

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA



TESIS:

**“ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA
SUBTERRÁNEA PARA SU APROVECHAMIENTO EN EL
FUNDO HUAYRAPONGO CHICO, BAÑOS DEL INCA –
CAJAMARCA, 2024”**

Para optar el Título Profesional de
INGENIERO HIDRÁULICO

Autor:

Bach. **GUTIÉRREZ COLORADO, MAICOL ORLANDO**

Asesor:

Dr. Ing. **GASPAR VIRILO MÉNDEZ CRUZ**

CAJAMARCA – PERÚ

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador: MAICOL ORLANDO GUTIÉRREZ COLORADO

DNI: 75975269

Escuela Profesional: Ingeniería Hidráulica

2. Asesor: Gaspar Virilo Méndez Cruz

Facultad: Ingeniería

3. Grado académico o título profesional

Bachiller

Título profesional

Segunda especialidad

Maestro

Doctor

4. Tipo de Investigación:

Tesis

Trabajo de investigación

Trabajo de suficiencia profesional

Trabajo académico

5. Título de Trabajo de Investigación:

ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SUBTERRÁNEA PARA SU APROVECHAMIENTO EN EL FUNDO HUAYRAPONGO CHICO, BAÑOS DEL INCA – CAJAMARCA, 2024

6. Fecha de evaluación: 27/10/2025

7. Software antiplagio:

TURNITIN

URKUND (OURIGINAL) (*)

8. Porcentaje de Informe de Similitud: 17 %

9. Código Documento: Oid: 3117:519048621

10. Resultado de la Evaluación de Similitud:

APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: Cajamarca, 06 de enero de 2026



FIRMA DEL ASESOR
Dr. Ing. Gaspar Virilo Méndez Cruz

DNI: 26631950



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148268601 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 06/01/2026 09:58:10-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : ESTIMACIÓN DE LA DIPONIBILIDAD HÍDRICA SUBTERRÁNEA PARA SU APROVECHAMIENTO EN EL FUNDO HUAYRAPONGO CHICO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA, 2024.

ASESOR : Dr. Ing. Gaspar Virilo Méndez Cruz.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0086-2026-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 21 de enero de 2026, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **tres días del mes de febrero de 2026**, siendo las quince horas con treinta minutos (3:30 p.m.) en la Sala de Audiovisuales (Ambiente 1A - Segundo Piso), de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de Cajamarca, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Vocal : Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.
Secretario : M.Cs. Ing. José Hilario Longa Álvarez.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **ESTIMACIÓN DE LA DIPONIBILIDAD HÍDRICA SUBTERRÁNEA PARA SU APROVECHAMIENTO EN EL FUNDO HUAYRAPONGO CHICO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA, 2024**, presentado por el *bachiller en Ingeniería Hidráulica MAICOL ORLANDO GUTIÉRREZ COLORADO*, asesorado por el Dr. Ing. Gaspar Virilo Méndez Cruz, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 07 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 18 PTS

Decendio (En letras) *Decendio (18)*

En consecuencia, se lo declara Aprobado con el calificativo de con el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 03:30 del 13 horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Presidente

Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.
Vocal

M.Cs. Ing. José Hilario Longa Álvarez.
Secretario

Dr. Ing. Gaspar Virilo Méndez Cruz.
Asesor

AGRADECIMIENTO

A lo largo del camino recorrido para la realización de esta tesis, muchas personas han sido esenciales tanto en mi vida personal como académica, y a todas ellas quiero dedicarles unas palabras de gratitud.

Quiero agradecer profundamente a mis padres, quienes con su amor y apoyo incondicional han sido mi inspiración y fortaleza. Su ejemplo y sacrificio me han motivado día a día a seguir adelante, para cumplir mis metas.

A mis hermanos y amigos, quienes con su compañía y ánimo hicieron que el proceso fuera más ameno, les agradezco de todo corazón.

A mi asesor de tesis, Dr. Ing. Gaspar Virilo Méndez Cruz, gracias por su guía, paciencia y sabiduría. Sus conocimientos y observaciones fueron fundamentales para la realización de este trabajo, me ha enseñado el valor de la dedicación y la disciplina.

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico a mi familia en especial a mis padres, que con amor y entrega me enseñaron que se pueden lograr grandes cosas. Su ejemplo de vida y su apoyo incondicional me ha dado la fortaleza para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mis hermanos, amigos y familiares, que han sido mi refugio y alegría en este recorrido. Gracias por su apoyo desinteresado y sobre todo por su amistad incondicional.

Finalmente, a todas las personas que, con pequeños gestos, hicieron que este sueño se volviera realidad. A ustedes, les dedico este esfuerzo.

INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.3 JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.3.1 Justificación Científica.....	2
1.3.2 Justificación técnica practica	2
1.3.3 Justificación institucional y personal	2
1.4 ALCANCES O DELIMITACION DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.5 LIMITACIONES	2
1.6 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	2
1.6.1 Objetivo general.....	2
1.6.2 Objetivos específicos	3
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS	3
2.1.1 Internacionales	3
2.1.2 Nacional	3
2.1.3 Locales	4
2.2 BASES TEÓRICAS.....	4
2.2.1 Hidrología.....	4
2.2.1.1 El ciclo hidrológico	5
2.2.2 Origen de las aguas subterráneas.	6
2.2.2.1 Hidrogeología.....	6
2.2.2.2 Acuífero.....	6
2.2.2.3 Parámetros hidrogeológicos	8
2.2.2.3.1 Porosidad.....	13
2.2.2.3.2 Permeabilidad o conductividad hidráulica	15
2.2.2.3.3 Transmisividad (T).....	16

2.2.2.3.4 Coeficiente de almacenamiento	17
2.2.3 Ecuaciones generales.....	18
2.2.3.1 Ley de ohm generalizada.....	19
2.2.4 Resistividad eléctrica.....	20
2.2.5 Sondeos eléctricos verticales (sev).....	22
2.2.6 Métodos electródicos.....	24
2.2.6.1 Método Wenner.....	24
2.2.6.2 Método Schlumberger	25
2.2.6.3 Dispositivo Dipolar Axil (Dipolo – Dipolo)	27
2.2.7 Equipo de medición de los SEV GeoSeeker	28
2.2.8 Napa Freática.....	28
2.2.9 Perfil estratigráfico	29
2.2.10 Perfil geológico	29
2.2.11 Perfil geoelectrico	29
2.2.12 Software IPI2Win.....	31
2.2.13 Aguas Subterráneas para uso Agrícola y Ganadero	32
2.2.13.1 Demanda de agua para uso agrícola	32
2.2.13.2 Demanda de agua para uso ganadero	33
2.2.14 Estimación de la disponibilidad hídrica	34
CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
3.1. UBICACIÓN	35
3.1.1 Ubicación Política	35
3.1.2 Ubicación Administrativa	36
3.1.3 Ubicación hidrográfica.....	38
3.1.4 Localización del área de estudio	39
3.1.5 Características ambientales del área de estudio	40
3.2. MATERIALES	40
3.2.1. Equipos y Materiales Utilizados en la investigación	40
3.2.1.1. Equipos utilizados en campo	40
3.2.1.2. Equipos utilizados en gabinete	40
3.3. FASE PRELIMINAR DE LA INVESTIGACION.....	41
3.4. METODOLOGIA DEL TRABAJO	41
3.4.1 Levantamiento topográfico	41
3.4.2 Plano topográfico del fundo Huayrapongo Chico – UNC	42

3.4.3	Caracterización del Fundo de Huayrapongo chico	43
3.4.3.1	Obtener y procesar la información agropecuaria	43
3.4.3.2	Obtener y procesar la información obtenida del pozo de bombeo	43
3.4.3.3	Obtener y procesar la información geológica	44
3.4.3.4	Obtener y procesar la información geotécnica.....	47
3.4.4	Estimación del requerimiento Hídrico en el fundo Huayrapongo Chico	50
3.4.4.1	Estimación del requerimiento Hídrico de los cultivos	50
3.4.4.2	Equipo que se utilizó para realizar los SEV	54
CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS		57
4.1.	RESULTADOS	57
4.1.1.	Volumen de agua requerido.....	57
4.1.2.	Prueba de bombeo	57
4.1.3.	Sondeo eléctrico vertical (SEV): análisis de resistividad aparente y profundidades	59
4.1.3.1.	SEV realizado en el pozo artesanal N°2	60
4.1.3.2	SEV-1	62
4.1.3.3	SEV-2	63
4.1.3.4	SEV-3	65
4.1.3.5	SEV-4	66
4.1.3.6	SEV-5	68
4.1.4	Perfiles Geoelectricos de los SEV	70
4.1.4.1	Perfil Geoelectrico del Sev-Pozo y el Sev-3	70
4.1.4.2	Perfil geoelectrico del Sev-1 y Sev-2	71
4.1.4.3	Perfil geoelectrico del Sev-4 y Sev-5	72
4.1.5	Perfiles litológicos de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).....	73
4.1.5.1	Perfil litológico del Sev realizado en el pozo artesanal N°2 y el Sev-3	73
4.1.5.2	Perfil litológico de los Sev-1 y Sev-2.....	74
4.1.5.3	Perfil litológico de los Sev-4 y Sev-5.....	75
4.1.6	Transmisividad	76
4.1.7	Coeficiente de almacenamiento.....	76
4.1.8	Conductividad hidráulica.....	76
4.1.9	La porosidad	76
4.1.10	Estimación del potencial hídrico del Fundo	76
4.1.11	Informe de análisis fisicoquímico y bacteriológico de agua	77

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	78
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFIA	82
LINKOGRAFIA	85
ANEXOS	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de porosidad.....	15
Tabla 2: Valores de coeficiente de permeabilidad	16
Tabla 3: Intervalos de la conductividad según la textura y estructura del suelo	16
Tabla 4: Valores de la transmisividad	17
Tabla 5: Valores del coeficiente de almacenamiento	18
Tabla 6: Resistividades de algunos materiales en ohmios-metro.....	22
Tabla 7: Características técnicas del equipo GeoSeeker	28
Tabla 8: Requerimiento de agua para ganado vacuno.....	34
Tabla 9: Distribución de las formaciones Geológicas en el Área de Estudio	45
Tabla 10: Resumen de la información Climática y Estimación de las Evapotranspiración potencias (ETo).....	50
Tabla 11: Distribución de áreas del fundo Huayrapongo Chico	50
Tabla 12: Estimación del coeficiente de Cultivo (Kc) Promedio Mensual en el Fundo Huayrapongo Chico	51
Tabla 13: Análisis de la persistencia del 75% de Precipitaciones Aplicando la Distribución de Weibull.....	52
Tabla 14: Precipitación al 75% de persistencia	52
Tabla 15: Cédula agrícola y necesidades hídricas de los cultivos (Área=9.50 Ha)	53
Tabla 16: Requerimiento de agua para uso ganadero en el fundo Huayrapongo Chico en época de estiaje.....	57
Tabla 17: Requerimiento de agua para uso agrícola en el fundo Huayrapongo Chico en época de estiaje.....	57
Tabla 18: Prueba de bombeo con un caudal de 0.668 lt/s (26/09/2024)	58
Tabla 19: Coordenadas de los SEV	59
Tabla 20: Resistividades aparentes del pozo artesanal N°2	60
Tabla 21: Resistividades aparentes del SEV -1	62
Tabla 22: Resistividades aparentes del SEV -2	63
Tabla 23: Resistividades aparentes del SEV -3	65
Tabla 24: Resistividades aparentes del SEV -4	66
Tabla 25: Resistividades aparentes del SEV -5	68
Tabla 26: Estimación de la disponibilidad hídrica del Fundo Huayrapongo Chico en época de estiaje (junio-diciembre del 2024)	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: El ciclo hidrológico.....	5
Figura 2: Acuífero libre parcialmente drenado por un río	7
Figura 3: Acuífero confinado	7
Figura 4: Acuífero semiconfinado.....	8
Figura 5: Ecuación de THIEM para Ensayo de Bombeo a caudal constante de régimen permanente en Acuífero cautivo.....	10
Figura 6: Representación de medidas en un Grafico logarítmico	12
Figura 7: Representación de la porosidad	13
Figura 8: Porción de un conductor cilíndrico que conduce una corriente I	19
Figura 9: Diagrama con valores típicos de resistividades diferentes	21
Figura 10: Flujo de corriente en un suelo homogéneo e isótropo	23
Figura 11: Arreglo Wenner	24
Figura 12: Arreglo de electrodos para el método Schlumberger	25
Figura 13: Dispositivo o arreglo electrónico Schlumberger	27
Figura 14: Dispositivo Dipolo - Dipolo	27
Figura 15: Napa freática	29
Figura 16: Columna Estratigráfica de Cajamarca	30
Figura 17: Perfil geoelectrico en la plaza de Cusco-Perú.....	31
Figura 18: Mapa Político de Localización del Área de Estudio	35
Figura 19: Mapa de Localización Administrativa.....	36
Figura 20: Mapa de Administración local del agua	37
Figura 21: Mapa de Referencia Hidrográfica.....	38
Figura 22: Mapa de ubicación del área de estudio	39
Figura 23: Levantamiento topográfico con GPS Garmin 64 SX.....	41
Figura 24: Plano topográfico del fundo Huayrapongo Chico – UNC.....	42
Figura 25: Caracterización agropecuaria del Fundo Huayrapongo Chico	43
Figura 26: Obtención de la información del pozo de bombeo, caudal y muestra de agua.....	44
Figura 27: Mapa de las formaciones geológicas en el área de estudio	46
Figura 28: Ficha técnica del pozo PCA-4.....	49
Figura 29: Relación entre oferta y demanda en época de estiaje (junio-diciembre 2024) en el Fundo Huayrapongo Chico	53

Figura 30: Equipo OKM GeoSeeker utilizado para realizar los SEV (28/10/2024)	54
Figura 31: Mapa de distribución de los 6 SEV	56
Figura 32: Curva de la prueba de bombeo (fase descenso).....	59
Figura 33: Curva de resistividad aparente obtenida en el pozo artesanal N°2.....	61
Figura 34: Resistividad aparente vs resistividad calculada del pozo N°2.....	61
Figura 35: Curva de resistividad aparente obtenida del SEV-1	62
Figura 36: Resistividad aparente vs resistividad calculada del SEV-1	63
Figura 37: Curva de resistividad aparente obtenida del SEV-2	64
Figura 38: Resistividad aparente vs resistividad calculada del SEV-2	64
Figura 39: Curva de resistividad aparente obtenida del SEV-3	65
Figura 40: Resistividad aparente vs resistividad calculada del SEV-3	66
Figura 41: Curva de resistividad aparente obtenida del SEV-4	67
Figura 42: Resistividad aparente vs resistividad calculada del SEV-4	67
Figura 43: Curva de resistividad aparente obtenida del SEV-5	68
Figura 44: Resistividad aparente vs resistividad calculada del SEV-5	69
Figura 45: Perfil Geoelectrico del Sev-Pozo y el Sev-3.....	70
Figura 46: Perfil geoelectrico del Sev-1 y Sev-2	71
Figura 47: Perfil geoelectrico del Sev-4 y Sev-5	72
Figura 48: Perfil litológico del Sev-pozo y el Sev-3	73
Figura 49: Perfil litológico de los Sev-1 y Sev-2	74
Figura 50: Perfil litológico de los Sev-4 y Sev-5	75

RESUMEN

La presente investigación tuvo como finalidad determinar la disponibilidad hídrica subterránea presente en el fundo Huayrapongo Chico en época de estiaje, con apoyo de los sondeos eléctricos verticales (SEV) utilizando el arreglo Schlumberger. Se realizaron seis sondeos, realizando el estudio para una profundidad de 80 metros, permitiendo identificar la distribución y características hidrogeológicas del subsuelo. La interpretación de los datos reveló que, los SEV-1 y SEV-3 son los más favorables para el aprovechamiento del agua subterránea, están relacionados con areniscas con resistividades de ($70\text{-}80 \Omega\text{m}$), gravas y arenas saturadas con resistividades de ($30\text{-}60 \Omega\text{m}$).

Los perfiles geoelectricos obtenidos permitieron distinguir zonas con mayor potencial para el almacenamiento de agua subterránea. En particular, los sondeos SEV-1 y SEV-3, en el SEV-1 se identificó un acuífero semiconfinado a 28 m de profundidad, el segundo un acuífero confinado a los 13 metros. Complementariamente, se calcularon los parámetros hidrogeológicos como la transmisividad ($2.746 \text{ m}^2/\text{día}$), la conductividad hidráulica (1.9452 m/día), y la porosidad eficaz (13.9471%), los cuales indican una permeabilidad moderada propia de acuíferos confinados, capaces de almacenar y transmitir agua, aunque en menor medida que en acuíferos de alta productividad. Estimando una disponibilidad hídrica subterráneo en épocas de estiaje de junio a diciembre 2024 con un volumen de $71,827.98 \text{ m}^3$.

Palabras clave

Acuífero: Se refiere a una unidad geológica compuesta por materiales permeables, que almacenan y permiten el flujo del agua subterránea.

Coeficiente de almacenamiento: fracción de agua que un acuífero libera o absorbe ante variaciones en el nivel freático.

Transmisividad: capacidad de un acuífero para transmitir agua según su permeabilidad y espesor saturado.

Porosidad efectiva: porción de material con poros conectados que permiten el flujo y almacenamiento de agua.

Conductividad hidráulica: Es la medida que expresa que tan fácilmente un material geológico permite el paso del agua a través de sus poros o fracturas bajo un gradiente hidráulico.

Resistividad aparente: Es un valor promedio que refleja la oposición del subsuelo al paso de corriente eléctrica, calculado con datos tomados desde la superficie.

ABSTRACT

This research aimed to determine the groundwater availability within the Huayrapongo Chico estate during the dry season, supported by vertical electrical sounding (SEV) techniques under the Schlumberger configuration. A total of six sounding was carried out, each reaching a depth of 80 meters, which allowed the identification of the hydrogeological characteristics and distribution of the subsurface. The interpretation of the collected data revealed that SEV_1 and SEV_3 presented the most favorable conditions for groundwater utilization. These zones were associated with sandstones showing resistivity values between 70 and 80 $\Omega\text{.m}$, as well as saturated gravels and sandas with resistivities ranging from 30 to 60 $\Omega\text{.m}$.

The resulting geoelectrical profiles enabled the distinction of areas with greater potential for groundwater storage. Specifically, SEV_1 identified a semi-confined aquifer at a depth of 28 meters, while SEV_3 revealed a confined aquifer located at approximately 13 meters. Furthermore, key hydrogeological parameters were estimated, including transmissivity ($2.745 \text{ m}^2/\text{da}$), hydraulic conductivity (1.9452 m/day), and effective porosity (13.9471%). These values indicate moderate permeability characteristic of confined aquifers, capable of storing and transmitting groundwater, although to a lesser extent than high-yield aquifers. An estimated groundwater availability of $71,827.98 \text{ m}^3$ was obtained for the dry season extending from June to December 2024.

Keywords

Aquifer: A geologic formation made up of permeable materials that can store and transmit groundwater.

Storage coefficient: The proportion of water an aquifer can release or absorb in response to changes in the water table.

Effective porosity: The percentage of a material's volume composed of interconnected pores that contribute to water flow and storage.

Hydraulic conductivity: A parameter indicating how easily water can move through a geologic material under a hydraulic gradient.

Apparent resistivity: An average value reflecting the subsurfaces's resistance to electrical current, calculated using surface-based measurements.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso del agua subterránea ha mostrado un incremento constante a nivel mundial a lo largo del tiempo, adquiriendo mayor relevancia en la actualidad debido al agotamiento o a la ausencia de fuentes superficiales disponibles para el abastecimiento (Veléz, 1999).

En la exploración de aguas subterráneas, se emplean varios métodos geofísicos que ayudan a identificar las características del subsuelo. Uno de los más comunes es el método de sondeos eléctricos verticales (SEV), también conocido como “perforación eléctrica”. Este método es especialmente útil en estudios geotécnicos y de hidrogeología, ya que permite evaluar la presencia de interfaces horizontales o casi horizontales en el subsuelo. En hidrogeología, su aplicación es fundamental para identificar zonas horizontales con estratos porosos, permitiendo una mejor comprensión de la disponibilidad y ubicación del agua subterránea. (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).

En la prospección eléctrica existen diversas técnicas que permiten determinar de manera indirecta la resistividad, la conductividad de los materiales del subsuelo. Entre los métodos más empleados, tanto por su eficiencia, sencillez y bajo costo, destacan los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), considerados altamente confiables en estudios hidrogeológicos. Su aplicación resulta especialmente útil para la identificación de formaciones acuífera y a delimitación de zonas de contacto entre distintos tipos de fluidos (Yampasi, 2019).

Actualmente, en el fundo Huayrapongo Chico ubicado en el Distrito de Baños del Inca, Provincia de Cajamarca, existe escasez de suministro de agua en épocas de estiaje (junio-diciembre) para el uso agropecuario, siendo una zona de gran interés para realizar la siguiente investigación, es por ello que se realizará una evaluación geoeléctrica aplicando el método de Schlumberger, para medición de la resistividad, para estimar la disponibilidad hídrica subterránea.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuánto es la disponibilidad hídrica subterránea en época de estiaje para su aprovechamiento, con apoyo de Sondajes Eléctricos Verticales, en el fundo Huayrapongo Chico?

1.3 JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Justificación Científica

La escasez del recurso hídrico es un desafío tanto a nivel local como mundial, Por lo tanto, es importante comprender la disponibilidad hídrica subterráneo para analizar el comportamiento del flujo en función de las características hidrogeológicas del acuífero. Además, el uso de métodos como son los SEV que nos permite evaluar de manera precisa las características hidrogeológicas de los acuíferos existentes en el área de influencia.

1.3.2 Justificación técnica practica

El uso de los SEV nos permite obtener la información de los parámetros hidrogeológicos, como la profundidad en la que se encuentran los diferentes tipos de acuíferos, los espesores de los diferentes estratos por los que está cubierto el subsuelo.

1.3.3 Justificación institucional y personal

Esta investigación geoeléctrica se justifica por el bajo costo y la metodología que se va emplear como son los Sondeos Eléctricos Verticales puesto que son muy utilizados en estudios hidrogeológicos con fines de aprovechar el agua subterránea; además de ser económica nos permite conocer y distinguir los materiales que está compuesto el subsuelo, así mismo, ubicar las zonas más favorables para la exploración de este y proponer la ubicación de los pozos de explotación del agua.

1.4 ALCANCES O DELIMITACION DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se realizará en época más desfavorable (estiaje) en el fundo Huayrapongo Chico, Baños del Inca - Cajamarca, como posible solución a la escasez de agua para el uso Agropecuario, es por ello que se centrará en determinar la profundidad de las aguas subterráneas a través de los SEV aplicando el método de Schlumberger, para su aprovechamiento.

El trabajo de campo, se realizará entre junio y diciembre del 2024.

1.5 LIMITACIONES

Información hidrometeorológica y el periodo de estiaje.

1.6 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

1.6.1 Objetivo general

Estimar la disponibilidad hídrica subterránea para su aprovechamiento, con apoyo de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).

1.6.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la zona de estudio
- Realizar la evaluación hidrogeológica del acuífero, empleando Sondeos Eléctricos Verticales.
- Elaborar los perfiles litológicos y geoelectricos.
- Estimar los parámetros hidrogeológicos (Permeabilidad, porosidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento)
- Interpretar y procesar los datos obtenidos en campo utilizando el software IPI2WIN.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1.1 Internacionales

De acuerdo con (Mena, A. 2020), los resultados de su estudio revelan que la primera capa presenta $464 \Omega.m$ de resistividad con un 1m de espesor aproximadamente, correspondiente a un suelo de tipo phaeozem. La segunda capa registra una resistividad de $842 \Omega.m$ con 2 m de espesor, compuesta principalmente por cantes rodados y gravas de granulometría gruesa. En cuanto a la tercera capa, se caracteriza por una resistividad de $189 \Omega.m$, asociada a depósitos aluviales con potencial de almacenamiento de agua subterránea, y un espesor estimado de 15m. La cuarta capa se inicia a una profundidad de 18 m, conformada por material aluvial con presencia de humedad, presentando una resistividad de $63 \Omega.m$ y un espesor de 35 m aproximadamente. Finalmente, la última capa aparece a partir de 53 m de profundidad, compuesta por material aluvial arcilloso saturado, con $18 \Omega.m$ de resistividad indicando una baja capacidad de retención hídrica.

2.1.2 Nacional

Según (Molleda, D.2019) en su investigación, concluyo que, en el área de estudio se realizaron 30 SEVs, a partir de los cuales fue posible identificar zonas con potencial para la perforación de pozos exploratorios. El primer horizonte, denominado H1, muestra valores de resistividad comprendidos entre 30 y $7394 \Omega.m$, con espesores que varían de 1.5 a 32.9 m. Por su parte, el Horizonte H3 muestra resistividades que oscilan entre 68 y $4917 \Omega.m$, alcanzando espesores de 15 a 167 m. Las áreas delimitadas se localizan en la Quebrada de Huiscash, tanto en la parte alta como en la parte baja del sector analizado, y están

constituidas por bloques de diversas dimensiones. El agua almacenada en estos materiales presenta baja salinidad, lo que sugiere condiciones favorables para su aprovechamiento.

2.1.3 Locales

En el año 2015, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) llevó a cabo el estudio denominado “Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del Criznejas”, en el cual se determinó que, para una superficie de 117.5 km^2 y una porosidad efectiva del 6.5 %, el volumen de agua subterránea disponible asciende a 420 hm^3 . Asimismo, se estimó una conductividad hidráulica (K) comprendida entre 10^{-3} y 10^{-4} m/día , y un coeficiente de almacenamiento (S) de 0.06 valores que reflejan las características hidrogeológicas del acuífero analizado.

Según (Paredes, A. 2020) en su investigación, concluyó que, en el área de estudio se realizaron 7 SEV, a partir de los cuales se reconocieron tres capas geoelectricas. La primera está compuesta por areniscas arcillosa, cuyas resistividades varían entre $66.14 \Omega\cdot\text{m}$ y $84.11 \Omega\cdot\text{m}$, con un espesor aproximado de 15 m. La segunda formación está constituida por material de grano mediano a fino, con resistividades que oscilan entre $216 \Omega\cdot\text{m}$ y $302.83 \Omega\cdot\text{m}$, y un espesor entre 25 y 85 metros. La tercera formación consiste en calizas, con resistividades de $513 \Omega\cdot\text{m}$ a $895.30 \Omega\cdot\text{m}$ y espesores que van de los 25 a los 95 metros. Los resultados sugieren que el mejor acuífero se localiza en la segunda capa geeléctrica, con profundidades que van de los 25 y 85 metros bajo la superficie, lo cual indica una zona beneficiosa para la acumulación de agua subterránea.

(Hernández, D. 2019) desarrolló una investigación concluyendo que, para un área de 96.46 km^2 se inventariaron 43 pozos, tanto perforados como excavados, cuyas profundidades oscilan entre 5 y 80 metros. De este conjunto, se identificaron cuatro pozos de interés estratégico, a partir de los cuales se determinó que la conductividad hidráulica (K) presenta valores comprendidos entre 0.20 y 0.40 m/día. La transmisividad promedio fue estimada en $19.55 \text{ m}^2/\text{día}$, lo que indica la presencia de un acuífero libre. Asimismo, se calculó una porosidad efectiva de 5.23%, considerando un espesor medio del acuífero saturado de aproximadamente 55 m, se concluye que dicho acuífero posee buenas condiciones para la producción de agua subterránea.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Hidrología

La hidrología es una disciplina fundamental dentro de las ciencias naturales que abarca el estudio del agua en todas sus formas y procesos. Su campo de estudio incluye no solo la

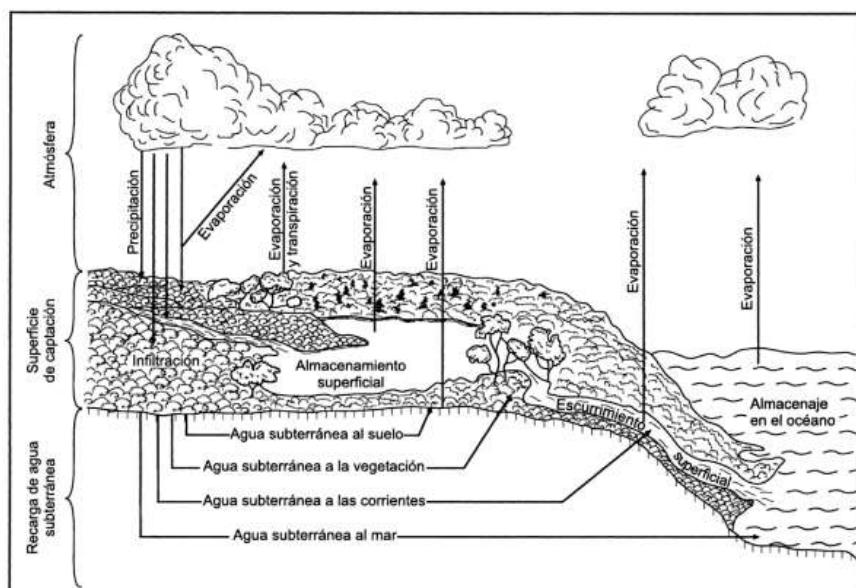
circulación y distribución del agua en la superficie terrestre, sino también su presencia en la atmósfera, su infiltración en el suelo y su almacenamiento en acuíferos subterráneos. Además de analizar el origen del agua y sus trayectorias a través del ciclo hidrológico (Béjar, 2004).

2.2.1.1 El ciclo hidrológico

El ciclo del agua comprende el conjunto de procesos naturales mediante los cuales el agua cambia de estado y se desplaza en la tierra, tanto en su forma sólida, líquida o gaseosa, como a través de sus diferentes reservorios naturales, entre ellos el agua superficial y la subterránea. La hidrología, como ciencia, se encarga de analizar y comprender estos procesos que permiten el movimiento y la distribución del agua en el planeta, como se puede observar en la Figura 1 (Béjar, 2004).

El agua en el planeta se divide en un 97,5% de agua salada, localizada principalmente en los océanos, mientras que el agua dulce representa solo el 2,5% restante. Esta agua dulce es vital para la vida y el desarrollo humano, pero su disponibilidad está restringida: cerca del 68,7% de esta agua dulce se encuentra en glaciares y casquetes polares, mientras que otro 30,1% está almacenado en aguas subterráneas, un recurso crucial para muchas regiones del mundo. Subraya que solo aproximadamente el 1,2% de agua dulce se encuentra en aguas superficiales, como ríos y lagos, que son las fuentes más accesibles para el consumo humano directo (Gleick, 1993).

Figura 1: El ciclo hidrológico



Fuente: (Maderey & Roman, 2005)

2.2.2 Origen de las aguas subterráneas.

Las aguas subterráneas, al igual que las superficiales, tienen origen en las precipitaciones. Ambas están estrechamente interconectadas y no actúan de manera independiente. Muchas corrientes superficiales se alimentan de aguas subterráneas, mientras que estas últimas dependen del aporte proveniente de los cuerpos de agua en la superficie (Chereque, 1989).

2.2.2.1 Hidrogeología

La hidrogeología es la ciencia encargada de estudiar el origen, evolución y comportamiento de las aguas subterráneas, abarcando los tipos de yacimientos, su clasificación, dinámica de movimiento y almacenamiento, así como la interacción que mantiene con los suelos y las formaciones rocosas. Del mismo modo, analiza los diferentes estados físicos del agua (líquido, sólido y gaseoso) y las condiciones naturales que influyen en su aprovechamiento, regulación y descarga. (Mijailov, 1989).

2.2.2.2 Acuífero

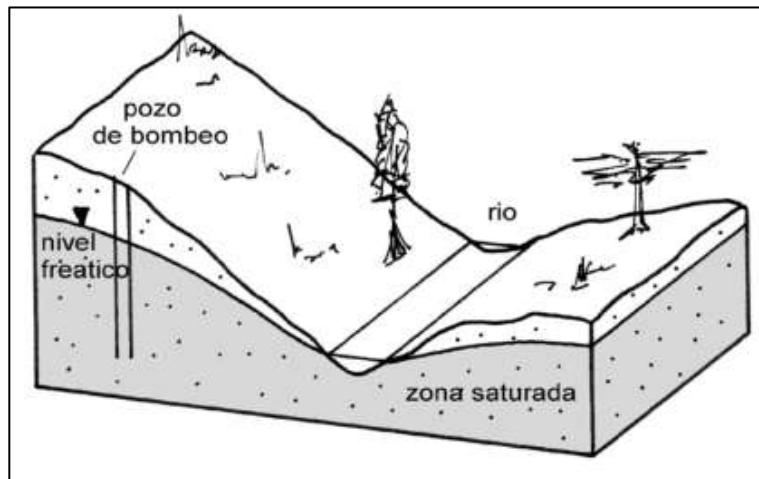
Es la formación o capa geológica capaz de almacenar y permitir el movimiento del agua a través de sus poros o fracturas, posibilitando que el ser humano extraiga este recurso en volúmenes económicamente aprovechables para satisfacer diversas necesidades mediante obras de captación (Custodio & Llamas, 1996).

