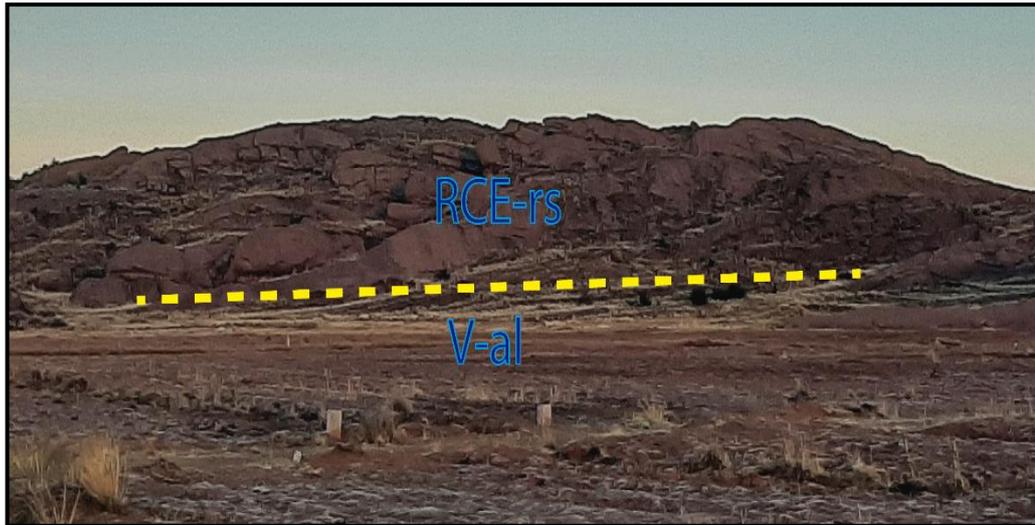


Figura 27: Zona de colina estructural en roca y vertiente. Fuente fotografía propia

Colinas y lomadas.- Son elevaciones naturales del terreno, cuyas laderas se inclinan en promedio con valores superiores al 16% de pendiente; y las lomadas con cimas más amplias, redondeadas y alargadas. La longitud y el área que cubren estas geoformas varían; sus formas convexas son originadas por procesos de erosión diferencial de rocas estratificadas con inclinaciones menores de cinco grados.

Esta geoforma se presenta en varios sectores de la zona de estudio y es fácilmente identificable.

Vertiente o pie de monte aluvial.- Esta unidad corresponde a las acumulaciones de laderas originadas por procesos de movimientos en masa (deslizamiento y reptación de suelos), así como también del material detrítico proveniente de caídas o de escorrentía superficial y que ha sido formada por la sedimentación de las corrientes de agua que emergen de los terrenos más elevados hacia las zonas más bajas y abiertas.



Figura 28: Zona de pie de monte aluvial. Fuente fotografía propia

Sistema Antropomórfico.- Este sistema corresponde a las zonas donde se observa la intervención humana, edificaciones, accesos, zonas de sembrío y zonas de pastoreo.

En la zona de estudio se observa desarrollo urbano con escasa planificación, este sistema se encuentra dinámico.

Las carreteras son las vías de acceso vehicular y peatonal, así mismo calles, caminos y tochas carrozables.

La infraestructura rural constituida por materiales de adobe, concreto o ladrillo, con muy poco equipamiento y falta de planificación.



Figura 29: Zona de área rural. Fuente fotografía propia



Figura 30: Zona de sembrío. Fuente fotografía propia

4.6.2. Estratigrafía Regional

Las formaciones geológicas presentes en el área de estudio tienen edades comprendidas entre el Cretáceo al Cuaternario.

Durante el Cretáceo se produjo una deposición donde se sedimentaron las calizas Ayabacas. En el Paleógeno (Oligoceno Superior – Mioceno Inferior),



debido a la composición mineralógica esta formación es portadora de aguas subterráneas.

En el Cretáceo superior se depositaron las areniscas de la formación Muñani, en un ambiente lacustrino, depositando areniscas de color rojizo de granulometría fina a mediana con potentes capas de intercalación de limonitas que se observan claramente en el cerro Yuncuta, como también en Marcuyo, por la composición y facies que presenta son poco portadoras de aguas subterráneas.

En el Neógeno se produjo una fase volcánica denominada como Grupo Barroso, que aflora en la cuenca.

En el Cuaternario Pleistoceno se depositaron los sedimentos lagunares de la formación Azángaro, en una gran cuenca y en el Cuaternario Reciente depósitos de fluvioglaciares, lagunares, aluviales, coluviales, coluvio-aluvial y fluviales. Como depósitos acuíferos son favorables.

4.6.3. Geología Local

La morfología que conforman es de alta meseta con laderas escabrosas cortadas por quebradas de pendientes moderadas, que contrastan con la suavidad de las depresiones intramontañosas y fluvio-lacustrinas. Dentro del contexto de la Geología Regional, se aprecia un alineamiento de las formaciones rocosas a lo largo del eje geosinclinal andino; así las formaciones Cretáceo-Terciarias que pertenecen a la franja sedimentaria Mezo-Cenozoica del sur del Perú muestran un plegamiento moderado dado por estructuras anticlinales y sinclinales pequeños, bastante contorsionados y en parte fallados, cuyo rumbo general es de NW-SE.

Formación Ayabacas (Kis-Ay)

En la base se tiene intercalación de limonitas rojas con intercalación de areniscas, con potentes capas de yeso, intercalación de calcarenitas de color blanquecino, calizas compactas silicificadas en los cerros Yawrincahe, Calacota, Ancasaya, Chijuyo Copapujo, etc.

En algunos lugares se observan calizas intemperizadas que se tienden mucho a fangolitas y margas por su alteración frente a las precipitaciones pluviales.

Estratos que componen la formación de calizas Ayabacas en la localidad de Ilave.

