

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA**



## **TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**“CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA DISPONIBILIDAD  
HÍDRICA DE UNA MINA AURÍFERA EN EL DISTRITO DE  
HUAMACHUCO”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO GEÓLOGO**

**ELABORADO POR  
ERIKSON EDWIN UNSIHUAY SANCHEZ**

**ASESOR  
M.Sc. Lic. ATILIO MENDOZA APOLAYA**

**LIMA-PERU**

**2023**

## **DEDICATORIA**

*En especial quiero dedicar este presente trabajo a mis padres Edwin y Lila por su cariño inquebrantable, constante apoyo y motivación hacia mi persona. A mi hermano Werner por brindarme un tiempo con sus soportes y consejos.*

## **AGRADECIMIENTO**

*A los ingenieros de las empresas donde laboré, en especial al Ingeniero Humberto Cruz por la oportunidad y confianza durante el tiempo que trabajamos juntos en diferentes proyectos mineros.*

*A los profesores de la Escuela de Geología de la Universidad Nacional de Ingeniería por los conocimientos brindados, con mención especial para mi asesor M. Sc. Atilio Mendoza y la especialista Ing. Doris Palacios por sus consejos, aportes y constante apoyo durante la realización de este trabajo.*

*A aquellos profesionales de diferentes áreas que me brindaron soporte para completar y terminar este trabajo.*

## RESUMEN

El éxito de las operaciones de las unidades mineras depende de varios factores durante su desarrollo, siendo uno de ellos el acceso al agua. Actualmente, la mayoría de conflictos entornos a los proyectos mineros son debido al uso del recurso hídrico, lo que significa un paso importante poder garantizar la calidad y cantidad de éste sin perjudicar a las comunidades o área de influencia.

En el presente estudio se tuvo como unidad de análisis la Unidad Minera El Toro, operado por la empresa Summa Gold Corporation, que se encuentra en el corredor minero de los yacimientos auríferos asociados a la formación Chimú y contralado por estructuras en dirección noroeste. Este yacimiento se ubica en el distrito de Huamachuco, provincia de Sánchez Carrión, región de La Libertad y actualmente está considerado entre uno de los cinco principales productores de oro de la gran minería en nuestro país.

La presencia de áreas poblacionales relativamente pequeñas, además de zonas agrícolas y ganaderas en los alrededores de la Unidad Minera obligan a usar de forma óptima el recurso hídrico durante las operaciones mineras hasta la obtención del mineral económico, siendo los meses de sequía el periodo en el cual los problemas se agudizan hasta racionar e incluso detener las operaciones durante intervalos de tiempo perjudicando las actividades diarias.

Se comenzó esta investigación con los trabajos de gabinete donde se revisó la información bibliográfica disponible, antecedentes referenciales, conceptos y se estableció la metodología de la investigación. Se definió la hipótesis, así como las variables para desarrollar los trabajos.

En las actividades de campo, el primer trabajo realizado fue el reconocimiento del área de estudio donde se anotaron las características geológicas y estructurales, también se revisó las perforaciones realizadas en la sala de testigos y se logró identificar a la formación Farrat como la más importante por estar constituido de areniscas gruesas de gran potencia. Luego se hizo la prospección geofísica, ciencia usada ampliamente para la exploración de aguas subterráneas donde se aplicó el método de la tomografía eléctrica para hallar áreas potencialmente favorables a la presencia de acuíferos. En otro de los trabajos se monitoreó los puntos de agua superficial y subterránea más importantes y se hizo una evaluación fisicoquímica del agua para determinar su calidad y su posterior uso. Esta actividad implicó realizar la medición periódica de los niveles de agua de los piezómetros instalados, calcular los caudales de los manantiales y anotar las características fisicoquímicas in situ.

Teniendo toda la información de gabinete y campo desarrollada y procesada, se procedió a analizar los resultados obtenidos con el propósito de solucionar el problema de disponibilidad de agua y cumplir con el objetivo del estudio. Dados los resultados de los trabajos realizados se estableció que existen dos puntos en los cuales es más factible extraer el recurso hídrico, estando estos futuros pozos en dos diferentes microcuencas y opuestas respecto a la Unidad Minera. Del mismo modo, según los requerimientos de las áreas operativas la cantidad de agua a usar durante la extracción impactará en forma mínima al acuífero principal y solamente se usará durante un breve periodo (época de sequías) determinado por el especialista en hidrogeología.

**PALABRAS CLAVE:** Acuífero, recurso hídrico, geofísica, permeabilidad.

## ABSTRACT

The success of mining operations depends on multiple factors during their establishment, being one of them the water access. Currently, a major issue facing mining projects is the utilization of water resources, making it crucial to ensure both the quality and quantity of water without causing harm to the local communities or their surroundings.

The focus of this study was the "El Toro" mining unit, which is operated by Summa Gold Corporation. It is situated in the mining area where gold deposits associated with the Chimu formation are found and is controlled by structures that run in a north-west direction. This deposit can be found in the Huamachuco district, located in the Sanchez Carrion province, within the La Libertad region. It is currently regarded as one of the top five gold producers in large-scale mining operations in the country.

The presence of relatively small population areas, in addition to agricultural and livestock areas around the mining unit, make it necessary to make optimal use of water resources during mining operations until the economic mineral is obtained, being the months of drought the period in which the problems become more acute to the point of rationing and even stopping operations for intervals of time, damaging the daily activities.

This research commenced with a desk research phase, during which relevant bibliographic information was analyzed and reviewed. The hypothesis was defined, as well as the relevant variables to develop the work.

During the fieldwork, the initial performed task was to survey the study area where the geological and structural characteristics were noted, the drillings conducted at the core

shack were also reviewed and identified the Farrat formation as the most significant feature due to its composition of thick sandstones with immense strength. Then, geophysical prospecting was carried out, which is a science widely used for groundwater exploration where the electrical tomography method was applied to identify favorable areas that may contain aquifers. In another study, the most important surface and subway water points were monitored, and a physicochemical evaluation of the water was made to determine its quality and potential use. This task consisted of regularly checking the water levels of the piezometers that were installed, computing the flow rates of the springs, and documenting the physicochemical properties in situ.

Once all the information regarding the cabinets and fields had been collected and processed, the results were moved to further examination. The main goal of this analysis was to find a solution to the issue of water availability and achieve the objective of the study. Given the results of the work done, it was established that there are two points in which it is more feasible to extract the water resource, being these future wells in two different micro-watersheds, located on the opposite side of the Mining Unit. Likewise, according to the requirements of the operating areas, the quantity of water utilized for extraction will have a negligible effect on the primary aquifer and will only be used during a short period (dry season), as decided by the hydrogeology expert.

**Key Words:** Aquifer, Water resource, Geophysics, Permeability.

## PRÓLOGO

El presente informe investigativo tiene como aporte formular la disponibilidad de agua subterránea en una operación minera mediante los estudios hidrogeológicos caracterizando el subsuelo.

El contenido de la investigación se ha constituido en seis capítulos principales que se describen a continuación:

Capítulo I: Se mencionan las generalidades del trabajo de investigación, del mismo modo se describe la realidad problemática del área de estudio. En este capítulo se encuentra el objetivo principal del estudio y los antecedentes referenciales revisados a manera de bibliografía.

Capítulo II: Se hace mención a las bases teóricas para comprender y desarrollar el estudio. Se hace una descripción de las unidades hidrogeológicas, la prospección geofísica, análisis hidroquímico, modelo hidrogeológico entre otros. Respecto al marco conceptual, se presentan los términos necesarios para el desarrollo del trabajo de investigación como formación, permeabilidad, resistividad eléctrica, Ley de Darcy, piezómetros, acuífero, etc.

Capítulo III: Contiene la hipótesis del trabajo de investigación con sus respectivas variables de estudio y los indicadores. Siendo la disponibilidad de agua subterránea la variable dependiente y las características del subsuelo la variable independiente.

Capítulo IV: Se detalla la metodología del estudio donde se menciona el tipo y diseño de investigación, el alcance, la unidad de análisis y por último representar en un cuadro la matriz de consistencia.



Capítulo V: Contiene el desarrollo del trabajo de investigación empezando por el área de estudio, geología general de la zona y continuando con la recolección de la información de campo y gabinete para finalizar con el procesamiento de la información de los datos obtenidos.

Capítulo VI: Se detalla el análisis de los resultados obtenidos durante el trabajo de investigación y se discute acerca de estos. En este capítulo se evidencia la validez de la hipótesis respecto a los trabajos realizados y los resultados obtenidos en el trabajo de investigación.

Finalmente, se mencionan las conclusiones y recomendaciones de todo el proceso de esta investigación.

## ÍNDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	v
PRÓLOGO.....	vii
INDICE.....	ix
INDICE DE FIGURAS.....	xiii
INDICE DE TABLAS.....	xvi
<b>1 CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	3
1.3 Objetivo.....	8
1.4 Antecedente Investigativos.....	8
1.4.1 Antecedente Internacionales.....	8
1.4.2 Antecedentes Nacionales.....	11
<b>2 CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....</b>	<b>14</b>
2.1 Marco Teórico.....	14
2.1.1 Unidades Hidrogeológicas.....	14
2.1.2 Prospección Geofísica.....	15
2.1.3 Análisis Hidroquímico.....	16
2.1.3.1 Parámetros Físicoquímicos.....	17
2.1.4 Modelo Hidrogeológico.....	17
2.1.4.1 Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	18

2.2	Marco Conceptual .....	20
3	CAPÍTULO III HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	24
3.1	Hipótesis.....	24
3.2	Operacionalización de Variables.....	24
3.2.1	Variable Dependiente (VD) .....	24
3.2.2	Variable Independiente (VI) .....	24
3.2.3	Indicadores .....	24
4	CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	26
4.1	Tipos y Diseño de Investigación .....	26
4.1.1	Enfoque .....	26
4.1.2	Alcance.....	27
4.1.3	Diseño de la Investigación .....	27
4.2	Unidad de Análisis .....	27
4.2.1	Características Específicas .....	28
4.3	Matriz de Consistencia.....	29
5	CAPÍTULO V DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	30
5.1	Área de Estudio .....	30
5.1.1	Ubicación .....	30
5.1.2	Accesibilidad.....	31
5.1.3	Clima.....	32
5.2	Geología del Área de Estudio.....	32
5.2.1	Geología Regional.....	32
5.2.2	Estratigrafía.....	33
5.2.3	Geología Estructural .....	40
5.2.4	Geología Histórica .....	41

5.2.5	Geomorfología .....	42
5.3	Recolección de la Información.....	44
5.3.1	Geología Local.....	45
5.3.2	Trabajos de Perforación .....	46
5.3.3	Ensayos Hidrogeológicos.....	47
5.3.4	Piezómetros instalados.....	50
5.4	Procesamiento de la Información.....	50
5.4.1	Inventario de Fuentes de Agua.....	50
5.4.1.1	Monitoreo de Nivel de Agua Subterránea .....	51
5.4.2	Geofísica .....	55
5.4.2.1	Ubicación de las Líneas Geofísicas .....	55
5.4.2.2	Preparación de las Líneas Geofísicas .....	56
5.4.2.3	Estudio de Tomografía Eléctrica .....	56
5.4.2.4	Control de Calidad.....	58
5.4.2.5	Interpretación de Resultados Geofísicos .....	59
5.4.3	Hidroquímica .....	67
5.4.3.1	Parámetros Físicoquímicos.....	68
5.4.3.2	Composición Iónica.....	70
5.4.3.3	Resultados.....	74
5.4.4	Hidrodinámica Subterránea.....	74
5.4.4.1	Propuesta Pozos – Punto de Captación .....	84
5.4.4.2	Demanda de Agua .....	86
5.4.4.3	Disponibilidad de Agua.....	87
6	CAPÍTULO VI ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	89
6.1	Condiciones Geológicas – Estructuras Mayores.....	89

6.2	Conductividad Hidráulica por Formación Geológica .....	90
6.3	Unidades Hidrogeológicas .....	91
6.4	Acuífero.....	94
6.4.1	Napa Freática .....	95
6.5	Síntesis del Modelo Conceptual.....	97
	CONCLUSIONES .....	100
	RECOMENDACIONES .....	101
	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....	102
	ANEXOS	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Ciclo Hidrológico del Agua .....	5
Figura 2.1	Rangos típicos de resistividad eléctrica o conductividad eléctrica .....	16
Figura 5.1	Ubicación del Área de Estudio.....	31
Figura 5.2	Geología Regional del área de estudio .....	33
Figura 5.3	Columna Estratigráfica del área de estudio.....	34
Figura 5.4	Vista de afloramiento de la formación Chimú cerca de la laguna Cahuadán al norte de la zona de estudio .....	36
Figura 5.5	Afloramiento de la formación Santa Carhuáz, cerro Rafachuz.....	37
Figura 5.6	Afloramiento de la formación Farrat cerca de la Laguna Negra.....	37
Figura 5.7	Mapa Geomorfológico del área de estudio.....	44
Figura 5.8	Sección geológica AA´ .....	46
Figura 5.9	Conductividad hidráulica vs altitud.....	49
Figura 5.10	Principales fuentes de agua inventariadas .....	53
Figura 5.11	Hidrograma de niveles de agua subterráneos de piezómetros antiguos .....	54
Figura 5.12	Hidrograma de niveles de agua subterráneos de piezómetros operativos .....	54
Figura 5.13	Ubicación de líneas geofísicas .....	56
Figura 5.14	Equipamiento para tomografía eléctrica.....	57
Figura 5.15	Líneas geofísicas de la zona Coigobamba.....	59
Figura 5.16	Líneas geofísicas de la zona Shiracmaca .....	60
Figura 5.17	Sección Tomografía Eléctrica – Línea 1 .....	61
Figura 5.18	Sección tomográfica eléctrica interpretada – Línea 1 .....	61
Figura 5.19	Sección Tomografía Eléctrica – Línea 2 .....	62

Figura 5.20	Sección tomográfica eléctrica interpretada – Línea 2 .....	62
Figura 5.21	Sección Tomografía Eléctrica – Línea 3 .....	63
Figura 5.22	Sección tomográfica eléctrica interpretada – Línea 3 .....	63
Figura 5.23	Sección Tomografía Eléctrica – Línea 4 .....	64
Figura 5.24	Sección tomográfica eléctrica interpretada – Línea 4 .....	64
Figura 5.25	Sección Tomografía Eléctrica – Línea 5 .....	65
Figura 5.26	Sección tomográfica eléctrica interpretada – Línea 5 .....	65
Figura 5.27	Sección Tomografía Eléctrica – Línea 6 .....	66
Figura 5.28	Sección tomográfica eléctrica interpretada – Línea 6 .....	66
Figura 5.29	Ubicación de los puntos de monitoreo .....	68
Figura 5.30	Mapa de isoconductividad eléctrica de la zona de estudio.....	70
Figura 5.31	Diagrama Piper de las muestras de agua subterránea.....	72
Figura 5.32	Distribución de Diagramas Stiff.....	73
Figura 5.33	Ubicación pozo exploratorio PW – HT – 01 .....	75
Figura 5.34	Prueba Air Lift (PZ – HT – 05) a profundidad de 35.00 metros.....	76
Figura 5.35	Prueba Air Lift (PZ – HT – 05) a profundidad de 50.00 metros.....	77
Figura 5.36	Prueba Air Lift (PZ – HT – 05) a profundidad de 61.00 metros.....	78
Figura 5.37	Ubicación pozo exploratorio PW – HT – 02.....	79
Figura 5.38	Prueba Air Lift (Sondaje PZ – HT – 04) a profundidad de 47.00 metros .....	80
Figura 5.39	Prueba Air Lift (Sondaje PZ – HT – 04) a profundidad de 55.44 metros .....	81
Figura 5.40	Prueba Air Lift (Sondaje PZ – HT – 09) a profundidad de 66.90 metros .....	82
Figura 5.41	Prueba Air Lift (Sondaje PZ – HT – 09) a profundidad de 76.00 metros .....	83

Figura 5.42	Gráfico preliminar de los pozos exploratorios .....	85
Figura 6.1	Formación geológica, cota (msnm) y conductividad hidráulica (m/d) .....	91
Figura 6.2	Unidad Hidrogeológicas del área de estudio .....	94
Figura 6.3	Mapa de isopropundidades de la zona de estudio .....	96
Figura 6.4	Mapa de hidroisohipsas de la zona de estudio .....	97
Figura 6.5	Modelo Conceptual de la zona de estudio .....	99



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Contenido de agua en la superficie de la tierra .....	5
Tabla 3.1	Operacionalización de Variables .....	25
Tabla 4.1	Matriz de Consistencia .....	29
Tabla 5.1	Coordenadas Unidad Minera El Toro .....	30
Tabla 5.2	Unidades Litoestratigráficas Regionales .....	35
Tabla 5.3	Inventario de piezómetros instalados operativos.....	51
Tabla 5.4	Inventario de aguas superficiales .....	52
Tabla 5.5	Coordenadas líneas geofísicas.....	55
Tabla 5.6	Especificación de equipos para tomografía eléctrica .....	57
Tabla 5.7	Parámetros de tomografía eléctrica .....	58
Tabla 5.8	Relación de puntos de monitoreo .....	67
Tabla 5.9	Parámetros fisicoquímicos de los puntos muestreados .....	69
Tabla 5.10	Tipos de agua según formación geológica .....	72
Tabla 5.11	Pozos exploratorios propuestos .....	74
Tabla 5.12	Características técnicas de los pozos exploratorios.....	84
Tabla 5.13	Régimen de Aprovechamiento por pozo exploratorio .....	86
Tabla 5.14	Demanda de Agua de la Unidad Minera .....	86
Tabla 5.15	Disponibilidad de Agua Subterránea.....	87
Tabla 5.16	Balance Hídrico por pozo.....	88
Tabla 6.1	Rango de Conductividad por Formación Geológica .....	91

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Generalidades**

Las operaciones mineras representan una actividad económica muy importante para el beneficio de todos los peruanos. En el año 2021 el sector minero formal representó el 12 % del PBI; se aportaron el 20% de los ingresos fiscales a través de impuestos, canon y regalías; las exportaciones sobrepasaron los 36,000 millones de dólares representando el 60% del total de exportaciones realizadas. En la actualidad se estima la empleabilidad en 215,000 empleos directos y 1.8 millones de puestos trabajo indirectos.