Los acuíferos se clasifican en función de las condiciones de presión hidrostática a las que se encuentra sometida el agua almacenada, así como de las características estratigráficas de las formaciones geológicas que los contienen. En base a estos criterios, es posible distinguir diferentes tipos de acuíferos, cada uno con propiedades hidráulicas particulares que influyen en su comportamiento y capacidad de almacenamiento como son: (Vélez, 1999).

a) Acuíferos libres o no confinados

Estos se distinguen por tener una superficie de agua expuesta directamente al aire, lo que significa que se encuentran a presión atmosférica. En estos acuíferos, el nivel del agua en los pozos refleja directamente el límite superior de la zona saturada, marcando hasta donde se extiende la columna de agua almacenada en el subsuelo (García & Fernández, 2008).

Figura 2: Acuífero libre parcialmente drenado por un río

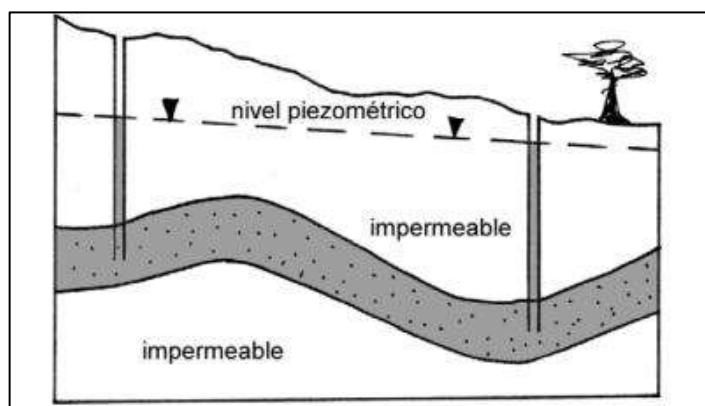


Fuente: (García & Fernández, 2008)

b) Acuífero cautivo, confinado

Son aquellos donde el agua subterránea se encuentra sometida a una presión superior a la atmosférica. En este tipo de formaciones, el agua ocupa completamente los poros del medio geológico, quedando encerrada entre capas de baja permeabilidad. Su identificación en campo se realiza al observar que , al perforar un pozo, el nivel del agua se eleva por encima del techo del acuífero, lo que indica que el nivel piezométrico se localiza por encima del límite superior de la formación que contiene el agua (García & Fernández, 2008).

Figura 3: Acuífero confinado



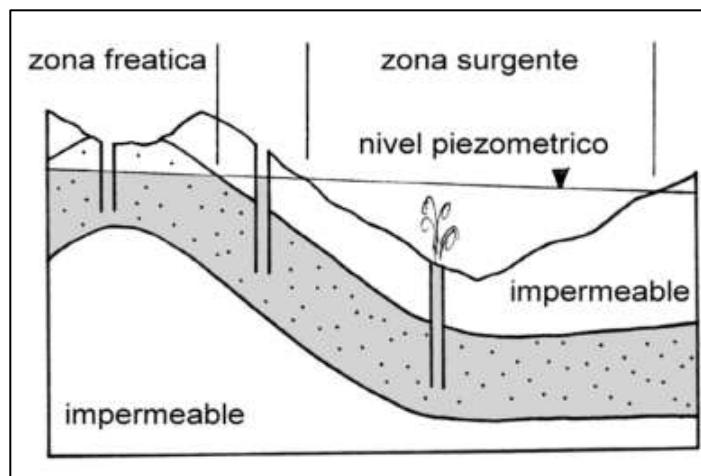
Fuente: (García & Fernández, 2008)

c) Acuíferos semiconfinados.

En este tipo de acuíferos, el agua subterránea se encuentra bajo una presión superior a la atmosférica, lo que provoca que el nivel piezométrico se ubique por encima del límite

superior del acuífero. No obstante, a diferencia de los acuíferos confinados o cautivos, estos mantienen una leve comunicación con la superficie, permitiendo cierto intercambio de agua con el medio exterior, ya sea a través de un acuitardo (capa de baja permeabilidad que permite un flujo reducido) o mediante contactos directos con otras formaciones permeables (García & Fernández, 2008).

Figura 4: Acuífero semiconfinado



Nota: En la zona izquierda, el acuífero presenta contacto directo con la superficie, lo que determina su comportamiento como un acuífero libre. Se denomina zona surgente al sector donde el nivel piezométrico se encuentra por encima de la superficie topográfica. En estas condiciones, los pozos perforados dentro de dicha zona permiten que el agua ascienda hasta la superficie o muy próxima a ella, sin requerir bombeo para su extracción (García & Fernández, 2008).

2.2.2.3 Parámetros hidrogeológicos

Los parámetros hidrogeológicos constituyen herramientas fundamentales para analizar y cuantificar la circulación del agua subterránea en el interior de un acuífero, conforme a la ecuación del flujo. A partir de estos parámetros es posible caracterizar el comportamiento hidráulico de un acuífero. Entre lo más representativos y utilizados se encuentran la porosidad, la permeabilidad, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento (García & Fernández, 2008).

Los métodos existentes para determinar estos parámetros son:

a) Laboratorio

- Los ensayos de permeabilidad, compactación y lixiviación. Los métodos realizados en campo abarcan un volumen más amplio del medio físico en comparación con los ensayos de laboratorio, lo que los hace más representativos, en consecuencia, más recomendables. Sin embargo, los datos obtenidos en laboratorio pueden ser útiles como referencia y complemento para contrastar los resultados obtenidos en campo.

b) Campo

- Ensayos de bombeo
- Ensayos de trazador
- Ensayos de inyección

En dicha investigación los parámetros hidrogeológicos se han determinado mediante Ensayos de Bombeo.

Un ensayo de bombeo implica la extracción de agua de una captación bajo condiciones previamente definidas durante la etapa de diseño de la prueba. Durante el ensayo, se monitorean de manera simultánea tanto el caudal bombeado (que puede ser constante o variable, según el tipo de ensayo elegido) como la variación temporal del nivel del agua, tanto en la captación principal como en otras ubicadas en las proximidades (Sarango, 2019).

Los métodos de ensayos existentes son:

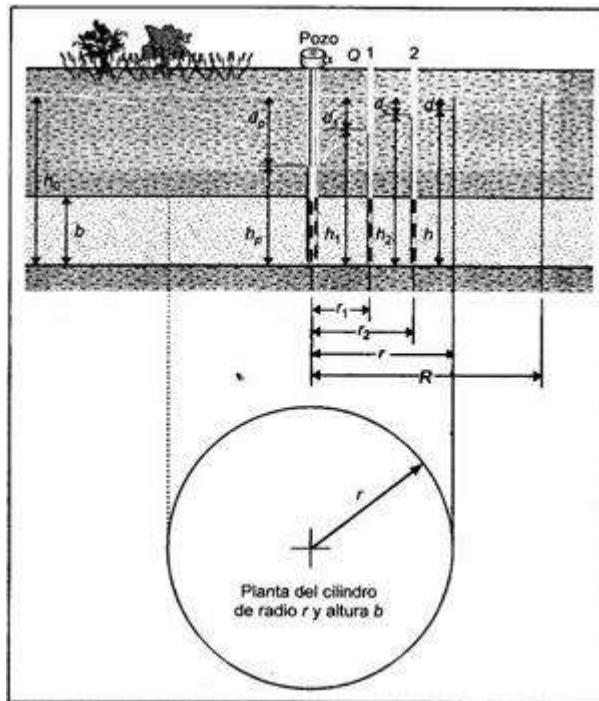
A. A caudal Constante

- **Régimen permanente:** Los niveles en el pozo de bombeo alcanzan un estado de equilibrio después de cierto tiempo, manteniéndose constantes a pesar de la continuidad del bombeo. Esto indica que el acuífero funciona únicamente como un conductor de la recarga, sin extraer agua de su almacenamiento. El análisis se centra en la evolución de los descensos de nivel en los puntos de observación cercanos, en lugar de considerar el descenso total (Sarango, 2019).

Acuífero Cautivo: Condiciones necesarias: El acuífero debe ser homogéneo, isótropo e infinito, sin recarga vertical (lo que implica que la transmisividad, T , es constante en cualquier punto) y los pozos deben ser completamente penetrantes.

En este sistema, el flujo del agua es bidimensional y de tipo radial, de modo que el caudal extraído por el pozo equivale al que atraviesa una superficie cilíndrica de altura constante b y radio r (Sarango, 2019).

Figura 5: Ecuación de THIEM para Ensayo de Bombeo a caudal constante de régimen permanente en Acuífero cautivo.



Fuente: Hidrología Subterránea- Manzano.2008

$$h_0 - h = \frac{Q}{2\pi T} * \ln \frac{R}{r} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

h_0 : nivel inicial en el punto de medida r

h : nivel en el punto r

Q : caudal de bombeo

T : transmisividad

$h_0 - h$: descenso de nivel en el punto r

R : radio de influencia

r : distancia del punto de observación al eje del pozo

Acuífero libre: En este caso, el flujo no es bidimensional ni radial, el caudal extraído del pozo equivale al que atraviesa una superficie cilíndrica cuya altura varía en función del nivel freático h en cada instante. En cualquier punto del acuífero, la variación del nivel piezométrico durante el bombeo se describe mediante la fórmula de Dupuit para ensayo de bombeo a caudal constante de régimen permanente en acuífero libre (Sarango, 2019).

$$h_0^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi * T} * \ln \frac{R}{r} \quad \text{Ec. (2)}$$

- **Régimen variable:** Durante la prueba, los niveles en el pozo experimentan cambios continuos, lo que indica que el agua extraída proviene total o parcialmente del almacenamiento del acuífero. Generalmente, estos ensayos se realizan con un caudal constante, donde la variable controlada es el nivel del agua. Sin embargo, también pueden llevarse a cabo con un nivel constante, ajustando el caudal de extracción para mantener dicho nivel estable.

Acuífero Cautivo: La solución matemática de la ecuación de flujo conduce a la fórmula de Theis que, en la mayoría de los casos prácticos, puede simplificarse mediante la aproximación de Jacob (también conocida como Jacob-Cooper). Según esta simplificación, en un punto específico, la variación del nivel piezométrico durante el bombeo se describe por la siguiente expresión (Sarango, 2019).

$$h_0 - h = s = 0.183 \frac{Q}{T} * \ln \frac{R * 2.25 * T * t}{r^2 * S} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

s: descenso en el tiempo t (desde el comienzo del bombeo) en el punto de medida situado a la distancia r del eje del pozo de bombeo.

Q: caudal de bombeo

T; transmisividad

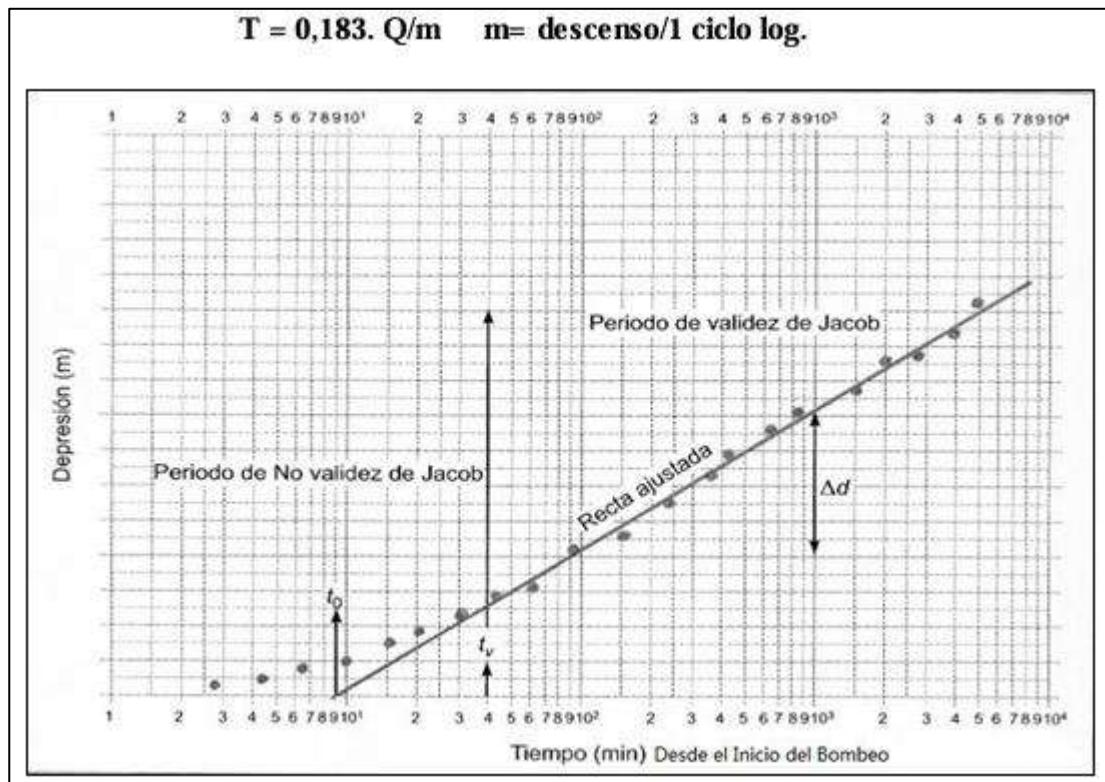
S: coeficiente de almacenamiento

Con una pequeña transformación matemática en la expresión anterior se llega a la siguiente fórmula equivalente:

$$s = 0.183 * \frac{Q}{T} * \log t - 0.183 * \frac{Q}{T} \log t_0 \quad \text{Ec. (4)}$$

En otras palabras, la relación se representa como una línea recta de la forma $y=m.x+n$. por lo tanto, basta con graficar x ($\log t$) en papel semilogarítmico frente a y (s) para determinar el valor de la pendiente m . Conociendo m y dado que el caudal Q es un valor conocido, se puede calcular la transmisividad T (Sarango, 2019).

Figura 6: Representación de medidas en un Grafico logarítmico



Fuente: (Sarango, 2019).

Para calcular el coeficiente de almacenamiento S , se determina el valor del punto donde la recta corta el eje X, es decir, el tiempo t_0 . Conceptualmente, esto representa el “tiempo de bombeo en el cual el descenso de nivel aún es cero” (lo que requiere que el eje Y comience en cero). Si en la ecuación anterior sustituye $t=t_0$, se obtiene la siguiente relación:

$$t_0 = \frac{r^2 * S}{2.25 * T} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$S = \frac{2.25 * T * t_0}{r^2} \quad \text{Ec. (6)}$$

B. A caudal Variable

- Bombeo a caudal crítico
- Bombeo escalonado. El caudal se incrementa tres o cuatro veces a lo largo de la prueba, pero se mantiene constante dentro de cada escalón.

2.2.2.3.1 Porosidad.

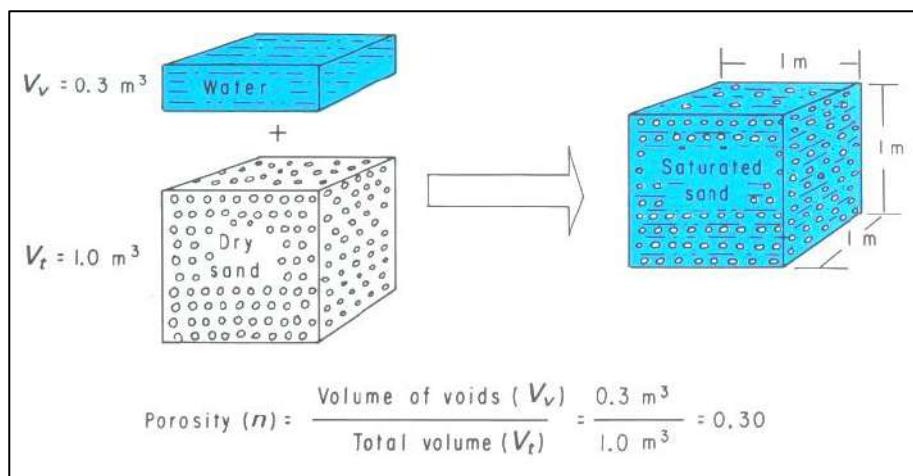
La conductividad hidráulica y la porosidad representan los espacios vacíos o intersticios presentes en las rocas, los cuales actúan como zonas de almacenamiento y circulación del agua subterránea. Estos espacios se clasifican en dos tipos principales:

- Poros intergranulares (primarios): se originan en rocas sedimentarias clásticas, tanto consolidadas como no consolidadas.
- Poros formados por fisuras y fracturas, se dividen en dos grupos principales:
 - Rocas estratificadas fisuradas, pueden sufrir procesos de disolución, generando canales de flujo a lo largo de las fracturas y planos de estratificación, como ocurre en calizas, carbonatos y evaporitas.
 - Rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias fracturadas, poseen la capacidad de almacenar y conducir agua mediante las fisuras y fracturas que las atraviesan su estructura.

La forma en que estos poros se interconectan determina la permeabilidad o conductividad hidráulica del material, la cual expresa la capacidad del agua para desplazarse a través de las formaciones geológicas. En consecuencia, un material puede presentar una porosidad elevada, como ocurre en las arcillas, pero una permeabilidad muy baja o incluso nula, debido a la falta de interconexión entre sus poros. (Vélez, 1999).

La porosidad es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de una roca o sedimento. Se simboliza con la letra “n” y se expresa en porcentaje.

Figura 7: Representación de la porosidad



Fuente: (Heath, 2004)

Una alta porosidad no siempre implica buena productividad de un acuífero; por ejemplo, en las arcillas, gran parte del agua queda retenida en pequeños poros por tensión capilar, dificultando su extracción.

La porosidad se refiere al espacio intersticial presente en una roca, lo que determina la capacidad del medio para almacenar fluidos. Es decir, representa el volumen relativo de poros o vacíos dentro de una formación geológica. En materiales granulares, esta característica está influenciada por el tipo de empaquetamiento, la forma de los granos y la distribución de sus tamaños. En términos cuantitativos, la porosidad de una roca corresponde a la suma del rendimiento específico (Sy) y la retención específica (Sr) (Vélez, 1999).

- **El rendimiento específico (Sy)** es la relación entre el volumen de agua que puede drenarse libremente y el volumen total de la formación geológica, siendo este valor inferior a la porosidad total. Los acuíferos de textura fina suelen mostrar un rendimiento reducido, mientras que aquellos de textura gruesa liberan una mayor proporción del agua almacenada, debido a su mayor capacidad de drenaje.
- **La retención específica (Sr)** corresponde a la fracción de la porosidad total de un acuífero que permanece retenida en el material y no puede extraerse fácilmente debido a la acción de fuerzas capilares (Ordoñez & Valdera, 2019)
- **Porosidad efectiva (m_e)**

Desde una perspectiva hidrogeológica, la porosidad efectiva (m_e) adquiere especial relevancia, pues indica la fracción de agua que un acuífero puede liberar por efecto de la gravedad, es decir, el agua aprovechable o útil para su explotación. En el caso de un acuífero libre, se cumple que $S=m_e$, ya que el agua ocupa completamente los espacios porosos disponibles dentro del medio.

La porosidad efectiva se define como la proporción entre el volumen de poros interconectados, capaces de permitir el flujo del agua, y el volumen total del suelo o de la roca. En materiales granulares como arenas y gravas, este valor puede considerarse equivalente al rendimiento específico (Sy) o bien obtenerse como la diferencia entre la porosidad total y la retención específica (Sr) (Vélez, 1999).

Tabla 1: Valores de porosidad

Material	Porosidad m (%)
Grava	25-40
Arenas y gravas	36
Limos	35 - 50
Arcillas	40 – 70
Mármoles	0.1 – 0.2
Esquistos	01
Dolomitas	2.9
Granitos	1.5 – 0.02
Basaltos	0.1 – 2.9

Fuente: (Vélez, 1999)

Existen varios métodos para estimar la porosidad drenable, uno de los cuales consiste en correlacionarla con la conductividad hidráulica, utilizando la relación empírica propuesta por Van Beers (Salgado, 2000).

$$m_e = \sqrt{K} \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

m_e = porosidad drenable (%)

K= Conductividad hidráulica (cm/día)

2.2.2.3.2 Permeabilidad o conductividad hidráulica

Se define como la cantidad de agua que fluye a través de una unidad de área de un medio poroso, bajo un gradiente hidráulico, representando la capacidad del material para permitir el paso del agua. Se expresa matemáticamente como:

$$K = c * d^2 * \frac{\gamma}{\mu} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

C: Factor forma, determinado por las características de la roca

d^2 : factor que depende de la superficie intergranular.

γ : peso específico del líquido

μ : viscosidad cinemática del líquido.

En esta expresión, el término $cd^2=k_0$ representa la permeabilidad intrínseca o específica, la cual depende únicamente de las propiedades del terreno. La permeabilidad (K) generalmente se expresa en metros por día (m/día). (García & Fernández, 2008).

Tabla 2: Valores de coeficiente de permeabilidad

CLASE	K (m/día)
Muy baja	<0.05
Baja	0.05 – 0.3
Media	0.3 -1
Alta	1 - 5
Muy alta	>5

Fuente: (Pizarro, C.F.1978)

Tabla 3: Intervalos de la conductividad según la textura y estructura del suelo

TEXTURA Y ESTRUCTURA	K (m/día)
Arena gruesa con grava	10 – 50
Franco arenoso, arena fina	1 – 5
Franco arcilloso bien estructurado	1 – 3
Franco arenoso muy fino	0.5 – 2
Arcilla con grietas	0.5 – 2
Arena muy fina	0.5 – 2
Arena muy fina	0.02 – 0.2
Arcilla compacta	<0.002

Fuente: Martínez, B. J. (1986).

2.2.2.3.3 Transmisividad (T)

La transmisividad o transmisibilidad de un acuífero representa la cantidad de agua que puede fluir horizontalmente por unidad de ancho a través de su espesor saturado, bajo un gradiente hidráulico unitario. Este parámetro se calcula como el producto entre la conductividad hidráulica (K) y el espeso saturado del acuífero (b), expresando así la capacidad total de transmisión de agua subterránea en una zona determinada (Espinoza, 2009).

La ecuación de Theis - Jacob, permite calcular la Transmisividad utilizando el caudal de bombeo y la Pendiente de la recta tiempo – abatimiento (rebatiemiento).

$$T = 0.183 * Q/C \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

T: Transmisividad ($\text{m}^2 / \text{día}$)

Q: Caudal de bombeo constante (m^3/hora)

C: Pendiente de la recta tiempo – abatimiento (rebatimiento), en un ciclo logarítmico. (m).

Tabla 4: Valores de la transmisividad

T ($\text{m}^2/\text{día}$)	Calificación estimativa
$T < 10$	Muy baja
$10 < T < 100$	Baja
$100 < T < 500$	Media
$500 < T < 1.000$	Alta
$T > 1.000$	Muy alta

Fuente: (García & Fernández, 2008).

De igual manera la transmisividad y la permeabilidad se relacionan como:

$$T = K \cdot b \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

b: es el espesor del acuífero considerado (en metros)

K: permeabilidad (m/día)

2.2.2.3.4 Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento (S) representa el volumen de agua liberado por una unidad de área del acuífero ante una variación unitaria del nivel piezométrico. Este valor adimensional es mayor en acuíferos libres (0.02-0.3) que en confinados (0.0001-0.001) (Vélez, 1999).

Se determina de la siguiente manera:

$$S = \frac{2.25 * T * t_0}{r^2} \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde:

S: Coeficiente de almacenamiento

T: transmisividad ($\text{m}^2/\text{día}$)

t_0 : tiempo en que s=0

r: distancia al pozo de bombeo

En un acuífero libre, el coeficiente de almacenamiento (S) equivale a la porosidad efectiva, ya que el agua ocupa los poros del medio. En cambio, en los acuíferos confinados, el almacenamiento se debe a la compresibilidad del agua y del acuífero, liberándose agua por descompresión durante el bombeo, fenómeno denominado almacenamiento elástico (es el proceso mediante el cual un acuífero confinado libera agua cuando se reduce la presión) (VILLARROYA, F. 2009).

Tabla 5: Valores del coeficiente de almacenamiento

Tipo de material permeable	Tipo acuífero	Valor medio de S
Cárstico: Caliza y dolomías jurásicas	Libre	2×10^{-2}
	Semiconfinado	5×10^{-4}
	Confinado	5×10^{-5}
Cárstico: Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$
Poroso intergranular:	Libre	$5 \times 10^{-2} - 15 \times 10^{-2}$
Gravas y arena	Semiconfinado	10-3
	Confinado	10-4
Cársticos y porosos: Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$

Fuente: (García & Fernández, 2008).

En acuífero libres el coeficiente de almacenamiento corresponde directamente a la porosidad efectiva y su valor puede expresarse en porcentaje.

2.2.3 Ecuaciones generales

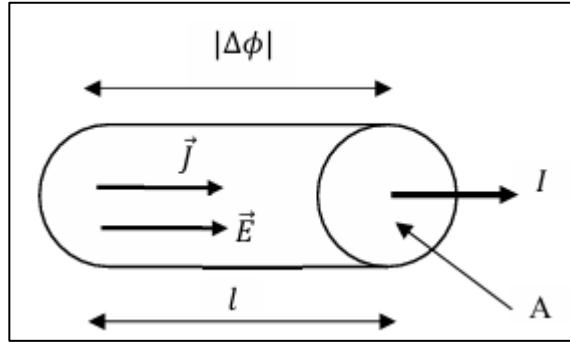
En la prospección geofísica, las corrientes eléctricas no se comportan de manera simple al atravesar conductores lineales como cilindros o prismas. En cambio, se desplazan a través de medios tridimensionales, lo que hace fácil entender las leyes de la física que las gobiernan. Para simplificar el análisis matemático, se asume que el subsuelo este compuesto por diversas capas homogéneas con resistividad constante, separadas por superficies planas (Orellana, 1972).

2.2.3.1 Ley de ohm generalizada

Si se analiza el flujo de corriente que atraviesa un material homogéneo de longitud L y sección trasversal A, por el cual circula una corriente I y existe una diferencia de potencial $|\Delta\phi|$, la densidad de corriente (\vec{J}) se vincula con el campo eléctrico (\vec{E}) mediante una constante de proporcionalidad denominada conductividad (σ). Esta relación, representada en la Ecuación 12, corresponde a la forma macroscópica de la Ley de Ohm (Orellana, 1972).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{Ec. (12)}$$

Figura 8: Porción de un conductor cilíndrico que conduce una corriente I



Fuente: (Wangness, 2001)

Como el campo eléctrico \vec{E} es conservatorio ($\nabla \times \vec{E} = 0$), este puede escribirse en término de gradiente de una función escalar V denominada potencial escalar o potencial electrostático en unidades de voltios.

$$\vec{E} = \vec{\nabla}\phi = -\text{grad}(\phi) \quad \text{Ec. (13)}$$

La función gradiente es un operador matemático que reúne las derivadas parciales de una función escalar de varias variables, formando con ellas un vector. En otras palabras, el gradiente concentra la información de cómo cambia la función en cada dirección del espacio. Si se considera una función escalar multivariable $f(x, y, \dots)$, su gradiente se representa como $\vec{\nabla}f$ y se define de la siguiente manera:

$$\vec{\nabla}f(x, y_1, \dots) = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \dots \right] \quad \text{Ec. (14)}$$

Cuando el campo eléctrico \vec{E} representa una única dirección, denominada l , al aplicar el operador gradiente sobre la función escalar ϕ se obtiene la siguiente expresión:

$$E = -\frac{d\phi}{dl} \quad \text{Ec. (15)}$$

Dado que $\vec{\nabla}\phi$ permanece constante dentro de la región y la corriente I en el cuerpo también es constante, la ecuación 15 puede expresarse nuevamente de la siguiente forma:

$$E = \frac{|\Delta\phi|}{l} \quad \text{Ec. (16)}$$

De forma análoga, la densidad de corriente puede expresarse en función de la corriente total (I) y del área trasversal (A) del cuerpo, considerando que la corriente se encuentra uniformemente distribuida a lo largo de toda la sección.

$$J = \frac{I}{A} \quad \text{Ec. (17)}$$

Al sustituir la Ec. 16 y 17 en la Ec.12, se obtiene.

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{|\Delta\phi|}{l} \quad \text{Ec. (18)}$$

A partir de la Ecuación 18, se establece una relación a nivel macroscópico en la que la corriente (I) resulta proporcional a la diferencia de potencial, o viceversa. Esta correspondencia conduce a la expresión de la Ley de Ohm (Ecuación 19), válida para materiales isotrópicos y homogéneos, en los cuales la resistividad (ρ) y la conductividad (σ) pueden tratarse como magnitudes escalares.

$$I = \frac{|\Delta\phi|}{R} \quad \text{Ec. (19)}$$

Al denominar la diferencia de potencial $|\Delta\phi|$ como V , se obtiene la forma clásica de la Ley de Ohm, que expresa la relación directa entre el voltaje, la corriente y la resistencia del material (Wangness, 2001).

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{Ec. (20)}$$

Esta expresión básica, o su forma macroscópica, describe el comportamiento del flujo de corriente eléctrica en el subsuelo, constituyendo el principio fundamental de los métodos eléctricos de prospección geofísica (Orellana, 1972).

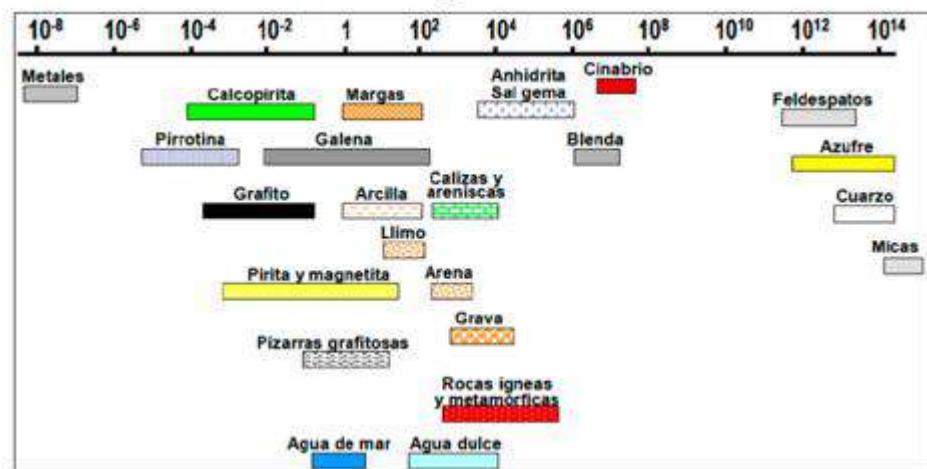
2.2.4 Resistividad eléctrica

La resistividad del suelo es la propiedad que determina su capacidad para conducir corriente eléctrica, también conocida como resistencia específica del terreno. Al medirla, se obtiene un valor promedio que integra el efecto de las distintas capas del subsuelo, las cuales presentan variaciones en su composición. Este valor resultante se conoce como resistividad aparente (Ruelas,2010).

La capacidad de las rocas para conducir corriente eléctrica depende tanto de factores internos, como la porosidad y permeabilidad del material, como de factores externos, entre ellos las zonas de almacenamiento. En conjunto, estos elementos determinan los valores de resistividad eléctrica de una roca, tales como: (Grijalva,2014).

- La conductividad de los granos minerales
- La Porosidad
- La composición química del agua, que llena los espacios porosos de la roca, como su salinidad, por ejemplo.
- La temperatura
- La Presión

Figura 9: Diagrama con valores típicos de resistividades diferentes



Fuente: (Orellana, 1972)

Tabla 6: Resistividades de algunos materiales en ohmios-metro

Resistividades de algunos materiales en ohmios-metro	
Aguas salobres	1-10
aguas potables superficiales	20-300
agua del mar	< 0.2
Agua destilada	>500
Arcillas y margas	10-100
Calizas y areniscas	50-3000
Pizarras	50-300
Rocas hipogénicas y metamórficas	100-10000
Gravas	100-10000
Arenas	130-1000
Limos	30-500

Fuente: (Custodio & Llamas, 1996)

2.2.5 Sondeos eléctricos verticales (sev)

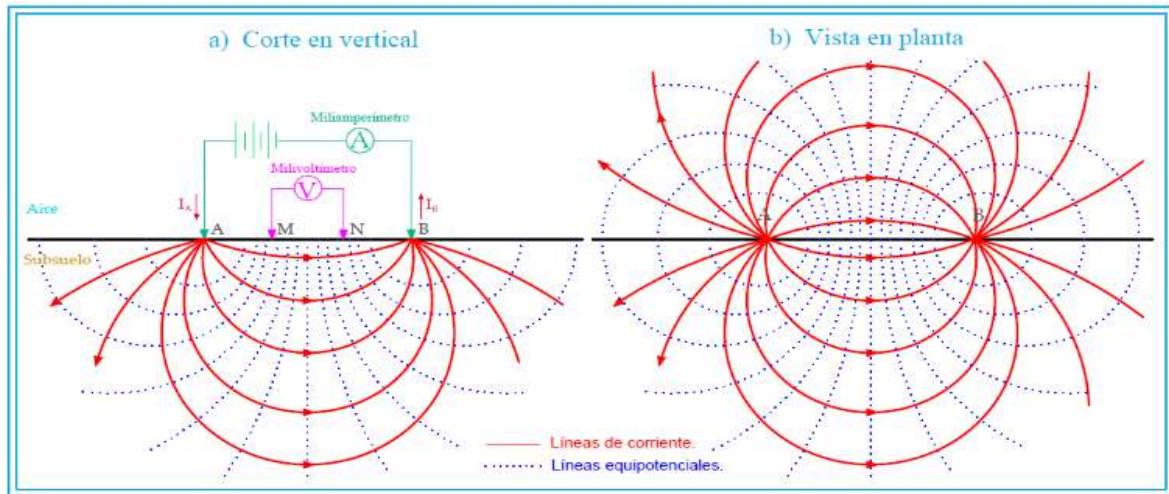
El método de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) se basa en efectuar mediciones sucesivas de resistividad aparente empleando un mismo tipo de arreglo, mientras se incrementa gradualmente la distancia entre los electrodos de corriente y de potencial. En el trabajo de campo, se mantiene constante el punto central del dispositivo, ampliando progresivamente las separaciones entre los electrodos con el propósito de explotar y caracterizar las capas más profundas del subsuelo (Orellana, 1972).