Las capas de caliza dentro de la formación son generalmente gris claro a oscuro, masiva lajosas o finamente laminadas y potentes capas de margas, limonitas meteorizadas.

Las Calizas Ayabacas, en el área de estudio son extensas y otras están separadas en forma de bloques, muchas de ellas son klippes de algunos mantos de corrimiento, las cuales fueron transportadas con una dirección de Oeste a WSW con un desplazamiento subhorizontal al frente de Ilave; esta formación se extiende en su mayor parte de la cuenca de Ilave.



Figura 31: Afloramiento rocoso del Grupo Puno y Formación Ayabacas. Fuente fotografía propia



Figura 32: Arenisca y caliza de la zona de estudio. Fuente fotografía propia

Formación Muñani (Ksp-mu)

La parte inferior de la Formación Muñani es dominada por pelitas rojas, que representan estratificación en un ambiente continental lacustrino, esta intercala una delgada capa de pilitas rojas pero característico color gris oscuro a verdoso, localmente calcáreo, que contrasta fuertemente con las pelitas rojas; las cuales se inserta en diferentes facies.

La parte superior de la Formación Muñani, las pelitas rojas van intercalándose con canales arenosos en forma creciente.

Grupo Puno (P-Pu)

Esta compuesto de areniscas con conglomerados generalmente de color rosado a marrón rojizo, bien clasificadas, masivas a bien estratificadas y de grano muy variable.

El Grupo Puno puede ser convenientemente subdividido en tres facies de extensión regional. Una facie conglomerádica que comprende conglomerados masivos con pocas areniscas interestratificadas y una facie mixta, arenisca-conglomerado, que consiste de areniscas con intercalación de conglomerados y una facie constituida por areniscas y limolitas con poca interestratificación de

conglomerados. Estas tres facies son completamente gradacionales, lo cual se aprecia en la localidad del C.P. Marcuyo y Chojñachojñani.



Figura 33: Zona de contacto del Grupo Puno. Fuente fotografía propia

Grupo Tacaza (PN-ta)

Consiste litológicamente de andesitas pseudo estratificadas, lavas de andesitas basálticas y tufos de bloques, con una alta proporción de sedimento fluviales en la parte basal.

Se han encontrado calizas delgadas intercaladas con areniscas de grano muy fino a grueso y limolitas violáceas a gris rojizo. Las calizas son delgadas, su grano es fino, lateralmente continuas de color gris a gris verdoso pálido. También registra caliza con moluscos pobremente conservados.

Grupo Sillapaca (Nm-si/bl)

El término denominado por Newell (1949), la secuencia está dominada por lavas formando riscos, principalmente de composición dacítica a traquiandesítica y alcalinas en pequeños afloramientos aislados en la zona de estudio. Principalmente se muestran como cordilleras cubiertas de nieve con picos por



encima de los 5000m siendo característicamente peñascos como resultado de la depresión de congelamiento del agua en las grietas de las rocas.

Fotogeológicamente dominan los tonos oscuros siendo estas algunas lavas cortas achaparradas en flujos por erosión que dan farallones escarpados.

Formación Azángaro (NQ –az)

Los sedimentos modernos de esta formación, que se extienden en las terrazas fluvio-lacustrinas de los ríos Ilave y Zapatilla, son los que dominan la parte llana de la zona de estudio.

Están constituidas por una alternancia de capas con estructura lenticular de arena, limos, arcillas y conglomerados finos; moderadamente consolidados, semipermeables, de color marrón a amarillento. La potencia promedio de esta formación es de aproximadamente 30 m, su edad asignada es cuaternario-pleistoceno.

Esta formación es una de las más extensas que aflora en la pampa del C.P. Marcuyo y Chojñachojñani ya que fue uno de los lugares de la cuenca en donde hubo mayor desarrollo de la deposición, la mayor exposición de estos depósitos recientes se encuentra en las pampas de Ilave, Pilcuyo y Juli en donde se les puede apreciar cubriendo algunas rocas de las calizas y de las del grupo Puno, esto casi en la desembocadura de ríos al lago Titicaca son muy favorables como acuífero.



Figura 34: Alternancia de limos, arcillas y conglomerados. Fuente fotografía propia

Se designan con este nombre, a una serie de materiales depositados en el cuaternario, bajo condiciones y ambientes diferenciados.

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOESTRATIGRAFICA	GROSOR	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	
CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Depósitos Aluviales	±100		Gravas, arenas y limos de color gris a marrón grisáceo.	
			Formación Azángaro	±200		Arenas, limos, arcillas y conglomerados finos color marrón a amarillento.	
	NEOGENO	MIOCENO	SUPERIOR	Grupo Sillapaca	±500		Tobas, brechas volcánicas, lavas.
			INFERIOR	Grupo Tacaza	±3600		Flujos andesíticos, tobas, brechas y areniscas vulcanoclásticas.
PALEOGENO	OLIGOCENO EOCENO PALEOCENO	Grupo Puno	±3000		Areniscas de grano medio a grueso color rojo, conglomerados pardos.		
PALEOZOICO	CRETÁCEO	SUPERIOR	Formación Muñani	±800		Areniscas y limoarcillitas marrón rojizas de grano fino a grueso.	
			Formación Vilquechico	±650		Limoarcillitas gris oscuras con niveles de areniscas.	
		INFERIOR	Formación Ayabacas	±1200		Calizas color gris azulado a gris parduzco, limonitas rojas con intercalación de areniscas.	