En este ámbito económico minero, tenemos a la empresa aurífera Summa Gold Corporation (Proyecto Minero El Toro), lugar objetivo de este trabajo, que inició sus operaciones en el año 2004 como una minera informal y sin embargo en la actualidad pertenece a la Gran Minería debido al proceso de formalización y la magnitud de sus reservas encontradas en numerosos trabajos de exploración.

Según los estudios de Ausenco (2019), estimó la vida útil de la mina en 08 años más mediante datos e interpretación de logeos de sondajes nuevos y relogeos de sondajes antiguos; donde de acuerdo a la actualización y reinterpretación según el modelo geológico – estructural se tendrá una producción anual de 100,000 a 150,000 onzas de oro hasta el fin de la última fase de minado.

Para la viabilidad productiva de los proyectos mineros se tiene en cuenta factores geológicos, económicos y ambientales siendo este último un tema muy sensible para las comunidades rurales aledañas debido al mal concepto que se tiene respecto a la actividad minera.

La fase operativa de una Unidad Minera implica un óptimo planeamiento según los factores estructurales, geomecánicos y geotécnicos. Pero también un factor importante durante la fase extractiva a tener en cuenta es también la disponibilidad de agua, siendo un componente ambiental esencial, para el desarrollo de las actividades durante las operaciones.

Los futuros proyectos mineros y las actuales unidades mineras consideran a la disponibilidad hídrica como un eje fundamental para la viabilidad de sus operaciones y debido a esto es que solicitan la realización de estudios hidrológicos e hidrogeológicos. Los estudios hidrológicos comprenden al componente hídrico superficial tales como ríos, quebradas y lagunas; mientras que los estudios hidrogeológicos comprenden al componente hídrico subterráneo tales como manantiales, napa freática, pozos.

Los especialistas y profesionales involucrados en las industrias extractivas generalmente son conscientes de las altas cantidades de agua a utilizar para el proceso

de extracción de una determinada materia prima. Sin embargo, a pesar del avance científico en diversidad de áreas, no se innovan y/o crean nuevas tecnologías para el menor uso de cantidad de recurso hídrico.

Un error fundamental típico de las empresas mineras es pretender utilizar las fuentes de agua cercanas a sus operaciones sabiendo que primero debe haber un estudio para demostrar su uso y una autorización gubernamental con las indicaciones de las cantidades a utilizar para sus actividades. Esta sustracción del agua de parte de las empresas mineras en condiciones no establecidas lo único que consigue es crear un impacto negativo en las comunidades y posteriormente originar conflictos socioambientales.

Según las normativas del Estado peruano y teniendo como guías reglamentos internacionales se debe garantizar la disponibilidad hídrica para la operación sin perjudicar al entorno incluso proveyendo al área de influencia si existe una sobreabundancia de agua. Se tienen proyectos mineros en el Perú que aplicaron correctamente estas normativas para beneficios de las comunidades y/o ciudades cercanas tales como Quellaveco (Anglo American) y Marcona (Shougang).

Una correcta caracterización hidrogeológica para determinar la disponibilidad hídrica subterránea y la calidad fisicoquímica de esta permitirá evitar posibles inconvenientes futuros y viabilizar los proyectos y/o operaciones mineras.

## **1.2 Descripción del problema de investigación**

La falta de previsión de las empresas mineras y control gubernamental de parte de las entidades del Estado inducen a una serie de decisiones incorrectas que repercuten en una imagen corporativa negativa respecto a cómo ven los pobladores del

área de influencia en el derecho al uso del agua. Esto se pone en evidencia en la Unidad Minera El Toro, lugar donde se realizó la presente investigación.

El abastecimiento de agua no es permanente durante todos los meses del año para las operaciones de los componentes de la Unidad Minera. Es así que los requerimientos de agua fresca son indispensables para el campamento, oficinas, comedor y también para el proceso de las labores realizadas en las secuencias de minado hasta la obtención final del producto con valor económico.

La disponibilidad de recursos hídricos siendo un problema recurrente asociado a temas socioambientales ha originado el desarrollo de una serie de metodologías, investigaciones, caracterizaciones y definiciones. Esto ha dado lugar que cada compañía del sector minero realice un estudio hídrico integral (superficial y subterráneo) para determinar el abastecimiento de agua ideal durante los meses de estrés hídrico (sequías).

Conocer el ciclo hidrológico (figura 1.1) como una terminología basada en el transporte del agua, es comprender que el agua en la naturaleza tiene un comportamiento dinámico. El concepto según Chereque (1989) menciona que *“se entiende como el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso) como en su forma (superficial, sub-superficial, subterránea, etc.)”*.

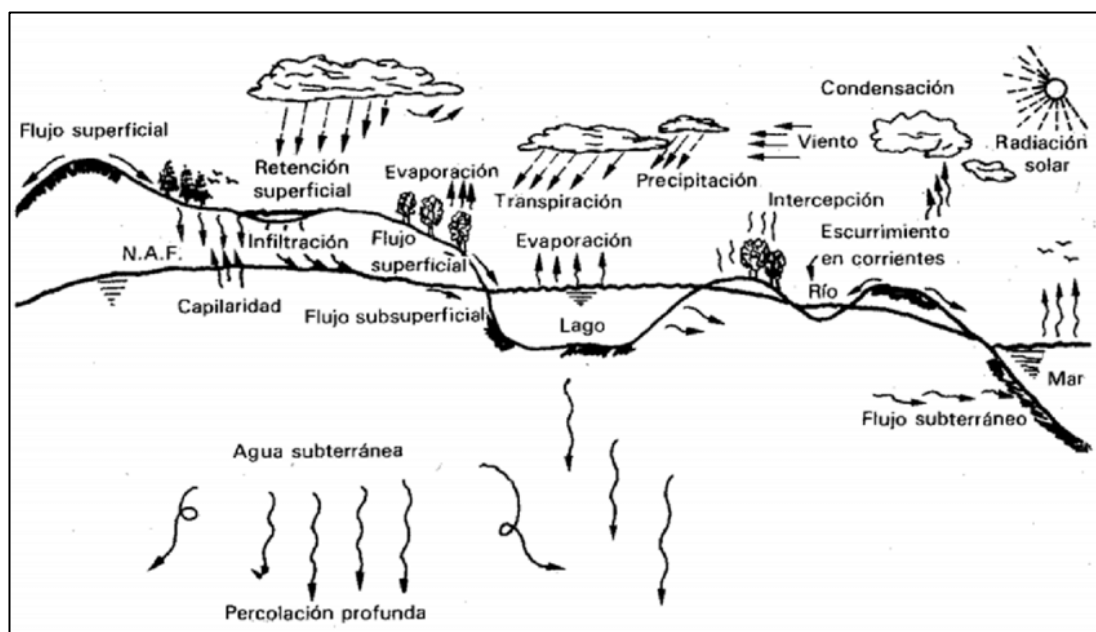


Figura 1.1 Ciclo Hidrológico del Agua

Fuente: "Fundamentos de Hidrología de superficie", Aparicio (1997).

Esto implica que el agua es almacenada en distintos medios (tabla 1.1) y que el ciclo es generado por dos causas: la energía solar y la gravedad. Según los estudios científicos realizados y las perforaciones experimentadas a nivel mundial siempre existe la presencia de agua a una determinada profundidad.

Tabla 1.1 Contenido de agua en la superficie de la tierra

Reservorios	Volúmen (cubic km x 1,000,000)	Porcentaje
Océanos	1370	97.25
Glaciares	29	2.05
Agua subterránea	9.5	0.68
Lagos	0.125	0.01
Suelos húmedo	0.065	0.005
Atmósfera	0.013	0.001
Ríos	0.0017	0.0001
Biosfera	0.0006	0.00004

Fuente: Pidwimy (2006)

Los estudios hidrológicos, relacionados al agua superficial, son una compleja solución al tema de falta de agua para una determinada actividad minera dado que cada vez más las normas, leyes y los compromisos medioambientales son más rigurosos y/o penalizados en este aspecto.

Sin embargo, los estudios hidrogeológicos, relacionados al agua subterránea, proporcionan una solución cada vez más usada en el ámbito minero nacional e internacional. Incluso otras actividades económicas importantes (sector agroexportador y ganadero) ya están empleando cada vez más el recurso hídrico subterráneo.

Los estudios hidrogeológicos modernos tienen una serie de lineamientos integrales ya establecidos para poder caracterizar y aprovechar de la mejor manera al agua del subsuelo tales como: reconocimiento del contexto geológico, perforaciones y elaboración del modelo hidrogeológico.

En cambio, los procedimientos antiguos de las empresas mineras establecían solo la perforación de pozos para abastecimiento de agua, sin importar la caracterización de la zona de estudio.

Durante la caracterización hidrogeológica el proceso más crítico implica establecer un punto desde donde se extraiga el agua con un caudal óptimo. Todavía siguen existiendo problemas conceptuales respecto a este tema ya que a pesar del avance de las metodologías existen algunos riesgos propios de la geología de la zona y costos asociados a ello.

En general para comenzar estos tipos de estudios tenemos que hacer un reconocimiento de campo que implican a la descripción litológica, geológica – estructural, geofísica e

hidroquímica. La ausencia o mal registro de estos datos generará problemas cada vez más complejos para interpretar el subsuelo.

La aplicación de la geofísica como método indirecto ha permitido un gran avance en la ubicación de zonas potencialmente prospectivas. Al igual que en la fase exploratoria de la industria petrolera y minera, los estudios geofísicos vienen siendo una herramienta altamente demandada por su aplicabilidad en todo tipo de terreno (suelo o roca) y cualquier medio (líquido o sólido).

Luego del trabajo de campo y uso de la geofísica en el área, los trabajos de perforación son las actividades a realizar durante el estudio. Estas perforaciones suponen como principal objetivo conocer el subsuelo mediante la descripción de los testigos de perforación recuperados. Además de aquello, durante las perforaciones se deben realizar una serie de ensayos hidráulicos para determinar la permeabilidad de las formaciones geológicas atravesadas. La correcta correlación de estos datos facilita la interpretación del modelo hidrogeológico a elaborar.

Considerar también una problemática recurrente en estos tipos de trabajos es no realizar la toma de parámetros fisicoquímicos del agua encontrada. Este registro de datos también debe ser aplicados a las fuentes de aguas (ríos, quebradas, manantiales, lagunas, pozos) de la zona de estudio.

Por tal motivo, la demanda de agua debe resolverse a través del estudio del acuífero y la colocación de pozos de producción de agua bajo un caudal de explotación determinado y por el tiempo que dure el estrés hídrico (sequía).



Es importante mencionar que, al tratarse de un recurso hídrico tan valioso, se debe evitar su sobreexplotación ya que conllevaría en problemas socioambientales con las comunidades cercanas y autoridades del estado.

En base a lo expuesto anteriormente nos planteamos el siguiente problema para la investigación:

¿Cómo se puede satisfacer la demanda de agua requerida por una Unidad Minera aurífera mediante una caracterización hidrogeológica integral de la zona?

### **1.3 Objetivo**

- Establecer la disponibilidad de agua subterránea para la Unidad Minera.

### **1.4 Antecedente Investigativos**

#### **1.4.1 Antecedente Internacionales**

Islam, R., Singh, R. & Khan, R. (2016) realizan una publicación “Methods of Estimating Ground water Recharge” donde mencionan la incertidumbre de la estimación de agua subterránea a utilizar y administrar según las necesidades del alcance de un estudio. Esto normalmente supone desde varias décadas una incertidumbre y desaciertos para calcular la recarga de los pozos. Los autores proponen varios métodos para estimar la recarga subterránea.

Estos métodos dependen de la disponibilidad de datos, las condiciones geológicas, topografía local, escala y la confiabilidad de resultados. Las estimaciones de recarga potencial son calculadas en base a múltiples técnicas para un resultado más confiable siendo el factor económico un limitante a la hora de escoger el método.

Los autores concluyen que, a pesar del avance de las técnicas de estimación de recarga no es posible identificar un solo método por lo que sugieren aplicar más de un método para cumplir con el objetivo del estudio.

De León, H., Dávila, R. y Aranda, L. (2013) publican su artículo “Diagnóstico del estado de las aguas subterráneas de Monterrey/México, aplicando hidrogeología urbana” donde se resalta una problemática ambiental del agua de esta ciudad mexicana, segunda más grande de ese país, afectada por las sequías, climas extremos y crecimiento demográfico acelerado.

La investigación hace una revisión geológica – estructural de esta ciudad y la integra con lo visto en campo. Primero se describe las formaciones geológicas que básicamente son secuencias sedimentarias de lutitas carbonatadas en la base y en la parte superior de coberturas cuaternarias como aluviones y conglomerados expuestos como terrazas fluviales. Luego se describe la parte estructural en el que se identifica un sinclinal plegado fracturado. Con las observaciones realizadas se describe el sistema hidrogeológico donde se definen tres principales acuíferos en base al comportamiento hidráulico.

En la publicación se menciona la extracción en exceso del agua subterránea debido a las necesidades industriales y aumentó de la población. Se evidencia una contaminación de los acuíferos debido a la sobreexplotación y se propone la actualización de modelos hidrogeológicos conceptuales para una mejor planificación hacia el futuro de esta metrópoli.

En el artículo se concluye que las principales ciudades de México y otras a nivel global ubicadas en zonas con escasez de recursos hídricos están dependiendo cada vez más

de la explotación de las aguas subterráneas para satisfacer las necesidades básicas de sus habitantes y la viabilidad de diversas actividades económicas.