En la configuración de adquisición del método SEV, se utilizan dos electrodos para la inyección de corriente en el terreno y otros dos para medir la diferencia de potencial. La relación entre la corriente aplicada, la diferencia de potencial obtenida y un factor geométrico dependiente de la disposición espacial de los cuatro electrodos permite determinar la resistividad aparente del subsuelo en el punto de estudio.

Este valor está asociado a una profundidad específica, determinada por la distancia entre los electrodos según el arreglo utilizado. Los resultados obtenidos en cada SEV se representan mediante una curva logarítmica, que relaciona la resistividad aparente con la separación creciente de los electrodos.

El objetivo principal del SEV es determinar la variación vertical de resistividades en el subsuelo. Las configuraciones geométricas más comunes para su aplicación son las de Dipolo-Dipolo, Wenner y Schlumberger (Orellana, 1972).

Figura 10: Flujo de corriente en un suelo homogéneo e isotrópico



Fuente: (Romero, 2019)

- a) Corte en vertical (a): La corriente se inyecta de un par de electros (A y B) en el subsuelo.
 - Las líneas rojas: representan el flujo de corriente I_a y I_b que se dispersa desde los electrodos hacia el subsuelo. Estas líneas muestran cómo la corriente se desplaza desde el electrodo positivo A hacia el negativo B en el suelo.
 - Las líneas equipotenciales en azul punteado: indican puntos donde el potencial eléctrico es constante. Estas líneas se distribuyen de forma circular, un comportamiento característico de los campos eléctricos medio homogéneos.
 - La separación de las líneas equipotenciales en el subsuelo está relacionada con la resistividad del terreno. En terrenos más conductores de menor resistividad, las líneas se agrupan menos, mientras que, en terrenos más resitivos, las líneas se agrupan más densamente.
- b) Vista en planta (b): Representa una vista en planta del flujo de corriente y las líneas equipotenciales.
 - Se observa como las líneas de corriente divergen desde el electrodo A y convergen en el electrodo B formando un patrón radial en el plano horizontal.

- La simetría radial sugiere que el terreno es relativamente homogéneo, lo que permite que el flujo de corriente sea simétrico en todas las direcciones alrededor de los electrodos.

2.2.6 Métodos electródicos

2.2.6.1 Método Wenner

El arreglo Wenner se basa en los mismos principios y procedimientos del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV); sin embargo, su particularidad radica en la separación entre los electrodos AB, MN Y BM, la cual varía según un factor denominado “a”, que se mantiene constante durante todo el proceso de medición.

La constante geométrica correspondiente al arreglo Wenner se determina mediante la siguiente expresión:

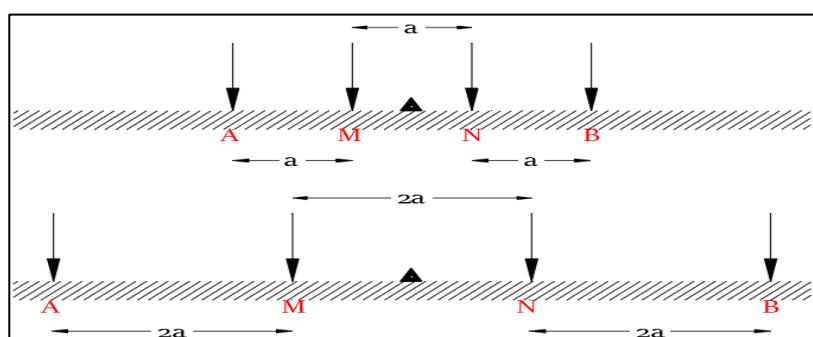
$$K = 2\pi*a \quad \text{Ec. (21)}$$

a = separación entre los electrodos AB, BM y MN

Características del arreglo Wenner

- Presentan una configuración simple y fácil de implementar.
- La medición de la resistencia (R) es más directa, gracias a la relación lineal entre el voltaje (V) y la corriente (I), lo que facilita interpretar la tendencia de la curva obtenida y decidir oportunamente si continuar o detener las mediciones.
- El equipo empleado puede requerir menor sensibilidad en comparación con otros tipos de configuraciones.
- Existe un menor efecto del campo potencial externo, ya que al aumentar la separación entre electrodos, el voltaje registrado es mayor, reduciendo así la influencia de factores externos (Pérez, 2023).

Figura 11: Arreglo Wenner



Fuente: Modificado de (GRIJALVA ,2014)

2.2.6.2 Método Schlumberger

El método de Schlumberger, desarrollado por Conrad Schlumberger, fundador de la empresa Schlumberger Oilfield Services y pionero en los métodos eléctricos de exploración a inicios del siglo XX, es uno de los arreglos más empleados en los sondeos eléctricos verticales (SEV) aplicados a la investigación de aguas subterráneas y yacimientos minerales.

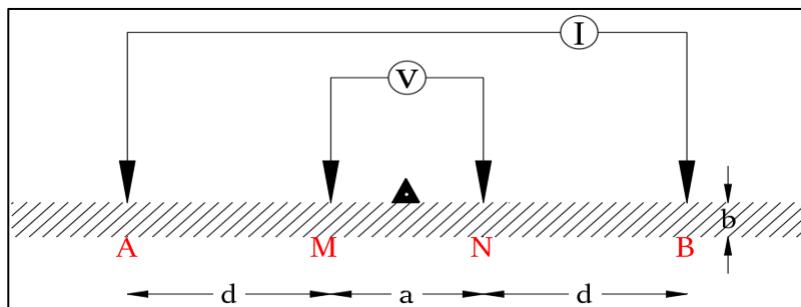
En esta configuración se disponen cuatro electrodos alineados, donde los electrodos de corriente (A y B) se ubican en los extremos, y los electrodos de potencia (M y N) se colocan entre ellos.

Durante el procedimiento, la distancia entre los electrodos de potencial se mantiene constante, mientras que los electrodos de corriente se desplazan progresivamente hacia el exterior. Cabe destacar que la separación entre los electrodos de corriente, permitiendo así explorar mayores profundidades del subsuelo (Pérez, 2023).

El método de Schlumberger puede considerarse una modificación del método Wenner, diferenciándose principalmente en la separación entre los electrodos. En esta configuración, los electrodos de medición de la distancia de potencial (M y N) se encuentran separados por una distancia a (m), mientras que los electrodos de inyección de corriente (A y B) están ubicados a una distancia d (m) de los electrodos de potencial.

Como resultado, la distancia total entre los electrodos de corriente es $(2d+a)$, tal como se ilustra en la figura 12. Esta disposición permite obtener una mayor profundidad de investigación sin necesidad de mover constantemente los electrodos de potencial, lo que representa una ventaja operativa respecto al método Wenner (Ferrer & Novoa, 2017).

Figura 12: Arreglo de electrodos para el método Schlumberger



Fuente: Modificado de (IEE,2012).

Este arreglo resulta altamente eficiente en la práctica; asumiendo, para fines de aproximación, que las separaciones entre electrodos son iguales ($AM=MN=NB=a$, ver

figura 11) y partiendo de la Ec.21, se obtiene la separación simplificada que se presenta en la Ec.22.

$$\rho_a = \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta\phi}{I} \right) \quad \text{Ec. (22)}$$

$$\rho_a = 2\pi * a * \frac{\Delta\phi}{I} \quad \text{Ec. (23)}$$

Si llamamos L a la distancia OA = OB esta expresión anterior se convierte en la siguiente ecuación.

$$\rho_a = \pi \left(L^2 - \frac{a^2}{4} \right) \frac{\Delta\phi}{Ia} \quad \text{Ec. (24)}$$

El planteamiento de Schlumberger consiste en reducir la separación “a” entre los electrodos M y N hasta valores despreciables. Al aplicar este criterio a la Ec.22, el segundo término del miembro derecho crece sin acotación, pues cuando “a” disminuye también lo hace $\Delta\phi$, lo que conduce al siguiente límite:

$$\rho_a = \lim_{a \rightarrow 0} \pi \left(L^2 - \frac{a^2}{4} \right) \frac{\Delta\phi}{Ia} = \pi L^2 \left(\frac{1}{I} \right) \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\Delta\phi}{a} = \pi L^2 \frac{E}{I} \quad \text{Ec. (25)}$$

Dado que el límite de $\frac{\Delta\phi}{a}$, cuando “a” tiende a cero, representa el gradiente de potencial o campo eléctrico, el método propone emplear una distancia MN=a lo suficientemente pequeña para mantener la validez de la Ec.24. Aunque teóricamente se considera que en el terreno se mide el campo eléctrico, en la práctica se determina el cociente $\frac{\Delta\phi}{I}$, por lo que pueden emplearse las siguientes ecuaciones (Orellana,1972).

$$\rho_a = \pi L^2 \frac{\Delta\phi}{Ia} \quad \text{Ec. (26)}$$

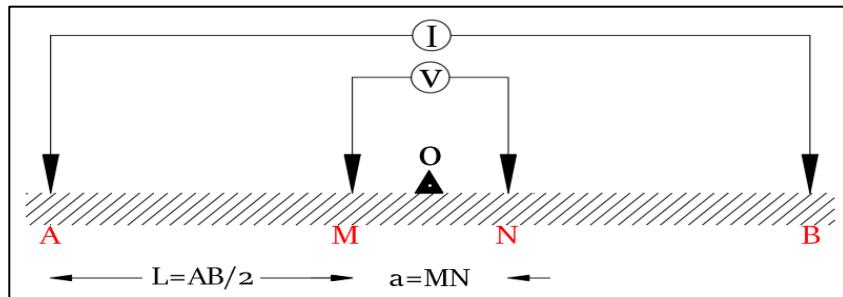
$$K = \frac{\pi L^2}{a} = \frac{\pi (\frac{AB}{2})^2}{MN} \quad \text{Ec. (27)}$$

El margen de error que se origina al utilizar esta expresión proviene de omitir el término $\frac{a^2}{4}$ en la Ec.24; sin embargo, dicho error es mínimo. En los levantamientos geoelectricos se suele adoptar como criterio que $MN \leq \frac{AB}{5}$; De este modo considerando que MN=a y 2L=AB, el error relativo correspondiente para $MN \leq \frac{AB}{5}$ se aproxima a un 4% (Orellana,1972).

Este tipo de arreglo es cada vez más empleado, ya que entre dos mediciones consecutivas únicamente se requiere desplazar dos electrodos. Esto representa un ahorro significativo de

tiempo y reduce las perturbaciones causadas por las heterogeneidades del medio cercanas a los electrodos (Orellana,1972).

Figura 13: Dispositivo o arreglo electrónico Schlumberger



Fuente: Modificado de (SEG Wiki,2022).

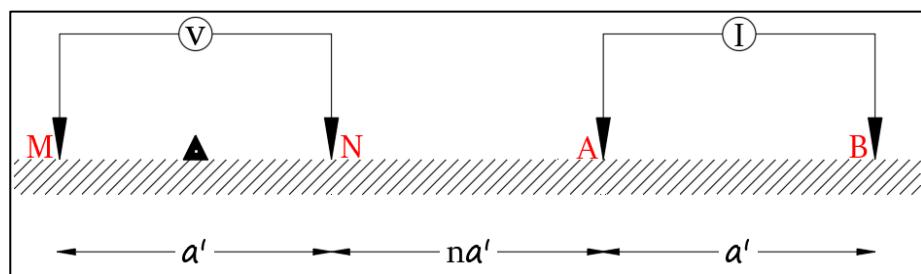
2.2.6.3 Dispositivo Dipolar Axil (Dipolo – Dipolo)

Cuando se requiere realizar investigaciones a mayores profundidades, se emplean los dispositivos dipolares. A diferencia de los métodos convencionales, en estos la profundidad de exploración no se controla ampliando la separación entre los electrodos A y B, sino incrementando la distancia entre los centros de los dipolos de corriente (AB) y de potencial (MN) (Orellana,1972).

Este dispositivo, conocido con distintos nombres como Dipolo, Doble dipolo, presenta una disposición lineal de cuatro electrodos, similar al método Schlumberger. Su principal característica, propia de los sistemas dipolares, es que los electrodos de corriente A y B se encuentran lo suficientemente próximos entre si (con una separación a') en comparación con la distancia a la que se registran sus efectos (na'), permitiendo considerarlos como un solo dipolo (figura 14) (Orellana,1972).

La principal ventaja de este tipo de dispositivos radica en su capacidad para explorar mayores profundidades con un tendido de cable reducido en comparación con otros arreglos, lo que optimiza el tiempo y los recursos durante la adquisición de datos en campo.

Figura 14: Dispositivo Dipolo - Dipolo



Fuente: modificado de (SEG Wiki,2022).

2.2.7 Equipo de medición de los SEV GeoSeeker

El GeoSeeker es un instrumento geofísico diseñado para identificar recursos hídricos y estructuras subterráneas mediante la medición de la resistividad del suelo. Su sistema incluye una unidad de control, electrodos, una batería recargable y un software de análisis que facilita la interpretación de los datos obtenidos. Utilizando el método Schlumberger, el dispositivo puede detectar hasta 250 metros de profundidad, siendo útil en áreas como hidrogeología y la arqueología.

Tabla 7: Características técnicas del equipo GeoSeeker

Componente	Descripción	Características Técnicas
Unidad de control	Procesa señales eléctricas y controla el sistema.	Dimensiones: 130×270×110 mm
		Peso: 0,6 kg (2,1 kg con cables)
		CPU: Cortex M3 80 MHz
		Frecuencia de muestreo: 4096 Hz
		Autonomía: ≥16 h
Caja de potencia	Genera la corriente de medición para los electrodos.	Dimensiones: 230×550×360 mm
		Peso: 15,8 kg (18 kg con electrodos)
		Salida: 390 V / 0,5 A / 20 W
		Batería: 2x12V, 10 Ah
		Autonomía: hasta 100 h
Electrodos	Se insertan en el suelo para transmisión y recepción eléctrica.	Dimensiones: 440×120×35 mm
		Peso: 0,52 kg
Tambores de cable	Facilitan conexión entre componentes y terreno.	Alimentación: Ø 290 mm, 26 m, 0,65 kg, 25 marcadores
		Tensión: Ø 120 mm, 255 m, 6,5 kg, 15 marcadores
Tableta Android	Controla el sistema y muestra datos en tiempo real.	Sistema operativo: Android
		App: OKM GeoSeeker App

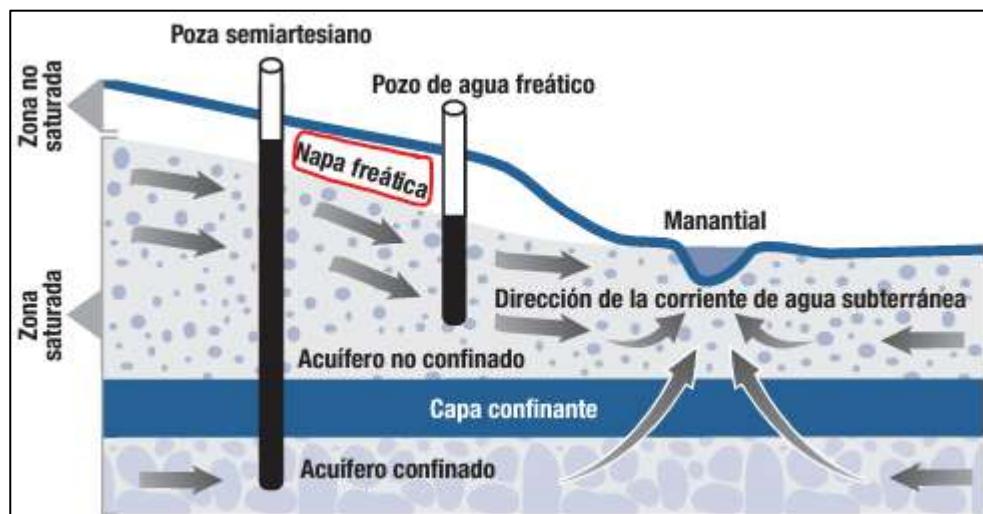
Fuente: (OKM,2019)

2.2.8 Napa Freática

Corresponde a la primera capa de agua subterránea que se encuentra al perforar el terreno, y es la más vulnerable a la contaminación. También llamada zona freática, forma parte del acuífero libre, el cual se extiende hasta un estrato impermeable. Este tipo de acuífero mantiene contacto directo con la atmósfera a través de la zona no saturada, por lo que se encuentra únicamente bajo la influencia de la presión atmosférica. Su profundidad varía

según las condiciones geológicas, pudiendo ir desde pocos centímetros hasta varias decenas de metros (EcuRed, 2019).

Figura 15:Napa freática



Fuente: (Oregón, 2021)

2.2.9 Perfil estratigráfico

Se denomina así al estudio que se lleva a cabo utilizando información proveniente de perforaciones, prospección geofísica o de cortes naturales, los cuales permiten identificar las rocas que conforman la columna estratigráfica. A partir de estos datos, es posible reconstruir la estratigrafía del subsuelo (ver figura 16) (Cárdenas, 2005).

2.2.10 Perfil geológico

Se define como una representación vertical interpretativa de la superficie terrestre, elaborada a partir de los datos obtenidos del mapa geológico. En otras palabras, constituye la interpretación gráfica de la información geológica de una zona, mostrada en forma de sección o corte, como se aprecia en la figura 16 (Pando et al.,2009).

2.2.11 Perfil geoelectrico

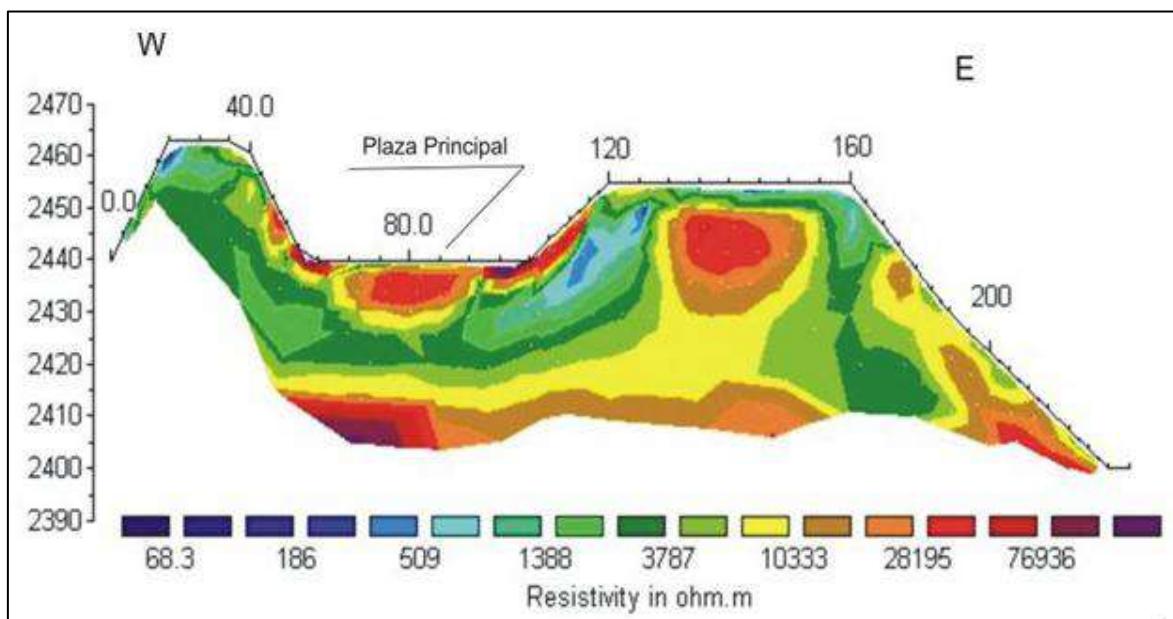
Es representación del subsuelo que muestra las distintas capas que conforman la estratigrafía del terreno, asignando a cada una de ellas un valor de resistividad característico. Esta información permite identificar la variación de propiedades eléctricas entre los diferentes estratos, como se observa en la figura (17) (Pando et al.,2009).

Figura 16: Columna Estratigráfica de Cajamarca

ERA TEMA	SISTEMA PERÍODO	SERIE ÉPOCA	UNIDAD LITOESTRATIGRAFICA	Grosor (m)	LITOLOGIA	DESCRIPCION
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Dep. fluviales y aluviales		Arenas, gravas. Limos, arcillas.	
			Dep. lagunares y glaciares		Conglomerados, areniscas y arcillas rojas. Lutitas, lodoletas, areniscas finas blanco amarillentas.	
		PLEISTOCENO	Formación Condebambo	150	Tobas dacíticas y traquianandesíticas blanquecinas.	
	NEOGENO	MIOCENO	Formación Cajabamba	200	Disc. ang.	
			Sup. Formación Bambamarca	300	Tobas blanco amarillentas intercaladas con areniscas rojizas, conglomerados y piroclastos.	
	PALEOGENO	OLIGOCENO	Grupo Calpuy		Dacita	
			Formación Porcula	2100	Intercalación de derrames andesíticos, tobas blanquecinas areniscas tobáceas y conglomerados lenticulares.	
		EOCENO	Formación Llama	600	Diorita	
	PALEOCENO	Formación Chota			Tobas blanquecinas intercaladas con delgados lechos de areniscas y lutitas tobáceas	
					Derrames y brechas andesíticas.	
MESOZOICO	CRETACEO	SUPERIOR	Formación Celendín	200	Disc. ang.	
			Formación Cajamarca	600-700	Conglomerados con cantos de calizas y areniscas rojizas Calizas, margas y lutitas gris amarillentas.	
			Grupo Quilquillán	500	Calizas gris azuladas, macizas, con delgadas intercalaciones de lutitas y margas	
			Grupo Pullucana	700	Calizas nodulares macizas, margas y lutitas pardo-amarillentas fosfolíferas	
			Formación Pariatambo	150-200	Calizas gris parduscas, fosiliferas, margas y escasos niveles de lutitas	
		INFERIOR	Formación Chúlec	200-250	Lutitas grises o negras, calizas bituminosas nodulares.	
			Formación Inca	150	Calizas arenosas, lutitas calcáreas y margas.	
			Formación Farrat	500	Areniscas calcáreas y limolitas ferruginosas.	
			Formación Carhuáz	500	Cuarcitas y areniscas blancas.	
			Formación Santa	100-150	Areniscas rojizas y cuarcitas blancas intercaladas con lutitas grises.	
		JURASICO	Formación Chimú	50-600	Lutitas grises y calizas margosas.	
			Formación Chicama	500	Areniscas, cuarcitas, lutitas y niveles de carbón en la parte inferior, principalmente cuarcitas en la parte superior.	
					Lutitas negras, laminares y deleznables, con intercalaciones de areniscas grises y horizontes arcillosos.	
		MEDIO	Formación Oyotún	500	Disc. ang.	
		TRIASICO	Formación Pucará	700-800	Tobas, brechas y derrames andesíticos, Tonalita/granodiorita	
					Calizas gris azuladas, macizas con nódulos silíceos.	
PALEOZOICO	PERMIANO	SUPERIOR	Grupo Mitu	300	Disc. ang.	
					Areniscas, limolitas y conglomerados rojizos.	
	ORDOVICIANO		Formación Salas	?	Disc. ang.	
PROTEROZOICO			Complejo Olmos	?	Filitas pelíticas y tobáceas de colores marrones y negruzcos con algunas cuarcitas hacia la parte superior.	
					Disc. ang.	
					Esquistos gris verdosos y anfibolitas.	

Fuente: (COLUMNNA ESTRATIGRAFICA DE CAJAMARCA - GEOLOGIA DEL PERU, 2024)

Figura 17: Perfil geoelectrico en la plaza de Cusco-Perú



Fuente: (Pari, et al, 2006)

2.2.12 Software IPI2Win

IPI2Win es el encargado de realizar la interpretación unidimensional de curvas de sondeo eléctrico vertical a lo largo de un perfil. Su distintiva característica es su capacidad para proporcionar resultados geológicos, lo que lo diferencia de otros programas de inversión automática. El software pone un énfasis especial en una interpretación iterativa que sea flexible y fácil de usar. Permite ajustar la solución según el criterio del interpretador, eligiendo entre un conjunto de soluciones equivalentes la que mejor se ajuste a los datos geofísicos, IPI2Win compara varias definiciones de la estructura geológica a lo largo del perfil para determinar la mejor aproximación. Esta metodología ofrece la posibilidad de utilizar información geológica previa y extraer la mayor cantidad de datos posible en contextos geológicos complejos. (Bobachev et al., 2000)

Este software permite realizar el análisis e interpretación tanto automática como manual de las curvas obtenidas en los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV). Es compatible con datos 1D de los arreglos Schlumberger, Wenner, Dipolo-Dipolo y Polo-Polo. Su principal ventaja radica en la facilidad del procedimiento manual, ya que los parámetros del modelo pueden ajustarse de tres maneras: Mediante una planilla, en la sección de resistividad o arrastrando directamente la curva. Además, los efectos de las modificaciones pueden visualizarse en tiempo real. Los resultados se presentan en forma de capas de resistividad, gráficos

logarítmicos, tablas de resistividad con profundidad y secciones o perfiles geoelectricos (estos últimos requieren múltiples SEV) (Bobachev et al., 2000).

2.2.13 Aguas Subterráneas para uso Agrícola y Ganadero

El agua subterránea constituye la principal reserva de agua dulce disponible en el planeta y representa una fuente esencial para diversas actividades humanas: como para el abastecimiento poblacional, el riego agrícola, del suministro para actividades pecuarias, así como en la minera y diversas industrias. Para el caso de Huayrapongo Chico, perteneciente a la Universidad Nacional de Cajamarca, este recurso se emplea en los siguientes ámbitos: para uso agrícola y pecuario, los diferentes cálculos para determinar la demanda se explican a continuación.

2.2.13.1 Demanda de agua para uso agrícola

El cálculo de la demanda hídrica para usos agrícola depende de diversos factores, entre los que destacan el tipo de cultivo, las condiciones climáticas, las características del suelo y las técnicas de riego empleadas. Para determinar las necesidades hídricas de los cultivos, se toma en cuenta los siguientes elementos:

a) Evapotranspiración (ET): representa el total de agua perdida a través de la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. Su estimación puede realizarse mediante métodos empíricos o modelos matemáticos que emplean variables climáticas como la humedad relativa, la temperatura, la radiación solar y la velocidad del viento. Entre los métodos disponibles se encuentra el modelo de Penman Monteith se destaca como uno de los más utilizados debido a su precisión (Rome, 2006)

b) Coeficiente de Cultivo (K_c): indica las necesidades hídricas específicas de un cultivo en comparación con la evapotranspiración de referencia (ETO), la cual corresponde a la evapotranspiración de un cultivo estándar bajo condiciones óptimas. Al multiplicar la ETO por el factor de cultivo, se obtiene la evapotranspiración real del cultivo, que representa su demanda hídrica específica (Rome, 2006).

$$K_C = \frac{ETc}{ETO} \quad \text{Ec. (28)}$$

c) Área de Cultivo: Consiste en identificar y cuantificar la superficie total destinada a actividades agrícolas.

d) **Duración del cultivo:** Corresponde al tiempo total comprendido entre la siembra y la cosecha del cultivo, dividido en tres fases principales:

- Fase inicial: comprende desde la siembra hasta alcanzar aproximadamente un 10% de cobertura vegetal, donde predominan los procesos de germinación y establecimiento.
- Fase de desarrollo: abarca desde el final de la fase inicial hasta lograr una cobertura del 70% al 80 %, caracterizada por un rápido crecimiento del cultivo.
- Fases finales: se extiende desde el término de la fase de desarrollo hasta la maduración o cosecha, donde disminuye la demanda hídrica del cultivo.

2.2.13.2 Demanda de agua para uso ganadero

La demanda hídrica en animales proviene de tres fuentes: el agua presente en los alimentos, la generada por el metabolismo y laingerida directamente. Este estudio se centra en calcular el consumo directo de agua en periodos críticos. El agua es esencial para mantener funciones vitales como la regulación térmica, la excreción y procesos productivos como el crecimiento, la producción y la lactancia. Esta necesidades varían según factores fisiológicos, ambientales y de producción (Wener, 2024).

- a) **Factores relacionados con la dieta:** Están determinados principalmente por el contenido de humedad, nitrógeno, fibra y sal presentes en los alimentos, los cuales influyen directamente en la cantidad de agua que el animal requiere.
- b) **Factores individuales del animal:** Comprenden aspectos como el estado fisiológico, el peso corporal y el nivel de producción y el consumo diario de materia seca, variables que condicionan el volumen de agua necesario para cubrir las demandas metabólicas y productivas del ganado.

El consumo de agua en los animales varía según su peso, edad y nivel de producción, siendo más elevado en individuos jóvenes o altamente productivos. Para facilitar su estimación, se presenta una tabla que relaciona el requerimiento hídrico con el peso corporal, el estado fisiológico y las condiciones de temperatura ambiente.

Tabla 8: Requerimiento de agua para ganado vacuno

Temperatura (°C)	Vacas lactando (lt/dia)	Vacas Secas (lt/dia)	Animales En Crecimiento (lt/dia)	Animales En Terminación (lt/dia)
	409 kg	409 kg	108 kg	364 kg
4	43	25	15	28
10	48	27	16	30
14	55	31	19	34
21	64	37	22	41
27	68		25	47
32	61		36	66
				78

Fuente: (Romero,2019)

2.2.14 Estimación de la disponibilidad hídrica

El cálculo se determina utilizando la siguiente fórmula, según la metodología empleada (Hernández,2019).

$$Q = A * E * m_e \quad \text{Ec. (29)}$$

Q: estimación hídrica del acuífero (m^3)

E: espesor del acuífero (m)

A: área (m^2)

me: porosidad eficaz

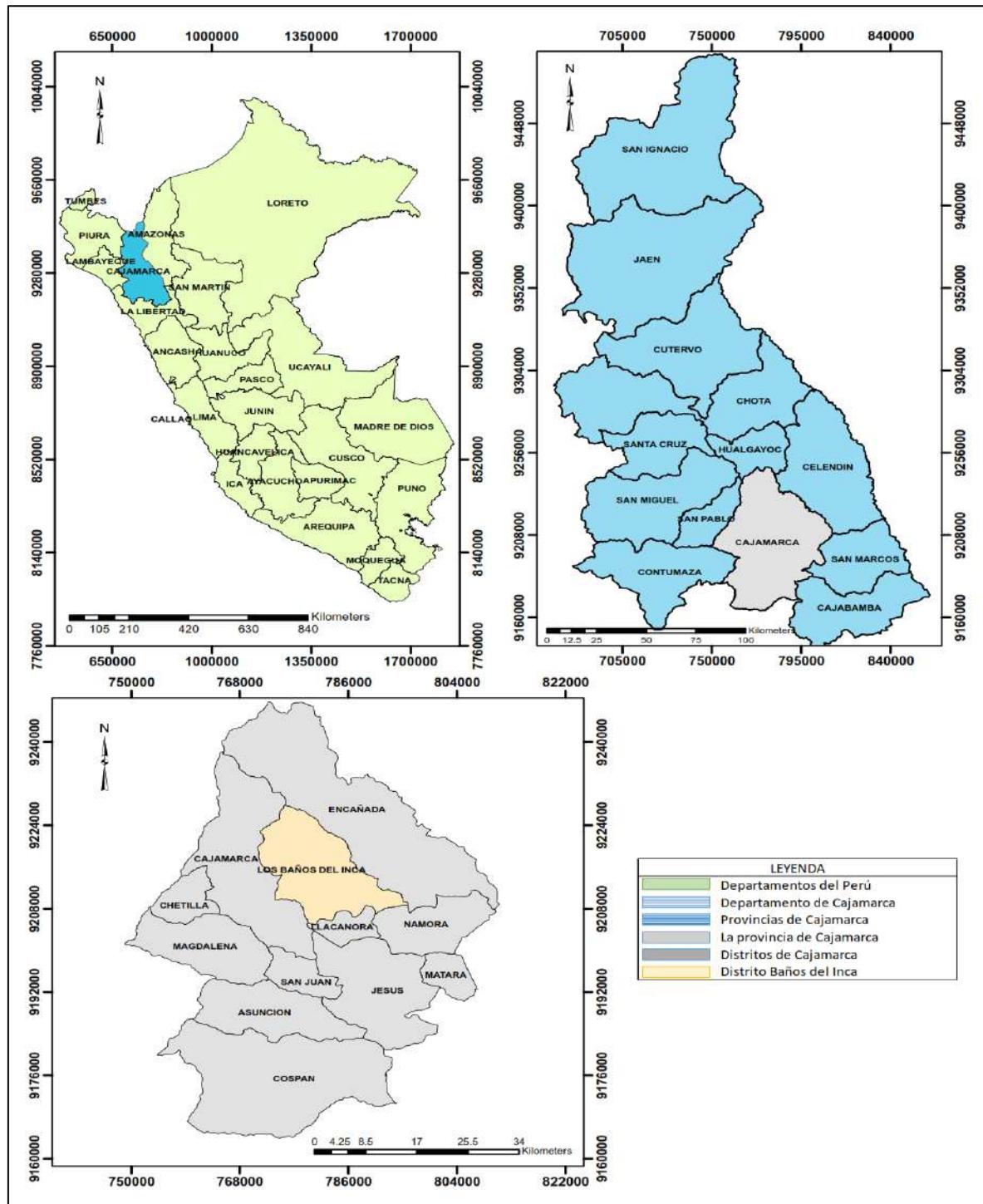
CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN

3.1.1 Ubicación Política

La zona de estudio se encuentra situada en el distrito de Baños del Inca, perteneciente a la provincia y departamento de Cajamarca, a una altitud promedio de 2645 msnm.