Figura 35: Columna estratigráfica de la zona de estudio. Fuente Ingemmet

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS EN CAMPO

a. Adquisición de datos en campo

El presente estudio se inició previo reconocimiento del terreno donde se realizaron los estudios geofísicos, y la ubicación de los puntos para el levantamiento de datos de Sondajes Eléctricos Verticales en coordenadas UTM ejecutados en la localidad del centro poblado de Marcuyo y la comunidad campesina Chojñachojñani que se han tomado con GPS Garmin en el sistema internacional WGS-84 que está en la zona 19 sur, que se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 3

Ubicación de los SEV en el C.P. Marcuyo

SEV	NORTE	ESTE	ALTITUD (m)	OBSERVACIONES
SEV 1	8213988	441403	3849	Línea 1
SEV 2	8213896	441285	3848	Línea 1
SEV 3	8213874	441342	3847	Línea 2
SEV 4	8213993	441251	3848	Línea 2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4

Ubicación de los SEV en el C.C. Chojñachojñani

SEV	NORTE	ESTE	ALTITUD (m)	OBSERVACIONES
SEV 1	8215864	439441	3849	Línea 1
SEV 2	8215977	439349	3848	Línea 1
SEV 3	8216106	439332	3847	Línea 1
SEV 4	8216097	439148	3848	Línea 2
SEV 5	8216181	439279	3847	Línea 2
SEV 6	8216261	439396	3849	Línea 2

Fuente: Elaboración propia



Figura 36: Realizando los SEV en la zona de estudio. Fuente fotografía propia

b. Parámetros SEV calculados

El proceso de interpretación, es la fase que permite determinar los parámetros básicos de Resistividad Verdadera y Espesores de cada uno de los horizontes geoelectricos que constituye el subsuelo. Las Resistividades Verdaderas y Espesores, se correlacionan, obteniéndose planos y perfiles de las variaciones laterales y en profundidad de las características físico geológicas que al ser estudiadas con las técnicas geofísicas proporciona valiosa información. La interpretación analítica se ha hecho con la ayuda de curvas maestras de ábacos chino-ruso, la metodología empleada fue la de Schlumberger y Ebert; asimismo toda la información se ha procesado con el software IPI2WIN, que permite mayor confiabilidad en los resultados.

Tabla 5

Valores de resistividad y espesores geoelectricos en el C.P. Marcuyo

SEV	R _o	E _o	R ₁	E ₁	R ₂	E ₂
SEV 1	60	15	75	35	95	NI
SEV 2	55	14	80	36	150	NI
SEV 3	55	12	80	38	100	NI
SEV 4	50	15	85	35	150	NI

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6

Valores de resistividad y espesores geoelectricos en la C.C. Chojñachojñani

SEV	R _o	E _o	R ₁	E ₁	R ₂	E ₂
SEV 1	60	4	70	36	100	NI
SEV 2	45	4	90	36	120	NI
SEV 3	50	3	80	37	180	NI
SEV 4	55	3	75	32	95	NI
SEV 5	50	5	85	30	120	NI
SEV 6	60	3.5	80	32.5	170	NI

Fuente: Elaboración propia

Donde:

SEV = Sondaje eléctrico vertical

R = Resistividad eléctrica (ohm-m)

E = Espesor del estrato (mts)

NI = No identificado

c. Interpretación de datos

Los Sondajes Eléctricos Verticales ejecutados en la localidad del centro poblado de Marcuyo tienen las siguientes características interpretadas:

SEV 1

E_o : Estrato de sedimentos limo arcillosos con intercalación de arena fina con una resistividad de 60 ohm-m y espesor de 15 mts.

E₁ : Estrato de sedimentos compuesto por grava, limo y arena gruesa con una resistividad de 75 ohm-m y espesor de 35 mts. Probable acuífero de agua subterránea.

E₂ : Estratificación de material limo arcilloso con intercalación de arena gruesa con una resistividad de 95 ohm-m y espesor mayor a 8 mts.

SEV 2

E₀ : Estrato de sedimentos limo arcillosos con intercalación de arena fina con una resistividad de 55 ohm-m y espesor de 14 mts.

E₁ : Estrato de sedimentos compuesto por grava, arena gruesa con una resistividad de 80 ohm-m y espesor de 36 mts. Probable acuífero.

E₂ : Estratificación de material limo arcilloso con intercalación de arena gruesa con una resistividad de 150 ohm-m y espesor NI.

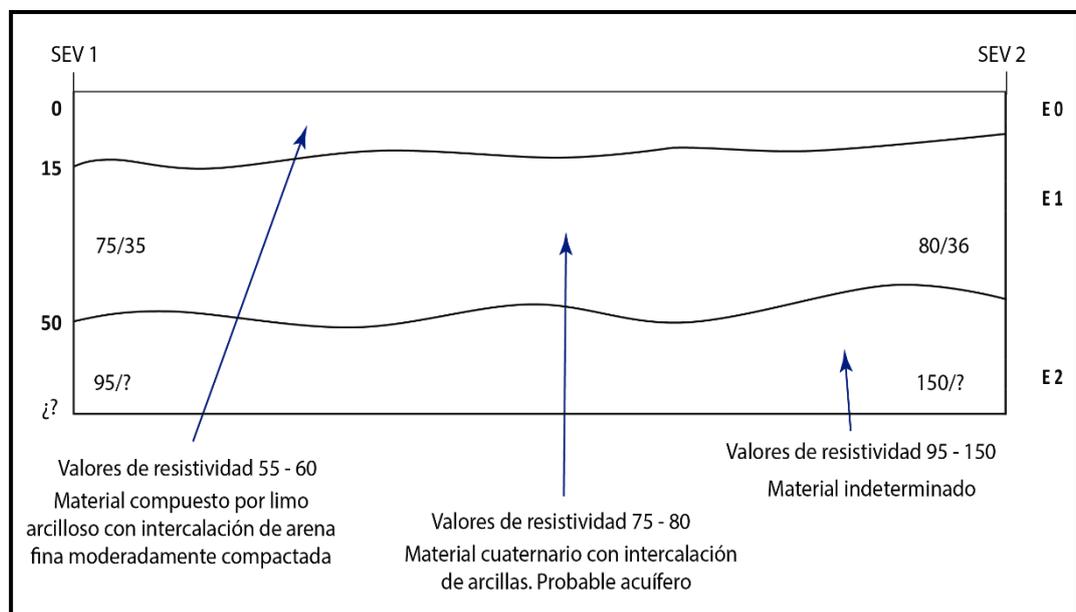


Figura 37: Sección de SEV 1 y 2 en el C. P. Marcuyo

SEV 3

E₀ : Estrato de sedimentos limo arcillosos con intercalación de arena fina con una resistividad de 55 ohm-m y espesor de 12 mts.