Iglesias, A. (2006), dictó un curso de doctorado “Hidrodinámica Subterránea y Modelos de Hidrogeología”, donde en uno de sus capítulos detalla la diversificación hidrogeológica y sus clasificaciones. De acuerdo al tipo de formación geológica con capacidad para almacenar y transmitir el fluido se tiene la siguiente clasificación: acuífero, acuitardo, acuicludo y acuífugo. La principal característica de su variación entre ellos es la capacidad de drenar agua siendo el acuífero una buena formación para explotar el agua subterránea.

Por otro lado, también menciona la clasificación de los acuíferos según las características hidráulicas y estructurales. Existen tres tipos de acuíferos mencionados: acuífero libre, acuífero semiconfinado y acuífero confinado. Según las necesidades de la explotación de agua subterránea se debe verificar la reacción de estos tipos de acuíferos.

En otro de sus capítulos del mismo curso, el autor hace un énfasis en los parámetros hidrogeológicos característicos de una formación geológica. Se considera que para el estudio de un acuífero se debe evaluar las formaciones desde el punto de vista hidrológico. Es por ello que al momento de la descripción de una formación geológica respecto al almacenamiento de agua y su transmisión se debe verificar estos cuatro parámetros: porosidad, coeficiente de almacenamiento, permeabilidad y transmisividad.

### 1.4.2 Antecedentes Nacionales

Chirme, E. (2020) en la tesis titulada “Estimación de parámetros hidráulicos mediante ensayos de recuperación de air – lift en taladros de exploración aplicado en la mina Antapaccay” menciona que los métodos de perforación rotativos (circulación inversa o RC) son los más utilizados al momento de describir la información hidráulica y litológica del subsuelo para realizar un estudio hidrogeológico.

En los trabajos realizados para su tesis se empezó con una recopilación de información bibliográfica, tipo de perforación, obtención de datos de campo, procesamiento y análisis de la información. El estudio se sustentó en base a la perforación de cinco sondajes exploratorios (RC) con la descripción litológica de las muestras trituradas (detritos) y ensayos tipo air – lift durante el avance en profundidad. Al final de cada ensayo se consideró realizar una prueba de recuperación (recovery test) de nivel de agua hasta aproximar al nivel freático inicial medido antes de cada ensayo.

La metodología de Theis fue aplicada para la estimación de los parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica y transmisividad) en base a la recta de recuperación. El autor concluye que en base a los resultados obtenidos se evidencia un medio heterogéneo donde está influenciado por intrusiones como barreras limitantes.

Marín, K. y Sangay, J. (2020) publican la tesis “Estudio Hidrogeológico mediante tomografía geoeléctrica para la localización de aguas subterráneas en el centro poblado La Huaraclla – Jesús – Cajamarca 2020”. La investigación tiene por finalidad solucionar el abastecimiento de agua para mejorar la calidad de vida de los pobladores de la zona. Identificando y verificando que el lugar es generalmente seco durante el

año y no tiene fuentes de aguas con una caudal considerable para uso potable o agrícola.

La metodología usada durante la investigación es del tipo aplicada y el enfoque es cuantitativo. Se desarrollaron trabajos de tomografía geoelectrica en cuatro puntos definidos por los investigadores. Otra actividad de campo realizada fue el cartografiado geológico para determinar las unidades litoestratigráficas, del mismo modo se constató la parte geológica estructural para hallar la presencia de controles estructurales como fallas y fracturas.

Los autores concluyen que se pudo localizar la presencia de aguas subterráneas a 45 m mediante la integración de los datos obtenidos y se estableció un modelo hidrogeológico para el aprovechamiento del recurso hídrico. Se sugiere también determinar la calidad de las aguas mediante estudios hidroquímicos.

Montoya, S. (2014), realizó un curso “Criterios de monitoreo de aguas subterráneas”. En este curso se detalla los pasos importantes para la toma de datos de las cuencas hidrográficas de una zona y los parámetros a incluir durante la caracterización del registro hídrico. El autor menciona la toma de muestras de agua en volúmenes considerables (2.5 litros) de perforaciones recientes y de fuentes de agua a lo largo de un área de estudio. Los parámetros considerados a medir en campo son: temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y potencial redox.

Se deja como recomendación la toma de datos en temporada seca (sequía) y temporada húmeda (lluviosa) y se concluye que para la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual se debe tener en cuenta la recarga y descarga hídrica de la zona de estudio. De igual modo se establece que los puntos de monitoreo de una Unidad Minera deben

tener una distribución espacial de tal manera que sea representativo de toda el área para la calibración del modelo.

Evans, D., Letient, H. & Aley T. (2005), realizan una publicación “Aquifer vulnerability mapping in karstic terrain Antamina mine, Peru”. En este estudio se realizó la importancia de definir la ubicación de una zona apropiada para colocar roca estéril provenientes del proceso de minado.

En la investigación se hace un análisis hidrogeológico de la zona para delimitar las cuencas hidrográficas y señalar un área óptima para las instalaciones de los materiales desechados. Se desarrolló diversos trabajos para observar la vulnerabilidad de la zona aledaña a la Unidad Minera como: mapeo geológico y kárstico, geofísica, estudios geoquímicos, estudios con trazadores, perforaciones y pruebas/ensayos en acuíferos.

Los autores concluyen que los trabajos de mapeo junto con el de trazadores resultaron ser los más ideales para caracterizar el contexto hidrogeológico kárstico y los resultados obtenidos se usaron para optimizar la ubicación de la roca estéril y así minimizar el riesgo ambiental potencial sobre el agua subterránea.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

#### **2.1 Marco Teórico**

##### **2.1.1 Unidades Hidrogeológicas**

Sánchez, F. (2017) – “Hidrología superficial y subterránea”, estas unidades representan la unión de formaciones geológicas de similares características litológicas y propiedades hidrodinámicas que permitan el tránsito del flujo de agua subterránea. Forman parte del análisis conceptual y tienen un alto grado de importancia al momento de elaborar el Modelo Hidrogeológico. En cada unidad se podría considerar uno o varios acuíferos e incluso acuitardos, acuícludos entre estos.

Estas unidades dan un concepto más coherente respecto al funcionamiento hidráulico teniendo en consideración el análisis previo de los cuerpos rocosos (Interpretación de ensayos durante perforación, reconocimiento de campo) en la zona de estudio. La agrupación de las formaciones también depende de la escala y objetivos del proyecto. Una unidad podría subdividirse en otras unidades menores.

### 2.1.2 Prospección Geofísica

Calixto, L. (2017) – “Métodos geofísicos para la búsqueda de aguas subterráneas y prediseño de un pozo de extracción para la empresa Transavella, en la ciudad de Sogamoso, Boyacá”, menciona que es un conjunto de técnicas físicas y matemáticas, aplicadas a la exploración del subsuelo para la búsqueda y estudio de yacimientos enriquecidos tales como el petróleo, aguas subterráneas, minerales, carbón, entre otros.

La prospección geofísica, estudia las variaciones del campo eléctrico o electromagnético cuando se hace pasar una corriente eléctrica en el suelo. El método de las resistividades o tomografía eléctrica es apropiado para los estudios de agua subterránea que exigen poca profundidad y para las características hidrogeológicas que se buscan en el terreno.

Permite determinar la naturaleza, la morfología y la profundidad del sustrato, así como la litología de las capas acuíferas. Existe una relación clara entre la porosidad, salinidad y la resistividad eléctrica, para sedimentos saturados de agua. En consecuencia, es posible definir la columna de un acuífero saturado, para cada sondeo eléctrico vertical, correlacionando las diferentes capas u horizontes geológicos.

Las medidas de resistividad eléctrica del subsuelo son habituales en las prospecciones geofísicas, su principal finalidad es detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo. Este método consiste en la inyección de corriente continua o de baja frecuencia en el terreno mediante un par de electrodos y la determinación, mediante otro par de electrodos, de la diferencia de potencial.



En general, de todas las propiedades geofísicas de las rocas, la resistividad eléctrica es la más variable, pues tiene variaciones de hasta 10 órdenes de magnitud y estas se pueden encontrar en el mismo tipo de roca. De forma muy general se muestran las resistividades de los principales grupos de rocas (figura 2.1), adaptado de la información Palacky (1987) que se presenta en la mayoría de los textos sobre geofísica aplicada.

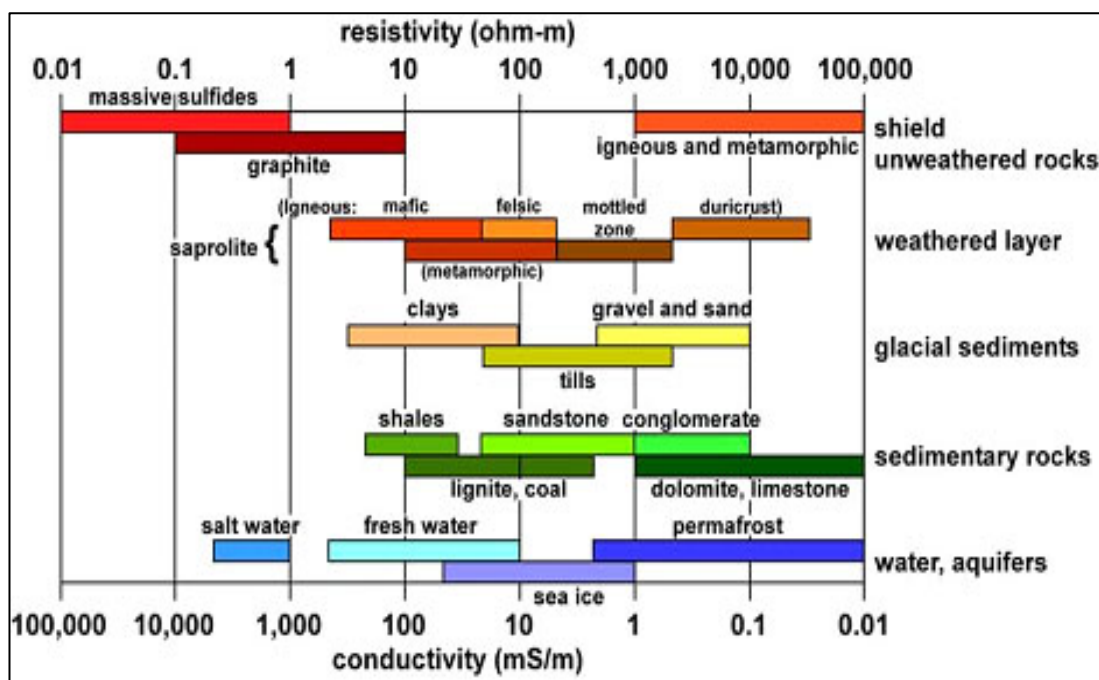


Figura 2.1 Rangos típicos de resistividad eléctrica o conductividad eléctrica

\*Fuente: "Earth materials", adaptado de Palacky (1988).

### 2.1.3 Análisis Hidroquímico

Sánchez, F. (2017) – "Hidrología superficial y subterránea", hace referencia a la hidroquímica como la química de las aguas subterráneas y de igual manera son aplicables a las aguas superficiales.

El estudio de las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas es de gran relevancia en la actualidad para definir el estado y sus posibles usos ya sea para fines

poblacionales o industriales. Estos estudios incluyen identificar los procesos y las reacciones generadas producto de la interacción del agua con el medio ambiente subterráneo y/o factores ajenos que alteren su composición.

El uso de la hidroquímica en los estudios hidrogeológicos se fundamenta en el postulado acerca de la composición del agua subterránea como resultado del agua que ingresa al acuífero y las reacciones con los minerales de las rocas por las que ha circulado y puesto en contacto o interacción con sustancias contaminantes que afectan su calidad (Appelo y Postma, 1999).

#### **2.1.3.1 Parámetros Físicoquímicos**

Para realizar la interpretación de la química de las aguas subterráneas se utilizan parámetros de campo como temperatura, pH, conductividad eléctrica y Eh; de igual manera se requiere conocer la concentración de los iones mayoritarios de sodio, potasio, calcio, magnesio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos; se utilizaron argumentos adicionales a partir del conocimiento de la presencia de compuestos minoritarios, trazas, compuestos microbiológicos, orgánicos y volátiles. Se requiere contar, además, con información acerca de la geología y mineralogía del medio acuífero.

#### **2.1.4 Modelo Hidrogeológico**

Martínez, G. (2009) hace mención que los modelos hidrogeológicos surgen con la necesidad de los investigadores de crear una representación de un ambiente hidrogeológico para un objetivo planteado. Estos modelos son caracterizados por la entrada de una base de datos y una serie de condiciones como limitaciones para una posterior simulación. Estos elementos nos permitirán luego estudiar, analizar e

interpretar el ambiente subterráneo para conocer la diversidad de situaciones y obtener conclusiones – recomendaciones en concordancia con la finalidad del estudio y los objetivos planteados.

Existen dos tipos de modelos para caracterizar el sistema hidrogeológico subterráneo, el conceptual y el numérico, ambos son elaborados y definidos de acuerdo a la necesidad del estudio y predicciones de escenarios futuros. Así tenemos al modelo hidrogeológico conceptual que es el más usado a nivel global por una concepción más genérica, buena comprensión y de elaboración accesible; mientras que el modelo hidrogeológico numérico es más complejo realizarlo debido a la utilización de softwares específicos y simulaciones de ambientes futuros más complicados de comprender para la mayoría de profesionales del sector.

#### **2.1.4.1 Modelo Hidrogeológico Conceptual**

Betancur et al., (2009), hace mención respecto a este tipo de modelo que corresponde a una representación de la situación de un determinado ambiente hidrogeológico, en el cual se denota las condiciones del flujo subterráneo a través de los parámetros hidráulicos característicos de cada unidad hidrogeológica y las posiciones de superficies freáticas y piezométricas. Además de identificar zonas de recarga y evaluación de reservas. La finalidad con este tipo de modelo es organizar datos para luego ser analizado de una manera más efectiva, por lo tanto, si la información ingresada es de calidad el modelo será más idóneo. Para establecer el modelo se debe tener conocimientos hidrológicos, geológicos, fisiográficos y climatológicos de la zona de interés para definir las unidades hidrogeológicas, zonas

de recarga posible, direcciones de flujo y calidad del agua subterránea. La interpretación de los resultados obtenidos generalmente es cualitativo y subjetivo.

Así también, en el modelo hidrogeológico conceptual se representa de forma gráfica y descriptiva al acuífero en el cual se interpreta e integran las condiciones hidrogeológicas con el ecosistema, con el fin de reducir posibles inconvenientes y mostrar el estado del acuífero similar a la realidad. Por lo que, considerar también que los modelos son dinámicos y cambios importantes deben ser tomados en cuenta para los ajustes necesarios.

En la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual se debe establecer tres momentos importantes: definir las unidades hidrogeológicas, calcular el balance hídrico y determinar las direcciones de flujo.

La primera está relacionada a comprender las formaciones geológicas; en el segundo se emplean los datos hidrológicos con la información hidroquímica; y el tercero hace referencia a las zonas de recarga y descarga junto con la topografía. Estos últimos también son dependientes de la hidrología y geoquímica local (Vélez et al., 2012).

Los modelos hidrogeológicos conceptuales deben ser capaces de dar a entender correctamente la relación entre los diferentes cuerpos de agua y el funcionamiento de estos en un área determinada, con la finalidad de propiciar directrices para proteger el recurso hídrico subterráneo.

## 2.2 Marco Conceptual

- **Formación**

Es una unidad litoestratigráfica definida por cuerpos rocosos que son descritos por propiedades litológicas comunes (composición y estructura) y se diferencian de otras adyacentes. Es la principal unidad base para la estratigrafía y pueden asociarse en unidades mayores (grupos), subdividirse (miembros) y diferenciarse de otras unidades estratigráficas menores (capas).

- **Ciclo Hidrológico**

Comúnmente conocido como ciclo del agua, es un proceso de circulación del recurso hídrico entre los diferentes compartimientos de la hidrósfera. Se trata de proceso dinámico en el cual el agua se moviliza de un lugar a otro y el estado físico (sólido, líquido o gaseoso) también puede ser variable dependiendo de su ubicación.