Figura 18: Mapa Político de Localización del Área de Estudio



3.1.2 Ubicación Administrativa

➤ ALA: Cajamarca

➤ AAA: Marañón

Figura 19: Mapa de Localización Administrativa

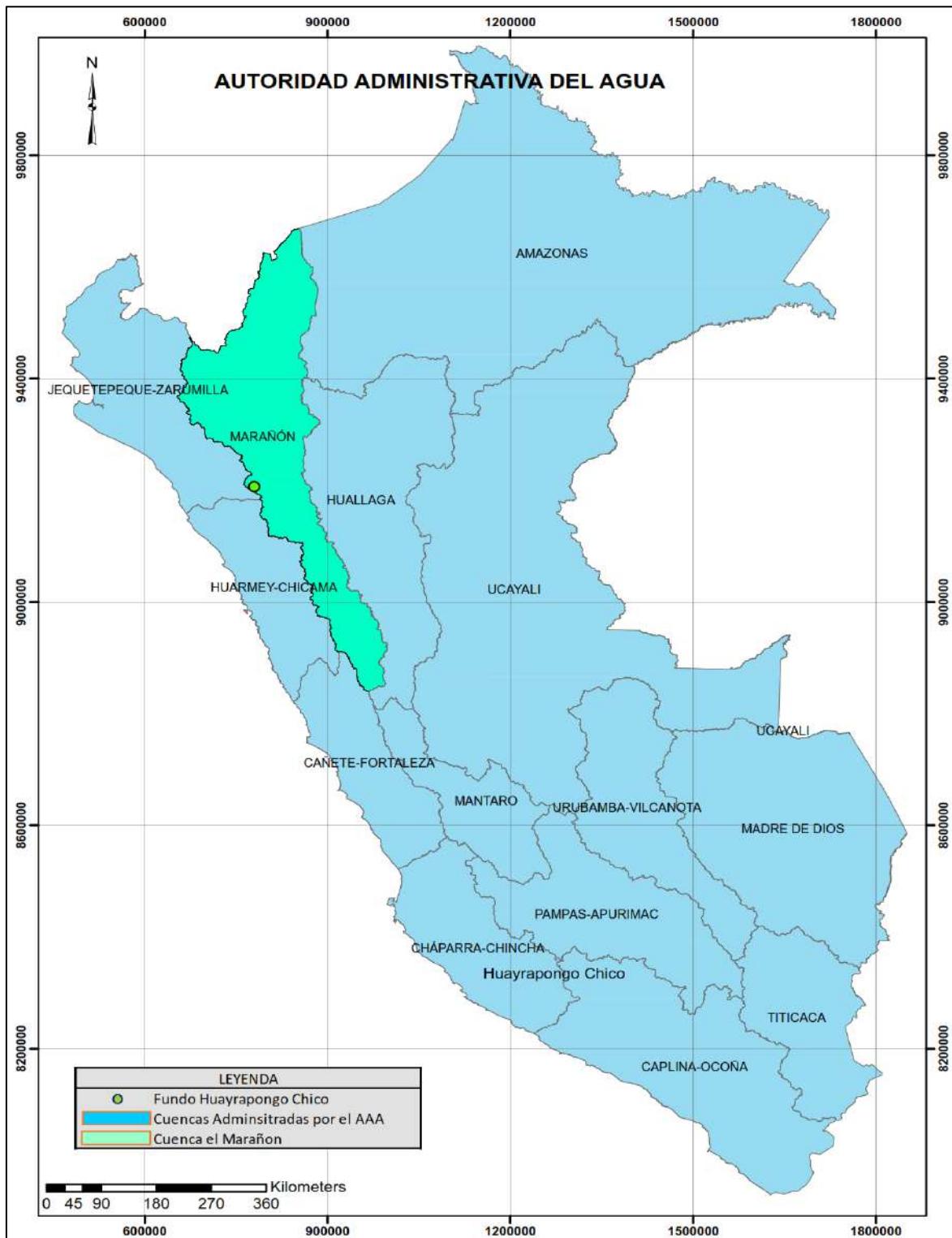
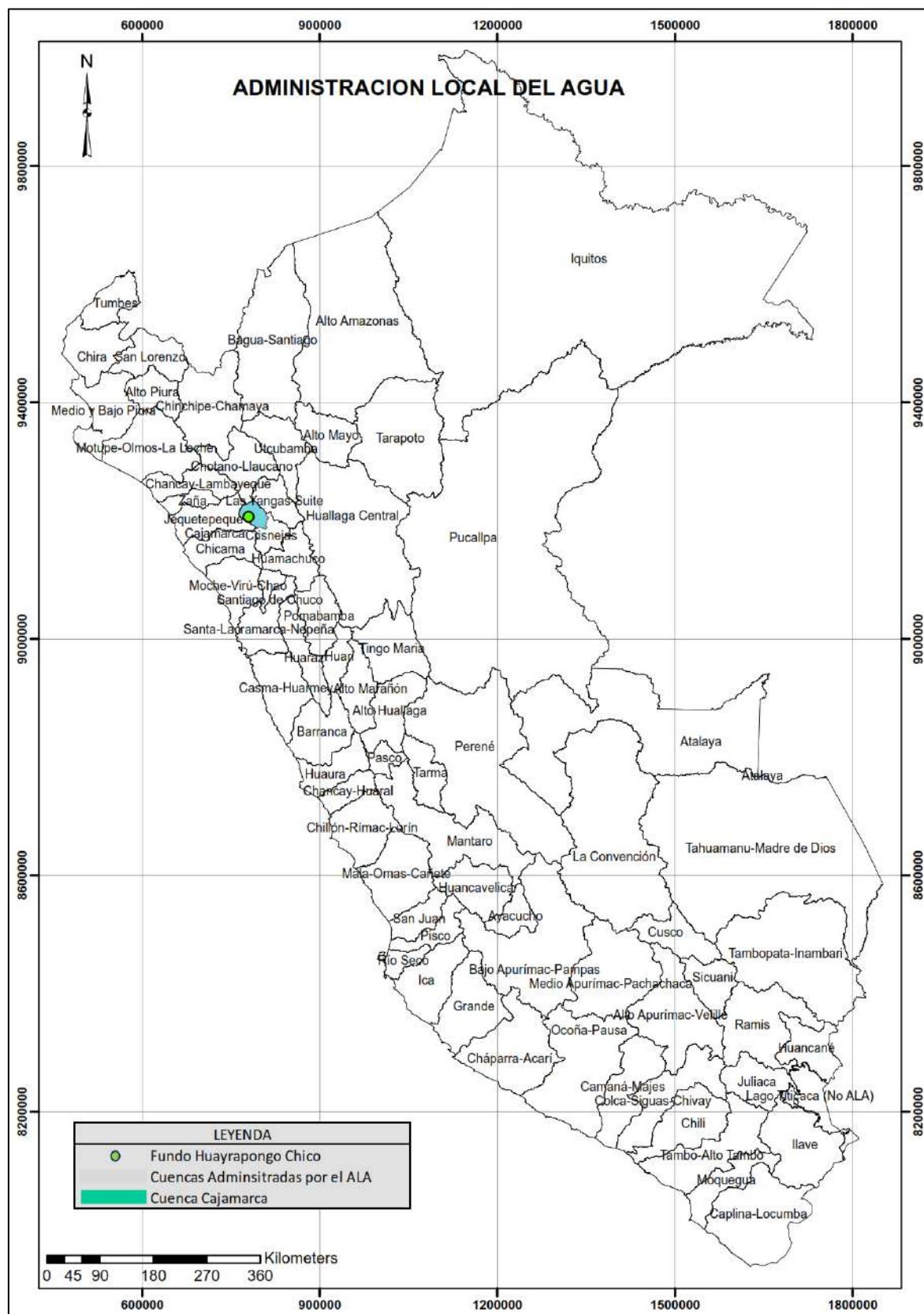


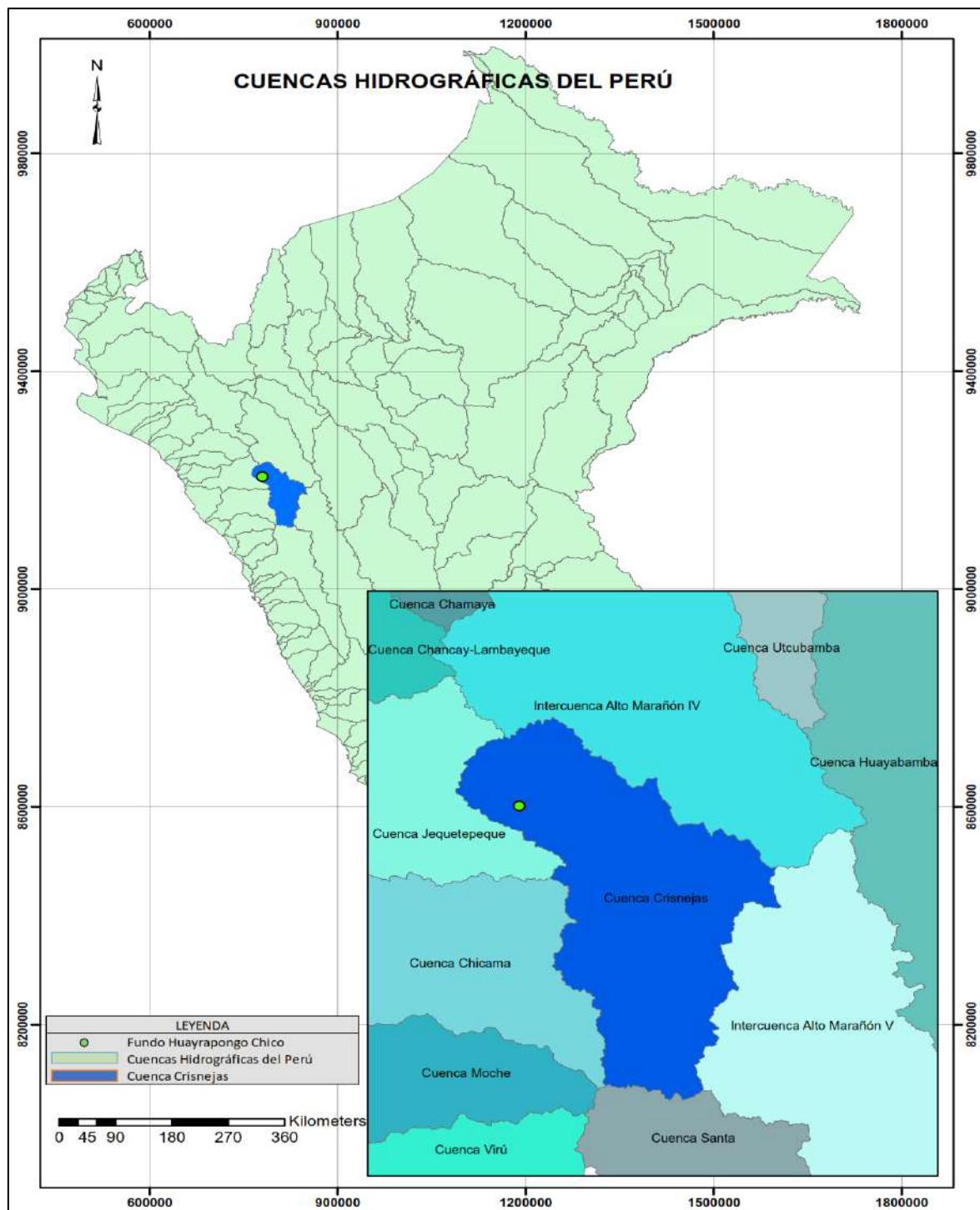
Figura 20: Mapa de Administración local del agua



3.1.3 Ubicación hidrográfica

- Vertiente: Red hidrográfica del Atlántico
- Cuenca Crisnejas

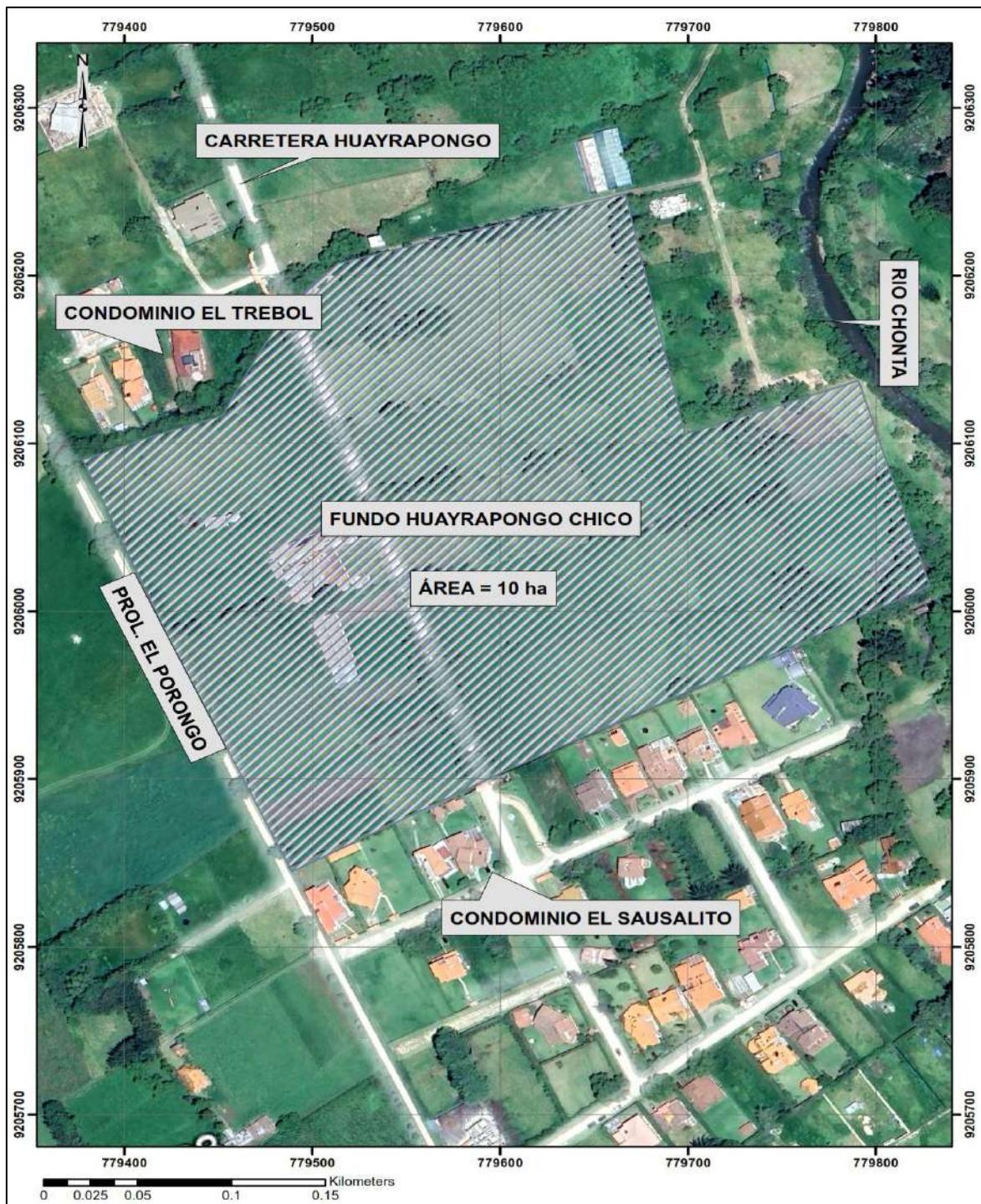
Figura 21: Mapa de Referencia Hidrográfica



3.1.4 Localización del área de estudio

La investigación se desarrolló en el predio de Huayrapongo Chico, con una extensión aproximada de 10 hectáreas, perteneciente a la Universidad Nacional de Cajamarca este se ubica en el distrito de Baños del Inca, provincia de Cajamarca y departamento de Cajamarca, está bajo la administración de la facultad de ciencias pecuarias, el 70% está cubierta por pastos, el resto de área está cubierta por alfalfa y zonas construidas.

Figura 22: Mapa de ubicación del área de estudio



3.1.5 Características ambientales del área de estudio

En el área de estudio las temperaturas varían moderadamente durante el año debido a su altitud de aproximadamente 2645 msnm. Los meses más cálidos tienen temperaturas máximas promedio alrededor de 22°C a 27°C, mientras que las mínimas nocturnas suelen descender a unos 5°C a 7°C. Durante los meses más fríos, las temperaturas pueden variar entre 3°C y 18°C, siendo los días templados y las noches frías. El clima es sustancialmente seco en invierno y húmedo en verano.

3.2.MATERIALES

3.2.1. Equipos y Materiales Utilizados en la investigación

3.2.1.1.Equipos utilizados en campo

- GPS, para la ubicación de cada punto donde se realiza el SEV.
- Cámara fotográfica
- Equipo de protección personal para la obtención de la información: Zapatos, chaleco.
- 02 combas
- 01 wincha de 50 m
- Estacas
- Equipo para determinar los SEV.

3.2.1.2.Equipos utilizados en gabinete

- Laptop Lenovo Core i5
- Útiles de escritorio para la organización y registro de datos.
- Softwares:
 - Microsoft Word, empleado en la redacción de la tesis y demás documentos.
 - Microsoft Excel, utilizado para el cálculo, análisis y manejo de la información obtenida.
 - AutoCAD CIVIL 3D, para la elaboración y presentación de planos topográficos.
 - ArcGIS, destinado al procesamiento de información geológica y cartográfica, así como a la generación de mapas temáticos.
 - Software IPI2WIN, utilizado para el procesamiento e interpretación de los datos obtenidos mediante los SEV.

3.3.FASE PRELIMINAR DE LA INVESTIGACION

El proyecto de investigación se ejecutó en tres fases principales: la recopilación de información teórica, el reconocimiento del área de estudio y el diseño, adquisición, procesamiento e interpretación de datos geoelectricos. Cada fase requirió una adecuada planificación para la realización del trabajo de campo. Durante la fase de adquisición de datos se efectuaron los SEV y la prueba de bombeo, con el propósito de determinar los distintos parámetros hidrogeológicos del área de estudio.

3.4.METODOLOGIA DEL TRABAJO

3.4.1 Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico del área de estudio se realizó con un GPS Garmin 64 SX, ubicando 112 puntos en el sistema UTM WGS84 de todo el perímetro del Fundo de Huayrapongo Chico y de las zonas importantes como áreas cultivadas, pozos artesanales, accesos y áreas construidas. Para realizar el plano topográfico empleando el software Civil 3D.

Figura 23: Levantamiento topográfico con GPS Garmin 64 SX



3.4.2 Plano topográfico del fundo Huayrapongo Chico – UNC

Se empleo el software AutoCAD Civil 3D, para la elaboración del plano topográfico, permitiendo representar con precisión las curvas de nivel, la localización de los pozos artesanales, las zonas edificadas, las áreas de cultivo y las vías de acceso.

Figura 24: Plano topográfico del fundo Huayrapongo Chico – UNC



3.4.3 Caracterización del Fundo de Huayrapongo chico

3.4.3.1 Obtener y procesar la información agropecuaria

El fundo de Huayrapongo Chico, perteneciente a la Universidad Nacional de Cajamarca, se encuentra bajo la administración de la facultad de ciencias pecuarias. En este terreno, se cultivan diversas parcelas con cultivos como alfalfa, ray Grass y pastos.

Figura 25: Caracterización agropecuaria del Fundo Huayrapongo Chico



3.4.3.2 Obtener y procesar la información obtenida del pozo de bombeo

Con ayuda del GPS se determinó las coordenadas de los 2 pozos artesanales ubicados en la zona de estudio. Del pozo artesanal N°02 se utiliza actualmente para el uso agropecuario.

Para determinar los parámetros hidrogeológicos se realizó la prueba de bombeo a caudal constante de 0.668 lt/s durante 2 horas, registrando periódicamente cada 5 minutos los niveles de abatimiento en metros utilizando una wincha metálica. Simultáneamente, se midió el caudal de extracción en l/s utilizando el método volumétrico.

Figura 26: Obtención de la información del pozo de bombeo, caudal y muestra de agua.



3.4.3.3 Obtener y procesar la información geológica

Para la recopilación de la información geológica se empleó la Carta Geológico 15-G, elaborada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET). En el área de estudio se identifican diversas formaciones geológicas, destacando principalmente los depósitos lacustres cuaternarios y los depósitos fluviales, conformados por arenas y gravas arenosas.

Los depósitos lacustres se originan principalmente por la acumulación de sedimentos transportados por los ríos, cuyos materiales se depositan en las márgenes. En estas zonas, la dinámica sedimentaria favorece la formación de estructuras características, como abanicos

aluviales y deltas. Las partículas más grandes, como gravas y arenas, tienden a asentarse cerca de las orillas, mientras que los sedimentos más finos, como limos y arcillas, se transportan hacia las áreas más profundas del lago, depositándose en el fondo central (Diaz,2006).

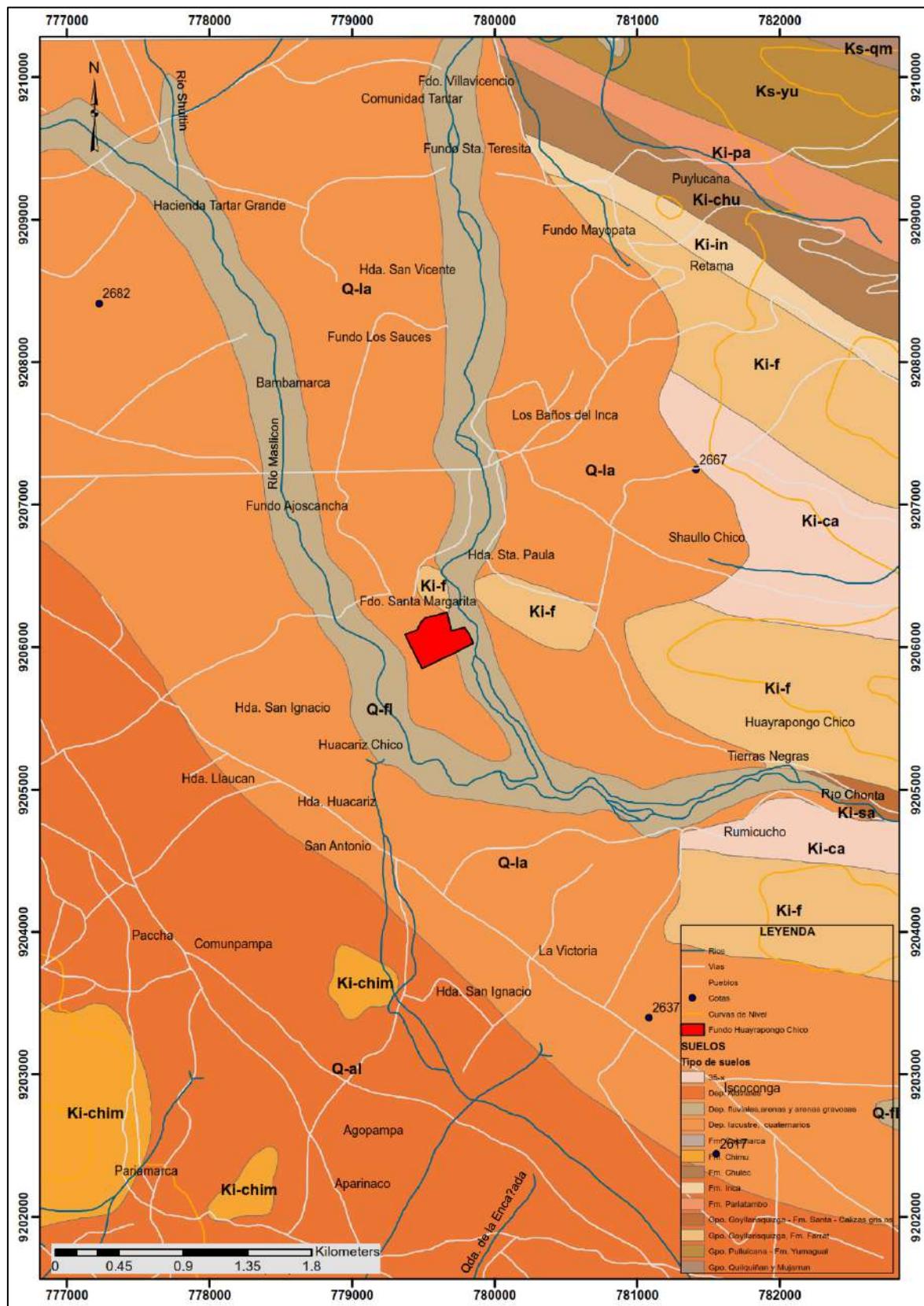
Los depósitos cuaternarios se caracterizan por una topografía predominantemente plana, con pendientes suaves que oscilan entre el 2% y el 4%. En ciertas áreas presentan ligeras ondulaciones producto de procesos de erosión moderada. Están compuestos principalmente por sedimentos finos como arenas, limos y arcillas (Atoche, 2018)

Los depósitos fluviales están conformados principalmente por materiales arcillosos, que se distribuyen de manera extensa a lo largo de la secuencia estratigráfica. Estos suelos se localizan comúnmente en los lechos de los ríos, quebradas y a lo largo de las laderas de los valles. Asimismo, presentan propiedades físicas y químicas que favorecen el desarrollo de la vegetación, especialmente de pastos y especies forrajeras utilizadas en actividades agropecuarias (De la Cruz & Jaimes, 2003).

Tabla 9: Distribución de las formaciones Geológicas en el Área de Estudio

Capas	Código	Símbolo	DESCRIPCIÓN
1	173	Ki-in	Fm. Inca
2	4279	Ki-chim	Fm. Chimú
3	221	Ki-chu	Fm. Chulec
4	959	Ki-ca	35-x
5	2571	Q-fl	Dep. fluviales, arenas y arenas gravosas
6	12	Ki-f	Gpo. Goyllarisquizga, Fm. Farrat
7	15	Ki-sa	Gpo. Goyllarisquizga - Fm. Santa - Calizas gris os
8	108	Q-al	Dep. Aluviales
9	959	Ki-ca	35-x
10	1392	Q-la	Dep. lacustre, cuaternarios
11	173	Ki-in	Fm. Inca
12	171	Ki-pa	Fm. Pariatambo
13	170	Ks-yu	Gpo. Pulluicana - Fm. Yumagual
14	4398	Ks-qm	Gpo. Quilquiñan y Mujarrun
15	4139	Ks-ca	Fm. Cajamarca

Figura 27: Mapa de las formaciones geológicas en el área de estudio



3.4.3.4 Obtener y procesar la información geotécnica

La información para la caracterización geotécnica se obtuvo de los estudios realizados en enero del 2020 para la exploración del pozo PCA-4 ubicado en el sector Qhapac Ñan – Cajamarca – Cajamarca ubicado geográficamente en las coordenadas UTM WGS84 776610 E, 9207973 N a cargo del Consorcio Perforación Cajamarca.

Con los ensayos de perforación exploratoria de 110 metros de profundidad presentados en la (figura 28), se observa que en los primeros metros del suelo (0-5 m) se encuentra una capa de arcilla plástica y gránulos de gravilla de color gris oscuro a negruzco, con una permeabilidad estimada baja -nula de la superficie orgánica

De los 5 metros hacia adelante pertenece a la formación Aluvial Cuaternario (Holoceno)

De los (5-10 m) se encuentra una capa de arcilla plástica de color beige a pardo con pigmentación gris y con una permeabilidad estimada de baja – nula.

La siguiente capa que va desde los (10-15 m) se encuentra una capa de arcilla semi-plástica con cierta cantidad de arena de grano fino a medio de color beige, arena polimictica de grano variado casi limpia de color variegado a beige, arena polimictica de grano fino a medio con escasa presencia de arcilla de color variegado a pardo oxidado estas capas tienen una permeabilidad estimada de media-alta.

Las capas de (15-25m) son capas formadas por arena gruesa y gravilla polimicticas casi limpias de color variegado a pardo, gravillas polimictica muy angulosa casi limpia de color variegado a pardo, gravilla polimictica con arena de grano fino, casi limpia de color variegado a pardo, gravillas polimictica y angulosa, con escasa presencia de arcilla de color variegado a pardo estas capas tienen una permeabilidad estimada de alta-media.

Las capas que van desde los (25-42 m) están conformadas por gravilla polimictica y angulosa, casi limpia de color variegado, arena polimictica de grano variado casi limpia de color variegado a pardo, gravillas con regular cantidad de arena de grano variado, polimicticas casi limpias de color variegado a pardo, gravilla con escasa presencia de arena de grano fino, polimicticas, casi limpias de color variegado a pardo estas capas tienen una permeabilidad estimada alta.

Las capas que van desde los (42-47m) están formadas por gravillas con cierta cantidad de arena y grano variado polimicticas con escasa presencia de arcilla color variegado a pardo con una permeabilidad estimada de alta-media.

Las capas formadas desde los (47-70 m) están formadas por gravillas con cierta cantidad de arena y grano variado polimicticas con escasa presencia de arcilla color variegado a pardo, arena polimictica de grano medio con escasa presencia de arcilla de color variegado a pardo, arena de grano medio a grueso con inclusiones de gravillas polimictica y escasa presencia de arcilla, arena de grano variado con inclusiones de gravilla polimictica casi limpia de color variegado a pardo con una permeabilidad estimada de media a alta.

Las capas que van desde los (70-105m) están formadas por gravilla con arena de grano variado, polimicticas y con cierta cantidad de arcilla, arena de grano variado con inclusión polimictica y con escasa presencia de arcilla, gravilla con cierta cantidad de arena de grano variado, polimicticas y casi limpias, gravilla con regular cantidad de arena de grano variado, palomiticas y con escasa y con escasa presencia de arcilla , arena polimictica de grano fino a medio, casi limpia, arena de grano variado con inclusión de gravilla polimictica y escasa presencia de arcilla gravilla con regular cantidad de arena y de grano variado, polimicticas y con escasa presencia de arcilla todas van de color variegado a pardo con una permeabilidad estima de alta-media.

La última capa que va desde los (105-110m) están formadas por gravilla con cierta cantidad de arena de grano variado, polimicticas y con cierta presencia de arcilla de color variegado a pardo con una permeabilidad estimada de media-baja.