E₁ : Estrato de sedimentos compuesto por grava, arena gruesa con una resistividad de 80 ohm-m y espesor de 38 mts. Probable acuífero.

E₂ : Estratificación de material limo arcilloso con intercalación de arena gruesa con una resistividad de 100 ohm-m y espesor NI.

SEV 4

E₀ : Estrato de sedimentos limo arcillosos con intercalación de arena fina con una resistividad de 50 ohm-m y espesor de 15 mts.

E₁ : Estrato de sedimentos compuesto por grava, arena gruesa con una resistividad de 85 ohm-m y espesor de 35 mts.

E₂ : Estratificación de material limo arcilloso con intercalación de arena gruesa con una resistividad de 95 ohm-m y espesor NI.

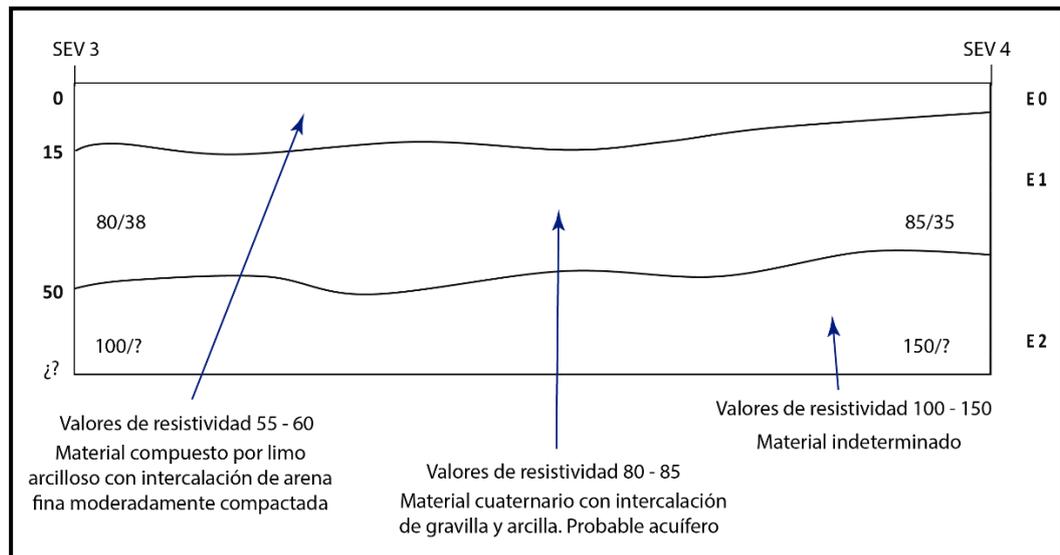


Figura 38: Sección de SEV 3 y 4 en el C. P. Marcuyo

Los Sondajes Eléctricos Verticales ejecutados en la localidad de la Comunidad Campesina Chojñachojñani tienen las siguientes características interpretadas:



SEV 1

E_0 : Estrato de sedimentos limo arcillosos con intercalación de arena fina con una resistividad de 60 ohm-m y espesor de 4 mts.

E_1 : Estrato de sedimentos compuesto por grava, limo y arena gruesa con una resistividad de 70 ohm-m y espesor de 36 mts. Probable acuífero de agua subterránea.

E_2 : Estratificación de material limo arcilloso con intercalación de arena gruesa con una resistividad de 100 ohm-m y espesor mayor a 8 mts.

SEV 2

E_0 : Estrato de sedimentos limo arcillosos con intercalación de arena fina con una resistividad de 45 ohm-m y espesor de 4 mts.

E_1 : Estrato de sedimentos compuesto por grava, limo y arena gruesa con una resistividad de 60 ohm-m y espesor de 36 mts. Probable acuífero.

E_2 : Estratificación de material limo arcilloso con intercalación de arena gruesa con una resistividad de 90 ohm-m y espesor mayor a 7 mts.

SEV 3

E_0 : Estrato de sedimentos limo arcillosos con intercalación de arena fina con una resistividad de 50 ohm-m y espesor de 3 mts.

E_1 : Estrato de sedimentos compuesto por grava y arena gruesa con una resistividad de 80 ohm-m y espesor de 37 mts. Probable acuífero.

E_2 : Estratificación de material limo arcilloso con intercalación de arena gruesa con una resistividad de 100 ohm-m y espesor mayor a 10 mts.