- **Resistividad Eléctrica**

Es una propiedad física de los materiales y se define como la resistencia para dejar pasar la corriente eléctrica a través de estos. Se mide en ohmio por metro ( $\Omega\text{m}$ ) y su valor nos da la idea de las características del material, un valor alto elevado indica que es un aislante y un valor bajo indica que es un conductor.

- **Tomografía Eléctrica**

Es una técnica geofísica utilizada para el estudio del subsuelo identificando las variaciones de resistividad y conductividad de los materiales presentes. Este método es aplicado ampliamente en el campo de exploración de recursos minerales, petróleo, gas natural y agua subterránea.

- **Porosidad**

Es una relación del volumen de espacios vacíos respecto al volumen total de roca o suelo. Normalmente se expresa en porcentaje (%). En hidrogeología, se determina la porosidad de los acuíferos para evaluar su capacidad de contener agua. Los factores que influyen en la porosidad son la forma de los granos, disposición de los granos (empaquetamiento) y tamaños de los granos.

- **Ley de Darcy**

Esta ley describe el flujo del agua a través de medios porosos. Constituye la base científica de la hidrogeología y se define que la velocidad de un líquido es proporcional al gradiente hidráulico a través del coeficiente de permeabilidad.

- **Permeabilidad**

Conocido también como conductividad hidráulica, es la facilidad de un terreno (roca, suelo o ambos) para dejar transmitir el agua a través de éste. Se expresa con unidades de metros por día (m/día) y su variación de valores están influenciados por la porosidad del material y viscosidad del fluido.

- **Temperatura**

Magnitud física que mide el grado de agitación de las partículas de un material. Está relacionado con la energía cinética y refleja la cantidad de calor. Se mide en grados centígrados (°C) o Kelvin (K). Este parámetro es variable siendo en superficie dependiente de las condiciones atmosféricas y en profundidades varía de acuerdo al gradiente geotérmico.

- **Conductividad Eléctrica**

Es una propiedad física de los materiales que consiste en dejar pasar la corriente eléctrica a través de éstos. Su unidad es el microsiemens por centímetro (uS/cm) y es inverso a la resistividad eléctrica. En las aguas superficiales o subterráneas se mide la facilidad del agua para conducir la corriente a través de los iones disueltos.

- **Potencial de Hidrógeno (pH)**

Es la medida del grado de acidez o alcalinidad de una sustancia. Su escala de valores varía entre 0 y 14, siendo el 7 neutro. Las aguas subterráneas varían normalmente entre 6.5 y 8.5.

- **Acuífero**

Formación geológica capaz de almacenar y dejar fluir el agua en cantidades importantes. Está caracterizado por la porosidad y permeabilidad y se clasifican en libres, confinados y semiconfinados.

- **Acuífugo**

Formación geológica carente de agua, no permitiendo el flujo de este último.

- **Acuitardo**

Formación geológica semipermeable que contiene cantidades de agua importantes, pero la transmite con dificultad.

- **Perforación**

Es la ejecución de un hueco o sondaje en un terreno con diferentes fines económicos o investigativos. Es de diámetro y profundidad variable y puede ser ejecutado de manera rotativa o rotopercusivo.

- **Testigo**

Muestras de roca de forma cilíndrica recuperadas durante el proceso de perforación.

- **Detritus**

Muestra de roca triturada proveniente de la perforación.

- **Piezómetro**

Es un instrumento sencillo colocado dentro de un sondaje perforado para medir el nivel de agua de un acuífero. Normalmente este material es de PVC. Son de diámetros menores a 6 pulgadas.

- **Pozo**

Es un instrumento complejo que se utiliza para poder extraer agua de un acuífero identificado. Son generalmente de diámetro superiores a 6 pulgadas y para su funcionamiento usan sistema de bombeo eléctrico.



## **CAPÍTULO III**

### **HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

#### **3.1 Hipótesis**

Al realizar estudios hidrogeológicos caracterizando el subsuelo de una operación minera se establecerá la disponibilidad de agua subterránea.

#### **3.2 Operacionalización de Variables**

##### **3.2.1 Variable Dependiente (VD)**

Disponibilidad de agua subterránea.

##### **3.2.2 Variable Independiente (VI)**

Características del subsuelo.

##### **3.2.3 Indicadores**

- Fuentes y calidad del agua superficial y subterránea.
- Ensayos hidrogeológicos.
- Descripción geológica del acuífero.
- Evaluación de las líneas geofísicas.

- Demanda de agua de la Unidad Minera.

*Tabla 3.1 Operacionalización de Variables*

<b>VARIABLES</b>	<b>INDICADORES</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• VD: Disponibilidad de agua subterránea.</li> <li>• VI: Características del subsuelo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuentes y calidad del agua superficial y subterránea.</li> <li>• Ensayos Hidrogeológicos.</li> <li>• Descripción geológica del acuífero.</li> <li>• Evaluación de las líneas geofísicas.</li> <li>• Demanda de agua de la Unidad Minera.</li> </ul>

*\*Fuente: Elaboración propia*

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **4.1 Tipos y Diseño de Investigación**

##### **4.1.1 Enfoque**

El tipo de enfoque utilizado para esta investigación se considera aplicativo que es según lo experimentado, las teorías generales y aplicando conocimientos sobre la extracción de agua a través de un estudio de las características del acuífero. Hurtado (2010) hace mención respecto al nivel aplicativo que es un tratamiento de solución a un problema de la sociedad o del sector privado para lograr un resultado favorable y cambiar de forma positiva la realidad. Este tipo de investigación se centra en hallar mecanismos o puntos estratégicos que permitan cumplir un objetivo.

Para comprender este tipo de investigación se debe conocer el marco teórico y se enriquece mediante los avances científicos o descubrimientos asociados para a partir de ello buscar posibles soluciones a un problema en particular.

#### **4.1.2 Alcance**

La presente investigación tiene un alcance correlacional, dado que asocia dos variables: características del subsuelo y extracción de agua subterránea, en una determinada zona a fin de cumplir o no la hipótesis: al realizar estudios hidrogeológicos caracterizando el subsuelo de una operación minera se establecerá la disponibilidad de agua subterránea.

#### **4.1.3 Diseño de la Investigación**

Con la finalidad de resolver el problema de abastecimiento de agua subterránea y garantizar su disponibilidad mediante la caracterización hidrogeológica del subsuelo en la Unidad Minera aurífera El Toro, este estudio constituye una investigación de tipo experimental.

La investigación experimental es un enfoque científico de la investigación con el empleo de una o más variables independientes y se utilizan en una o más variables dependientes para describir su resultado sobre estas últimas. La relación entre estos dos tipos de variables se suele evaluar para alcanzar las conclusiones razonables y ayudar a los investigadores (Hurtado, 2010).

#### **4.2 Unidad de Análisis**

En este estudio la unidad de análisis es la Unidad Minera El Toro, administrada por Summa Gold y está localizada en el distrito de Huamachuco, provincia de Sánchez Carrión, departamento de La Libertad – Perú.

#### 4.2.1 Características Específicas

Desde el punto de vista geológico el yacimiento se clasifica en epitermal de Baja Sulfuración (LS) y pórfido de Cu – Au; emplazado en los estratos de las formaciones Chimú, Santa – Carhuaz y Farrat. Formado por rocas andesíticas y con un control estructural en dirección noroeste, la mineralización se halla diseminada en las microfracturas y brechas. La Unidad Minera pertenece a la franja de yacimientos epitermales de oro localizados en intrusiones subvolcánicas de rocas sedimentarias del Cretácico, teniendo en el área mineralizada de Alto Chicama los principales yacimientos auríferos como Lagunas Norte, La Arena, Shahuindo, Santa Rosa, La Virgen (Tumialán, 2003; Chirif y Sang Mo, 2007; Vallance et al., 2018).

Hidrográficamente, el área de estudio se emplaza en las subcuencas río Grande y río Curgos, ambos pertenecientes a la cuenca Crisnejas. En la subcuenca río Grande están los componentes de la Unidad Minera mientras que la subcuenca río Curgos abarca las áreas exploratorias del proyecto. Las zonas donde se realizó la caracterización hidrogeológica y se evaluó el modelo conceptual se sitúa en la subcuenca río Grande y específicamente en las microcuencas Comúmbamba (Shiracmaca) y Cámish (Coigobamba) con un área aproximada de 51.47 km<sup>2</sup>.

### 4.3 Matriz de Consistencia

Tabla 4.1 Matriz de Consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables		Indicadores
			Dependiente	Independiente	
¿Cómo se puede satisfacer la demanda de agua requerida por una unidad minera aurífera mediante una caracterización hidrogeológica integral de la zona?	Establecer la disponibilidad de agua subterránea para la unidad minera.	Al realizar estudios hidrogeológicos caracterizando el subsuelo de una operación minera se establecerá la disponibilidad de agua subterránea.	Disponibilidad de agua subterránea.	Características del subsuelo.	Fuentes y calidad del agua superficial y subterránea. Ensayos hidrogeológicos. Descripción geológica del acuífero. Evaluación de las líneas geofísicas. Demanda de agua de la unidad minera.

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO V

### DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

#### 5.1 Área de Estudio

##### 5.1.1 Ubicación

La Unidad Minera El Toro se ubica en el Distrito de Huamachuco, capital de la Provincia de Sánchez Carrión, perteneciente a la Región La Libertad (figura 5.1). La propiedad tiene aproximadamente 4500 hectáreas correspondiendo a 09 concesiones mineras, a una altitud que varía entre los 3200 msnm y 4000 msnm. En la tabla 5.1 se presenta las coordenadas de la Unidad Minera.

*Tabla 5.1 Coordenadas Unidad Minera El Toro*

Vértice	Coordenadas UTM – WGS 84	
	Este	Norte
A	824110	9140400
B	837650	9140400
C	837650	9125900
D	824110	9125900

*\*Fuente: Elaboración Propia*



Figura 5.1 Ubicación del Área de Estudio

\*Fuente: Elaboración propia

### 5.1.2 Accesibilidad

El acceso desde la ciudad de Trujillo es a través de una pista asfaltada de 180 km hasta Huamachuco, luego se tomará una carretera afirmada de 4 km hasta la Unidad Minera. En total desde la ciudad de Trujillo el tiempo promedio es de 4 horas con camioneta hasta el área de estudio.



### **5.1.3 Clima**

El clima en la Unidad Minera y en la ciudad de Huamachuco en general es templado y con lluvias bien marcadas entre los meses de diciembre y marzo. Los meses donde se producen heladas durante las noches son entre mayo y agosto. La precipitación promedio anual de la zona es de 1042.5 mm. El promedio anual de temperatura máxima y mínima varía entre los 6.5 °C y los 18.5 °C.

## **5.2 Geología del Área de Estudio**

### **5.2.1 Geología Regional**

El Perú se enmarca dentro de dos placas tectónicas convergentes, la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca, el cual, en base al choque tectónico entre ambas, ha ayudado a la formación de la Cordillera de los Andes, así como al fallamiento y plegamiento de las capas de las diferentes litologías en todo el Perú.

A nivel regional, el área de estudio se enmarca en la zona norte de la Cordillera Occidental de los Andes en la divisoria de aguas de los flancos occidental y oriental. En la figura 5.2 se observa como la Unidad Minera se emplaza en la franja sedimentaria mesozoica de la cordillera occidental, con una altitud promedio de los 3200 m.s.n.m. ésta se encuentra geológicamente ubicado dentro de rocas siliciclásticas (areniscas cuarzosas, horizontes calcáreos y niveles de carbón), comprendidas entre el Jurásico Superior (secuencia pelíticas y base de la estratigrafía del Proyecto), hasta el Cretácico Superior; las cuales se encuentran cubiertos por depósitos cuaternarios.

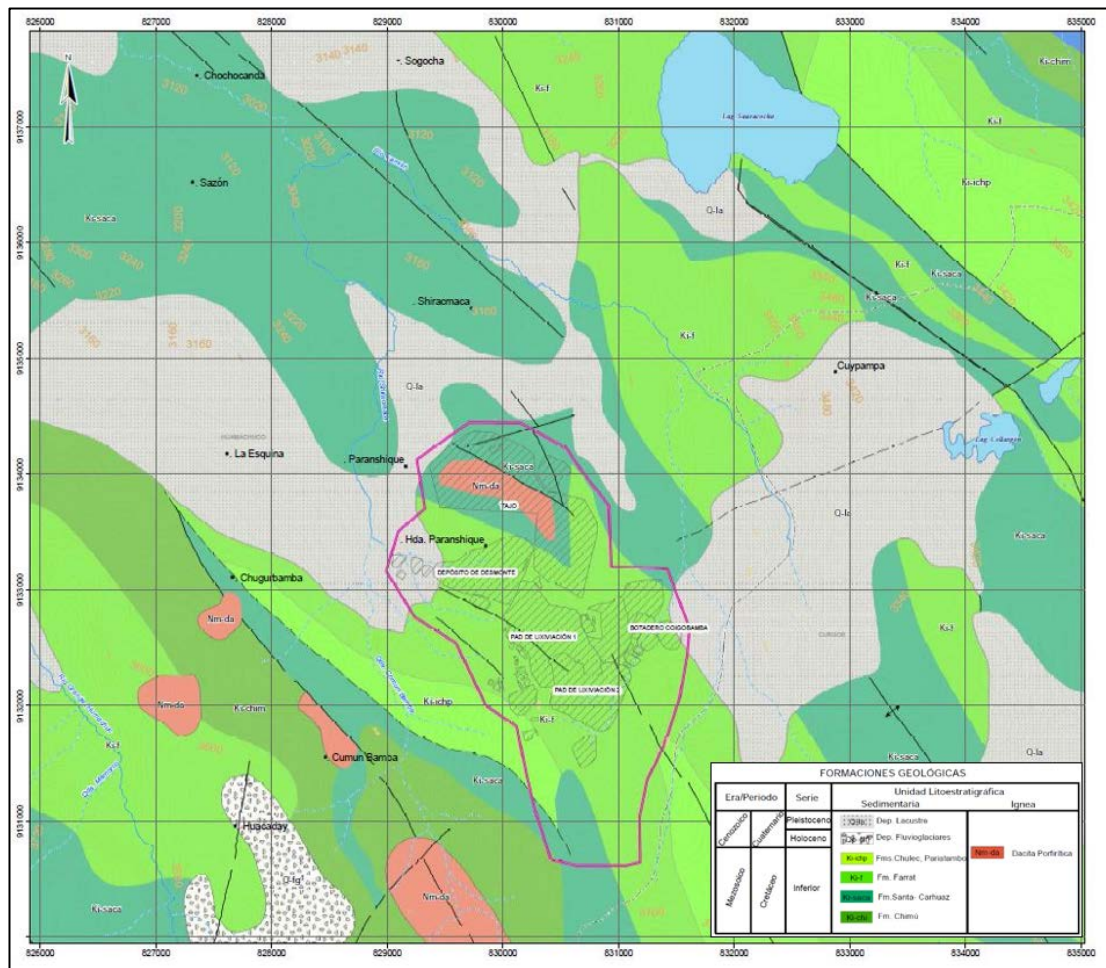


Figura 5.2 Geología Regional del área de estudio

\*Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2 Estratigrafía

En la tabla 5.2, se presentan las unidades litoestratigráficas identificadas para todo el ámbito regional del Proyecto.

En la figura 5.3 se observa la columna estratigráfica de la zona de estudio usado como guía para referencias geológicas en el área de interés.