Figura 28: Ficha técnica del pozo PCA-4

CONSORCIO PERFORACION CAJAMARCA Perforación de Pozos Profundos		POZO:	UBICACIÓN POLÍTICA	UBICACIÓN GEOGRÁFICA (UTM WGS 84):
		PCA-4	SECTOR QHAPAC ÑAN-CAJAMARCA-CAJAMARCA	776610 E/ 9207973 N
Responsable del Logeo:			Fecha de perforación exploratoria:	Ejecutado por :
YECSABELA CARHUAPOMA PORRAS			20/01/2020-23/01/2020	Consortio Perforacion Cajamarca
Dibujado: Y.C.P			Profundidad de exploratoria/diámetro:	Máquina Perforadora:
Revisado: G.G.V			110 m/8"	FR-15
Aprobado: L.G.A.V				
H (m)	SIMBOLOGIA	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	PERMEABILIDAD ESTIMADA	HORIZONTE
0		Arcilla plástica con ocasionales y muy aislados gránulos de gravilla. Color gris oscuro a negruzco		Superficie Orgánica
-5		Arcilla plástica. Color beige a pardo con pigmentación gris.		
-10		Arcilla plástica. Color beige Arcilla semi-plástica. Con cierta cantidad de arena de grano fino a medio. Color beige.		
-15		Arena polimictica de grano variado, casi limpia. Color variegado a beige. Arena polimictica de grano fino a medio con escasa presencia de arcilla. Color variegado a pardo oxidado. Arena gruesa y gravilla, polimicticas, casi limpias. Color variegado a pardo.		Media-Alta
-20		Gravilla polimictica, muy angulosa,casi limpia. Color variegado a pardo.		
-25		Gravilla polimictica con arena de grano fino,casi limpia. Color variegado a pardo. Gravilla polimictica y angulosa,con escasa presencia de arcilla. Color variegado a pardo. Gravilla polimictica y angulosa,casi limpia. Color variegado.		Alta-Media
-30		Arena polimictica de grano variado, casi limpia. Color variegado a pardo.		
-35		Gravilla con regular cantidad de arena de grano variado, polimicticas, casi limpias. Color variegado a pardo		Alta
-40		Gravilla con cierta cantidad de arena de grano variado, polimicticas y casi limpias. Color variegado a pardo		
-45		Gravilla con escasa presencia de arena de grano fino, polimicticas, casi limpias. Color variegado a pardo.		Alta-Media
-50		Gravilla con cierta cantidad de arena de grano variado, polimicticas, con escasa presencia de arcilla. Color variegado a pardo.		
-55		Gravilla con cierta cantidad de arena de grano fino, polimicticas, con escasa presencia de arcilla. Color variegado a pardo.		
-60		Gravilla con cierta cantidad de arena de grano fino, polimicticas, con escasa presencia de arcilla. Color variegado a pardo.		Media-Alta
-65		Arena de grano medio a grueso con inclusiones de gravilla polimictica y escasa presencia de arcilla. Color variegado a pardo		
-70		Gravilla con cierta cantidad de arena de grano variado,polimictica y con escasa presencia de arcilla. Color variegado a pardo		
-75		Arena de grano variado con inclusiones de gravilla polimictica,casi limpia. Color variegado a pardo.		
-80		Gravilla con cierta cantidad de arena de grano variado, polimicticas y con cierta cantidad de arcilla. Color pardo a variegado		Media
-85		Arena de grano variado con inclusiones de gravilla polimictica y con escasa presencia de arcilla. Color variegado a pardo		
-90		Gravilla con cierta cantidad de arena de grano variado, polimictica y con cierta cantidad de arcilla. Color pardo a variegado		
-95		Arena polimictica de grano fino a medio, casi limpia. Color pardo a variegado.		
-100		Arena de grano variado con inclusiones de gravilla polimictica y escasa presencia de arcilla. Color variegado a pardo.		Alta
-105		Gravilla con regular cantidad de arena de grano variado, polimicticas y con escasa presencia de arcilla. Color variegado a pardo.		
-110		Gravilla con regular cantidad de arena de grano variado, polimicticas y con regular cantidad de arcilla. Color pardo a variegado.		Alta-Media
				Media-baja

Fuente:(Galvasa SRL & Perforaciones y servicios generales, 2020)

3.4.4 Estimación del requerimiento Hídrico en el fundo Huayrapongo Chico

3.4.4.1 Estimación del requerimiento Hídrico de los cultivos

a. Cálculo de la ETo según el Método de Penman-Monteith

EL cálculo de la evapotranspiración de referencia (Eto) se llevó a cabo utilizando el método de Penman- Monteith, reconocido como uno de los procedimientos más exactos para estimar este parámetro. Este método destaca por considerar diversas variables climáticas, tales como la presión atmosférica, la radiación solar, la humedad relativa, la temperatura del aire y la velocidad del viento. Al considerar estos datos nos permite obtener con más precisión la evapotranspiración potencial (ETP). Los datos para este cálculo fueron obtenidos de la Estación Meteorológica Augusto Weberbauer.

Tabla 10: Resumen de la información Climática y Estimación de las Evapotranspiración potencias (ETo)

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
TºMáx °C	28.13	27.60	27.63	26.78	25.37	24.72	25.18	25.27	27.24	27.84	28.51	27.64
TºMin °C	3.09	4.03	4.19	3.94	3.17	2.09	2.23	1.89	4.85	4.17	2.86	2.80
V.Viento (m/s)	3.49	3.56	3.47	3.29	3.75	4.48	3.93	4.48	4.43	3.60	3.28	3.24
Sol (hr/mes)	5.30	4.70	4.50	5.30	6.40	6.90	7.40	7.10	5.70	5.40	6.10	5.70
Radiacion (MJ/m ² /dia)	10.35	9.72	9.42	9.18	8.80	8.38	8.82	9.70	9.76	10.02	10.38	10.06
Eto(mm/dia)	6.04	5.97	5.85	5.70	5.96	6.33	6.06	6.54	6.48	6.06	5.93	5.84
Eto(mm/mes)	187.38	167.02	181.36	171.13	184.67	189.77	187.73	202.71	194.30	187.74	178.00	181.14

Fuente: Elaboración propia

b. Distribución de áreas del fundo Huayrapongo Chico

Tabla 11: Distribución de áreas del fundo Huayrapongo Chico

DESCRIPCIÓN	ÁREA (Ha)	PORCENTAJE (%)
C.Alfalfa	1.45	14.54
C.pastos	7.60	76.02
C. Ray Grass	0.44	4.42
Galpón	0.06	0.58
Secador de Pastos	0.01	0.12
Oficinas y establos	0.23	2.34
Carretera	0.20	1.99
TOTAL	10.00	100

Fuente: Elaboración propia

c. Coeficiente de cultivo (Kc)

Es un valor numérico que representa la relación entre la evapotranspiración de un cultivo específico (Etc) y la evapotranspiración de referencia (Eto). Este coeficiente es fundamental en la planificación y gestión del riego, ya que permite ajustar la cantidad de agua necesaria para satisfacer las demandas hídricas de un cultivo en sus diferentes etapas de crecimiento.

Tabla 12: Estimación del coeficiente de Cultivo (Kc) Promedio Mensual en el Fundo Huayrapongo Chico

CULTIVO		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Área (ha)		7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60
Pastos	Kc	0.40	0.90	0.85	0.40	0.90	0.85	0.40	0.90	0.85	0.40	0.90	0.85
Área (ha)		0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
Rays grass	Kc	0.95	1.05	1.00	0.95	1.05	1.00	0.95	1.05	1.00	0.95	1.05	1.00
Área (ha)		1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
Alfalfa	Kc	0.40	0.95	0.90	0.40	0.95	0.90	0.40	0.95	0.90	0.40	0.95	0.90
Area a Cultivar (Has)		9.50	9.50	9.50	9.50	9.50	9.50	9.50	9.50	9.50	9.50	9.50	9.50
Kc ponderado (KCP)		0.43	0.91	0.86	0.43	0.91	0.86	0.43	0.91	0.86	0.43	0.91	0.86

Fuente: Elaboración propia

d. Precipitación confiable (PP75%)

Es la cantidad de lluvia que tiene una probabilidad del 75% de ser alcanzada o superada durante un periodo específico. Este indicador es de gran relevancia en áreas como la planificación agrícola, el diseño de sistemas de riego y la gestión de recursos hídricos, ya que ofrece un nivel de precipitación que se considera seguro y confiable para apoyar a la toma de decisiones. Las precipitaciones fueron obtenidas de SENAMHI de la estación augusto Weberbauer con un periodo de 33 años desde el año 1990 – 2022.

Para realizar el cálculo, se empleó la probabilidad empírica de Weibull, un método estadístico ampliamente utilizado en hidrología para analizar la distribución de datos extremos, como las precipitaciones. Con el objetivo de determinar la persistencia al 75%, se procedió a interpolar los datos disponibles, lo que permitió estimar los valores de precipitación correspondientes a este nivel de probabilidad. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla N°14.

Tabla 13: Análisis de la persistencia del 75% de Precipitaciones Aplicando la Distribución de Weibull

Precipitaciones - P(mm): Augusto Weberbauer													
m	weibull	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
	p=m/N+1												
	PROB.												
1	0.03	191.20	242.70	S/D	S/D	S/D	S/D	27.60	29.40	81.40	121.80	120.30	S/D
2	0.06	184.70	177.90	257.00	144.90	75.80	24.60	22.10	21.60	56.60	118.90	119.90	168.10
3	0.09	180.70	162.30	245.00	129.50	62.60	23.90	13.90	20.90	51.40	110.70	109.40	162.70
4	0.12	154.20	152.90	230.20	111.50	53.70	22.80	13.80	15.80	47.10	108.80	99.90	140.40
5	0.15	116.90	134.70	213.60	102.90	52.70	22.30	13.20	13.40	40.90	106.30	99.60	129.40
6	0.18	103.00	133.30	202.20	102.00	51.50	21.20	12.30	12.30	40.80	96.50	99.10	123.70
7	0.21	101.80	126.40	199.30	99.10	50.10	20.20	11.80	11.70	34.70	92.30	97.60	122.60
8	0.24	100.80	124.00	182.40	94.00	48.10	17.90	10.70	10.80	34.40	90.30	97.40	122.30
9	0.26	99.00	116.50	172.70	88.40	47.20	15.60	10.70	10.60	33.60	87.60	93.40	114.90
10	0.29	95.40	112.90	170.20	83.90	42.40	15.40	9.40	10.00	31.20	83.30	92.60	109.70
11	0.32	94.80	108.30	161.20	78.80	42.20	15.40	8.30	8.90	28.90	79.90	89.80	90.90
12	0.35	84.90	107.30	154.00	78.80	40.50	12.00	5.70	7.10	27.80	78.50	77.00	87.80
13	0.38	83.20	106.20	143.20	78.60	39.50	10.80	4.60	6.40	27.70	76.20	72.20	86.10
14	0.41	82.90	103.10	138.90	78.10	38.20	10.50	4.50	6.10	27.40	65.30	71.40	84.10
15	0.44	80.20	102.00	138.60	77.60	37.40	9.10	4.40	4.70	25.10	64.00	68.80	81.70
16	0.47	77.50	101.60	136.60	77.30	35.30	8.80	3.30	3.90	24.40	63.40	63.80	80.70
17	0.50	76.60	100.80	133.70	77.20	31.60	8.60	2.60	3.90	23.70	61.80	63.20	76.40
18	0.53	75.70	98.00	133.10	73.80	30.70	7.50	2.30	3.50	21.20	60.00	60.40	74.20
19	0.56	65.20	90.00	126.40	73.30	30.20	5.00	2.30	3.40	20.10	51.80	60.40	72.30
20	0.59	64.80	85.30	126.30	72.80	29.00	4.80	2.10	2.90	19.10	50.80	58.30	71.90
21	0.62	64.50	74.60	125.20	65.00	26.90	4.50	2.10	2.50	19.00	46.20	58.30	70.80
22	0.65	61.50	73.30	121.30	63.00	23.00	3.30	2.00	1.30	17.80	46.00	55.10	69.40
23	0.68	61.00	72.30	120.10	57.20	22.70	3.00	1.80	1.20	14.80	43.40	52.50	68.90
24	0.71	52.60	68.50	118.40	56.20	20.60	2.30	1.80	1.10	14.60	33.20	50.50	68.80
25	0.74	51.10	67.30	117.30	55.20	19.60	2.10	1.30	0.70	13.90	31.50	45.70	65.00
26	0.76	49.50	61.40	110.50	54.00	18.90	1.90	0.80	0.30	11.90	31.20	44.50	63.10
27	0.79	46.90	60.00	103.50	50.40	17.90	1.70	0.60	0.20	11.80	28.20	32.00	58.30
28	0.82	46.00	55.40	77.50	49.70	17.00	1.60	0.50	0.10	11.60	27.20	30.00	51.90
29	0.85	43.80	54.30	75.70	46.50	16.70	1.40	0.50	0.00	11.50	26.50	29.10	47.90
30	0.88	43.80	53.70	66.60	44.50	7.70	0.80	0.40	0.00	10.60	21.70	24.40	45.70
31	0.91	38.20	31.80	58.30	42.10	7.70	0.80	0.20	0.00	10.20	16.80	17.00	39.50
32	0.94	36.10	31.20	56.90	40.40	7.20	0.70	0.00	0.00	7.60	12.70	16.10	34.10
33	0.97	27.00	17.50	26.50	27.40	7.00	0.40	0.00	0.00	3.70	9.90	6.30	34.10

Tabla 14: Precipitación al 75% de persistencia

CUADRO DE RESUMEN													
DIAS		31	28	31	30	31	30	31	30	31	31	30	31
MES		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
PP confiable al 75% (mm/mes)		50.30	64.35	113.90	54.60	19.25	2.00	1.05	0.50	12.90	31.35	45.10	64.05
PP confiable al 75% (mm/dia)		1.62	2.30	3.67	1.82	0.62	0.07	0.03	0.02	0.42	1.01	1.50	2.07

Fuente: Elaboración propia

e. Cédula agrícola y necesidades hídricas de los cultivos

Tabla 15: Cédula agrícola y necesidades hídricas de los cultivos (Área=9.50 Ha)

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
CULTIVO	A (Ha)	A Kc										
Pastos	7.60	0.40	7.60	0.90	7.60	0.85	7.60	0.40	7.60	0.85	7.60	0.40
Rays grass	0.44	0.95	0.44	1.05	0.44	1.00	0.44	0.95	0.44	1.05	0.44	1.05
Alfalfa	1.45	0.40	1.45	0.95	1.45	0.90	1.45	0.40	1.45	0.95	1.45	0.40
Area a Cultivar (Has)	9.50		9.50		9.50		9.50		9.50		9.50	
Kc ponderado (KCP)	0.43		0.91		0.86		0.43		0.91		0.86	
ETP (mm/mes)	187.38		167.02		181.36		171.13		189.77		184.67	
Etc= Kcp*ETP (mm/mes)	79.74		152.76		156.81		72.83		173.57		159.68	
PP al 75% (mm/mes)	50.30		64.35		113.90		54.60		19.25		2.00	
Coef. Esc. Ponderado (C)	0.45		0.45		0.45		0.45		0.45		0.45	
PE (EFFECTIVA) (mm/mes)	27.67		35.39		62.65		30.03		10.59		1.10	
REQ. NETO (mm/mes)	52.08		117.37		94.17		42.80		162.98		158.58	
REQ. NETO (m ³ /Ha/mes)	520.80		1173.70		941.67		428.02		1629.81		1585.75	
REQ. NETO (m ³ /mes)	4946.47		11147.64		8943.89		4065.30		15479.71		15061.29	
DIAS DEL MES	31.00		28.00		31.00		30.00		31.00		30.00	
REQ. NETO (Lts/seg)	1.85		4.61		3.34		1.57		5.78		5.81	
REQ B. 75% EFEC (l/seg)	2.46		6.14		4.45		2.09		7.71		7.75	
Qmax=	8.75	lt/seg	Qmin=	2.09	lt/seg							

Figura 29: Relación entre oferta y demanda en época de estiaje (junio-diciembre 2024) en el Fundo Huayrapongo Chico



f. Determinación del requerimiento de agua en la actividad ganadera

Para estimar la cantidad de agua necesaria para el uso ganadero en el Fundo Huayrapongo Chico, se consideró un total de 17 vacas lechera y 19 vacas en crecimiento. Con base en los datos presentados en la tabla 8 y considerando una temperatura promedio de 27°C, se realizaron los cálculos correspondientes, obteniéndose los siguientes resultados:

$$Q = 17 \text{ vaca} * \left(68 \frac{Lt}{dia * vaca} \right) + 19 \text{ vaca} * \left(25 \frac{Lt}{dia * vaca} \right)$$

$$Q = 1631 L/dia$$

3.4.4.2 Equipo que se utilizó para realizar los SEV

El equipo que se utilizó en campo para la adquisición de los datos de los SEV fue un OKM GeoSeeker, un equipo alemán ya calibrado, las características más importantes son las siguientes; profundidad de exploración hasta 250 m, tiempo de funcionamiento hasta 16 horas, cuenta con una caja de potencia, con salida máxima de 390 V/0.5 A/20W, tiene una batería incorporada de plomo ácido, 4 electrodos, 2 rollos de cable de 290 mm ø, 2 cables de conexión de 120 mm ø, 1 Tablet Android. Se realizaron 6 SEV en el área de estudio empleando el método de schlumberger.

Figura 30: Equipo OKM GeoSeeker utilizado para realizar los SEV (28/10/2024)



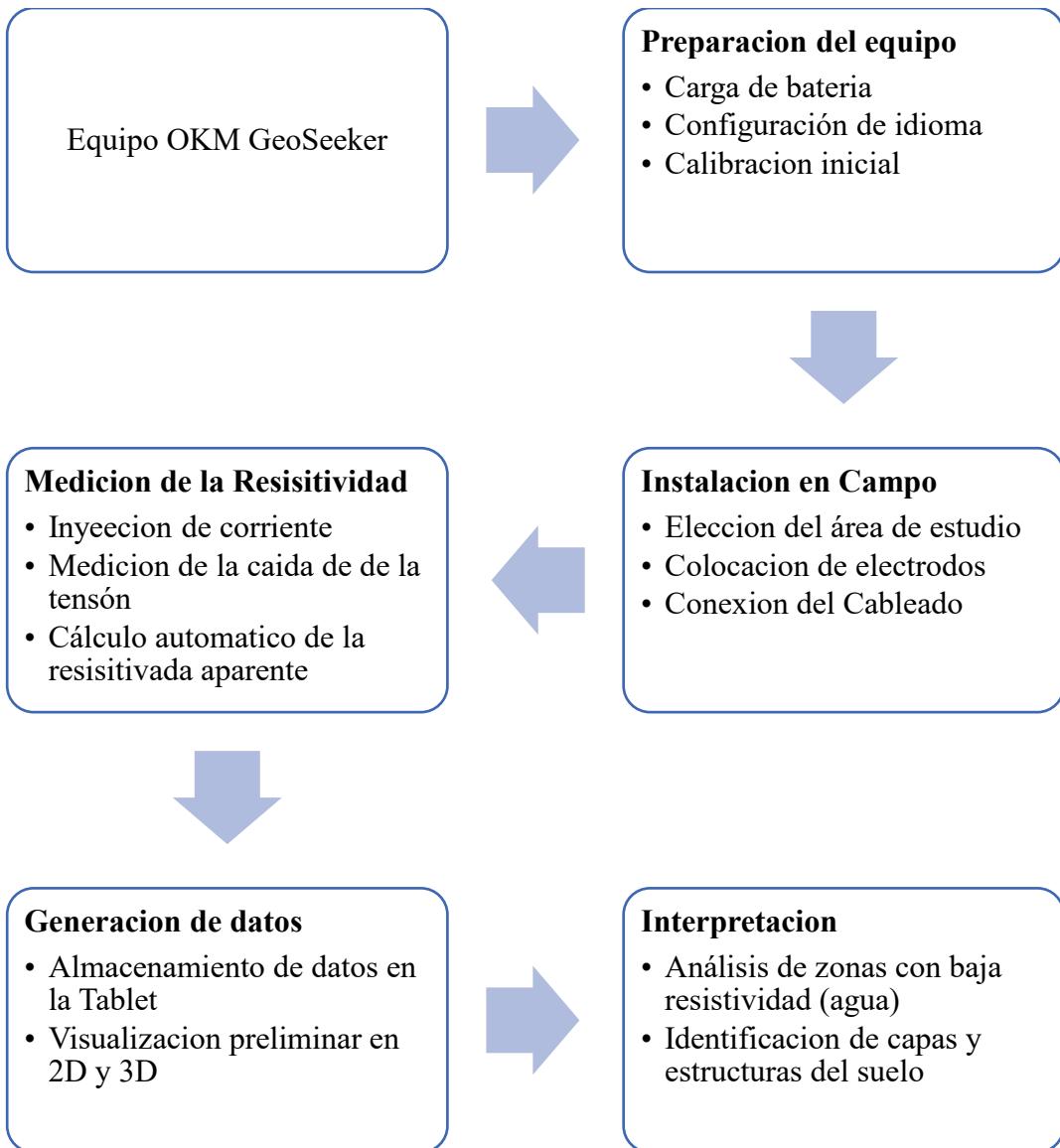
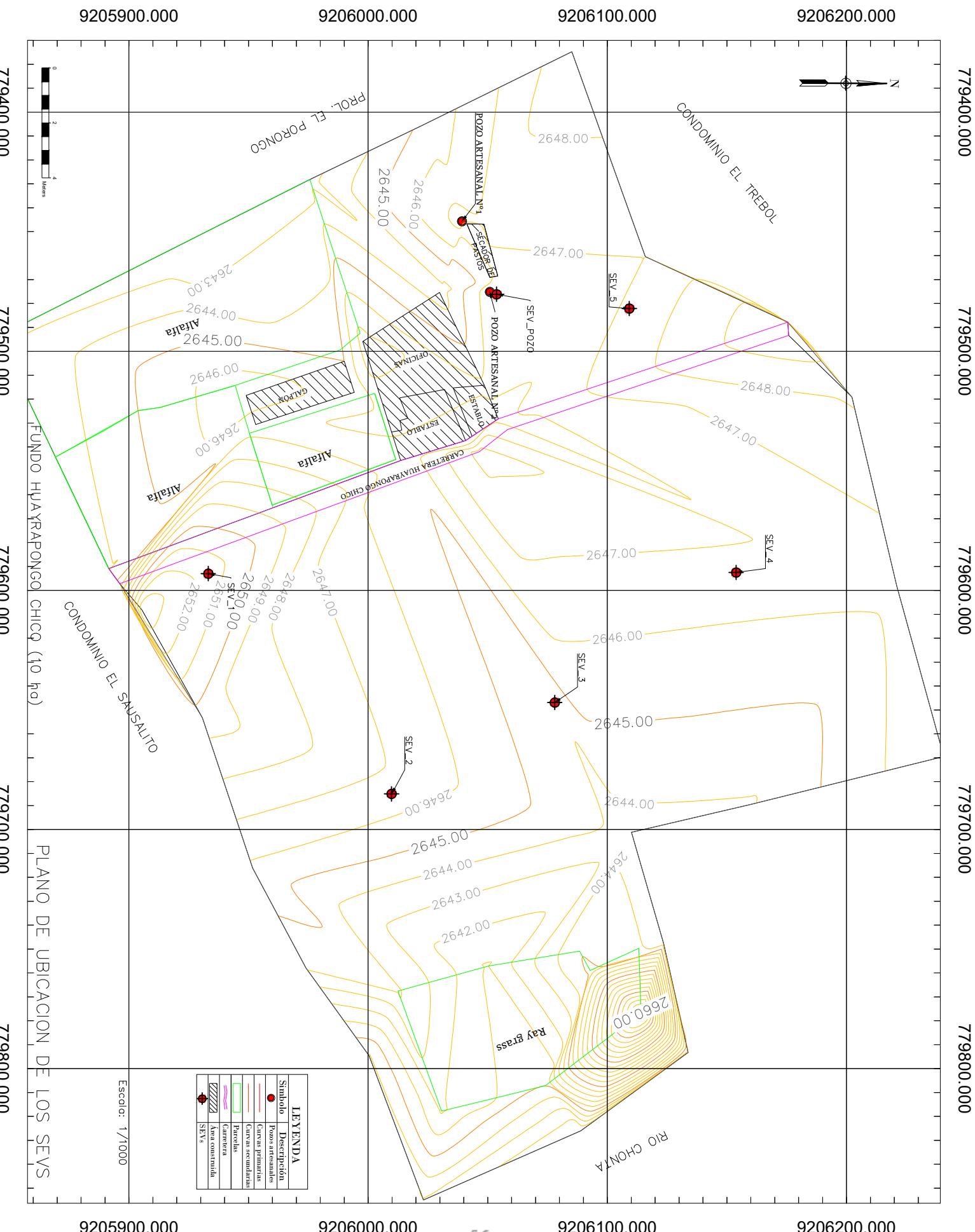


Figura 31: Mapa de distribución de los 6 SEV



Según la data obtenida de los acuíferos hidrogeológicos del GEO GPS PERÚ en la zona de estudio del Fundo Huayrapongo Chico abarca el Acuífero Poroso No Consolidado Alta, abarcando parte de los distritos de Cajamarca, Baños del Inca, San Juan, Llacañora, Namora y Jesús, a este tipo de acuíferos se lo denominan acuíferos libres y están compuestos por sedimentos sueltos o poco compactados, formados por fragmentos de rocas (gravas, arenas, limos) que permiten el paso del agua subterránea esto debido a su alta porosidad y permeabilidad. ver ANEXO (2)

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Volumen de agua requerido

Al realizar el cálculo del requerimiento de agua para uso agropecuario, se determinó que se necesitan 1631 lt/día para uso ganadero y para el uso agrícola según el cálculo de la cédula de cultivo 8.75 lt/s. para poder cubrir las épocas de estiaje. Estos datos están representados en las siguientes tablas.

Tabla 16: Requerimiento de agua para uso ganadero en el fundo Huayrapongo Chico en época de estiaje

	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
Q (m³/día)	1.631						
DIAS	30	31	31	30	31	30	31
Q (m³/mes)	48.93	50.561	50.561	48.93	50.561	48.93	50.561
Volumen total (m³)	349.034						

Tabla 17: Requerimiento de agua para uso agrícola en el fundo Huayrapongo Chico en época de estiaje

	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
Q (lt/s)	8.75						
Q (m³/día)	756						
DIAS	30	31	31	30	31	30	31
Q (m³/mes)	22680	23436	23436	22680	23436	22680	23436
Volumen total (m³)	161,784.00						

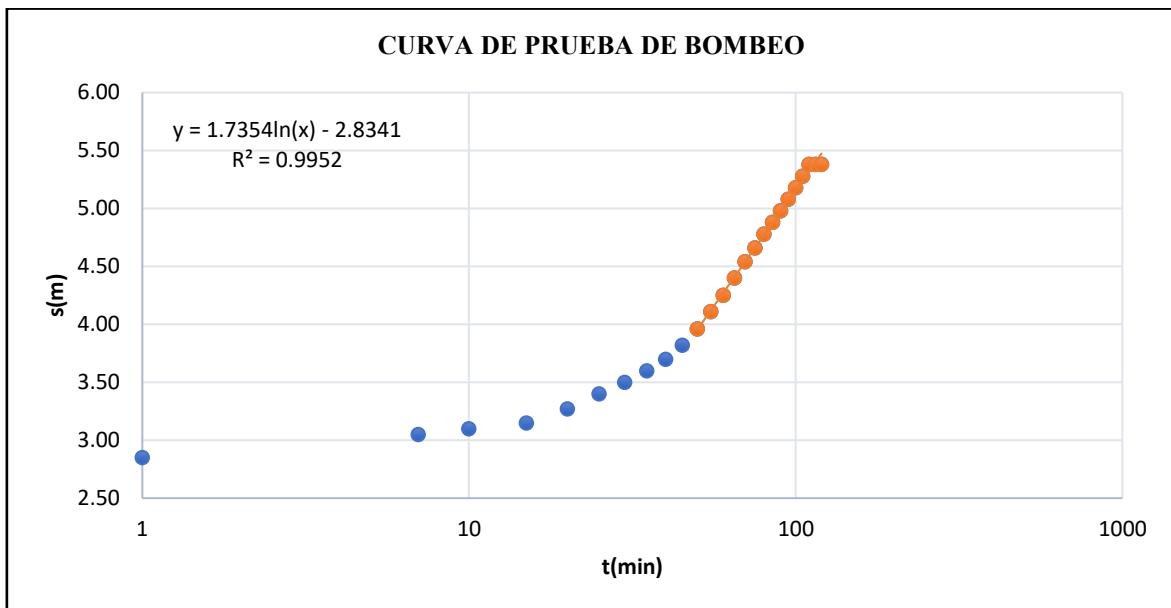
4.1.2. Prueba de bombeo

Los resultados obtenidos de la prueba de bombeo realizada en el fundo Huayrapongo Chico se muestran en la tabla 18. Durante el ensayo, se alcanzó un caudal de equilibrio de 0.668 l/s, registrando las mediciones de la profundidad del nivel piezométrico a intervalos de 5 min, a lo largo de un periodo total de 120 minutos.

Tabla 18: Prueba de bombeo con un caudal de 0.668 lt/s (26/09/2024)

Nombre del pozo : pozo artesanal N° 2		Caudal de bombeo (lts/s) : 0.668	
Profundidad del pozo de bombeo (m) : 8		Tiempo de bombeo (hr) : 2 horas	
Nivel piezométrico antes de la prueba (m): 2.85			
Descenso del bombeo cada 5 min		Recuperación del pozo cada 5 min	
Tiempo (min)	Nivel piezométrico (m)	Tiempo (min)	Nivel piezométrico (m)
0	2.85	0	4.40
7	3.05	5	4.30
10	3.10	10	4.20
15	3.15	15	4.15
20	3.27	20	4.08
25	3.40	25	4.00
30	3.50	30	3.94
35	3.60	35	3.89
40	3.70	40	3.84
45	3.82	45	3.80
50	3.96	50	3.72
55	4.11	55	3.67
60	4.25	60	3.63
65	4.40	65	3.58
70	4.54	70	3.54
75	4.66	75	3.49
80	4.78	80	3.45
85	4.88	85	3.40
90	4.98	90	3.35
95	5.08	95	3.30
100	5.18	100	3.25
105	5.28	105	3.20
110	5.38	110	3.15
115	5.38	115	3.10
120	5.38	120	3.05
		125	3.00
		130	2.95
		135	2.90
		140	2.85

Figura 32: Curva de la prueba de bombeo (fase descenso)



A partir de la aplicación de la solución de COOPER-JACOB al ensayo de bombeo, se han obtenido parámetros hidrogeológicos claves que nos permite caracterizar dicho acuífero, como la transmisividad (T) de $2.64749 \text{ m}^2/\text{día}$ y aplicando la ecuación (11) determinarnos el coeficiente de almacenamiento de 2.032×10^{-5} .

Utilizando la ecuación (10) determinamos una conductividad hidráulica de 1.9452 m/día , de igual manera aplicando la ecuación (7) se determinó una porosidad efectiva de 13.9471% .

Los resultados obtenidos nos dan entender que se trata de un acuífero confinado, con una permeabilidad media y una capacidad de almacenamiento reducida, lo cual es coherente con acuíferos sedimentarios de granulometría intermedia y cierto grado de compactación, compuesto por materiales de arenas finas a media, y algunos depósitos aluviales poco consolidados.

4.1.3. Sondeo eléctrico vertical (SEV): análisis de resistividad aparente y profundidades

Coordenadas de los SEV en el fundo de Huayrapongo Chico

Tabla 19: Coordenadas de los SEV

COORDENADAS SEV			
SEV	ESTE	NORTE	COTA
SEV_POZO	779476.19	9206053.72	2646.60
SEV01	779592.97	9205933.19	2651.50

SEV02	779685.08	9206009.82	2646.34
SEV03	779646.87	9206078.03	2644.31
SEV04	779592.49	9206153.81	2646.30
SEV05	779482.16	9206109.20	2647.55

4.1.3.1. SEV realizado en el pozo artesanal N°2

Para determinar las diferentes resistividades, en campo con ayuda del equipo OKM GeoSeeker se obtuvieron los datos de voltaje (mV) e intensidad (mA), aplicando la (ecuación 17) de schlumberger determinamos las resistividades aparentes, así formando una curva de resistividad aparente (ρ_a) en función del espaciamiento AB/2 (electrodos de corriente), graficada en escala logarítmica en el eje X.

Se observa un patrón heterogéneo y ligeramente decreciente al final. Esto se debe a que hay variaciones estratigráficas con respecto a las profundidades como nos muestra en la (figura 33).

Tabla 20: Resistividades aparentes del pozo artesanal N°2

POZO ARTEZANAL N°2							
A B (m)	AB/2 (m)	MN (m)	MN/2 (m)	VOLTAJE (mV)	INTENSIDAD (mA)	CONSTANTE GEOMETRICA (K)	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
10	5	2	1	371.16	292.84	37.70	47.78
20	10	2	1	147.66	515.17	155.51	44.57
30	15	2	1	75.20	548.98	351.86	48.20
40	20	2	1	36.65	414.73	626.75	55.39
60	30	26	13	174.40	261.71	88.33	58.86
80	40	26	13	31.89	97.85	172.91	56.36
100	50	26	13	23.49	132.58	281.66	49.90
130	65	26	13	24.79	289.67	490.09	41.94
160	80	26	13	15.33	305.41	752.89	37.79

AB: distancia de separación total entre los electrodos de corriente

AB/2 y MN/2: semi distancia entre los electrodos de corriente y de potencial, respectivamente.