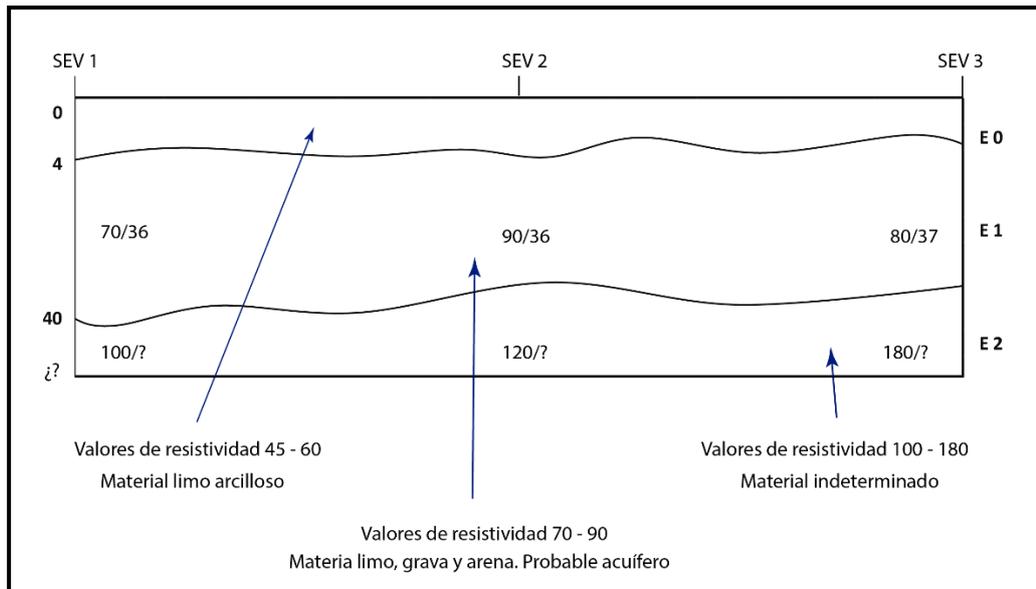


Figura 39: Sección de SEV 1, 2 y 3 en la C. C. Chojñachojñani

SEV 4

E₀ : Estrato de sedimentos limo arcillosos con intercalación de arena fina con una resistividad de 55 ohm-m y espesor de 3 mts.

E₁ : Estrato de sedimentos compuesto por grava y arena gruesa con una resistividad de 75 ohm-m y espesor de 32 mts.

E₂ : Estratificación de material limo arcilloso con intercalación de arena gruesa con una resistividad de 95 ohm-m y espesor mayor a 13 mts.

SEV 5

E₀ : Estrato de sedimentos limo arcillosos con intercalación de arena fina con una resistividad de 50 ohm-m y espesor de 5 mts.

E₁ : Estrato de sedimentos compuesto por grava y arena gruesa con una resistividad de 85 ohm-m y espesor de 30 mts. Probable acuífero.

E₂ : Estratificación de material limo arcilloso con intercalación de arena gruesa con una resistividad de 100 ohm-m y espesor mayor a 13 mts.

SEV 6

E₀ : Estrato de sedimentos limo arcillosos con intercalación de arena fina con una resistividad de 60 ohm-m y espesor de 3.5 mts.

E₁ : Estrato de sedimentos compuesto por grava y arena gruesa con una resistividad de 80 ohm-m y espesor de 32.5 mts. Probable acuífero.

E₂ : Estratificación de material limo arcilloso con intercalación de arena gruesa con una resistividad de 95 ohm-m y espesor mayor a 8 mts.

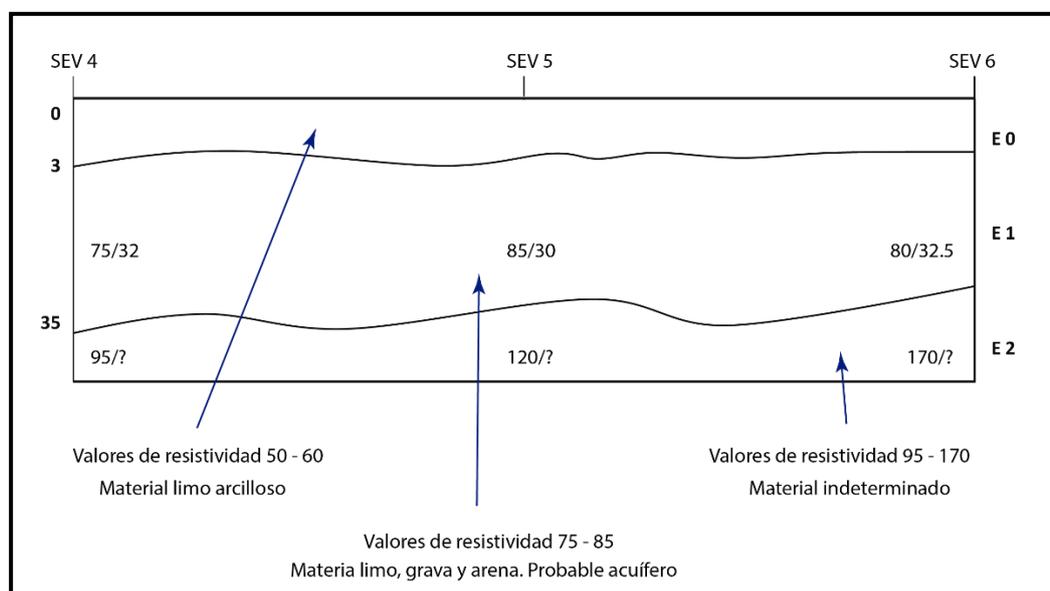


Figura 40: Sección de SEV 4, 5 y 6 en la C. C. Chojñachojñani

d. Anteproyecto de perforación

De acuerdo a los resultados de interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales y su correlación con la geología local, el acuífero manifestado en el entorno de la localidad del C.P. Marcuyo y la C.C. Chojñachojñani correspondería a depósitos del cuaternario aluvial formadas durante las avenidas que causo la formación de llanuras que se encuentran saturadas de aguas subterráneas y conectadas hidráulicamente en la extensión de los estratos en la cuenca del río Zapatilla e Ilave. Esta estructura constituirá el potencial portador de aguas

subterráneas susceptibles de aprovechamiento y explotación mediante pozo tubular.

Viabilidad de Perforación

Alrededor del C.P. Marcuyo y la C.C. Chojñachojñani se observa el escurrimiento superficial que probablemente provenga de la filtración de la cuenca del río Ilave de las zonas altas en donde existen afluentes de aguas. Esto nos indica que es uno de los afluentes principales de aguas subterráneas del C.P. Marcuyo y la C.C. Chojñachojñani, al encontrar manantiales cerca del proyecto y también al encontrarse cerca el río Ilave, es un indicativo de procedencia de la columna vertical de estructuras acuíferas existentes en el lugar de estudio.