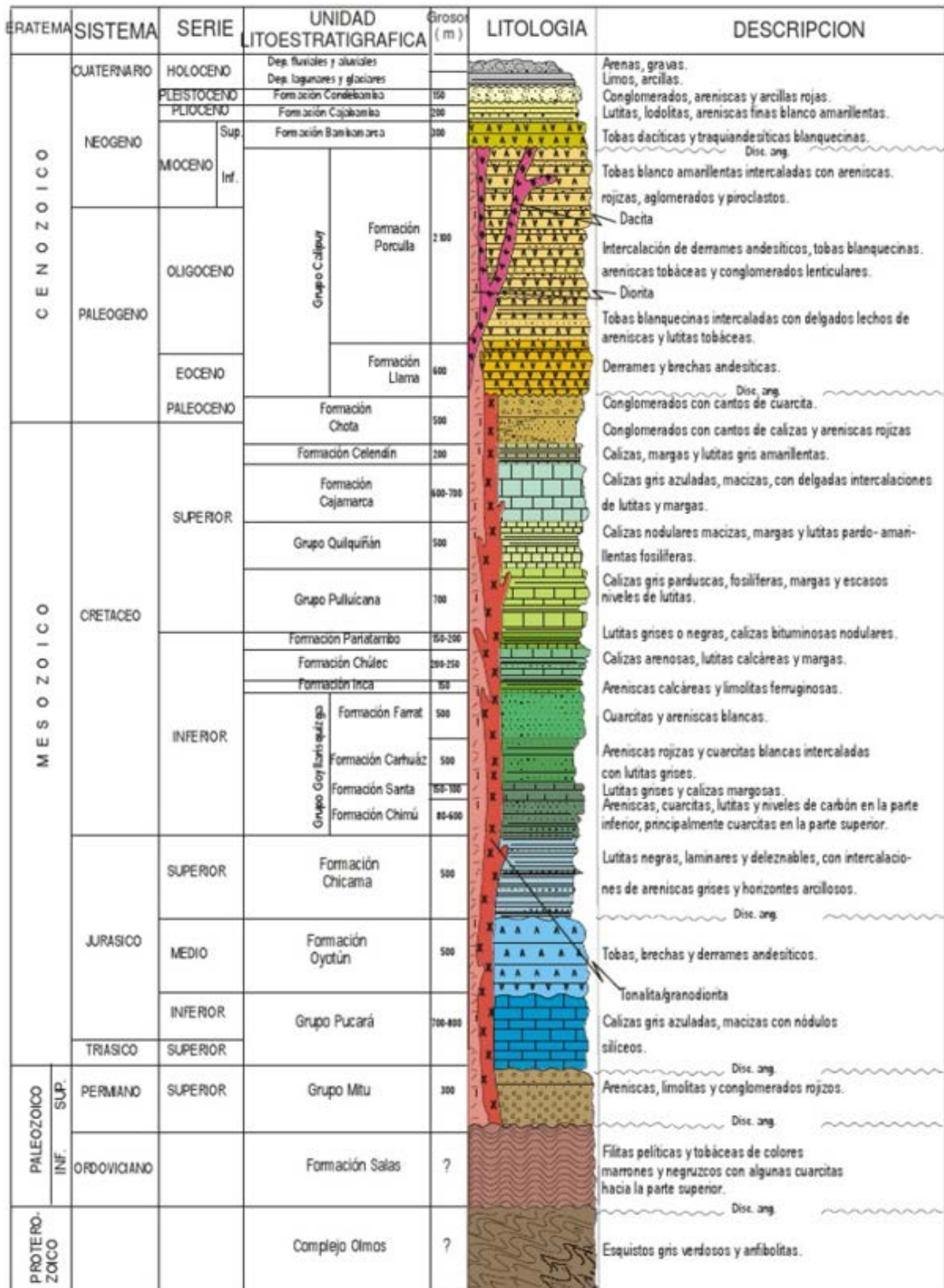


Figura 5.3 Columna Estratigráfica del área de estudio

\*Fuente: Rivera, L. (1980)

Tabla 5.2 Unidades Litoestratigráficas Regionales

Era/Periodo		Serie	Unidad Litoestratigráfica	Simbología	Potencia (m)	Litología
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósito Lacustre	Q-la	-	Arenas, limos, lentes de grava
		Pleistoceno	Depósito Aluvial	Q-al	-	Gravas, arenas y limos
			Depósito Fluvioglacial	Q-fg	-	Matriz heterogénea grava, arenas y limo
	Terciario	Superior	Formación Condebamba	TsQ-co	50 - 100	Conglomerado
Mesozoico	Cretácico	Superior	Grupo Pullucana	Ks-p	1000	Caliza gris
		Inferior	Formación Pariatambo	Ki-ichp	150 - 200	Caliza, lutita negra
			Formación Chúlec		200 - 250	Caliza, lutita negra
			Formación Inca		200	Arenisca, lutita
			Formación Farrat	Ki-f	300 - 500	Arenisca blanca
			Formación Carhuaz	Ki-saca	400 - 500	Arenisca, lutita
			Formación Santa		200	Lutita, caliza gris
			Formación Chimú	Ki-chim	400 - 600	Arenisca blanca
	Jurásico	Superior	Formación Chicama	Js-chic	500 - 1000	Lutita gris

\*Fuente: Elaboración propia

### Formación Chicama (Js – chic)

Esta formación corresponde al Jurásico Superior y está conformada por lutitas negras, laminares y deleznales, intercalaciones de areniscas, arcillas y material tufaceo. La presencia de sedimentos terrigenos indica un desarrollo de una cuenca poco profunda y más dispuesto a la erosión.

### Formación Chimú (Ki – chim)

Esta formación (Ver figura 5.4) con espesor de 400 a 600 m corresponde al cretácico superior y está conformada por secuencia de arenisca cuarzosa con intercalaciones de limolitas grises con arcillitas. También es importante mencionar

algunos niveles de carbón en la parte media y base de esta formación. La formación es distinguible por su topografía abrupta, que se distingue a manera de escarpas.



*Figura 5.4 Vista de afloramiento de la formación Chimú cerca de la laguna Cahuadán al norte de la zona de estudio*

*\*Fuente: Elaboración propia*

### **Formación Santa – Carhuaz (Ki – saca)**

Esta formación (figura 5.5) con potencias aproximadas entre los 300 a 500 m corresponde al cretácico inferior, se distribuyen formas redondeadas y onduladas con dirección NO – SE. La formación Santa está conformada por lutitas fosilíferas y calizas con una alternancia de arcillitas, limolitas y areniscas grisáceo de grano fino. La formación Carhuaz está conformada por una intercalación de lutitas, limolitas y areniscas, fisurables con resistencia baja y fracturadas, dispuestos en estratos delgados y con óxido de hierro.



*Figura 5.5 Afloramiento de la formación Santa Carhuáz, cerro Rafachuz*

*\*Fuente: Elaboración propia*

### **Formación Farrat (Ki – f)**

Esta formación (figura 5.6) con potencia de 500 m pertenece al Cretáceo Inferior y está conformado por areniscas cuarzosas de grano grueso con delgadas capas de limolita y texturas laminadas y masivas. Para su reconocimiento en campo, debido a su resistencia a la erosión, es necesario hacer una correlación con la formación Santa – Carhuáz. Este tipo de formación corresponde a un ambiente playero.



*Figura 5.6 Afloramiento de la formación Farrat cerca de la Laguna Negra*

*\*Fuente: Elaboración propia*

### **Formación Inca – Chúlec – Pariatambo (Ki – ichp)**

Esta formación corresponde al Cretáceo Inferior. Está conformado por una secuencia de areniscas calizas y lutitas del Albiano. La Formación Inca suprayace en forma concordante a la formación Farrat y se compone de una serie de estratos de arenisca cuarzosa, limolitas y lutitas ferruginosas, con textura laminada y fracturamiento de moderado a intenso. La formación Chúlec está constituido por capas delgadas de calizas nodulares y arenosas, con intercalaciones de lutitas y calizas azulinas estratificadas en la parte superior. Por último, la formación Pariatambo está conformada por una secuencia de calizas calcáreas y lutitas negras bituminosas estratificadas en capas delgadas.

Es importante mencionar que estas formaciones para fines prácticos en este estudio se consideran en un mismo grupo, ya que en la visita a campo no pudo ser fácilmente distinguible. La potencia varía entre 400 a 500 m.

### **Grupo Pulluicana (Ks – p)**

Este grupo corresponde al Cretácico Superior, haciéndose visible en la parte norte de la zona de estudio. Consiste de bancos de caliza gris clara. Esta caliza es algo lutácea, nodular y con presencia abundante de fragmentos fósiles. Se presenta en discordancia paralela a la formación Pariatambo. La potencia aproximada es de 1000 m.

### **Formación Condebamba (TsQ – co)**

Esta formación corresponde al Terciario Superior y está constituido por depósitos de arenas y conglomerados. Se puede observar su afloramiento en los flancos del valle Chusgón en el área de El Pallar a una altitud de 2900 msnm. Esta formación

no presenta plegamientos, pero ha sido afectada por reactivación de fallas preexistentes, originando desplazamientos, flexuras y erosión en determinadas zonas.

#### **Depósitos Fluvioglaciares (Q – fg)**

Estos depósitos están conformados por pequeñas morrenas de origen glaciar y fragmentos calcáreos del Albiano y Cretáceo Superior. El límite inferior de estas morrenas queda cerca de los 3600 msnm. Según estimaciones hechas previamente se calcula una potencia variable entre los 20 a 80 m.

#### **Depósitos Aluviales (Q- al)**

Estos depósitos están compuestos por material conglomerádico de guijarros redondeados a subredondeados en una matriz de arena y arcilla. Estos depósitos son considerados compactos y da presencia a barrancos verticales.

#### **Depósitos Lacustres (Q – la)**

Estos depósitos están ubicados en diferentes lugares y niveles, dispuestos en bancos constituidos por material fino areno – arcilloso, intercalado con lentes de gravas y conglomerados delgados. Estos depósitos lacustres involucran materiales depositados casi en forma horizontal en pequeñas cuencas ocupadas anteriormente por lagunas.

#### **Rocas Intrusivas**

##### **- Diorita – Andesita (Nm – di)**

Estos afloramientos, asociados a fallas y fracturas, en forma de pequeños stocks o diques de textura variable se encuentran en diferentes zonas. En otras áreas se



presenta como microdiorita, en cambio en lugares lejanos corresponden a una roca hipoabisal andesítica.

- **Dacita (Nm – da)**

Estas intrusiones que se emplazan a lo largo del rumbo de plegamiento y estratificación, están conformadas por cuerpos de menores dimensiones respecto a las dioritas – andesitas. Las dacitas son de coloración gris clara con una textura porfirítica y matriz microcristalina. En muchos sectores la roca ha sufrido alteración hidrotermal.

### **5.2.3 Geología Estructural**

La zona de estudio, desde el punto de vista regional, es el resultado de esfuerzos ocurridos en la Orogenia Andina, caracterizado por el periodo magmático post – tectónico efusivo y el posterior emplazamiento del Batolito de la Costa. Los esfuerzos han generado tectonismo de compresión de dirección NE – SO, dando como resultado el arqueamiento y el intenso plegamiento de la secuencia sedimentaria del Mesozoico; además de lineamientos, fallas y cabalgamientos.

La actividad tectónica que ocurrió a fines del Mesozoico hasta el Neógeno ha generado un intenso plegamiento de la secuencia sedimentaria. Las rocas más plegadas son las secuencias calcáreas y pelíticas de las formaciones Santa, Carhuáz, Chúlec y Pariatambo.

Durante el Cenozoico, ocurrieron eventos efusivos de volcanismo en un régimen compresional, ocasionando la aparición de centros volcánicos.

#### 5.2.4 Geología Histórica

En el Jurásico se depositó una cuenca al oeste que es invadida por el mar y al este una parte positiva que no fue cubierto. Se depositan más de 1000 metros (Formación Chicama). En el Neocomiano – Aptiano se depositan sedimentos de 1500 metros de potencia en la cuenca, dando como resultado al Grupo Goyllarisquizga y en la plataforma unos 200 metros de la secuencia clástica. A fines del Aptiano y comienzo del Albiano, la cuenca se empieza a hundir y el mar inunda la cuenca y en forma progresiva la parte positiva, consecuentemente se depositan las facies calcáreo – arenoso de la formación Inca, luego la secuencia carbonatada de la Formación Chúlec y Pariatambo.

Esta deformación compresiva principal de los sedimentos de la cuenca sucedió a comienzos del Terciario, plegándolos intensamente y ocasionando estructuras de corrimiento al nivel de las lutitas Chicama, sobre el flanco occidental del geoanticlinal del Marañón, el que reaccionó con una serie de fallas de alto ángulo ondulando suavemente su cobertura.

El tercer movimiento deformatorio del Ciclo Andino precede al emplazamiento de los cuerpos del batolito y ondula a las rocas volcánicas, y está relacionado con un fallamiento de bloques de alto ángulo y con la mineralización. Un intenso y largo periodo de peneplanización cíclica en el intervalo Oligoceno – Plioceno siguió toda la actividad magmática – tectónica anterior, dando como resultado varias superficies de erosión, entre las cuales la primera es conocida como superficie Puna, elevada hasta alturas que promedian los 4200 msnm; ello significa un ascenso de más de 3000 msnm de su posición original, el mismo que aún continúa en la actualidad, debido a lo cual

se está produciendo la profundización de los valles, dando a la cadena andina una topografía accidentada.

Durante el periodo de ascensión de los Andes, se cubrió parte de la superficie con el volcánico Huambo y por los sedimentos lacustres Cajabamba y Condebamba, que también fueron afectados por la reactivación de fallas. Las partes altas del área fueron afectadas por la glaciación del Pleistoceno, que en cierto modo contribuyó a conformar el aspecto geomorfológico de la región. Teniendo, así como resultado que los vestigios que se encuentran ahora corresponden a los efectos de la última regresión de los glaciares.

#### **5.2.5 Geomorfología**

En la Unidad Minera, como resultado de procesos tectónicos se generaron pliegues y fallas los cuales por efectos de meteorismo e intemperización originaron las siguientes unidades geomorfológicas (ver figura 5.7).

##### **- Zona de Montañas**

Se caracteriza por presentar zonas positivas de colinas alineadas con rumbo NNO – SSE y NNE – SSO, presentando un modelado de erosión diferencial y conformados por afloramientos de areniscas cuarzosas muy fracturadas y lutitas siguiendo una estratificación de rumbo NO – SE, y que se hallan bordeando la zona suroeste.

- **Colinas**

Se puede observar en ambos márgenes de la zona de estudio y corresponde a taludes de colinas alineadas por presentar pendientes fuertes donde sobresalen lomadas. En otras zonas sin embargo está cubierto por depósitos glaciares y aluviales.

- **Terraza Aluvial**

Comprende el lecho de los ríos y es donde se encuentra la ciudad de Huamachuco. Se presenta como una plataforma sedimentaria formada por el cauce del río y rodeada de las zonas de montaña.

- **Depósito Lacustre**

Comprende la zona SE de la zona de estudio y está conformado por las lagunas Sausacocha y Collasgón. Presenta sedimentos finos alojados en la cuenca lacustre y sus márgenes.

- **Valle Fluvial**

Comprende el lecho de los ríos de régimen variable que determina su extensión. En algunos casos el valle es de geometría angosta. Producto de este tipo de geoformas es favorable el desarrollo de buena vegetación.

- **Quebrada**

Comprende los desfiladeros, aberturas alargadas o pasos estrechos entre montañas. Se presentan con pendientes moderadas a fuertes.

## - Cono Aluvial

Conocido también como abanico aluvial, comprende la parte final de una quebrada y su característica principal está dado por la pendiente suave y el origen sedimentario en su formación.