Voltaje (mV) e Intensidad (mA): medición de la caída de potencial y la corriente eléctrica inyectada.

Constante geométrica (K): Factor de calibración según la configuración del arreglo.

Resistividad aparente (Ω.m): Valores representativos que presenta la resistividad del subsuelo.

Figura 33: Curva de resistividad aparente obtenida en el pozo artesanal N°2

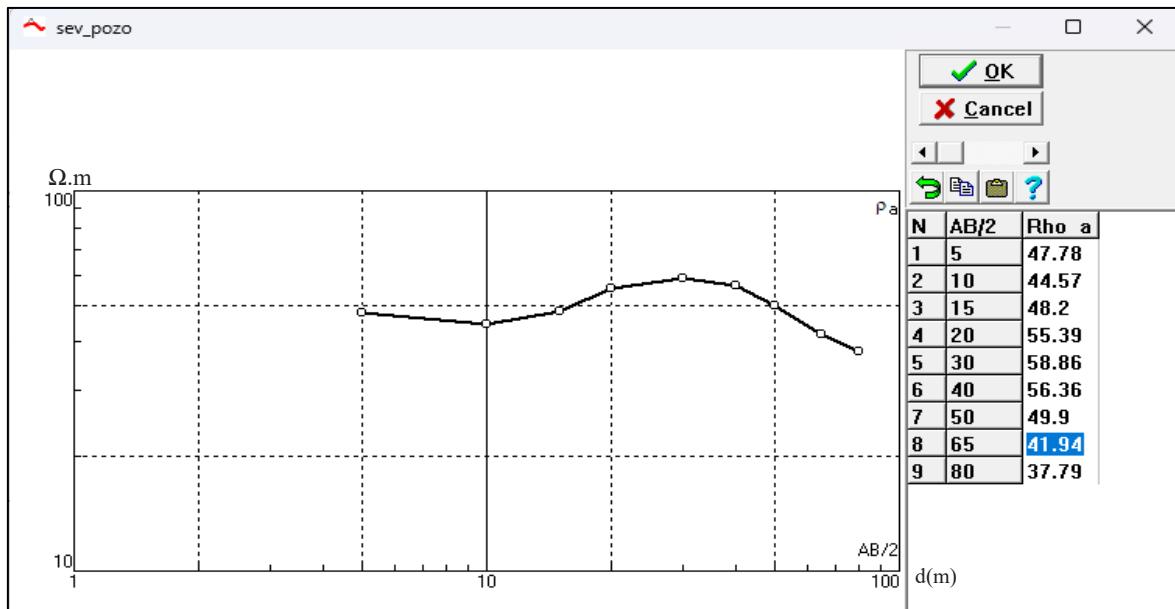
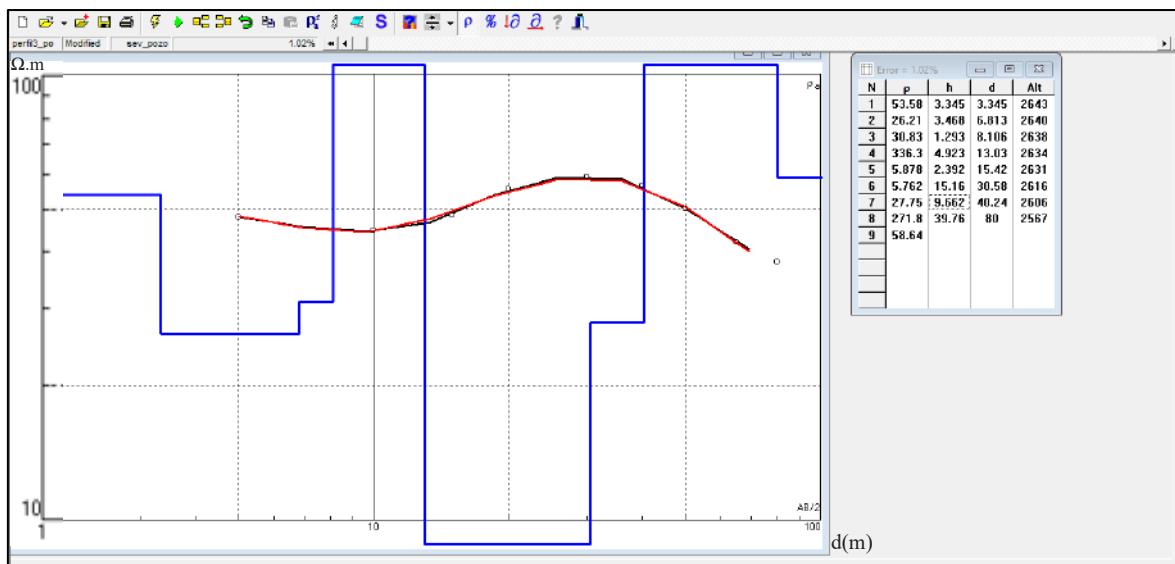


Figura 34: Resistividad aparente vs resistividad calculada del pozo N°2



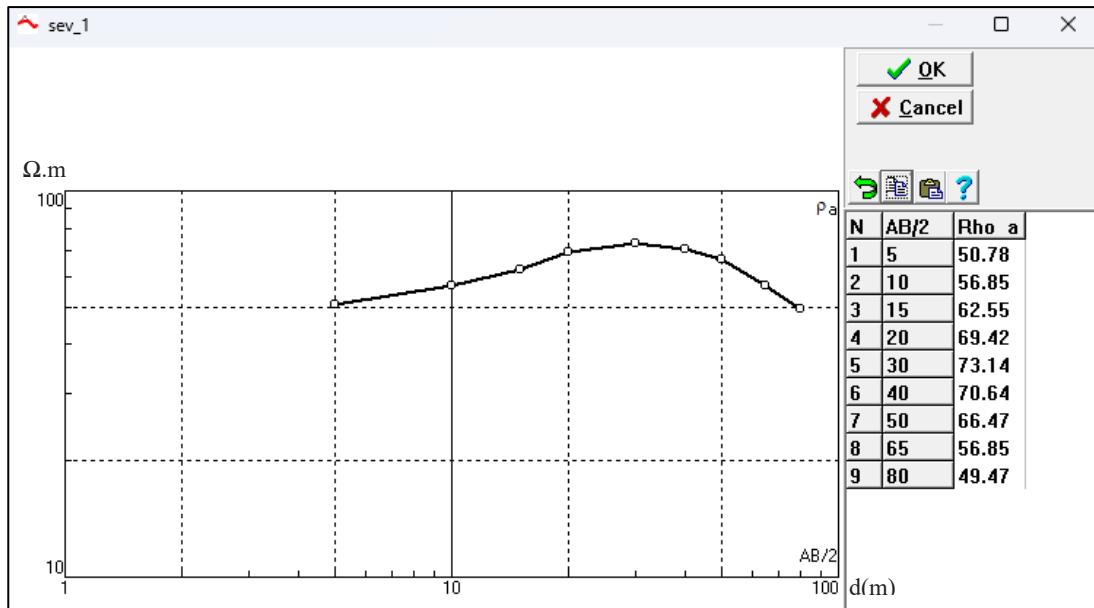
La figura 34: está relacionada entre la resistividad obtenida en campo que es la línea de color negro y la línea de color rojo es la teórica modelada, la línea azul escalonada indica el modelo geoeléctrico interpretado, compuesto por ocho capas con sus respectivos valores de resistividad y espesores. Con ayuda del software IPI2Win, el ajuste entre el modelo y los datos medidos es bueno, con un error de ajuste de 1.02% lo cual indica un modelo confiable y bien calibrado.

4.1.3.2 SEV-1

Tabla 21: Resistividades aparentes del SEV -1

SEV-1							
A B (m)	AB/2 (m)	MN (m)	MN/2 (m)	VOLTAJE (mV)	INTENSIDAD (mA)	CONSTANTE GEOMETRICA (K)	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
10	5	2	1	374.34	277.93	37.70	50.78
20	10	2	1	151.98	415.74	155.51	56.85
30	15	2	1	75.19	422.96	351.86	62.55
40	20	2	1	31.31	282.66	626.75	69.42
60	30	26	13	179.52	216.80	88.33	73.14
80	40	26	13	32.32	79.11	172.91	70.64
100	50	26	13	20.40	86.44	281.66	66.47
130	65	26	13	22.44	193.45	490.09	56.85
160	80	26	13	18.54	282.16	752.89	49.47

Figura 35: Curva de resistividad aparente obtenida del SEV-1



La curva mostrada en la figura 35, es una representación logarítmica, donde el eje horizontal (logarítmico) representa la media distancia entre los electros de corriente (AB/2), mientras que el eje vertical (logarítmico) representa la resistividad aparente en (ohm-m).

Figura 36: Resistividad aparente vs resistividad calculada del SEV-1



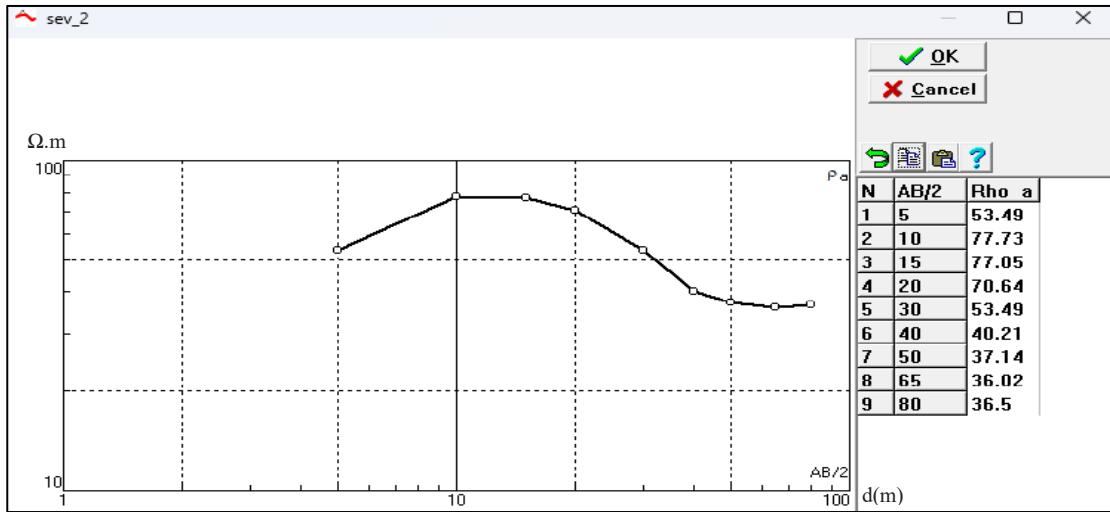
La figura 36: está relacionada entre la resistividad obtenida en campo que es la línea de color negro y la línea de color rojo es la teórica modelada, la línea azul escalonada indica el modelo geoelectrico interpretado, compuesto por ocho capas con sus respectivos valores de resistividad y espesores. Con ayuda del software IPI2Win, el ajuste entre el modelo y los datos medidos es bueno, con un error de ajuste de 0.737% lo cual indica un modelo confiable y bien calibrado.

4.1.3.3 SEV-2

Tabla 22: Resistividades aparentes del SEV -2

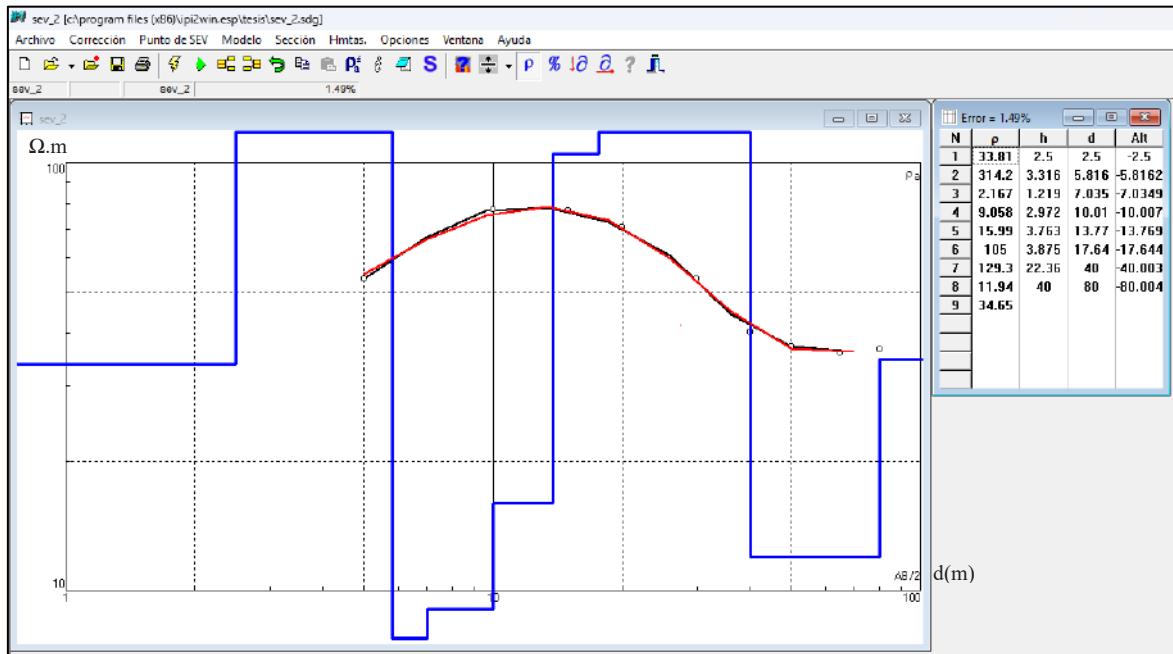
SEV-2							
A B (m)	AB/2 (m)	MN (m)	MN/2 (m)	VOLTAJE (mV)	INTENSIDAD (mA)	CONSTANTE GEOMETRICA (K)	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
10	5	2	1	737.27	519.62	37.70	53.49
20	10	2	1	112.75	225.56	155.51	77.73
30	15	2	1	42.16	192.53	351.86	77.05
40	20	2	1	48.51	430.41	626.75	70.64
60	30	26	13	118.67	195.96	88.33	53.49
80	40	26	13	44.19	190.01	172.91	40.21
100	50	26	13	36.88	279.68	281.66	37.14
130	65	26	13	22.48	305.89	490.09	36.02
160	80	26	13	20.31	418.86	752.89	36.50

Figura 37: Curva de resistividad aparente obtenida del SEV-2



En la curva mostrada de la figura 37: se observa una capa superior de resistividad intermedia, seguida por una capa de mayor resistividad, y luego una disminución hacia resistividades más bajas que disminuye progresivamente en profundidad y luego se estabiliza.

Figura 38: Resistividad aparente vs resistividad calculada del SEV-2



La figura 38: está relacionada entre la resistividad obtenida en campo que es la línea de color negro y la línea de color rojo es la teórica modelada, la línea azul escalonada indica el modelo geoeléctrico interpretado, compuesto por ocho capas con sus respectivos valores de resistividad y espesores. Con ayuda del software IPI2Win, el ajuste entre el modelo y los

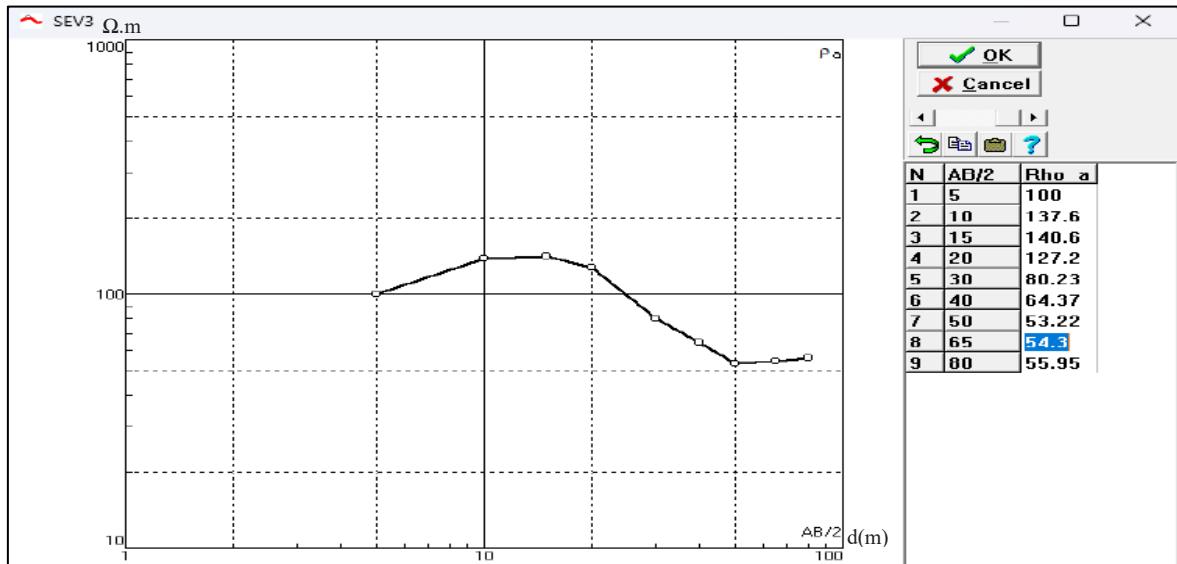
datos medidos es bueno, con un error de ajuste de 1.49% lo cual indica un modelo confiable y bien calibrado.

4.1.3.4 SEV-3

Tabla 23: Resistividades aparentes del SEV -3

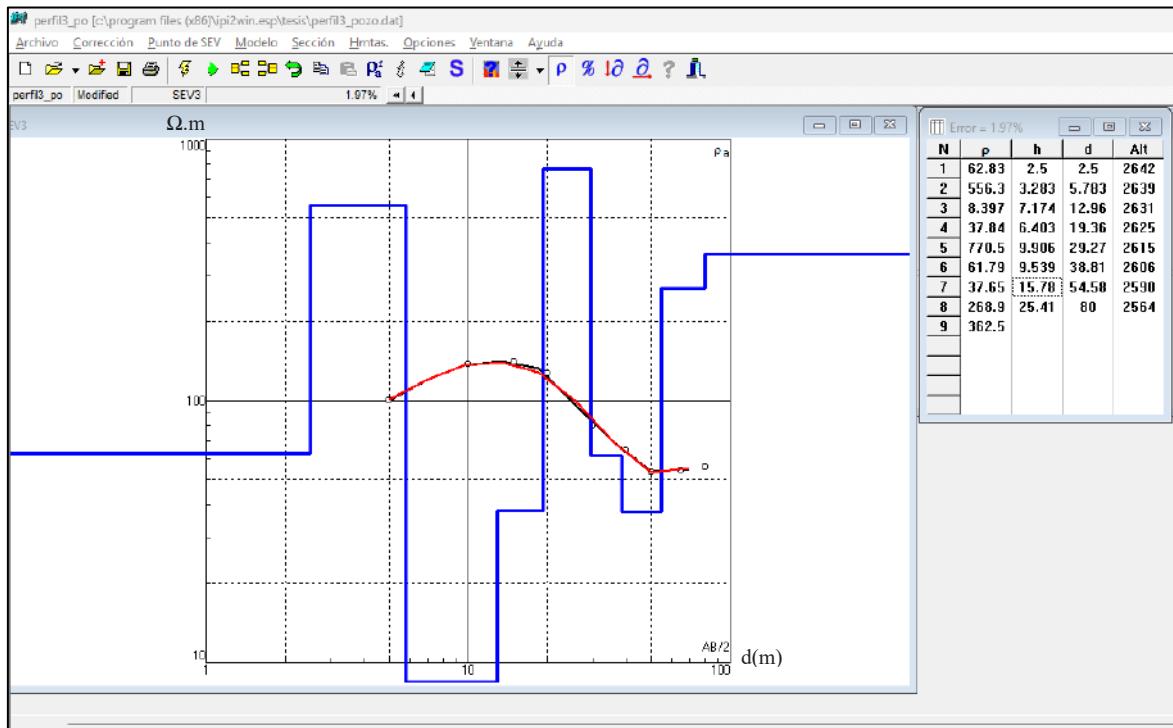
SEV-3							
A B (m)	AB/2 (m)	MN (m)	MN/2 (m)	VOLTAJE (mV)	INTENSIDAD (mA)	CONSTANTE GEOMETRICA (K)	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
10	5	2	1	661.32	249.31	37.70	100.00
20	10	2	1	146.88	166.00	155.51	137.60
30	15	2	1	75.19	188.17	351.86	140.60
40	20	2	1	80.34	395.86	626.75	127.20
60	30	26	13	417.83	460.00	88.33	80.23
80	40	26	13	59.24	159.12	172.91	64.37
100	50	26	13	51.20	270.99	281.66	53.22
130	65	26	13	81.37	734.41	490.09	54.30
160	80	26	13	78.28	1053.38	752.89	55.95

Figura 39: Curva de resistividad aparente obtenida del SEV-3



En la figura 39: se observa una curva que revela la existencia de al menos tres unidades geoelectricas. La capa superior corresponde a materiales de resistividad media-alta, seguida por una capa más resistente y finalmente con una capa donde las resistividades van disminuyendo con respecto a la profundidad.

Figura 40: Resistividad aparente vs resistividad calculada del SEV-3



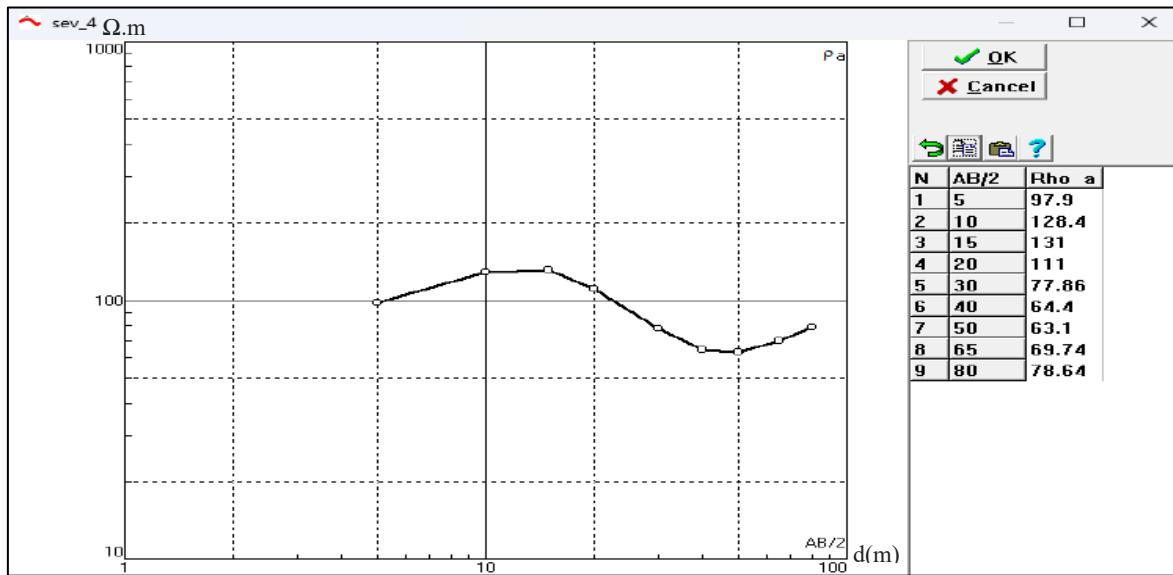
La figura 40: está relacionada entre la resistividad obtenida en campo que es la línea de color negro y la línea de color rojo es la teórica modelada, la línea azul escalonada indica el modelo geoeléctrico interpretado, compuesto por ocho capas con sus respectivos valores de resistividad y espesores. Con ayuda del software IPI2Win, el ajuste entre el modelo y los datos medidos es bueno, con un error de ajuste de 1.97% lo cual indica un modelo confiable y bien calibrado.

4.1.3.5 SEV-4

Tabla 24: Resistividades aparentes del SEV -4

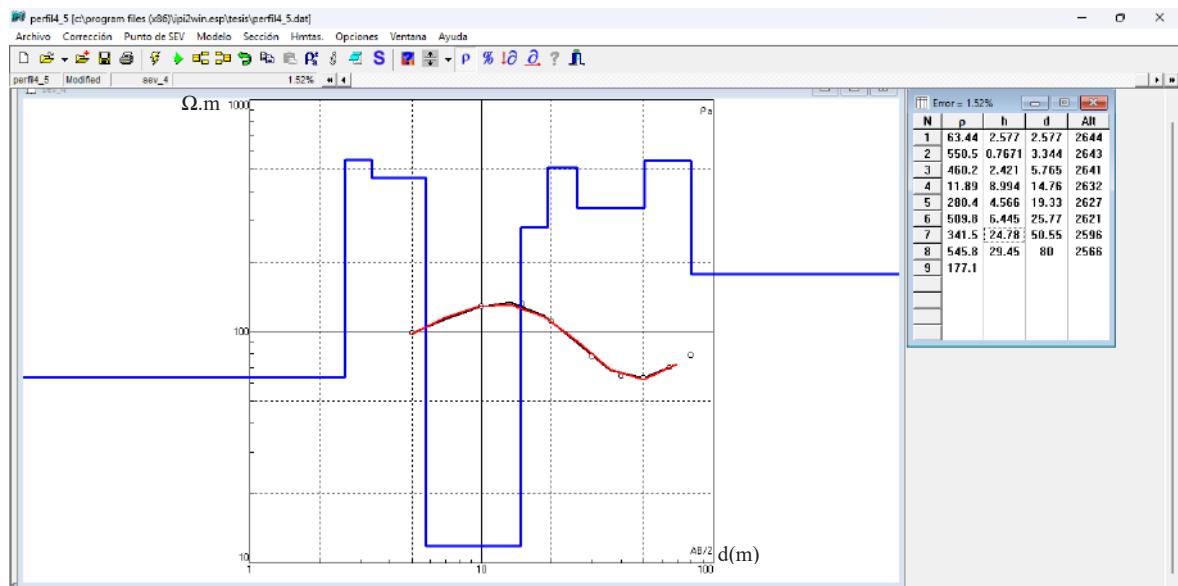
SEV-4							
A B (m)	AB/2 (m)	MN (m)	MN/2 (m)	VOLTAJE (mV)	INTENSIDAD (mA)	CONSTANTE GEOMETRICA (K)	RESISTIVIDA D (Ohm-m)
10	5	2	1	654.31	251.96	37.70	97.90
20	10	2	1	145.86	176.60	155.51	128.44
30	15	2	1	72.10	193.60	351.86	131.04
40	20	2	1	79.31	447.81	626.75	111.00
60	30	26	13	377.75	428.54	88.33	77.86
80	40	26	13	73.13	196.35	172.91	64.40
100	50	26	13	65.26	291.31	281.66	63.10
130	65	26	13	81.37	571.81	490.09	69.74
160	80	26	13	82.40	788.87	752.89	78.64

Figura 41: Curva de resistividad aparente obtenida del SEV-4



En la figura 41: la curva está formada por diferentes resistividades al menos tres unidades geoelectricas diferenciadas. La primera capa está compuesta por materiales con resistividades moderada a alta, seguida por una unidad de mayor resistencia eléctrica. Finalmente, se evidencia una tercera capa en los que los valores de resistividad tienden a disminuir progresivamente con la profundidad.

Figura 42: Resistividad aparente vs resistividad calculada del SEV-4



La figura 42: está relacionada entre la resistividad obtenida en campo que es la línea de color negro y la línea de color rojo es la teórica modelada, la línea azul escalonada indica el modelo geoeléctrico interpretado, compuesto por ocho capas con sus respectivos valores de

resistividad y espesores. Con ayuda del software IPI2Win, el ajuste entre el modelo y los datos medidos es bueno, con un error de ajuste de 1.52% lo cual indica un modelo confiable y bien calibrado.

4.1.3.6 SEV-5

Tabla 25: Resistividades aparentes del SEV -5

SEV-5							
A B (m)	AB/2 (m)	MN (m)	MN/2 (m)	VOLTAJE (mV)	INTENSIDAD (mA)	CONSTANTE GEOMETRICA (K)	RESISTIVIDAD (Ohm-m)
10	5	2	1	376.38	335.38	37.70	42.31
20	10	2	1	145.86	404.11	155.51	56.13
30	15	2	1	79.31	508.24	351.86	54.91
40	20	2	1	32.32	435.15	626.75	46.55
60	30	26	13	177.48	538.38	88.33	29.12
80	40	26	13	32.32	253.45	172.91	22.05
100	50	26	13	24.48	362.48	281.66	19.02
130	65	26	13	20.40	473.56	490.09	21.11
160	80	26	13	16.48	543.50	752.89	22.83

Figura 43: Curva de resistividad aparente obtenida del SEV-5

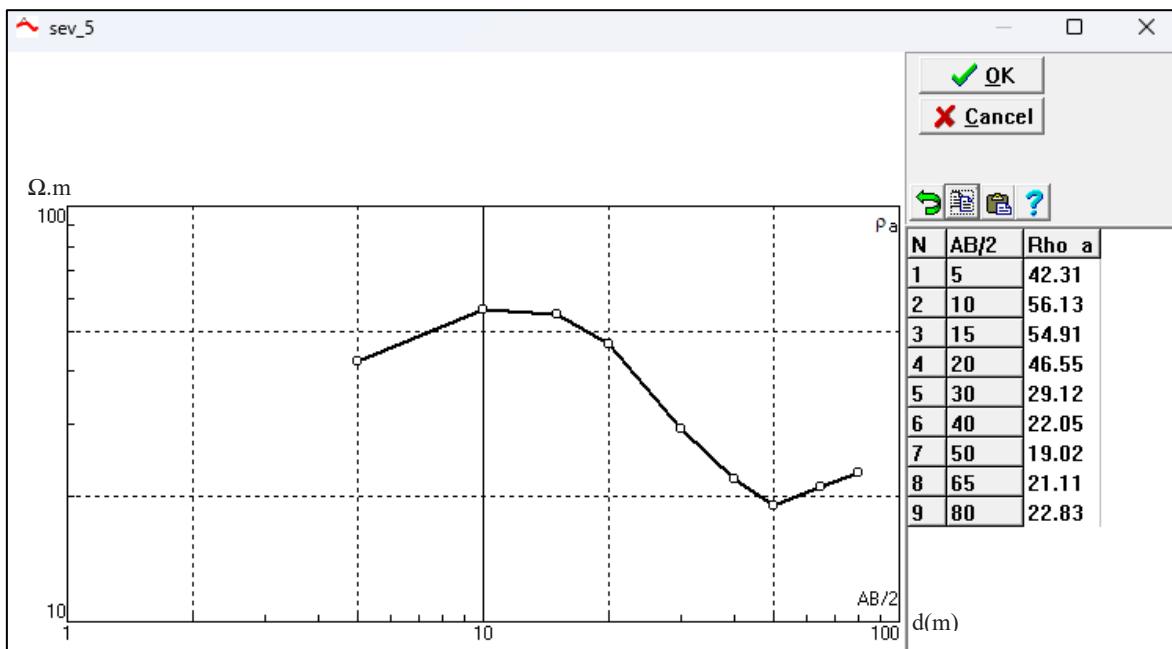
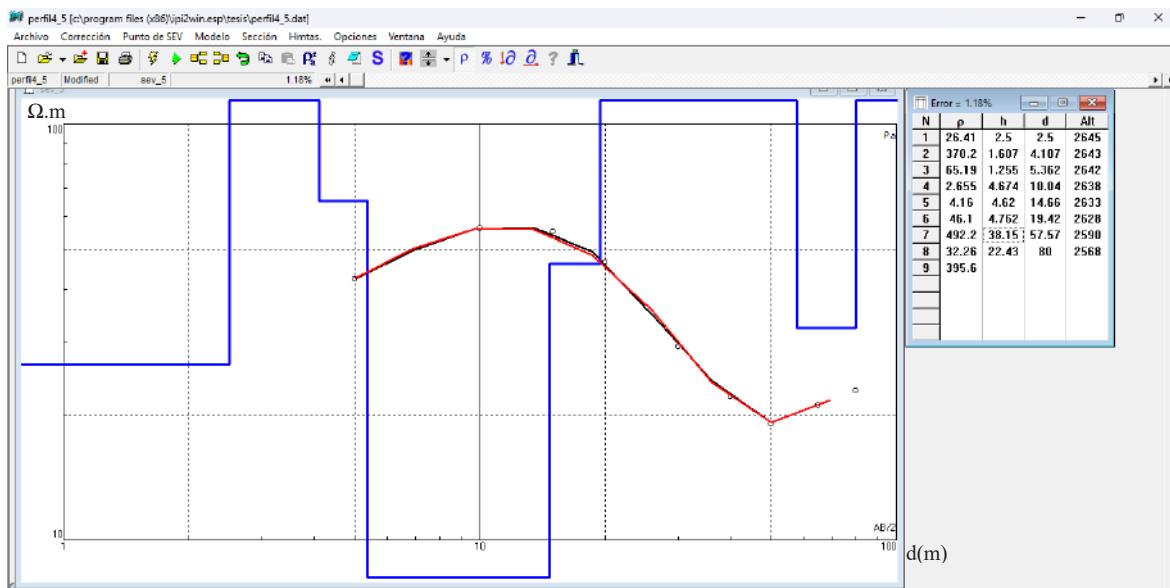


Figura 44: Resistividad aparente vs resistividad calculada del SEV-5

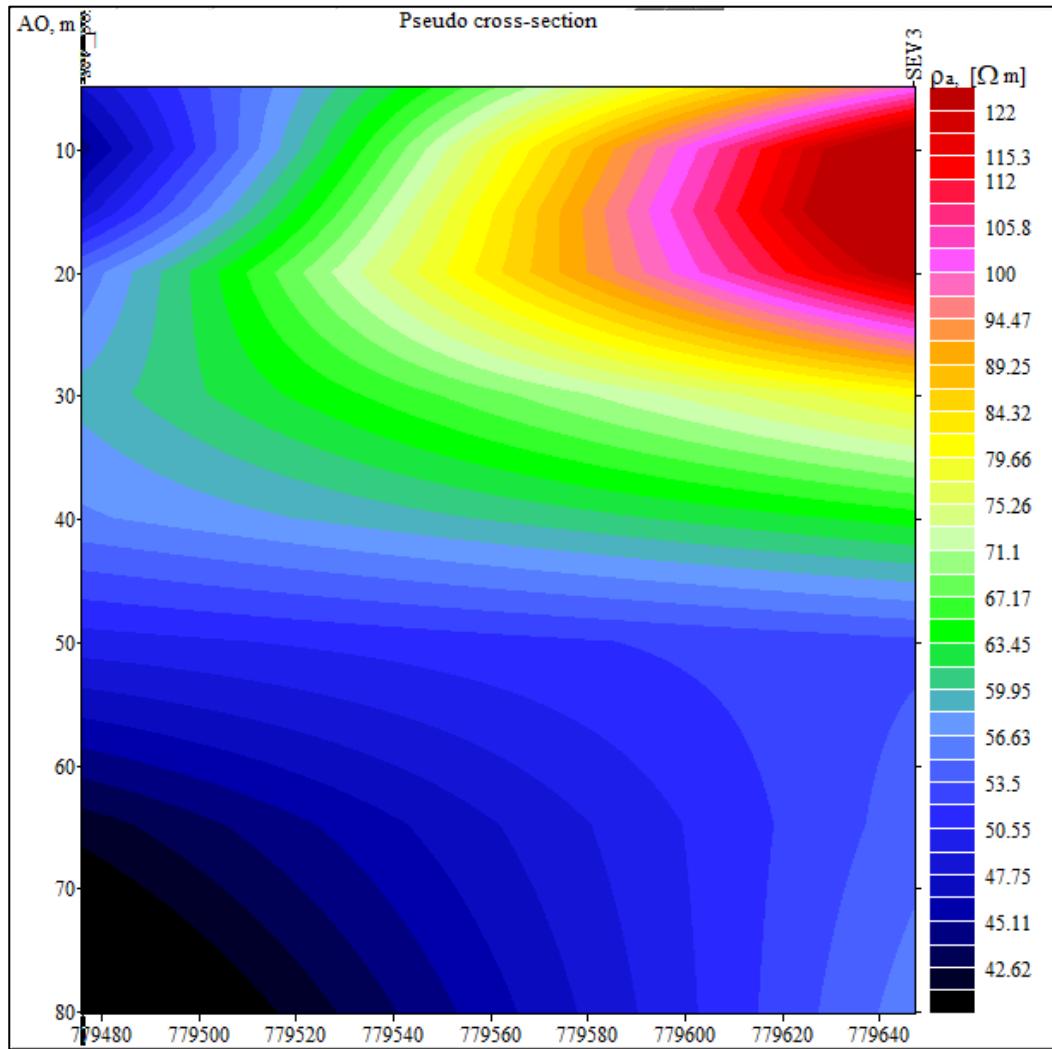


La figura 44: está relacionada entre la resistividad obtenida en campo que es la línea de color negro y la línea de color rojo es la teórica modelada, la línea azul escalonada indica el modelo geoeléctrico interpretado, compuesto por ocho capas con sus respectivos valores de resistividad y espesores. Con ayuda del software IPI2Win, el ajuste entre el modelo y los datos medidos es bueno, con un error de ajuste de 1.18% lo cual indica un modelo confiable y bien calibrado.