Los resultados que son interpretados del estudio identificaron la presencia de una estructura del subsuelo de estrato E₁ y E₂ que están compuestos de arena y grava permeable de depósitos cuaternarios con probable presencia de acuífero con agua subterránea en el C.P. Marcuyo y la C.C. Chojñachojñani, por lo que es viable la perforación de un pozo con fines de captar agua subterránea para los propósitos del proyecto de agua para riego tecnificado.

Ubicación del punto de Perforación

En base a la viabilidad de perforación del pozo, el punto de ubicación está referido cerca al SEV 2 en ambo casos, tanto para el C.P. Marcuyo y también para la C.C. Chojñachojñani.

Tabla 7

Coordenadas de ubicación de perforación del pozo

PROYECTO	ESTE WGS-84 UTM	NORTE WGS-84 UTM
Marcuyo	441312	8213916
Chojñachojñani	439409	8215936

Fuente: Elaboración propia

Profundidad y diámetro de Perforación

La profundidad de perforación del pozo exploratorio proyectado en el C.P. Marcuyo y también para la C.C. Chojñachojñani se estima que tendría un alcance de hasta 40.0 metros; con diámetro de perforación de 8" y entubado de 4" según el diseño técnico preliminar.

Ya estimada la profundidad del pozo, se plantea un diseño técnico preliminar con las siguientes características constructivas de perforación exploratoria proyectada:

Profundidad de perforación	: 40.0 metros
Diámetro de perforación	: 8.0 pulgadas
Diámetro de entubamiento PVC	: 4.0 pulgadas
Entubamiento total	: 40.0 metros
Tramo de filtros	: 8.0 a 35.0 metros

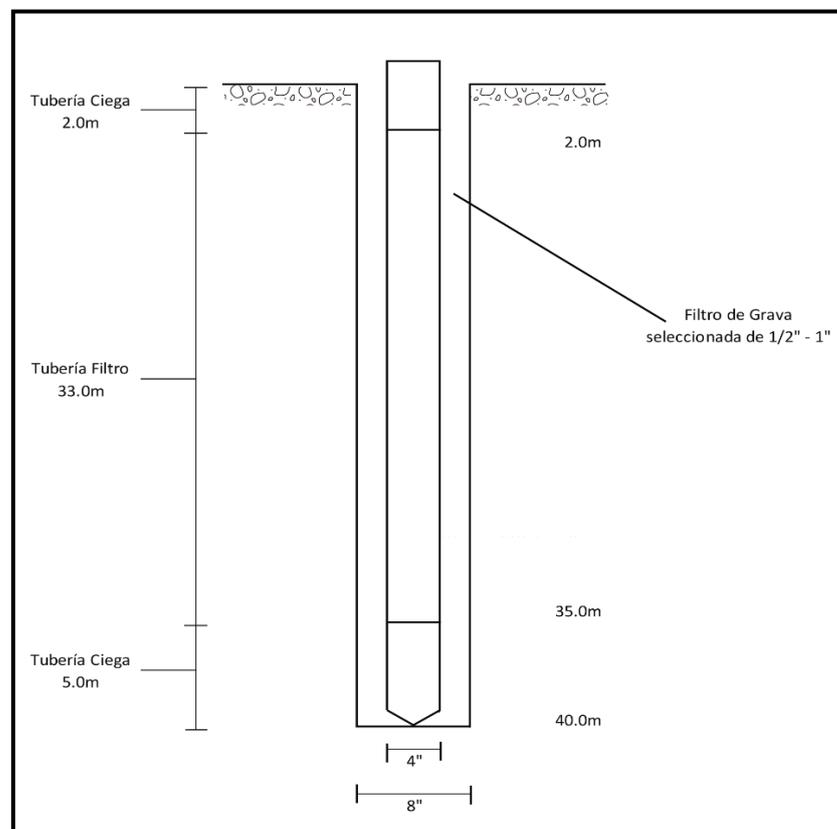


Figura 41: Diseño técnico preliminar de perforación de pozo exploratorio



e. Construcción del pozo

Se presentan las especificaciones técnicas que se deben seguir para la construcción del pozo.

Se realiza el transporte de los equipos y maquinarias necesarias e imprescindibles a utilizarse en la ejecución del proyecto, los cuales son:

- 01 Equipo de perforación rotatorio con capacidad de perforación de 130 metros de profundidad
- 01 Juego de tuberías de perforación y accesorios. Brocas/triconos
- 01 Grupo electrógeno
- 01 Sonda eléctrica
- 01 Equipo de bombeo
- 01 Equipo de SEV
- 01 Juego de herramientas
- 01 Tanque de agua

Excavación de zanja para pozas de lodo

Se hace el excavado de pozas con medidas adecuadas para la recirculación de lodo preparado y bombeo de lodo de perforación, utilizando un área de 1m x 1m de terreno, esta excavación se desarrolló para perforar los pozos exploratorios.

Lodos de Perforación

Para la preparación de los lodos de perforación se deberán usar lodos bentoníticos, de acuerdo a los problemas que se puedan presentar y los aditivos tales como soda cáustica, quebracho, etc.; previo control y verificación de la densidad de lodo y las propiedades químicas de acuerdo a los estratos a ser perforado.



Registro de Perforación

Se llevará el registro exacto de todas las actividades desarrolladas, como tiempo de la perforación y la profundidad perforada. Así como también las pérdidas de flujo, pérdidas de viscosidad del lodo de perforación y todas las contingencias presentadas.

Toma de muestras de zanja

Se tomarán muestras del subsuelo a intervalos de cada metro de perforación o en cada cambio de Formación. Las muestras deberán empacarse en bolsas de plástico o tela. La profundidad que se observe en el momento de recolección deberá anotarse claramente en todas las muestras recogidas.