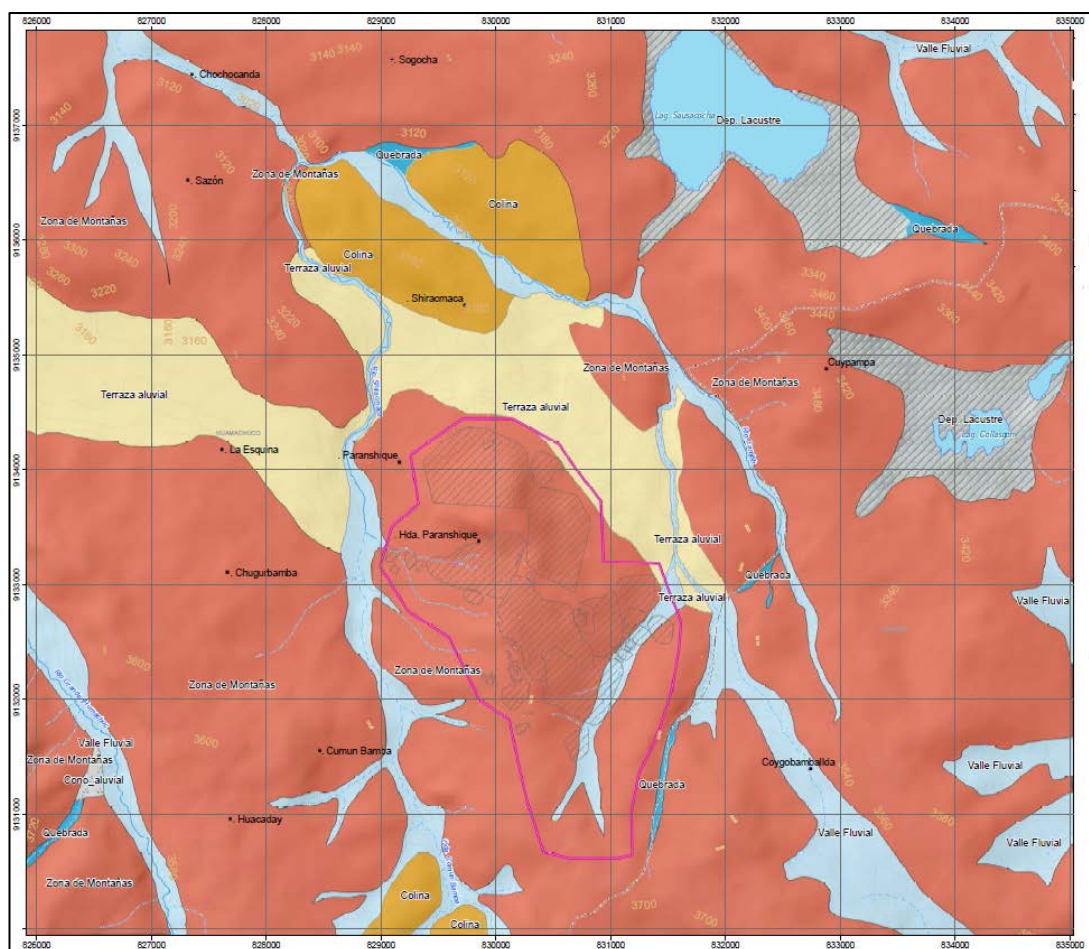


Figura 5.7 Mapa Geomorfológico del área de estudio.

\*Fuente: Elaboración propia

### 5.3 Recolección de la Información

Se revisó información bibliográfica referente a la geología local, registro de perforaciones, ensayos realizados, instalación de piezómetros. Estos registros de datos se hicieron a partir de estudios anteriores, reportes técnicos, informes mensuales y

trabajos de gabinete. Es preciso mencionar que la Unidad Minera cuenta con pocos años en la actividad extractiva y todavía existen varios protocolos, estudios e informes que deben implementarse. La regulación de parte de los organismos estatales y los estándares internacionales están ayudando a ordenar correctamente la información generada.

### **5.3.1 Geología Local**

En la zona existen principalmente afloramientos de rocas sedimentarias y volcánicas intrusivas los cuales han traído la mineralización que se determinó por la presencia de vetas o filones de sulfuros de plata, zinc y plomo. Estas rocas se encuentran alteradas por alteraciones hidrotermales.

En la variedad de minerales sobresalen el oro nativo (Au), esfalerita (ZnS), pirita (Fe<sub>2</sub>S), cuarzo (SiO<sub>2</sub>) y arcillas. El yacimiento aurífero de la Unidad Minera está asociado por la oxidación de la pirita y sus procesos de alteración en óxidos de hierro como limonita, goethita y jarosita.

#### **- Secciones Geológicas**

En la información recopilada se revisó las secciones geológicas elaboradas por el Área de Geología. En las secciones hidrogeológicas (Ver Anexos) se visualizan una representación a escala del subsuelo del área de estudio y algunas características hidrológicas que se le implementaron para interpretaciones posteriores. Su realización tiene como base la geología regional y ayudan a comprender el futuro contexto hidrogeológico.

Por ejemplo, la sección geológica AA' (figura 5.8) tiene una orientación NO – SE y una longitud aproximada de 19 km según la escala. En su trayecto se aprecia afloramientos de distintas formaciones de distantes edades.

Se visualiza la intrusión del cuerpo dacítico en las formaciones Santa – Carhuaz y Farrat originando estos contactos la formación del yacimiento de oro diseminado en el lugar de estudio. La presencia de plegamientos y fracturas en la zona de análisis sugieren desplazamientos a causa del tectonismo.

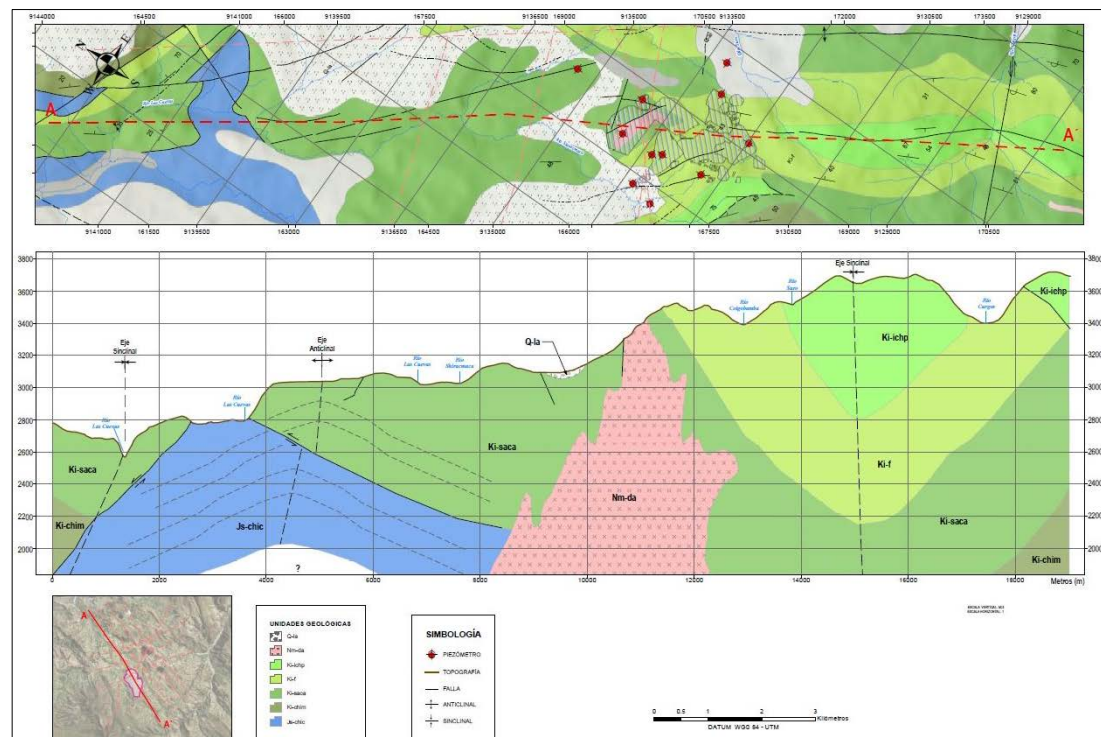


Figura 5.8 Sección geológica AA'

\*Fuente: Elaboración propia

### 5.3.2 Trabajos de Perforación

La perforación es la base para conocer el subsuelo. En hidrogeología las perforaciones son útiles para conocer la roca en profundidad y es el método más directo (eficiente) en la identificación de los niveles de agua subterráneos (posibles acuíferos).

En la zona de estudio se realizaron campañas de perforación hidrogeológicas con el fin de instalar piezómetros tipo Casagrande (PVC). Estas perforaciones cuentan con su registro respectivo y tienen características diferentes a las perforaciones con fines exploratorios en el ámbito minero.

Los taladros con fines hidrogeológicos fueron perforados usando solamente agua pura como aditivo por el método diamantino rotativo donde el diámetro de los testigos son generalmente HQ (96 mm) y el diámetro del casing o revestimiento es HW (117.4 mm). En algunos casos especiales por motivos operacionales o dificultades con el terreno (atrapamiento) el diámetro de perforación fue NQ (75.7 mm).

Los pozos perforados tuvieron una longitud variable entre los 50 y 200 m siendo un total de 12 los sondajes ejecutados en la campaña 2017. Se hizo el registro litológico de los testigos recuperados y muestras en general.

### **5.3.3 Ensayos Hidrogeológicos**

Durante la perforación de los taladros se fueron realizando los ensayos hidrogeológicos cada cierto tramo según criterio del hidrogeólogo supervisor presente y también la toma de datos de nivel de agua subterránea al inicio y fin de turno. Del mismo modo se anota los parámetros fisicoquímicos del agua proveniente del sondaje para su posterior interpretación.

Los ensayos más comunes usados durante las perforaciones hidrogeológicas son:

- **Lugeon (Packer Test)**

Consiste en el ingreso de un flujo de agua a presión constante en un tramo promedio de 5 m, se mide el consumo de agua con un caudalímetro y se controla con



un manómetro. Estos datos se registran durante un periodo de 10 minutos y se realizan en 5 ocasiones a diferentes presiones calculadas previamente según profundidad y condiciones del terreno perforado (litología y fracturas). Los datos obtenidos son digitalizados en hojas de cálculo configuradas para determinar la conductividad hidráulica de las formaciones atravesadas.

- **Air Lift Test**

Consiste en la inyección de aire de una compresora en el fondo del pozo para expulsar el agua del sondaje y medir a través de transductores de presión la recuperación del nivel de agua. También se toma datos de los volúmenes de agua extraída para determinar el volumen del pozo y capacidad de respuesta.

- **Slug Test**

Es similar al Air Lift y consiste en la inyección de un volumen conocido en el pozo a fin de conocer la respuesta rápida de la roca presente. Esta prueba hidrodinámica también puede realizarse de modo inverso de modo que los análisis se realizan en base al volumen extraído.

En la figura 5.9 se muestra gráfico con el análisis de la permeabilidad (m/d) respecto a la profundidad alcanzada durante la perforación de cada sondaje con el fin de asociar la conductividad hidráulica hallada.

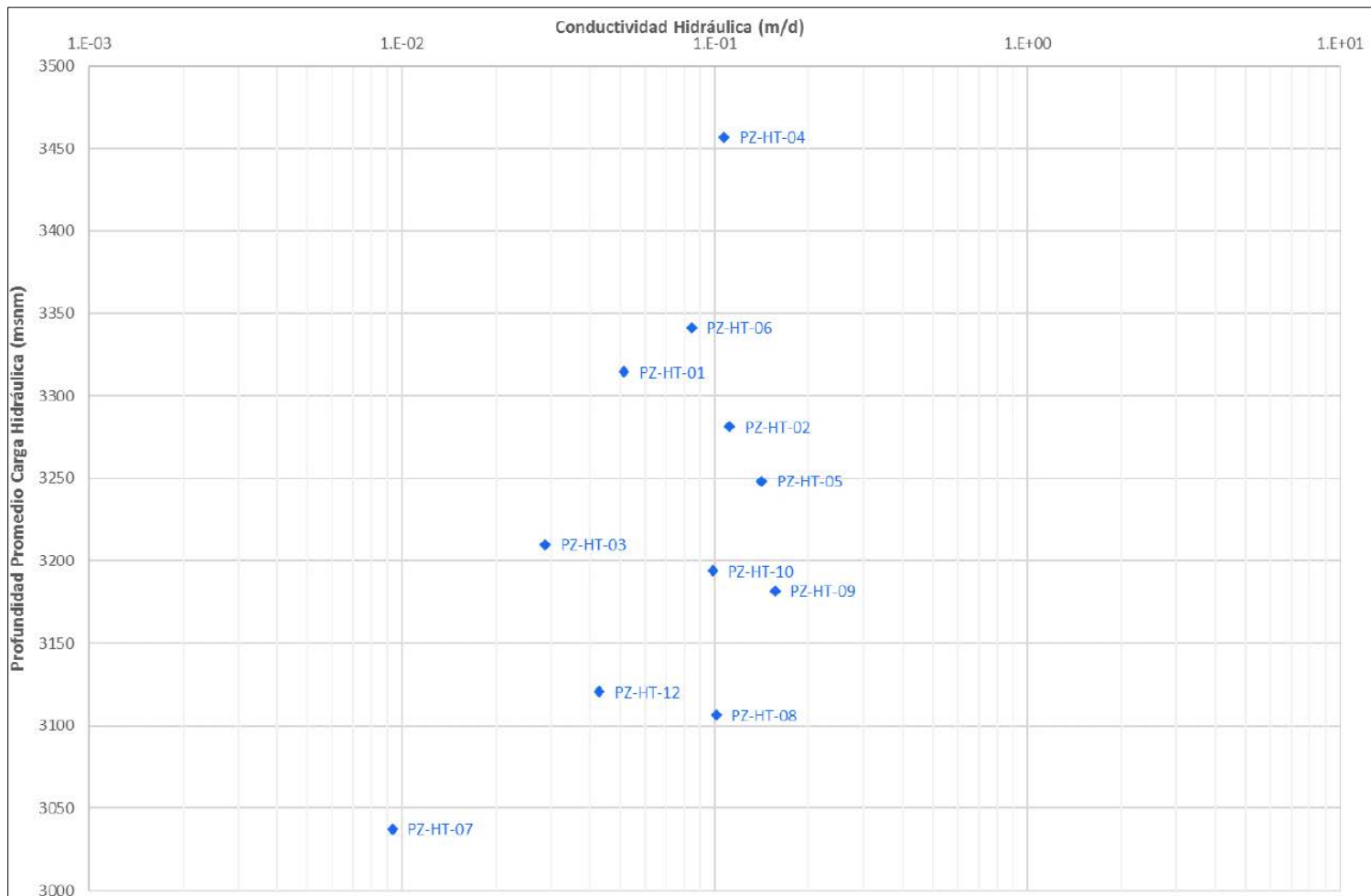


Figura 5.9 Conductividad hidráulica vs altitud

\*Fuente: Elaboración propia

#### **5.3.4 Piezómetros instalados**

Con la perforación terminada, el siguiente paso consiste en la instalación del piezómetro, el cual es un instrumento que es diseñado conceptualmente por el hidrogeólogo de campo presente en base a la litología descrita y ejecutado por la empresa perforista.

El proceso de instalación del piezómetro consta en tuberías de PVC ciegas o ranuradas según diseño previo. La parte más relevante de la instalación es la inyección de materiales en el espacio anular entre el terreno perforado y la parte externa del PVC con la finalidad de tener un piezómetro operativo correctamente. Los materiales vertidos generalmente son gravilla, bentonita en pellets y grouting (mezcla de cemento y bentonita en polvo), siendo la gravilla el más determinante para el correcto funcionamiento ya que el tramo de la tubería ranurada debe coincidir necesariamente con este material.

#### **5.4 Procesamiento de la Información**

Se realizó evaluaciones de registros de estudios presentados y reportes relacionados a la caracterización y disponibilidad de agua subterránea, con lo cual se llega a determinar el objetivo de la presente investigación. Según la experiencia adquirida por el parecido de casos similares a otras operaciones mineras y las actividades realizadas se hará una evaluación en temas considerados esenciales para este estudio.

##### **5.4.1 Inventario de Fuentes de Agua**

Los piezómetros distribuidos en diferentes puntos (tabla 5.3) de la zona de estudio es la única fuente para monitorear las aguas subterráneas.