4.1.4 Perfiles Geoelectricos de los SEV

4.1.4.1 Perfil Geoelectrico del Sev-Pozo y el Sev-3

Figura 45: Perfil Geoelectrico del Sev-Pozo y el Sev-3

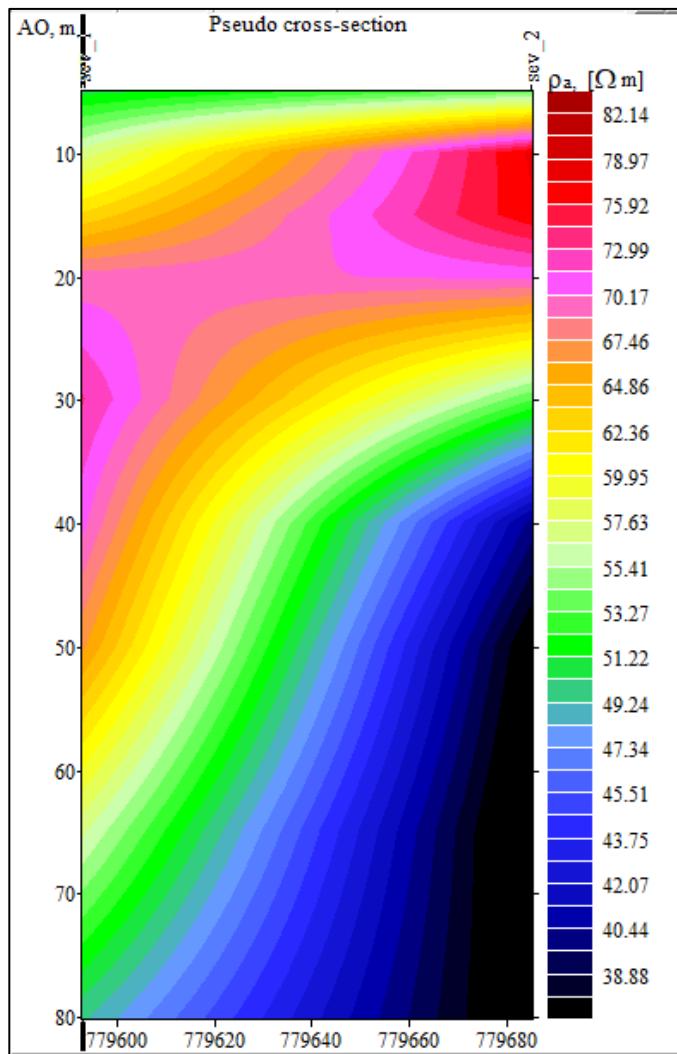


En el perfil mostrado del Sev realizado en el pozo artesanal N°2 y el Sev_3 ubicados entre si a 171 m. Se obtiene el siguiente perfil geoelectrico, obteniendo como resultados, en la zona alta de resistividades de 100 – 122 $\Omega \cdot m$ (tonos rojos y rosados), tomando como referencia el gráfico de Orellana, estos valores son compatibles con arenas secas, gravas o rocas volcánicas poco alteradas. Zona media – alta con tonos amarillos, naranjas y verdes ocupa buena parte de perfil entre los 10 y 40 m, es común en arenas húmedas, gravas parcialmente saturadas y calizas porosas. Se podría presentar un acuífero semiconfinado, debido a que la permeabilidad es moderada y la saturación no es completa. Zona baja de 42-70 $\Omega \cdot m$ tonos azules y cian ubicado 40 m hasta el fondo coincide con limos húmedos, arcillas

arenosas, pizarras. Zona de mayor saturación, probablemente corresponde a un acuífero confinado.

4.1.4.2 Perfil geoelectrico del Sev-1 y Sev-2

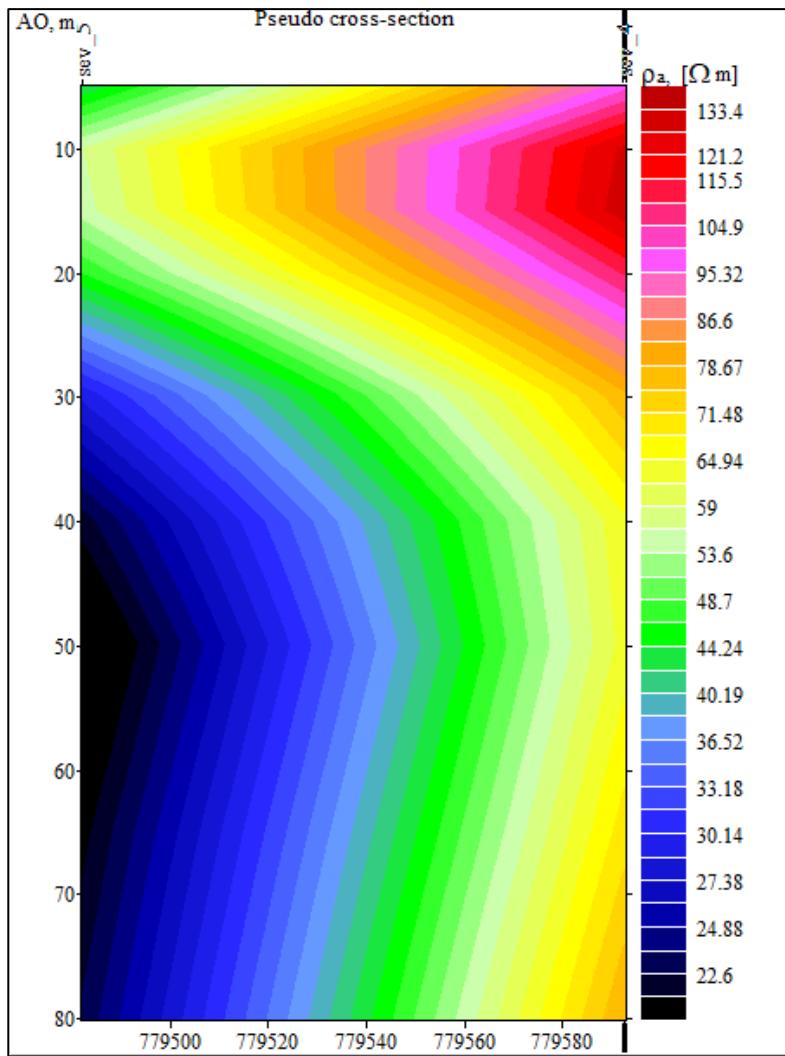
Figura 46: Perfil geoelectrico del Sev-1 y Sev-2



En el siguiente perfil geoelectrico Sev-1 y Sev-2 ubicados entre si a 93 m, y realizando el análisis con ayuda del diagrama de Orellana (1972), en la zona alta con resistividades de 70-82.14 $\Omega\text{.m}$ con tonos de color Rojo-Rosado con una litología probable de gravas secas, arenas, rocas ígneas zona poca saturada, en la zona media-alta con tonos de color naranja, amarillo con resistividades 70-50 $\Omega\text{.m}$ y ver con una litología probable de arenas húmedas, gravas parcialmente saturadas, areniscas posible acuífero libre o semiconfinado. En la zona baja con resistividades de 50 – 38.88 $\Omega\text{.m}$ con tonos de color azul-negro con una litología probable de arcillas, limos saturados, zona confinada.

4.1.4.3 Perfil geoelectrico del Sev-4 y Sev-5

Figura 47: Perfil geoelectrico del Sev-4 y Sev-5



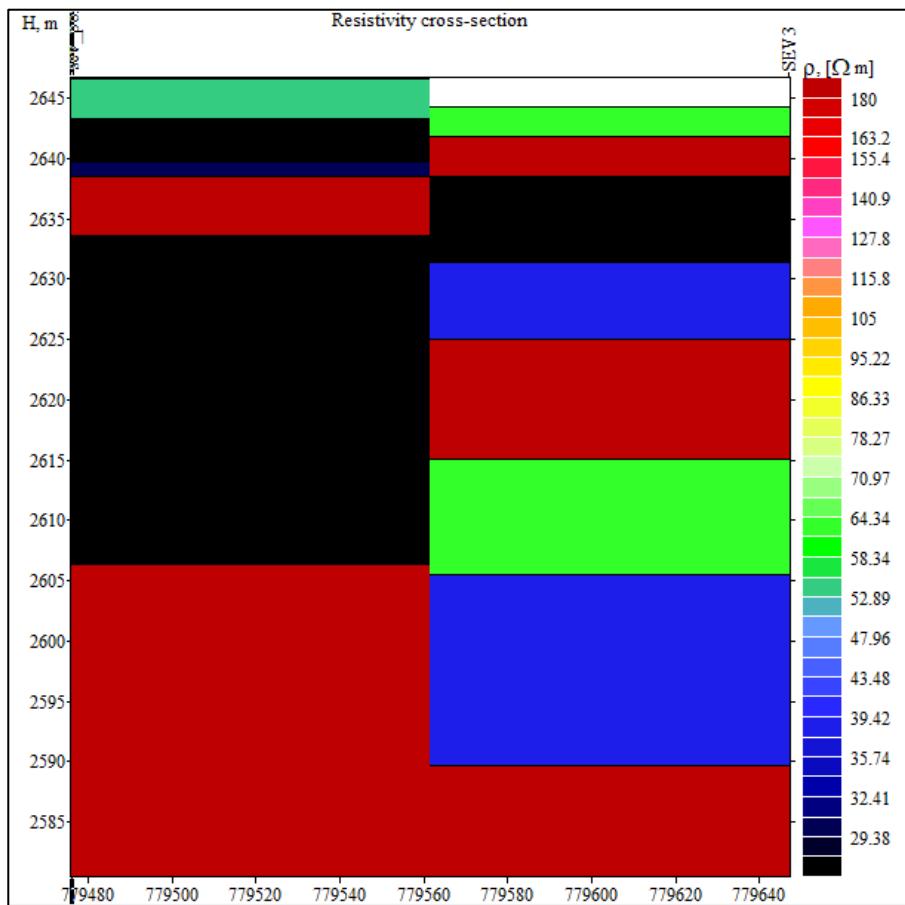
En el siguiente perfil geoelectrico de los Sev-4 y Sev-5 ubicados entre si a 110 m. utilizando el diagrama de Orellana (1972), en la zona alta en los primeros metros de profundidad (0-15m), predominan colores que van del amarillo al rojo intenso, resistividades que oscilan entre $70 \Omega\text{.m}$ y superan los $133.4 \Omega\text{.m}$, corresponden a materiales secos y poco consolidados como arena seca, grava, rocas metamórficas, la presencia de calizas o areniscas compactas y secas también podrían generar estas resistividades. En la zona media representados por colores verdes y amarillo claros (aproximadamente entre $40 \Omega\text{.m}$ y $70 \Omega\text{.m}$), alcanzando aproximadamente los 20 -30 m de profundidad. Estas capas están compuestas por arenas o gravas con mayor contenido de humedad o rocas sedimentarias (areniscas, calizas) con cierto grado de alteración que permite la presencia de agua. En la zona baja a mayores profundidades (aproximadamente a partir de los 25-30 m hasta el final del perfil) dominan

los colores azules intensos, indicando valores de resistividades bajas ($22.6 \Omega \cdot m$ a $35 \Omega \cdot m$) estos valores son característicos de materiales con mayor contenido de humedad podrían corresponder a arcillas o limos saturados o agua dulce saturando sedimentos porosos.

4.1.5 Perfiles litológicos de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

4.1.5.1 Perfil litológico del Sev realizado en el pozo artesanal N°2 y el Sev-3

Figura 48: Perfil litológico del Sev-pozo y el Sev-3

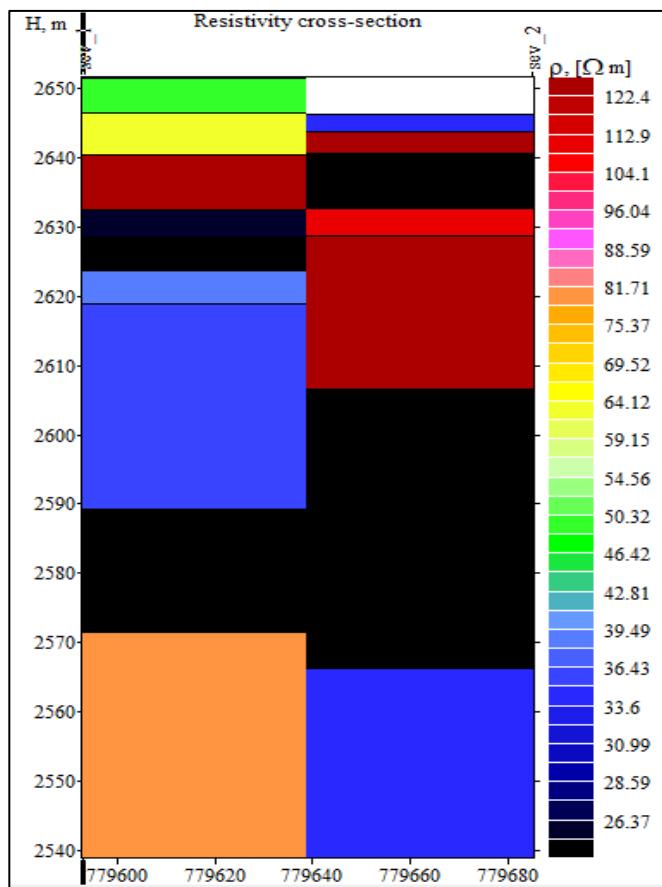


En el perfil litológico del Sev realizado en el pozo artesanal N°2 y el Sev-3 se pueden observar zonas rojas con resistividades que van desde los ($163-180 \Omega \cdot m$), estas resistividades son muy altas. Asociando a la figura de Orellana son rocas ígneas y metamórficas zonas secas. De igual manera, en las zona verde y verde fosforescente de ($70-80 \Omega \cdot m$) en este rango se pueden encontrar areniscas, formaciones con posible contenido de agua no mineralizada. Zonas azules ($30-60 \Omega \cdot m$) están relacionados a gravas, arenas saturadas, formaciones porosas saturadas con agua dulce o la existencia de un acuífero, en las Zonas negras de ($127-140 \Omega \cdot m$) estas resistividades intermedias-altas podrían corresponder a calizas, formaciones compactas con baja porosidad, finalmente en la Zona

de baja resistividad ($<40 \Omega\text{m}$, tonos azul oscuro o violeta) estas zonas pueden estar asociadas con, arcillas, limos, zonas saturadas con agua salina, zonas de baja permeabilidad.

4.1.5.2 Perfil litológico de los Sev-1 y Sev-2

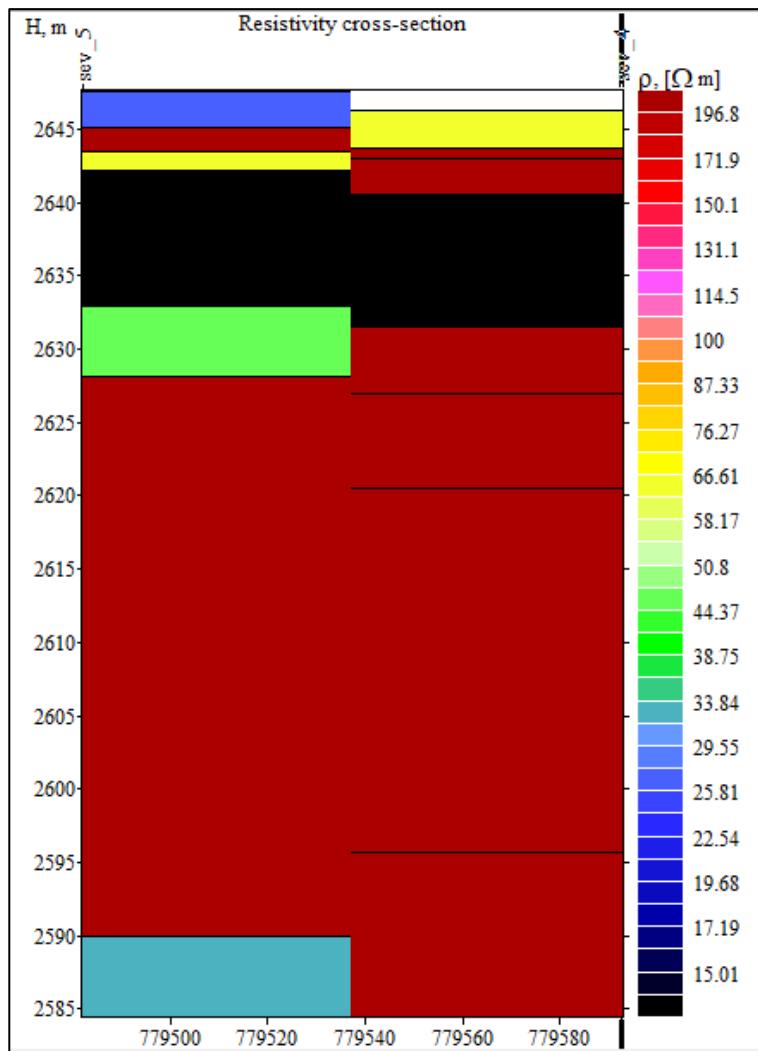
Figura 49: Perfil litológico de los Sev-1 y Sev-2



En el perfil litológico de los Sev-1 y Sev-2, se observa zonas de alta resistividad que predomina el color rojo de ($104-122.4 \Omega\text{m}$) estas resistividades son características de rocas ígneas metamórficas compactas. Zonas negras de ($96-104 \Omega\text{m}$) resistividades intermedias-altas podrían representar a calizas formaciones con baja saturación hídrica. Zonas azules de ($30-50 \Omega\text{m}$) asociadas generalmente a gravas, arenas o arcillas saturadas, puede encontrarse un acuífero. Zona verde claro de ($50-60 \Omega\text{m}$) suelos residuales o gravas moderadamente saturadas zonas de transición desde la superficie hacia capas acuíferas.

4.1.5.3 Perfil litológico de los Sev-4 y Sev-5

Figura 50: Perfil litológico de los Sev-4 y Sev-5



En el siguiente perfil litológico de los Sev-4 y Sev-5, los colores Azul oscuro, Azul claro y amarillo con resistividades de ($19.68\text{-}76.27 \Omega\text{.m}$) estas resistividades sugieren materiales húmedos, correspondientes a limos, arenas húmedas o arcillas, con presencia de agua subterránea. El color predominante Negro con resistividad menor a ($15.01 \Omega\text{.m}$) estas resistividades muy bajas están dentro del rango de materiales conductivos como arcillas saturadas, o incluso zonas con agua subterránea contaminadas. El color predominante rojo intenso con resistividad de ($131.1\text{-}196.8 \Omega\text{.m}$) estos valores son característicos de rocas ígneas o metamórficas de acuerdo al grafico de Orellana (1972). El color Celeste con resistividad de (25.81 y $33.84 \Omega\text{.m}$) este valor intermedio presenta una capa granular húmeda, como arena o grava situada debajo del macizo rocoso, acuífero confinado.

4.1.6 Transmisividad

El resultado obtenido de una transmisividad de $2.647 \text{ m}^2/\text{día}$ y relacionándolo con la tabla N°4 de valores de transmisividad, sugiere que el acuífero tiene una capacidad muy baja para transmitir agua subterránea a través de su sección saturada. Este valor es característico de formaciones compuestas por materiales de granulometría fina a media, como limos arenosos o arenas compactas. Por tanto, aunque el acuífero es capaz de abastecer pozos, su rendimiento podría ser limitado en situaciones de alta demanda.

4.1.7 Coeficiente de almacenamiento

El resultado obtenido del coeficiente de almacenamiento de 2.033×10^{-5} , relacionándolo con la Tabla N°5, indica que el acuífero tiene un comportamiento típico de un acuífero confinado, donde el volumen de agua que se libera por unidad de superficie y por unidad de descenso del nivel piezométrico es muy reducido. Este valor tan bajo sugiere que el agua no proviene tanto de drenaje por gravedad del medio poroso, sino más bien del proceso de compresibilidad del acuífero.

4.1.8 Conductividad hidráulica

El valor de la conductividad hidráulica, se ha determinado en 1.9452 m/día , relacionándolo con la Tabla N°3, indica que el material que compone el acuífero como arenas finas, o incluso gravas con algo de limo o arena compacta. Estos materiales permiten la circulación del agua subterránea, aunque no tan eficiente como en acuíferos muy productivos compuestos con gravas gruesas o arenas limpias y sueltas.

4.1.9 La porosidad

Un valor obtenido de la porosidad eficaz de 13.9471% , un valor de esta magnitud se considera moderado y es característico de materiales sedimentarios como arenas finas, limos o gravas mezcladas con partículas finas, donde existe una estructura porosa lo suficientemente conectadas como para facilitar el transporte del agua, aunque no al máximo nivel de eficiencia.

4.1.10 Estimación del potencial hídrico del Fundo

Para determinar el volumen de almacenamiento del acuífero en el sector del Fundo Huayrapongo Chico, ubicado en el Distrito de Baños del Inca, se lo considera como un reservorio natural que retiene agua durante las temporadas lluviosas, permitiendo su aprovechamiento en épocas de sequía (junio-diciembre del 2024).

La estimación de la reserva útil y aprovechable se basa en una superficie de 10 ha y tomando en cuenta los resultados de los parámetros hidrogeológicos como la transmisividad, coeficiente de almacenamiento, la transmisividad y la porosidad dando como resultado un acuífero confinado con espesor de 5.15 metros. Utilizando la ecuación 29 se determinó que:

Tabla 26: Estimación de la disponibilidad hídrica del Fundo Huayrapongo Chico en época de estiaje (junio-diciembre del 2024)

Lugar	Área (m ²)	Espesor del acuífero (m)	Porosidad eficaz	Volumen del acuífero (m ³)
Fundo Huayrapongo Chico	100000	5.15	0.1394	71,827.98

4.1.11 Informe de análisis fisicoquímico y bacteriológico de agua

Se realizó un análisis fisicoquímico y bacteriológico en la empresa prestadora de servicios de saneamiento de Cajamarca-sociedad anónima (EPS Sedacaj S.A.) de la muestra tomada del Fundo Huayrapongo Chico, obteniendo como resultados de la muestra y haberse comparado con los LMP dados por el Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano, según D.S. N°031-2010-SA. De los parámetros fisicoquímicos evaluados, se evidencia que todos se encuentran dentro de los Límites Máximos Permisibles (LMP), establecidos en la normativa vigente-Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano. Hay presencia de coliformes totales. La recomendación es realizar la desinfección (clorar el agua), para remover los coliformes y hacerla apta para consumo humano. Ver (ANEXO 03)

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El estudio realizado en el fundo Huayrapongo Chico para estimar las disponibilidad hídrica subterránea con apoyo de los Sondeos eléctricos verticales (SEV) y realizando una prueba de bombeo, se realizaron 3 perfiles geoelectricos con una profundidad de 80m, obteniendo como resultados, En el primer perfil se determinaron rocas ígneas y metamórficas que tienen resistividades de (163-180 $\Omega\text{.m}$), gravas, arenas saturadas que tienen resistividades de (30-60 $\Omega\text{.m}$) y se determinaron arcillas, limos con resistividades ($<40 \Omega\text{.m}$). En el segundo perfil se determinaron rocas ígneas metamórficas con resistividades de (104-122.4 $\Omega\text{.m}$), gravas, arenas y arcillas saturadas con resistividades de (30-50 $\Omega\text{.m}$). En el tercer perfil se determinaron rocas ígneas metamórficas con resistividades de (131.1-196.8 $\Omega\text{.m}$), Limos, arenas húmedas o arcillas con resistividades de (19.68-76.26 $\Omega\text{.m}$), arena, grava con resistividades de (25.81-33.84 $\Omega\text{.m}$). De igual manera, se obtuvieron los resultados hidrogeológicos como: la transmisividad de $2.647 \text{ m}^2/\text{día}$. Este valor es característico de formaciones compuestas por materiales de granulometría fina a media, como limos arenosos o arenas compactas, Un coeficiente de almacenamiento de 2.033×10^{-5} indica que el acuífero tiene un comportamiento típico de un acuífero confinado. Una conductividad hidráulica de 1.9452 m/día , indica que el material que compone el acuífero como arenas finas, o incluso gravas con algo de limo o arena compacta. Estos materiales permiten la circulación del agua subterránea, aunque no tan eficiente como en acuíferos muy productivos compuestos por gravas gruesas o arenas limpias y sueltas y una porosidad eficaz de 13.9471 %, un valor de esta magnitud se considera moderado y es característico de materiales sedimentarios como arenas finas, limos o gravas mezcladas con partículas finas, donde existe una estructura porosa lo suficientemente conectadas como para facilitar el transporte del agua, aunque no al máximo nivel de eficiencia. Estimando una disponibilidad hídrica subterráneo en época de estiaje (junio-diciembre del 2024) un volumen de $71,827.98 \text{ m}^3$.

Este estudio, al contrastarlo con la investigación denominada “Sondeos eléctricos verticales, en la localidad de Santa María, San Pedro Huamelula, Oaxaca para fines geohidrológicos”, aplicando el método schlumberger obtiene como resultados 5 capas, la primera capa está asociada a suelos de tipo Phaeozem con resistividades de (464 $\Omega\text{.m}$), la segunda capa está compuesta por materiales de cantos rodados y gravas de gran tamaño con resistividades de (842 $\Omega\text{.m}$), la tercera capa compuesta de material aluvial con posibilidad de tener agua con una resistividad de (189 $\Omega\text{.m}$), la cuarta capa contenida de material aluvial con posibilidad

de tener agua con una resistividad de ($63 \Omega\text{m}$), la quinta capa asociada a un material arcilloso saturado con una resistividad de ($18 \Omega\text{m}$) con pocas posibilidad de contener agua.

Este estudio, en relación con la investigación titulada “Estudio geofísico mediante el método geoelectrico Schlumberger en la quebrada de Huiscash, distrito de Aquia, provincia de Bolognesi, departamento de Ancash”, Han realizado 30 SEVs, denominando las zonas más importantes como Horizontes, donde el Horizonte H2 con resistividades entre (30 y $7394 \Omega\text{m}$) con espesores que oscilan entre 1.5 y 32.9 m de profundidad, el Horizonte H3 está compuesta por resistividades entre (68 y $4917 \Omega\text{m}$) con espesores que varían entre 15 y 167 m , determinando que en el lado Suroeste, el nivel freático se encuentra entre 25 y 50 m de profundidad, mientras que en el noreste está a 25 m de profundidad. Estos factores pueden variar de acuerdo a la topografía, la permeabilidad del suelo y la recarga del acuífero.

También se destaca el estudio realizado por el ANA (2015) sobre “Evaluación de recursos hídricos en la cuenca del Criznejas” quienes concluyeron que para un área de 117.5 km^2 obtuvieron una porosidad eficaz del 6.5% , una conductividad hidráulica de (10^{-3} - 10^{-4} m/día) y un coeficiente de almacenamiento de 0.06 determinando que el agua subterránea es 420 hm^3 .

El estudio realizado por Paredes (2020) en la zona de Agocucho utilizaron los SEV, ubicando 7 puntos en la zona de estudio identificando 3 capas geoelectricas. La primera capa compuesta por areniscas arcillosa cuyas resistividades varían entre ($66.14 \Omega\text{m}$ y $84.11 \Omega\text{m}$) con un espesor aproximado de 15 m. La segunda capa oscila entre ($216 \Omega\text{m}$ y $302.83 \Omega\text{m}$) está constituida por sedimentos de grano mediano a fino con espesores de 25 a 85 m. La tercera capa tiene resistividades de ($513 \Omega\text{m}$ - $895.30 \Omega\text{m}$) compuesta por calizas con espesores que varía de los 25 a 95 m. sugiriendo que el potencial acuífero se localiza en la segunda capa geoeléctrica.