Cuándo se presentan horizontes con posibles acuíferas, deberán hacerse anotaciones pertinentes al lodo de perforación sobre sus características y propiedades como viscosidad, pérdidas, adelgazamientos notables, aumento de volumen de dichos lodos en las piscinas y cantidad de bentonita que se hizo necesaria adicionar para aumentar viscosidad de los mismos. Es aconsejable tomar también la resistividad o conductividad del lodo y registrar el cambio.

f. Perforación del pozo

El pozo tubular exploratorio se utilizará triconos de 7", además se cuenta con un total de 7 tuberías cada uno de 6m.

La instalación de la tubería ciega de PVC SAP C-10 de 4" de diámetro.

El suministro de mano de obra, materiales y equipo necesario para la preparación y transporte de la grava seleccionada como prefiltro; antes de la instalación de la grava, ésta debe estar limpia y redondeada, libre de sedimentos, arcillas u otro material indeseable, el espacio anular entre el filtro y el terreno es rellenado de grava desde el fondo del pozo hasta la superficie del suelo.



El engravado de prefiltro se introduce a través de un tubo trompa, colocado dentro del anillo circular del agujero y el entubamiento, en el fondo del intervalo a ser llenado.

Concluida la perforación del pozo se procede a entubar y el colocado de prefiltro para posteriormente realizar el lavado preliminar y cambio gradual del lodo de perforación que se utilizó. Para ello se aplicara tripolifosfato de sodio en el pozo perforado y entubado con la finalidad de acelerar la limpieza del pozo.

El desarrollo del pozo se realizara con inyección de agua con bombas, luego de haber colocado el entubado definitivo se procederá a instalar el equipo de desarrollo con bombas sumergibles. Una vez culminado los trabajos de desarrollo seguirá la desinfección de los pozos con hipoclorito de calcio.

Se realizará el sellado sanitario en espacio anular de diámetro de 1.20m en pozo con concreto $f_c = 210\text{kg/cm}^2$ posteriormente para la instalación de la parte electromecánica. El sellado con concreto y plancha metálica en la boca del pozo tubular exploratorio para así sostener las instalaciones electromecánicas.

Pruebas de Pozo

Se hará la prueba de bombeo a caudal constante por 12 horas consecutivas utilizando un equipo con capacidad suficiente para extraer el caudal que se requiere para abastecimiento de agua para riego en el C.P. Marcuyo y también para la C.C. Chojñachojñani.

Para medir el nivel de agua en el pozo se utilizará sonda eléctrica; para introducir el cable de la sonda se necesita una tubería plástica con diámetro mínimo de una pulgada acoplada exteriormente a la columna de descarga de la bomba. La longitud de esta tubería de medición deberá ser suficiente para que su extremo inferior quede a un metro inmediatamente sobre el cuerpo de impulsores.



Las instalaciones de la prueba de bombeo deberán impedir la circulación de aguas, las cuales se descargaron a una distancia mínima de 30 metros de los pozos.

En el C. P. Marcuyo la zona de estudio tiene un perímetro de 1.81 kilómetros y un área de 20 hectáreas.

En la C. C. Chojñachojñani la zona de estudio tiene un perímetro de 1.09 kilómetros y un área de 7.39 hectáreas.



VI. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados de interpretación de sondajes eléctricos verticales y su correlación con la geología local, el acuífero manifestado en el entorno del C. P. Marcuyo y en la C. C. Chojñachojñani corresponderían a depósitos del cuaternario aluvial formadas durante las avenidas que causó la formación de llanuras que se encuentran saturados de aguas subterráneas y conectadas hidráulicamente en la extensión del estrato en la cuenca del río Zapatilla e Ilave. Entorno a la manifestación de manantiales y el río Ilave, es uno de los indicativos de procedencia de la columna vertical de estructuras acuíferas existentes en el lugar de estudio. El espesor promedio de la capa del acuífero varía desde 12 a 40 metros, lo cual estaría constituido por capas de arena gruesa, grava, arena fina con intercalación de capas de arcilla y limo.
- El estrato E_0 tiene una resistividad de 45-60 ohm-m y un espesor de 0-15 metros en el C. P. Marcuyo y un espesor de 0-4 metros en la C. C. Chojñachojñani. El estrato E_1 donde sus resistividades varían de 70 - 90 ohm-m, estrato que alcanza un espesor promedio de 38 metros en el C. P. Marcuyo y un espesor de 37 metros en la C. C. Chojñachojñani.
- Se distinguen 3 estratos definidos E_0 , E_1 y E_2 con las siguientes características: El estrato E_0 que corresponde a suelos superficiales de sedimentos limo arcillosos con arenas finas. El estrato E_1 que indica la ocurrencia de sedimentos de capas de arena gruesa y grava. El estrato E_2 vendría a conformar el nivel de fondo compuesto de sedimentos estratificados de limos y arcillas con intercalación de capas de arena gruesa.



VII. RECOMENDACIONES

- Se debería realizar estudios con mayor tendido de cable y de esa manera obtener mayor profundidad.
- Para diferenciar las capas del subsuelo se deberían realizar más secciones geoelectricas.
- Se debería ampliar este tipo de trabajos en otras zonas aledañas a la zona de estudio.