Tabla 5.3 Inventario de piezómetros instalados operativos

IRHS	Nombre del pozo	Cota de terreno	Coordenadas UTM WGS84-17S		Nivel de Agua	
			Este (m)	Norte (m)	Nivel Estático	
					Prof (m)	m.s.n.m.
Piezómetro	PZ - HT - 01	3362.487	829816.708	9133179.535	--	--
Piezómetro	PZ - HT - 02	3352.143	829715.62	9133341.967	40.75	3311.39
Piezómetro	PZ - HT - 03	3300.254	829733.18	9134013.338	79.09	3221.16
Piezómetro	PZ - HT - 04	3507.088	829915.412	9132373.267	8.29	3498.8
Piezómetro	PZ - HT - 05	3293.501	831366.863	9132905.401	4.52	3288.98
Piezómetro	PZ - HT - 06	3407.672	830898.616	9131967.524	--	--
Piezómetro	PZ - HT - 07	3094.364	830246.484	9135374.461	-1	3095.36
Piezómetro	PZ - HT - 08	3153.659	831300.278	9135902.573	-1.15	3154.81
Piezómetro	PZ - HT - 09	3251.31	828939.668	9132855.286	44	3207.31
Piezómetro	PZ - HT - 10	3273.743	830466.549	9134063.591	49.82	3223.92
Piezómetro	PZ - HT - 12	3200.705	829068.504	9133331.407	-0.9	3201.61
Piezómetro	PZ - HT - 13	3343.34	831916.985	9133153.42	80.43	3262.91

\*Fuente: Elaboración propia

Se registraron los piezómetros habilitados instalados en años anteriores, además de fuentes superficiales como: manantiales, quebradas y ríos detallados en la tabla 5.4.

En la figura 5.10 se observa las principales fuentes de agua los cuales son mostrados por estar más relacionados a la zona de estudio.

#### 5.4.1.1 Monitoreo de Nivel de Agua Subterránea

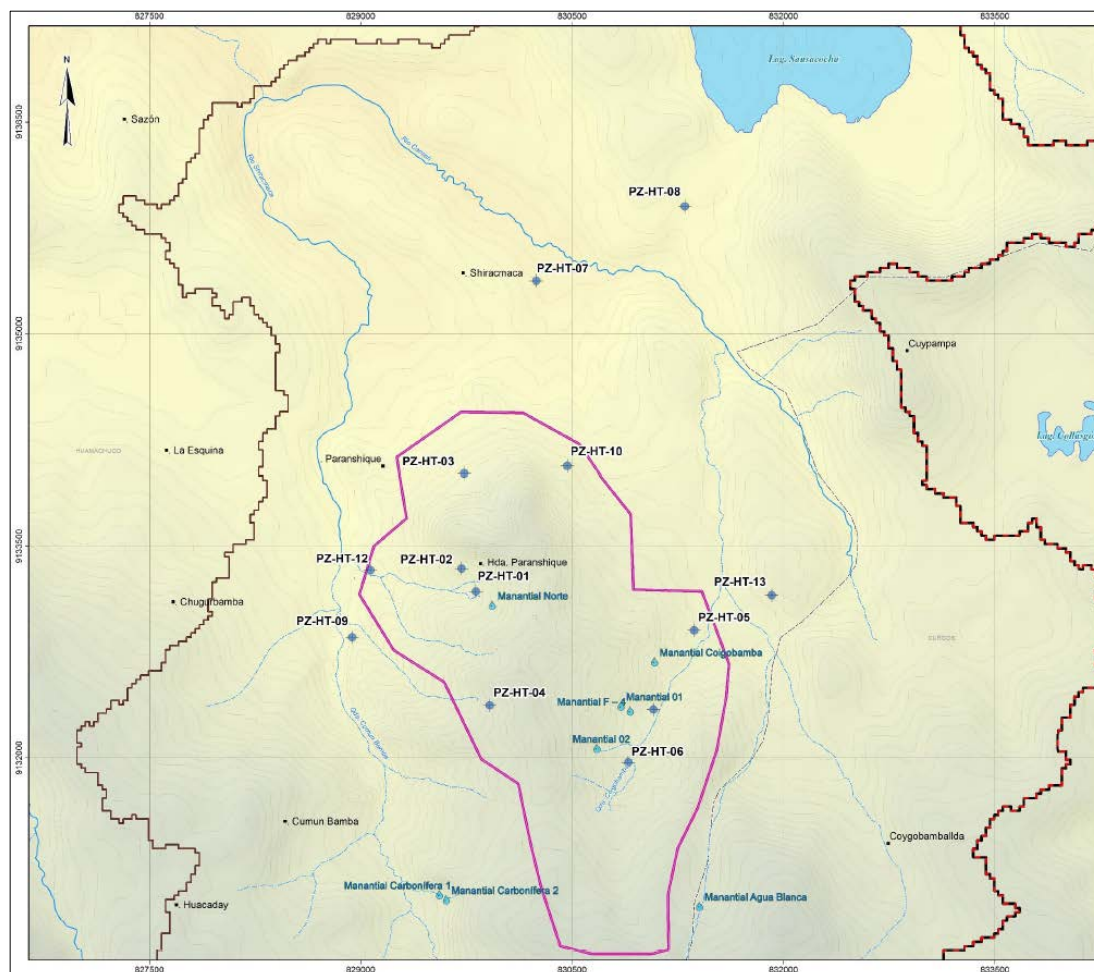
El monitoreo de los niveles de agua subterránea nos proporciona información acerca de la variabilidad de los niveles freáticos provenientes del subsuelo, los cuales nos ayudará a comprender el comportamiento hidrodinámico del acuífero.

Mediante software Excel se compila y se procesa la información de los niveles medidos en los piezómetros de la unidad, se establecen gráficos donde se muestra la variabilidad de los niveles de agua respecto al tiempo.

Tabla 5.4 Inventario de aguas superficiales

IRHS	Nombre del pozo	Coordenadas WGS 84		Cota de terreno (m.s.n.m.)	Caudal (l/s)
		Este (m)	Norte (m)		
Manantial	Manantial 01	830847	9132368	3408	0.08
Manantial	Manantial 02	830678	9132074	3458	--
Manantial	Manantial Agua Blanca	169654	9130964	3587	0.2
Manantial	Manantial Coigobamba	169335	9132686	3363	0.4
Manantial	Manantial F-4	169169	9132335	3393	0.05
Manantial	Manantial Norte	829934	9133084	3416	--
Manantial	Manantial Carbonífera 1	829559	9131032	3457	0.43
Manantial	Manantial Carbonífera 2	829607	9130997	3467	0.26
Manantial	Manantial El Escalón	172991	9138245	3066	0.15
Quebrada	Afloramiento Botadero Norte	829938	9132708	3497	0.01
Río	Río Grande	825902	9132637	3350	294.7
Río	Río Grande Lag. Negra	827338	9127564	3771	176.5
Quebrada	Quebrada Colorada	829143	9131386	3328	172.4
Quebrada	Quebrada Coigobamba	169622	9132763	3312	4.4
Quebrada	Quebrada Chotamalca	834199	9128702	3348	608.95
Quebrada	Quebrada Purpucala	829330	9132569	3346	0.42
Quebrada	Quebrada Huangasparate	170211	9132201	3420	7.5
Río	Curgos	174633	9129679	3268	229.6
Río	Layza	828783	9133044	3174	319.6
Quebrada	La Zarza	169731	9128701	3594	63.4
Quebrada	Cargashe	169714	9128672	3593	5.8
Manantial	Poza 1 Cungunbamba	828932	9129434	3569	2.3
Quebrada	Poza 2 Cungunbamba	829462	9129253	3643	11.55
Manantial	Poza 3 Cungunbamba	829871	9129366	3672	6.83
Quebrada	Quebrada Suro	831428	9131185	3556	0.45
Quebrada	Cungunbamba	829242	9129200	3581	73.6

\*Fuente: Elaboración propia



*Figura 5.10 Principales fuentes de agua inventariadas*

*\*Fuente: Elaboración propia*

En la figura 5.11 se observa la representación espacial de la variación de los niveles piezométricos desde el año 2012 hasta el año 2016 que corresponden a piezómetros ya inoperativos debido a construcción y desarrollo de la Unidad Minera El Toro, en el gráfico se denota la casi nula variación de los niveles medidos de los piezómetros en general y que serán útiles al momento de elaborar el modelo conceptual.

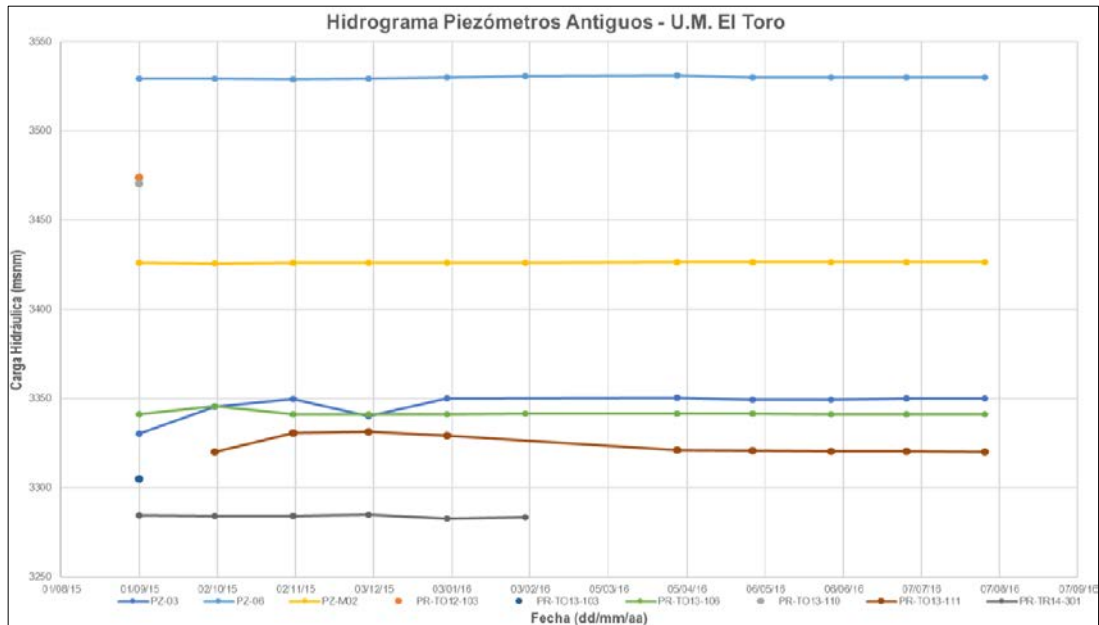


Figura 5.11 Hidrograma de niveles de agua subterráneos de piezómetros antiguos  
 \*Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo en la figura 5.12 se muestra el hidrograma de los piezómetros instalados en el año 2017 (poca variación) y que se encuentran operativos.

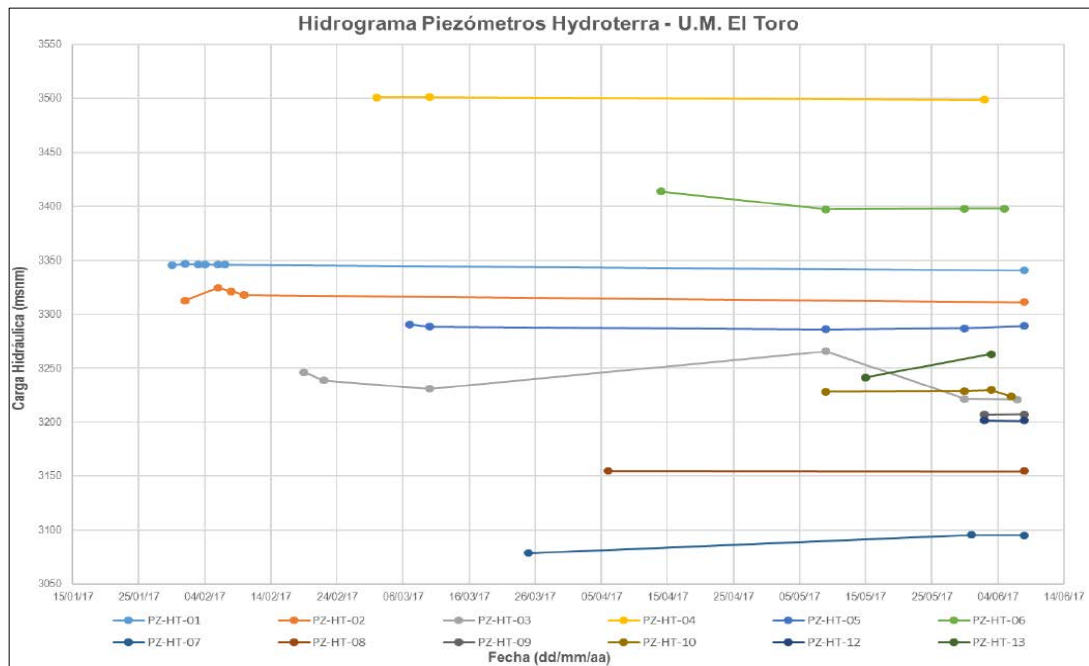


Figura 5.12 Hidrograma de niveles de agua subterráneos de piezómetros operativos  
 \*Fuente: Elaboración propia

## 5.4.2 Geofísica

En un estudio hidrogeológico es importante la ejecución de trabajos de prospección geofísica para la ejecución de pozos exploratorios. El método usado en esta ocasión fue el de tomografía eléctrica con el propósito de determinar la profundidad de nivel freático a detalle. Al ser un método indirecto se definen e identifican a través de las resistividades bajas las zonas anómalas, las cuales podrían sugerir la presencia de zonas saturadas.

### 5.4.2.1 Ubicación de las Líneas Geofísicas

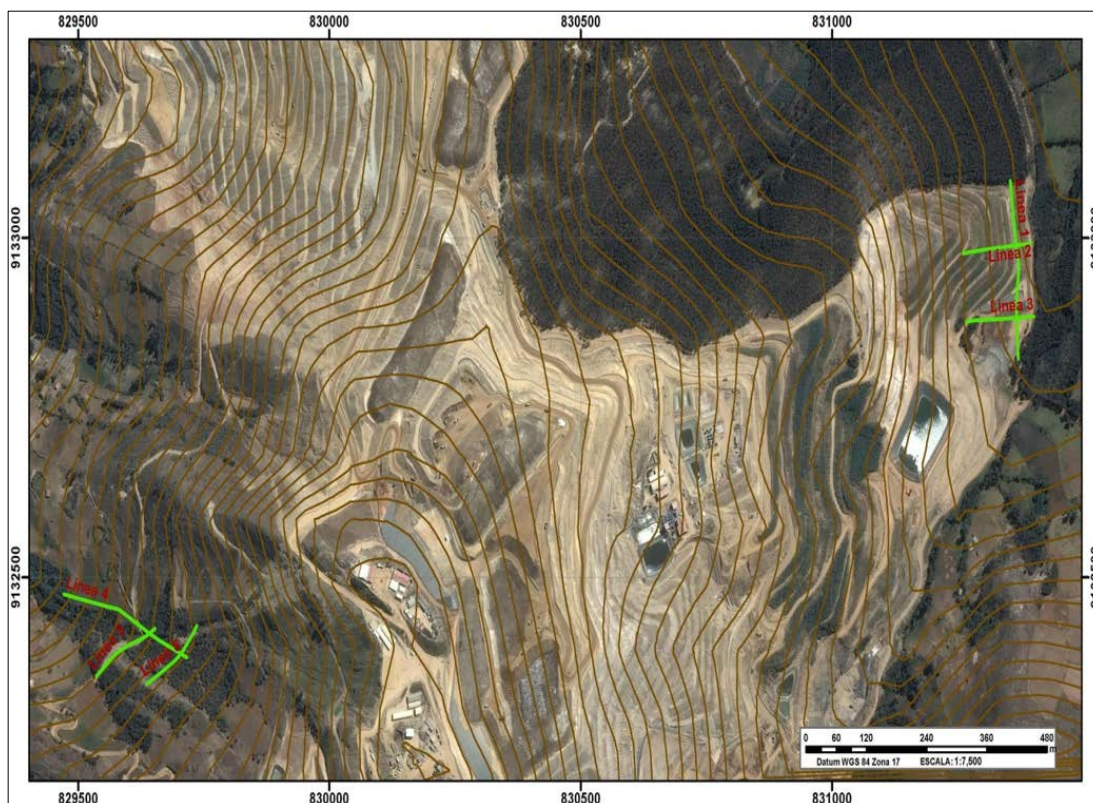
Son cables de recepción y de corriente a lo largo del área de estudio, éstos poseen electrodos (varillas aceradas) separados cada 10 metros los cuales registran los datos medidos. En la figura 5.13 se ubica la distribución de las líneas geofísica en las zonas Coigobamba (parte superior derecha) y Shiracmaca (parte inferior izquierda). También se muestran las coordenadas de las líneas en la tabla 5.5.