En la investigación realizada por Hernández (2019), desarrollada en el Valle de Cajamarca para un área de 96.46 km^2 , inventariaron 43 pozos perforados y excavados con profundidades que van desde los 5 metros hasta los 80 metros de profundidad. Donde identificaron que en 4 pozos la conductividad hidráulica varia desde los 0.20 m/día hasta 0.40 m/día , la transmisividad promedio obtenida es de $19.55 \text{ m}^2/\text{día}$, lo que indica la presencia de un acuífero libre. Asimismo, se determinó una porosidad efectiva de 5.23% , lo que sugiere que el acuífero presenta buenas condiciones de producción de agua subterránea, considerando que el espesor medio de la zona saturada alcanza aproximadamente 55 metros.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian la relevancia de integrar diversas metodologías geofísicas para lograr una caracterización más detallada y confiable del subsuelo. La aplicación de diferentes métodos geofísicos nos permite identificar con mayor precisión la heterogeneidad geológica y las propiedades física de los materiales. Esta información resulta fundamental para la adecuada planificación y ejecución de proyectos hidrogeológicos.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se llevó a cabo la caracterización del fundo Huayrapongo considerando tanto los aspectos agrícolas como los geológicos del área de estudio, se han establecido parcelas con diferentes cultivos como, Alfalfa 1.45 ha (equivalente al 14.54 %), Ray Grass 0.44 ha (equivalente al 4.42%) y pastos 7.60 ha (equivalente al 76.02 %), lo que representa a un área de 9.50 ha. Desde el punto de vista geológico, el fundo Huayrapongo Chico se sitúa estratigráficamente los depósitos fluviales (predominantemente los suelos arcillosos) y los depósitos cuaternarios (están compuestos principalmente por sedimentos finos como arenas, limos y arcillas).
- Se determinó la evaluación hidrogeológica del acuífero, mediante la aplicación de sondeos eléctricos verticales (SEV) utilizando el método de schlumberger, para un estudio de 80 m de profundidad, donde nos permitió interpretar de manera indirecta las características físicas del subsuelo y definir la presencia, espesor y profundidad de las unidades acuíferas. Este método geofísico facilitó la identificación de zonas con mayor cantidad de almacenamiento de agua subterránea, determinando que el SEV-3 y el SEV-1 son los más importantes para el aprovechamiento del agua subterránea, están relacionados con areniscas con resistividades de (70-80 Ω.m), gravas y arenas saturadas con resistividades de (30-60 Ω.m)
- Se elaboraron los perfiles litológicos y geoelectricos de 80 m de profundidad, con ayuda de las resistividades calculadas la cual nos permitió integrar e interpretar de forma coherente los resultados obtenidos en campo, facilitando la identificación de las diferentes capas del subsuelo. Esta información fue clave para establecer la estructura vertical del terreno, siendo fundamental para el análisis hidrogeológico del área en estudio. Obteniendo como resultado en los sondeos más favorables que son el Sev-3 que se encuentra un acuífero confinado a 13 metros de profundidad con

un espesor de 25 m de profundidad y en el Sev-1 se encuentra un acuífero libre a 28 metros de profundidad con un espesor de 33 m de profundidad.

- Se calcularon los parámetros hidrogeológicos obteniendo resultado que evidencian que el acuífero evaluado presenta una transmisividad de $2.647 \text{ m}^2/\text{día}$ y una conductividad hidráulica de 1.9452 m/día , lo cual indica una capacidad moderada de transición del agua subterránea a través del medio poroso. Asimismo, el coeficiente de almacenamiento de 2.033×10^{-5} se trata de un acuífero confinado, con baja capacidad de liberar agua por unidad de superficie. La porosidad estimada en 13.9471% característico de materiales sedimentarios como arenas finas, limos o gravas mezcladas, donde existe una estructura porosa lo que permite el transporte del agua, aunque no al máximo nivel de eficiencia. Estimando una disponibilidad hídrica subterráneo en época de estiaje (junio-diciembre del 2024) un volumen de $71,827.98 \text{ m}^3$. De igual forma de acuerdo al análisis fisicoquímico y bacteriológico de agua realizado en la EPS Sedacaj S.A. está dentro los LMP para uso agropecuario.
- Se interpreto y se procesaron los datos geofísicos obtenidos en campo mediante el software IPI2WIN, el cual nos permitió generar modelos geoelectricos confiables del subsuelo, facilitando la identificación de las distintas capas litológicas y su relación con los acuíferos existentes. La aplicación de esta herramienta especializada optimizó el análisis de los sondeos eléctricos verticales, permitiendo el ajuste de los datos de resistividad aparente con la curva teórica modelada.

5.2. RECOMENDACIONES

- Realizar más sondeos eléctricos verticales, con el propósito de mejorar la resolución de los datos y obtener una caracterización más precisa del subsuelo.
- Se recomienda ampliar el alcance del tendido de cable en futuros estudios geofísicos, con el fin de alcanzar mayores profundidades y obtener una caracterización más detallada del subsuelo.
- Se sugiere replicar este tipo de estudios en zonas aledañas al área evaluada, con el objetivo de ampliar el conocimiento hidrogeológico regional y determinar la continuidad de las unidades acuíferas.

BIBLIOGRAFIA

- ANA, Consorcio, T., Tecnoma, & Engecorps, G. I. (2015). Evaluación de recursos hídricos en la cuenca de Crisnejas. *Autoridad Nacional del Agua*.
- Béjar, M. V. (2004). *Hidrología* (Primera edición). Instituto Tecnológico de Costa Rica.p.478
- Cardenas, V., Fabian Alberto. (2005). *SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA REPRESENTAR Y GENERAR ESTATIGRAFÍA Y PROPEIDADES DEL SUELO* [Maestría]. Universidad de los Andes.
- Chereque, M., Wendor. (1989). *HIDROLOGÍA para estudiantes de ingeniería civil* (segunda edición). p.73
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). *Hidrología subterránea. 2* (Segunda edición). Ed. Omega.p.1273
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). *Hidrología subterránea. 2* (Segunda edición). Ed. Omega.p.1397
- De la Cruz, B., Natalio, & Jaimes, S., Fredy. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Canta (23-j)—Cuadrante I. Escala 1:50 000.* 21.
- Diaz, R., Jorge Abraham. (2006). LOS SUELOS VOLCÁNICO-LACUSTRES DE LA CIUDAD DE MÉXICO. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*.
- Espinoza, C. C. (2009). *PROPIEDADES FISICAS DEL AGUA SUBTERRANEA Y ACUIFEROS* (p. 11). Universidad de Chile.
- Espinoza, P., Wener. (2024). “*EXPLORACIÓN GEOFÍSICA DE AGUA SUBTERRÁNEA UTILIZANDO EL MÉTODO SÍSMICO PARA SU APROVECHAMIENTO EN EL FUNDO TARTAR UNC, 2022*” [Tesis, Universidad Nacional de Cajamarca].
- Ferrer, C., David Camilo, & Novoa, T., Luis Miguel. (2017). *Analisis experimental de métodos de medición de resistividad del terreno para evaluar su profundidad de exploración* [Tesis, Universidad de la Salle].

Galvasa SRL, & Perforaciones y servicios generales, J. y G. S. (2020). *MEMORIA DESCRIPTIVA POZO TUBULAR PCA-4—QHAPAC ÑAN - CAJAMARCA - CAJAMARCA* (p. 72). Consorcio perforación Cajamarca.

García, R., Manuel, & Fernández, E., Enrique. (2008). *Hidrología básica Las aguas subterráneas y su flujo* (Colección Medio Ambiente). FIEC.pp.30-31

Grijalva, M., Adrián. (2014). *Metodología para obtener un modelo hidrogeofísico en la prospección de acuíferos* [Tesis]. Universidad de Sonora.

Gleick, P. (1993). *Recursos mundiales de agua dulce*.

Heath, R. C. (2004). *Basic ground-water hydrology* (Vol. 2220). US Geological Survey.p.98

Hernández, B., David. (2019). *Estimación del potencial hídrico subterráneo del Valle de Cajamarca—Cajamarca*. [Tesis, Universidad Nacional de Cajamarca].

Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration* (3rd ed). Blackwell.p.14

Mena Hernández, A. E. (2020). *Sondeos eléctricos verticales, en la localidad de Santa María, San Pedro Huamelula, Oaxaca para fines geohidrológicos* [Tesis, Universidad Autónoma de Puebla].

Mijailov, L. (1989). *Hidrogeología* (Primera edición). Mir.p.286

Molleda, B., Diego Alejandro. (2019). *Estudio geofísico por el método Geoeléctrico Schlumberger en la quebrada de Huiscash, Distrito de Aquia, Provincia de Bolognesi, Departamento de Ancash* [Tesis, Universidad Nacional de San Agustín].

Ordoñez, D., Manuel Herick, & Valdera, S., Jimmy Frans. (2019). *Estudio hidrogeológico con fines de aprovechamiento hídrico subterráneo del manantial Uchpayacu para consumo humano en el caserío Tres de Octubre, distrito de La Banda de Shilcayo, provincia de San Martín—Región San Martín, 2019* [Tesis, Universidad Nacional de San Martín].

Orellana, E. (1972). *PROSPECCION GEOLECTRICA EN CORRIENTE CONTINUA* (primera edición). Cometa, S.A.pp.100-101

- Pando, G., Luis Alberto, López, F., Carlos, & De la Rubia, M., Luis. (2009). Perfil geológico a lo largo del trazado de los Túneles de Pajares. *Artículo*.
- Paredes, A., & Alva, D. (2020). *Potencial acuífero mediante el sondeo eléctrico vertical (SEV) en las unidades litoestratigráficas en la zona de Agocucho 2019* [Tesis, Universidad Privada del Norte].
- Pari, P., Walter, Carlotto, C., Víctor Santiago, Cárdenas, R., José Dionicio, Oviedo, M., Martin Jhonatan, Douma, M., Best, M., & Bobrowsky, P. D. (2006). Aplicación de la geofísica (Resistividad 2D y georadar-GPR) en la ciudadela inca de Machu Picchu: Cusco-Perú. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET*.
- Maredey, R. L. & Jiménez, R. A. (2005). Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico. En *Instituto de Geografía* (primera edición). Instituto de Geografía.
- Romero, C., Jorge Wilson. (2019). *Estudio geoeléctrico y planteamiento de explotación de aguas subterráneas en el fundo La Victoria—UNC, 2019*. [Tesis, Universidad Nacional de Cajamarca].
- Salgado, S. L. (2000). *Determinación de características hidrodinámicas del suelo: Conductividad hidráulica, espacio poroso drenable, espesor de la región de flujo*.
- Sarango, O., Israel. (2019). “*Evaluación Hidrogeológica Para Determinar La Disponibilidad Hídrica Subterránea En El Sector Punta Arena, Distrito De Castilla, Provincia Y Departamento De Piura - Perú*” [Tesis, Universidad Nacional de Piura]
- Vélez, O., Maria V. (1999). (*PDF*) *Hidráulica de Aguas Subterráneas* (2 edición). Mundo libro.pp.78-81
- Villarroya, F. (2009, junio 2). *JORNADAS TÉCNICAS SOBRE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA RIEGO*. Centro Nacional de Tecnología de Regadíos, Torrejón de Ardoz (Madrid).
- Wangsness, K., Ronald. (2001). *Campos Electromagnéticos* (1ra Edición). Limusa, S.A de C.V Grupo Noriega Editores.pp.258-260
- Yampasi, S., Larissa Galia. (2019). *Aplicación del método de sondaje eléctrico vertical para la ubicación de pozos de agua subterránea en los centros poblados de Buena Vista y*

Miraflores en el distrito de Sama, Provincia y Región de Tacna [Tesis, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].

LINKOGRAFIA

Alexei, A., Bobachev, Igor, N., Modin, Vladimir, A., & Shevnin. (2000). *IPI2Win User Manual—Universidad Estatal de Moscú Facultad de Geología Departamento de Geofísica—Studocu*. Geoscan - M Ltd., Moscú.

<https://www.studocu.com/cl/document/universidad-tecnologica-de-chile/mallas-a-tierra/ipi2win-user-manual/55082403>

Atoche, S., Stefanny. (2018, enero 12). *Depósitos Cuaternarios*. prezi.com.

<https://prezi.com/p/ey2mdq3ak77p/depositos-cuaternarios/>

COLUMNA ESTRATIGRAFICA DE CAJAMARCA - GEOLOGIA DEL PERU. (2024, septiembre 23). SlideShare.

<https://es.slideshare.net/slideshow/columna-estratigrafica-de-cajamarca-geologia-del-peru/271977753>

EcuRed, C. (2019, julio 30). *Capa freática—EcuRed*. Capa freática.

https://www.ecured.cu/Capa_fre%C3%A1tica

IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. (2012). *IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983)*, 1-86. IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983).

<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6392181>

Manzano, A., Marisol. (2008). *Interpretación de un Ensayo de Bombeo de un Acuífero Cautivo en Régimen Variable. Hidrología subterránea (ITOP)/Hidrogeología (ITM)*. UPCT

<https://www.udocz.com/apuntes/630792/explicapdf>

Oregón, H. (2021, diciembre). *Pozos de agua, Manual para el propietario, Guía sobre pozos de agua en Oregón*.

https://www.oregon.gov/owrd/WRDPublications1/Well_Water_Handbook_SP.pdf

OKM. (2019, mayo). OKM GeoSeeker | Detector de Agua hasta 250 m (820 ft) de Profundidad.OKM detectors.

<https://www.okmdetectors.com/es/products/geoseeker>

Pérez. (2023, abril). *Método Wenner para medición de resistividad.* Ingenieriaelectrica.online.

<https://www.ingenieriaelectrica.online/metodo-schlumberger-medicion-resistividad/>

Rebollo, F., Luis. (2014). *HIDROGEOLOGÍA Licenciatura en Ciencias Ambientales Tema 4 Tema 4 MOVIMIENTO DEL AGUA EN MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUBSUELO, HIDROGEOLOGÍA Licenciatura en Ciencias Ambientales.*

<https://www.scribd.com/document/707532585/Hidrogeologia-Tema-4-Movimiento-Del-Agua-en-El-Subsuelo>

Rome. (2006). *Estudio Fao Riego y Drenaje.*

<https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>

Ruelas, G., Roberto. (2010). *RESISTIVIDAD... TEORIA Y DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.*

<https://ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html>

SEG Wiki. (2020, septiembre 21). *Dictionary:Array (electrical)/es.* SEG Wiki.

[https://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Array_\(electrical\)/es](https://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Array_(electrical)/es)

ANEXOS

ANEXO 1: ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUGUSTO WEBERBAUER

Estación Meteorológica Augusto Weberbauer

Tabla 10

Precipitaciones máximas a 24 hr de la estación Augusto Weberbauer

UBICACIÓN POLÍTICA		UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
DEPARTAMENTO	: CAJAMARCA	LATITUD	: 07° 10' 03" Sur
PROVINCIA	: CAJAMARCA	LONGITUD	: 78° 29' 35" Oeste
DISTRITO	: CAJAMARCA	ALTITUD	: 2673 m.

AÑO/MES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1990	101.8	68.5	58.3	27.4	39.5	24.6	0.8	7.1	20.1	87.6	99.1	72.3
1991	43.8	90.0	133.7	55.2	17.9	0.7	0.4	0.3	10.2	28.2	55.1	71.9
1992	52.6	31.8	66.6	46.5	18.9	21.2	4.6	10.0	40.8	64.0	32.0	34.1
1993	61.0	106.2	245.0	102.9	30.2	1.9	3.3	2.9	51.4	106.3	71.4	84.1
1994	116.9	103.1	170.2	144.9	35.3	3.3	0.0	0.2	11.9	27.2	89.8	122.6
1995	43.8	108.3	75.7	49.7	20.6	1.7	13.2	10.8	11.5	51.8	50.5	76.4
1996	65.2	124.0	120.1	50.4	7.7	0.8	0.5	15.8	13.9	76.2	68.8	34.1
1997	64.8	152.9	26.5	40.4	17.0	15.4	0.2	0.0	27.4	50.8	119.9	129.4
1998	103.0	116.5	257.0	83.9	19.6	4.8	1.3	4.7	17.8	79.9	29.1	47.9
1999	94.8	242.7	77.5	65.0	53.7	22.8	22.1	1.2	81.4	21.7	77.0	68.9
2000	46.0	162.3	126.3	77.3	40.5	15.6	2.1	13.4	56.6	9.9	44.5	122.3
2001	191.2	100.8	230.2	57.2	48.1	2.3	13.9	0.0	34.4	46.2	93.4	90.9
2002	27.0	60.0	133.1	77.2	23.0	8.8	10.7	3.4	14.6	90.3	99.9	86.1
2003	51.1	61.4	103.5	42.1	30.7	22.3	1.8	10.6	14.8	46.0	63.8	80.7
2004	36.1	102.0	56.9	44.5	42.4	2.1	13.8	29.4	19.0	63.4	92.6	123.7
2005	84.9	53.7	136.6	54.0	7.2	4.5	0.6	3.5	31.2	92.3	30.0	87.8
2006	83.2	101.6	199.3	77.6	7.7	23.9	1.8	6.1	33.6	12.7	60.4	81.7
2007	95.4	17.5	182.4	111.5	29.0	1.4	10.7	6.4	11.6	118.9	97.6	68.8
2008	80.2	133.3	118.4	99.1	22.7	15.4	2.3	11.7	34.7	96.5	72.2	S/D
2009	180.7	74.6	110.5	78.8	42.2	17.9	12.3	3.9	11.8	78.5	109.4	74.2
2010	49.5	112.9	154.0	88.4	31.6	8.6	2.6	1.3	28.9	43.4	52.5	70.8
2011	76.6	73.3	125.2	102.0	16.7	0.4	8.3	0.0	47.1	31.5	24.4	109.7
2012	154.2	134.7	126.4	72.8	51.5	0.8	0.0	2.5	19.1	83.3	120.3	58.3
2013	61.5	98.0	213.6	73.8	62.6	7.5	5.7	8.9	3.7	110.7	17.0	51.9
2014	75.7	67.3	143.2	78.8	26.9	5.0	2.0	3.9	27.7	26.5	45.7	114.9
2015	184.7	55.4	202.2	63.0	75.8	3.0	4.4	0.1	27.8	16.8	99.6	39.5
2016	82.9	85.3	121.3	56.2	7.0	1.6	2.1	1.1	25.1	60.0	16.1	63.1
2017	77.5	72.3	138.9	78.6	47.2	12.0	2.3	20.9	21.2	65.3	63.2	168.1
2018	99.0	126.4	117.3	73.3	50.1	10.8	0.5	0.0	24.4	61.8	97.4	69.4
2019	46.9	107.3	172.7	78.1	37.4	9.1	11.8	0.0	7.6	121.8	60.4	162.7
2020	38.2	31.2	S/D	S/D	S/D	S/D	27.6	0.7	10.6	33.2	58.3	140.4
2021	100.8	54.3	138.6	129.5	38.2	10.5	4.5	12.3	23.7	108.8	58.3	45.7
2022	64.5	177.9	161.2	94.0	52.7	20.2	9.4	21.6	40.9	31.2	6.3	65.0

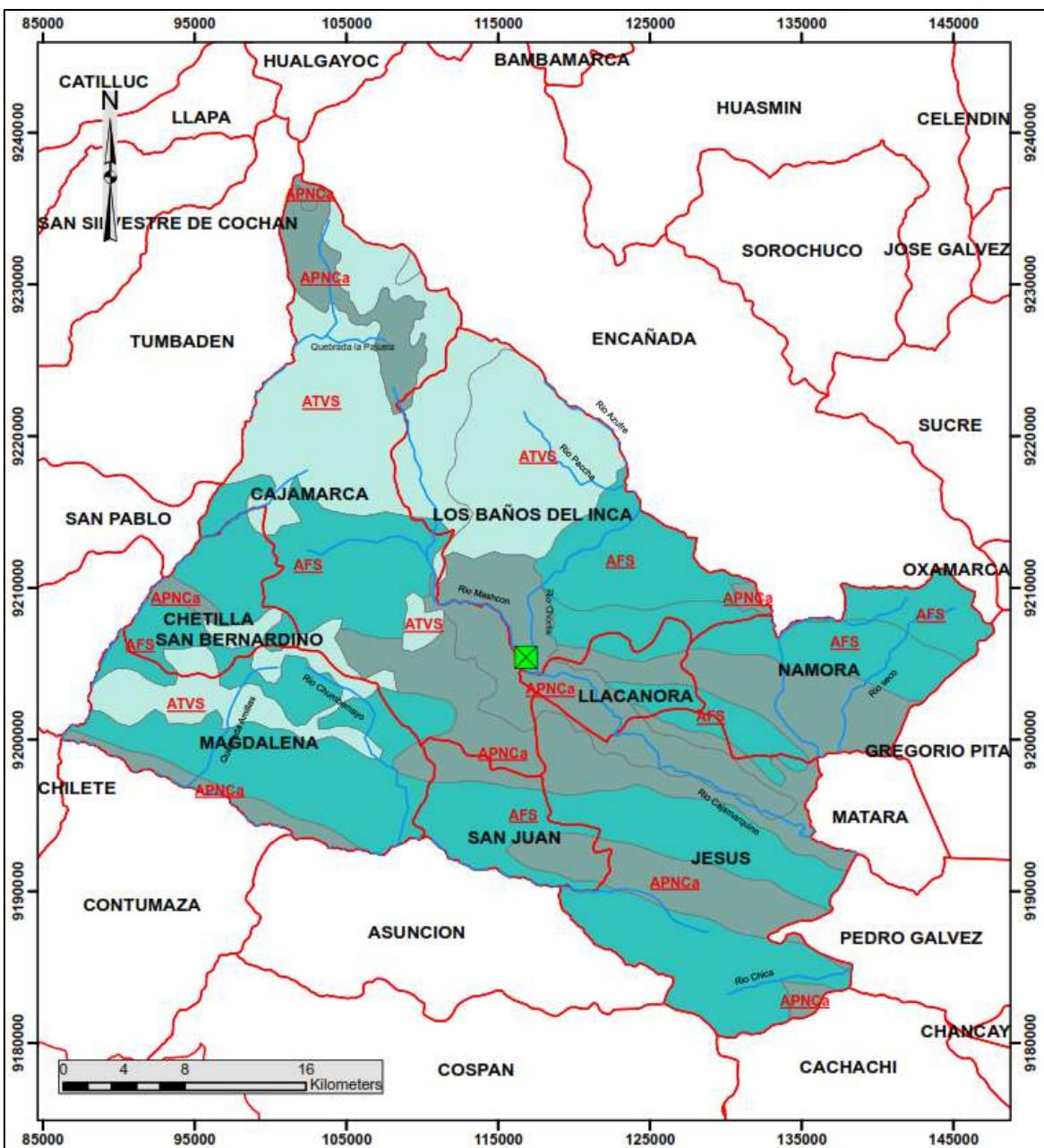
Nota. La tabla muestra un registro histórico de las precipitaciones máximas a 24 hr de la estación Augustowebwebauer, los datos fueron otorgados por el Senamhi en el mes de septiembre de 2024



Lorenza Valencia López
ESPECIALISTA ADMINISTRATIVO CONTABLE
DIRECCIÓN ZONAL 3
SENAMHI - PERÚ

D: Pje. Jaén 121-Urb. Ramón Castilla-
Cajamarca
T: 076-364500
C: 976681616
E: lvalencia@senamhi.gob.pe
W: www.senamhi.gob.pe

ANEXO 02: MAPA HIDROGEOLÓGICO DEL VALLE DE CAJAMARCA



MAPA HIDROGEOLÓGICO DEL VALLE DE CAJAMARCA



SISTEMA DE COORDENADAS:
Projection: Transverse_Mercator
Datum: WGS_1984_UTM_Zone_17S
Elaborado por: Bachiller. Maicol O. Gutiérrez Colorado

La información utilizada para elaborar este mapa ha sido obtenida del GEO GPS PERÚ a escala: 1: 342,295

**ANEXO 03: INFORME DE ANÁLISIS FISICOQUÍMICO BACTERIOLOGICO
DEL AGUA**



INFORME DE ANÁLISIS FISICOQUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DE AGUA

DATOS DE LA MUESTRA :

SOLICITANTE : TESISTA MAICOL ORLANDO GUTIÉRREZ COLORADO
 PUNTO DE MUESTREO : POZO ARTESANAL N° 02
 UBICACIÓN FUENTE : FUNDO HUAYRAPONGO CHICO
 DISTRITO : BAÑOS DEL INCA
 PROVINCIA Y DEPARTAMENTO : CAJAMARCA
 FECHA DE ANALISIS : 22 de setiembre del 2025

PARAMETRO	UNIDAD	M - 1	LMP
		RESULTADO	
ANALISIS FISICOQUIMICO			
TURBIEDAD	UNT	0.88	5
pH, a 18.7 °C	--	7.17	6.5 a 8.5
CONDUCTIVIDAD	uS/cm	836	1500
DUREZA TOTAL	mg/L	356	500
CLORUROS	mg/L	65	250
SULFATOS	mg/L	125	250
NITRATOS	mg/L	18	50
ALUMINIO	mg/L	0.014	0.2
CROMO	mg/L	<0.001	0.05
COBRE	mg/L	1.87	2.0
HIERRO	mg/L	0.01	0.3
MANGANEZO	mg/L	0.4	0.4
ZINC	mg/L	0.008	3.0
ANALISIS BACTERIOLOGICO			
COLIFORMES TOTALES	UFC/100 mL a 35°C	2	0
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	UFC/100 mL a 44,5°C	0	0

LMP = Límites Máximo Permisibles, dados por DS N° 031-2010-SA, para aguas de consumo humano.

UNT = Unidad Nefelométrica de Turbiedad

UFC = Unidad Formadora de Colonias

MUESTRA:

M-1: muestreada y alcanzada al Laboratorio por el usuario.

COMENTARIO :

Los Resultados de la muestra se compara con los LMP dados por el Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano, según D.S. N° 031-2010-SA.

De los parámetros fisicoquímicos evaluados; se evidencia que todos se encuentran dentro de los Límites Máximos Permisibles (LMP), establecidos en la normativa vigente - Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano.

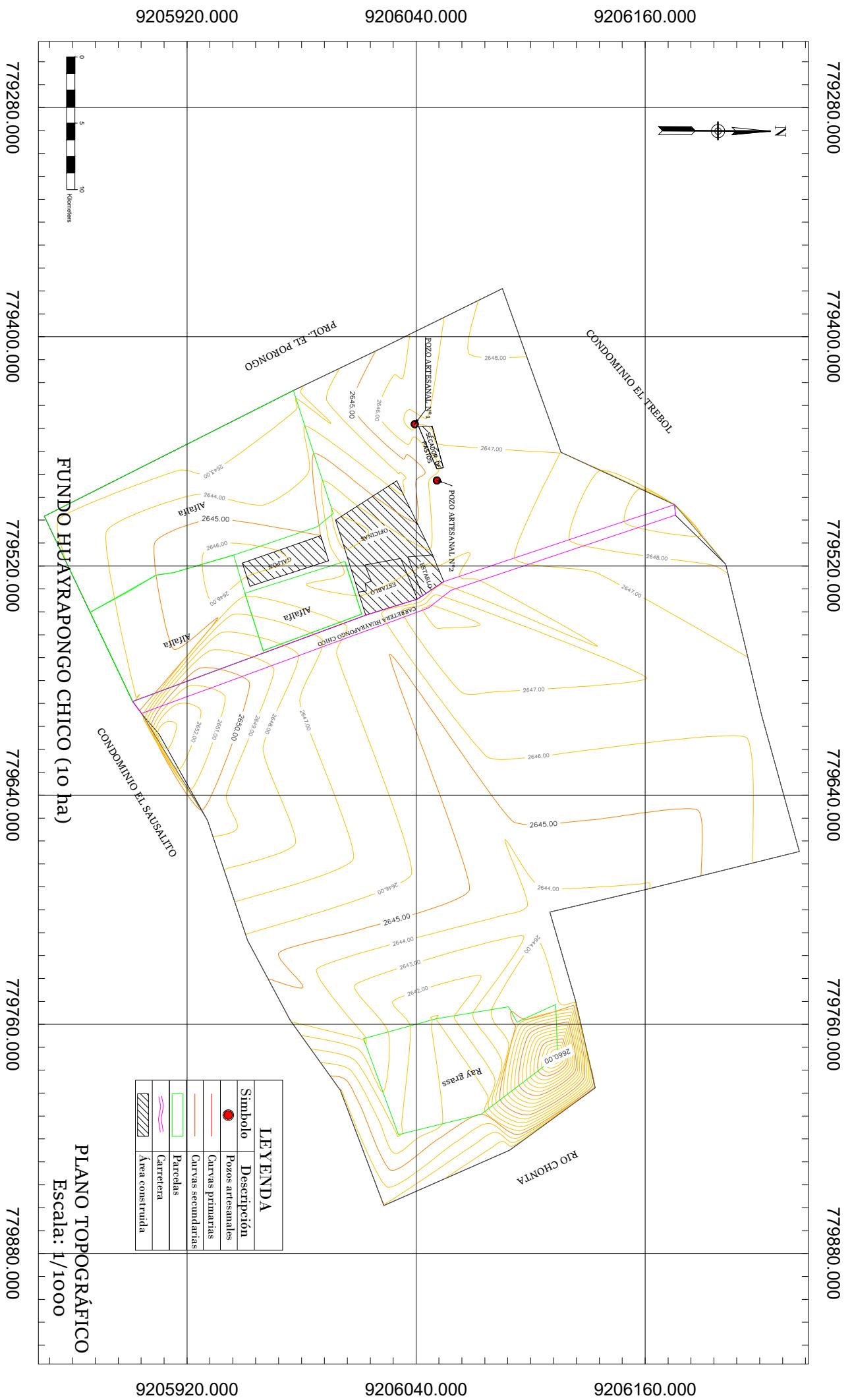
Hay presencia de coliformes totales. Se recomienda realizar la desinfección (clorar el agua), para remover los coliformes y hacerla apta para consumo humano.

Cajamarca, 29 de setiembre del 2025.

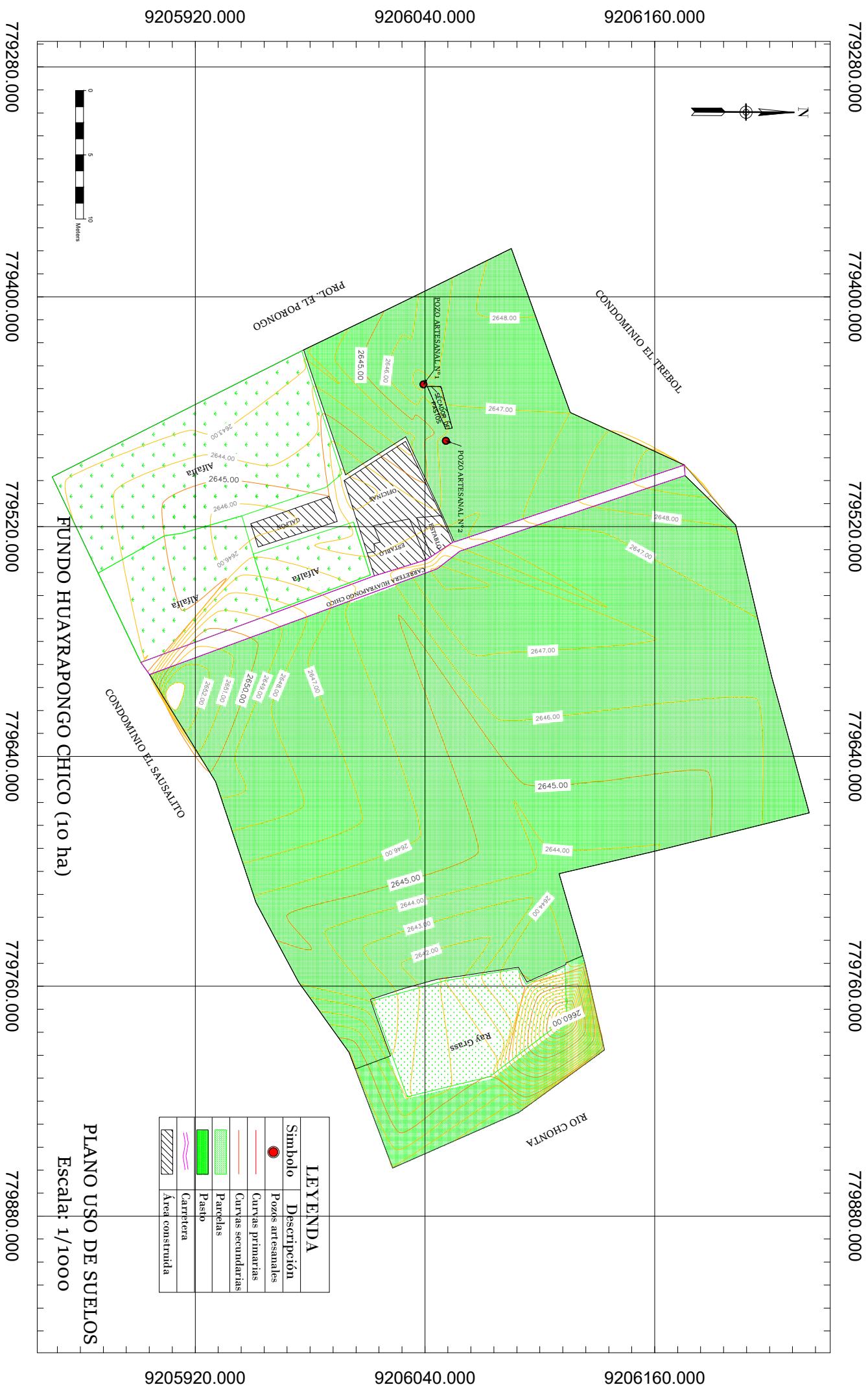


Ingº Marco Tulio Narro Centurión
CONTROL DE CALIDAD
EPS SEDACAJ S.A.

ANEXO 04: PLANO TOPOGRÁFICO



ANEXO 05: PLANO DE USO DE SUELOS



ANEXO 06: PLANO DE UBICACION DE LOS SEVs