VII. REFERENCIAS

- Auge, M. (2008) *Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea*. Buenos Aires – Argentina
<http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/ProspeccGoelec.pdf>
- Barrientos Quinde, Karen E. (2018) *Investigación hidrogeológica para explotación de agua subterránea en el sector 84 bajo – San Isidro, Distrito de Tambogrande, Provincia y Departamento de Piura – Perú*. Universidad Nacional de Piura.
<https://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1595>
- Benitez, A. (1963) *Captación de aguas subterráneas: Nuevos métodos de prospección y de cálculo de caudales*. Madrid. 2da Edición.
- Cantos Figuerola, J. (1987) *Tratado de la geofísica aplicada*. Madrid: Ciencias Industriales, 2da Edición.
- Cárdenas, J. & Galvis, E. (2019) *Manual para la interpretación del perfil de resistividad obtenido al realizar el estudio de la resistividad del suelo a partir de las configuraciones del método de Wenner*. Colombia. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Carrasco García, Pedro (2013) *Avance en técnicas geofísicas para la caracterización del subsuelo mediante innovación y el uso de herramientas de gestión de información espacial*. Universidad de Salamanca.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=87129>
- Castillo Valencia, Frank J. (2017) *Estudio geofísico para la exploración de agua subterránea en el fundo Buselcat Asia – Cañete, Lima*. Universidad Nacional de San Agustín.
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2815>
- Chávez Díaz, Rosendo (1994) *Hidrología para ingenieros*.



https://books.google.com.pe/books/about/Hidrolog%C3%ADa_para_ingenieros.html?id=AWnyngEACAAJ&redir_esc=y

Chumbe Ventura, Robert A. (2018) *Aplicación de métodos geofísicos en los estudios geotécnicos para centrales hidroeléctricas. Universidad Nacional de Ingeniería.*
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_081c541bc26860a732df831db16d516d/Details

Colquehuanca Quispe, Jannet V. (2015) *Estudio hidrogeológico en la cabecera de la subcuenca de Macuya, mediante prospección geofísica. Universidad Nacional de San Agustín.*
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3206>

Custodio, E. & Llamas, M. R. (1996) *Hidrología subterránea.* Barcelona. Ediciones Omega S.A. 2da Edición.

Dávila Burga, J. (1992) *Diccionario Geológico. Arth Grouting S.A.C. Perú. Primera Edición*

Daza Hernández, Felipe A. (2012) *Métodos geoeléctricos aplicados a la exploración de aguas subterráneas y termales. Universidad de Concepción, Chile.*
https://books.google.com.pe/books/about/M%C3%A9todos_geoel%C3%A9ctricos_aplicados_a_la_e.html?id=CvUooAEACAAJ&redir_esc=y

Dobrin, Milton B. (1969) *Introducción a la prospección geofísica.* Ediciones Omega S.A. Barcelona. Second Edition

Hernández R., Fernández C. & Baptista P., (2019) *Metodología de la investigación.* Interamericana Editores. México. Quinta edición

Huaman Morales, M. (2017) *Estudio de prospección geofísica en la ubicación de un pozo tubular para mejorar el servicio de agua potable en el sector de San Luis, Distrito de Santa, Provincia de Santa – Departamento de Ancash.*



Instituto Geológico y Minero De España (2006) *Tomografía geoeléctrica: Desarrollo para la caracterización de acuíferos*. J.L. Plata. Universidad de Barcelona
http://info.igme.es/SidPDF%5C112000%5C159%5CTomo%20I%5C112159_0001.pdf

Johnson, Edward E. (1975) *El agua subterránea y los pozos*. Minnesota. 1ra Edición.

Kirsch, Reinhard (2006) *Groundwater Geophysics*. First Edition

López Tamayo, A. (2015) *Exploración geofísica para la prospección hidrogeológica del sistema Pool Tunich, Solidaridad, Quintana Roo, México* [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán]
<https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/364>

Montaño, F. (2009) *Aplicación de métodos eléctricos de prospección geofísica*. Colombia.
<http://sg.cier.org.uy/Publicaciones/revista.nsf/0a293b20eacdf8a903257133003ea67d/2f6610e1ca627d25832576ef004f02?OpenDocument>

Newell N. D. (1949) *Geology of the Lake Titicaca región, Peru and Bolivia*. Geological Society of America Memoir.

Orellana Silva, E. (1982) *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. Paraninfo. Madrid

Paredes R., Alexis V. (2019) *Potencial acuífero mediante el sondeo eléctrico vertical (SEV) en las unidades litoestratigráficas en la zona de Agocucho*. Universidad Privada del Norte.
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/21795>

Progeo, Alberto (1997) *Prospecciones geofísicas para agua subterráneas*. Córdoba – Argentina.
http://www.igme.es/actividadesigme/lineas/HidroyCA/publica/libros2_TH/actu_tec_geofi/pdf/3a_ponencia.pdf



- Reyes A., Coras P. M. & Arteaga E. (2017) *Prospección geofísica eléctrica en la búsqueda de agua subterránea*. Universidad Autónoma Chapingo.
http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2017/wp-content/uploads/ponencias/tema_A/a14.pdf
- Solana Capilla, M. (2014) *Comparación de técnicas geofísicas para determinación de contaminación de suelos agrícolas*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas
<https://oa.upm.es/32832/>
- Subsuelo 3D S.A.S (2017) *Estudio de geoeléctrica para prospección y exploración de agua subterránea en la cabecera municipal de Jerusalén – Departamento de Cundinamarca*.
<http://sie.car.gov.co/bitstream/handle/20.500.11786/33646/Estudio%20de%20geoel%C3%A9ctrica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Telford W. M., Geldart L. P. & Sheriff R. E. (1976) *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, London. Second Edition.
- Toledo Baca, Juan C. (2015) *Aplicación de los métodos geoeléctricos en la prospección geofísica*. Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/12584/Toledo_Baca_Juan_Cesar_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vélez Otálvaro, María V. (1999) *Hidráulica de aguas subterráneas*. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
https://www.researchgate.net/profile/Velez-Maria/publication/338778773_Hidraulica_de_Aguas_Subterranas/links/5e2a11f492851c3aadd512bb/Hidraulica-de-Aguas-Subterranas.pdf
- Vitulli N. & R. García (2015) *Método eléctrico: Principios y leyes fundamentales; prospección, tendidos presentación e interpretación*.



<https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1880?mode=full>

<https://es.weatherspark.com/>



ANEXOS