*Tabla 5.5 Coordenadas líneas geofísicas*

Línea	Punto	Coordenadas UTM WGS 84 Zona 17S		Elevación
		Este (m)	Norte (m)	
Línea 1	Inicio	831354.60	9133084.30	3293.11
	Fin	831370.60	9132822.20	3293.94
Línea 2	Inicio	831395.88	9132992.39	3288.13
	Fin	831260.30	9132977.30	3332.59
Línea 3	Inicio	831401.77	9132884.11	3288.89
	Fin	831267.20	9132876.23	3308.51
Línea 4	Inicio	829471.60	9132475.30	3364.65
	Fin	829716.13	9132382.24	3433.17
Línea 5	Inicio	829536.82	9132354.38	3417.12
	Fin	829652.36	9132424.36	3416.79
Línea 6	Inicio	829636.23	9132343.03	3439.84
	Fin	829735.75	9132428.65	3443.41

*\*Fuente: Elaboración propia*





*Figura 5.13 Ubicación de líneas geofísicas*

*\*Fuente: Elaboración propia*

#### **5.4.2.2 Preparación de las Líneas Geofísicas**

Se ubican primero los puntos según la dirección deseada, luego se determina su ubicación con un GPS Diferencial y se conectan los electrodos a cada terminal del cable de recepción con intervalos de 10 metros. Finalmente se proceden a la emisión de corriente para determinar los valores de las resistividades con un Equipo GDD modelo RX 8 – 32 de 10 canales.

#### **5.4.2.3 Estudio de Tomografía Eléctrica**

Se completaron 06 líneas distribuidas en 04 líneas de 120 metros y 02 líneas de 250 metros, llegando a profundidades mayores a 50 metros para las líneas cortas y profundidades mayores a los 100 metros en las líneas más largas.

- **Instrumentos**

Se utilizó un equipo transmisor y un equipo receptor ambos con baterías internas para el registro de datos. En la tabla 5.6 se muestra las especificaciones y en la figura 5.14 los equipos utilizados.

*Tabla 5.6 Especificación de equipos para tomografía eléctrica*

<b>Instrumentos</b>	<b>Modelo</b>
Transmisor	Innova Electronics hasta 600 Voltios de 250 Watts de potencia
Receptor	GDD 10 Canales con programación de 20 ventanas en modo user

*\*Fuente: Elaboración propia*



*Figura 5.14 Equipamiento para tomografía eléctrica*

*\*Fuente: Elaboración propia*

### - **Parámetros de Adquisición**

Las mediciones se realizan con el tiempo como base en el cual se administra corriente por 2 segundos y se corta los siguientes 2 segundos de manera que el equipo invierte las polaridades de corriente, para que el equipo receptor pueda detectar los cambios y sincronizar las lecturas de inversión.

En la configuración de los electrodos se utilizó el arreglo Polo – Dipolo. La distancia entre los puntos de lectura fue cada 10 metros determinando una investigación mayor a los 50 metros. En la tabla 5.7 se detalla los parámetros utilizados para el levantamiento geofísico.

*Tabla 5.7 Parámetros de tomografía eléctrica*

<b>Parámetros</b>	<b>Modo de Adquisición</b>
Mediciones	Dominio de Tiempo
Intervalo entre las líneas	No hay
Configuración de electrodos	Polo – Dipolo
Extensión del dipolo	10 m
Densidad de puntos	100 pts /km
Profundidad nominal	50 metros
Factor de separación (n)	Lecturas de n 1 a n 10
Ventanas de medición	20 ventanas de 80 milisegundos
Tiempo de Retraso	240 ms

*\*Fuente: Elaboración propia*

#### **5.4.2.4 Control de Calidad**

Por cada lectura se controlaban los resultados de resistividad observando los porcentajes de error, se realizaron 2 medidas cada punto para ver la variabilidad de los valores. Además, para ver si correspondía a los niveles de

profundidad se revisaban las diferencias de potencial y si existía correlación entre ellas.

#### 5.4.2.5 Interpretación de Resultados Geofísicos

El procesamiento detallado y la validación está basado con respecto a los datos obtenidos en campo. En las figuras 5.15 y 5.16 se muestran la ubicación de las líneas geofísicas en gráficos más ampliados para su interpretación.

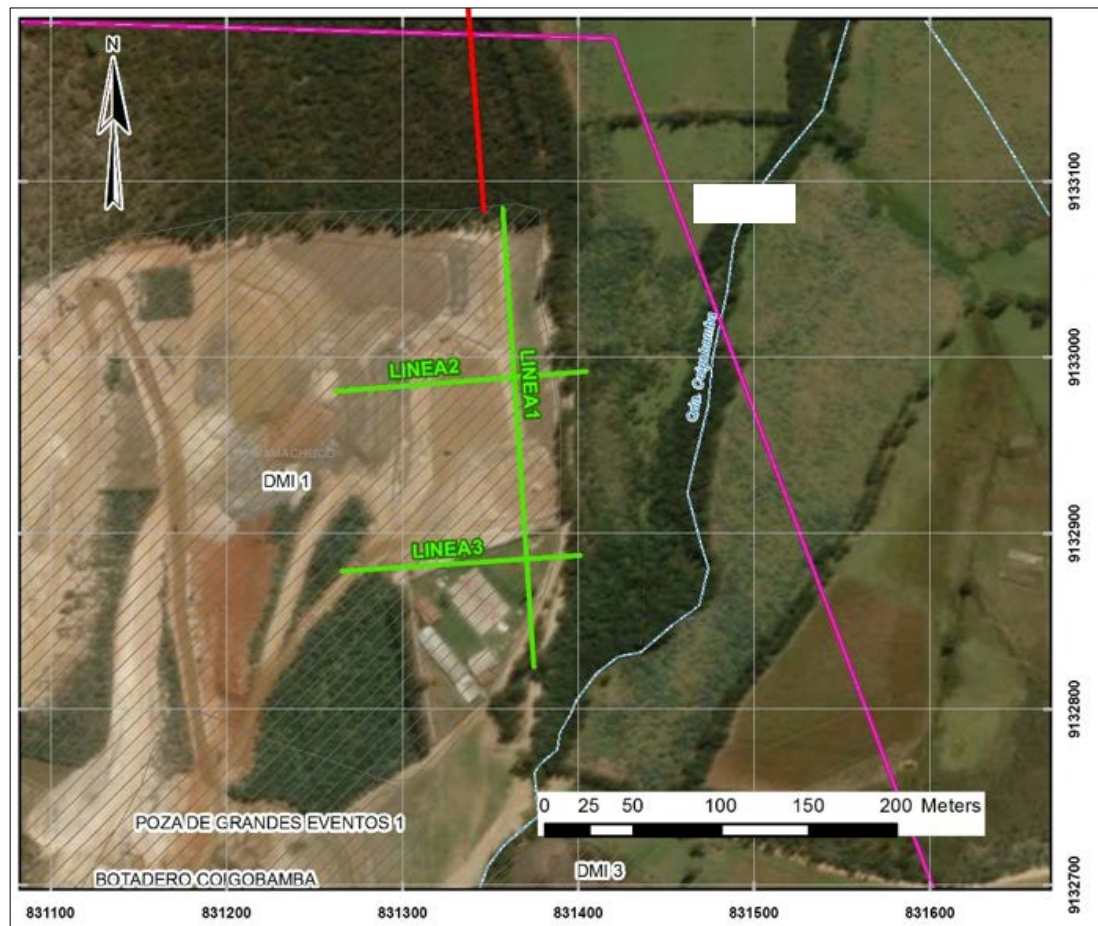
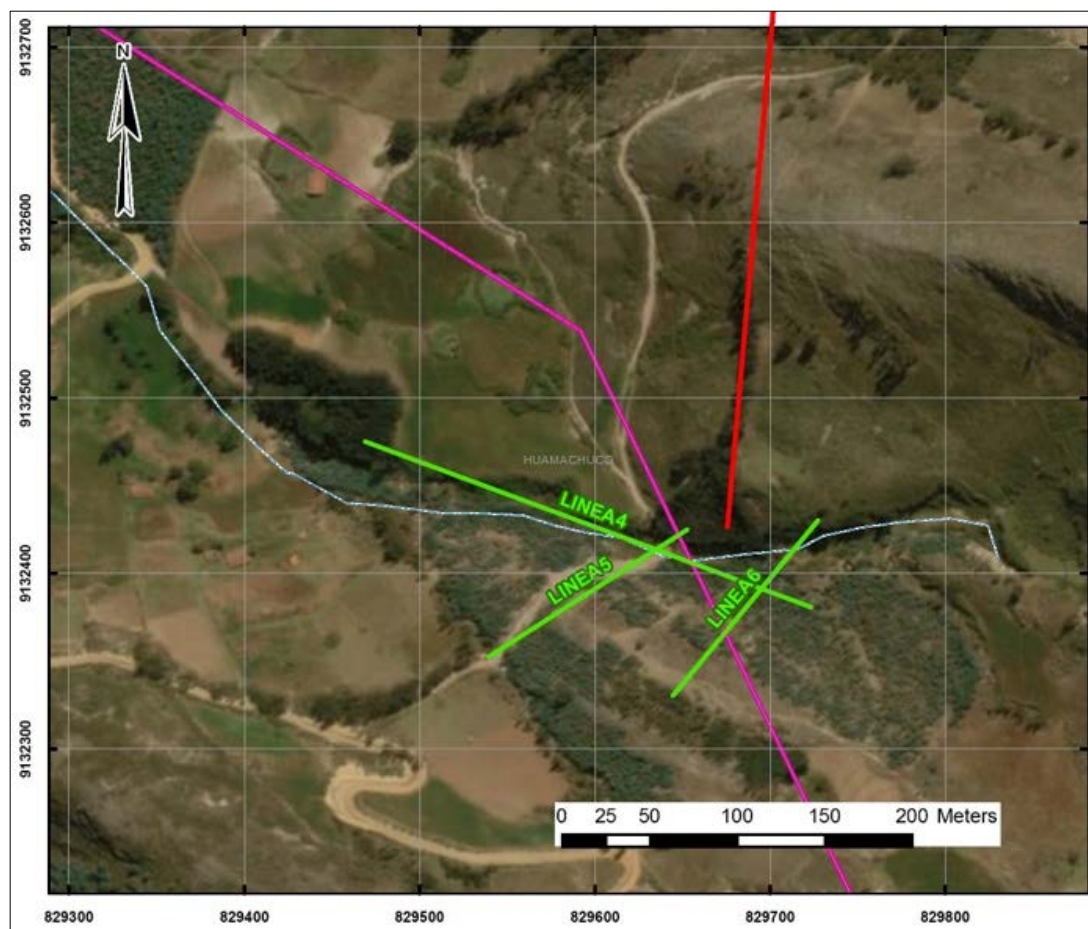


Figura 5.15 Líneas geofísicas de la zona Coigobamba

\*Fuente: Elaboración propia



*Figura 5.16 Líneas geofísicas de la zona Shiracmaca*

*\*Fuente: Elaboración propia*

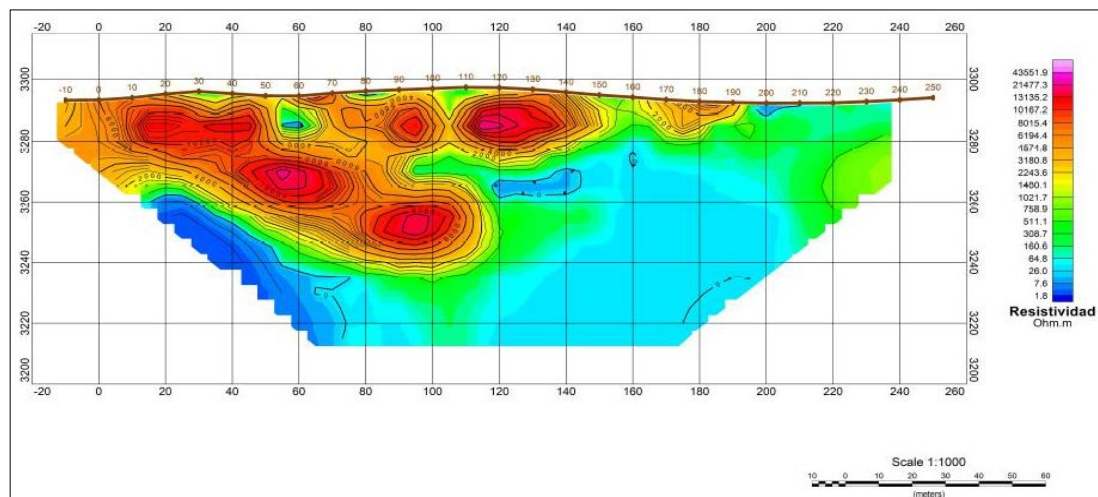
#### - Zona Coigobamba

En la figura 5.17 se muestra la Sección Tomografía Eléctrica – Línea 1 y la Sección Interpretada se muestra en la figura 5.18. Los colores diferentes están asociados a diferentes valores de resistividad (Ohm.m).

En color azul el valor de resistividad varía entre 0.1 a 70 Ohm.m. Se asocia a la presencia de agua con lentes en la parte superficial indicando infiltración, a profundidad se halla el nivel freático asociado a cuerpos de agua.

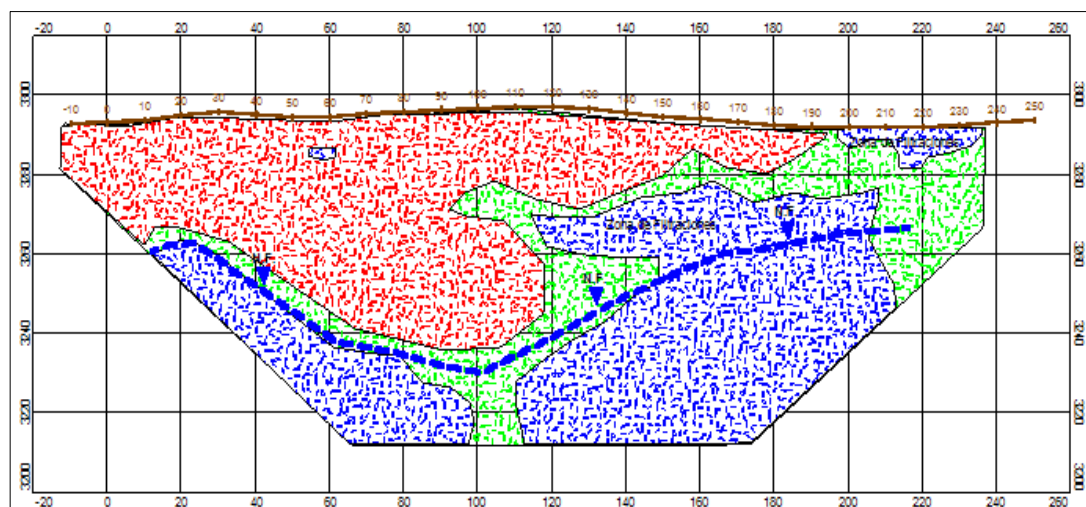
En color verde el valor de resistividad varía entre 70 a 1480 Ohm.m. Corresponde a materiales de transición entre las zonas permeables a impermeables. Se asocia a rocas fracturadas con presencia de humedad.

En color rojo el valor de resistividad varía entre 1480 a 43550 Ohm.m. Corresponde a materiales impermeables por presencia de roca compacta o materiales consolidados sin presencia de agua.



*Figura 5.17 Sección Tomografía Eléctrica – Línea 1*

*\*Fuente: Elaboración propia*

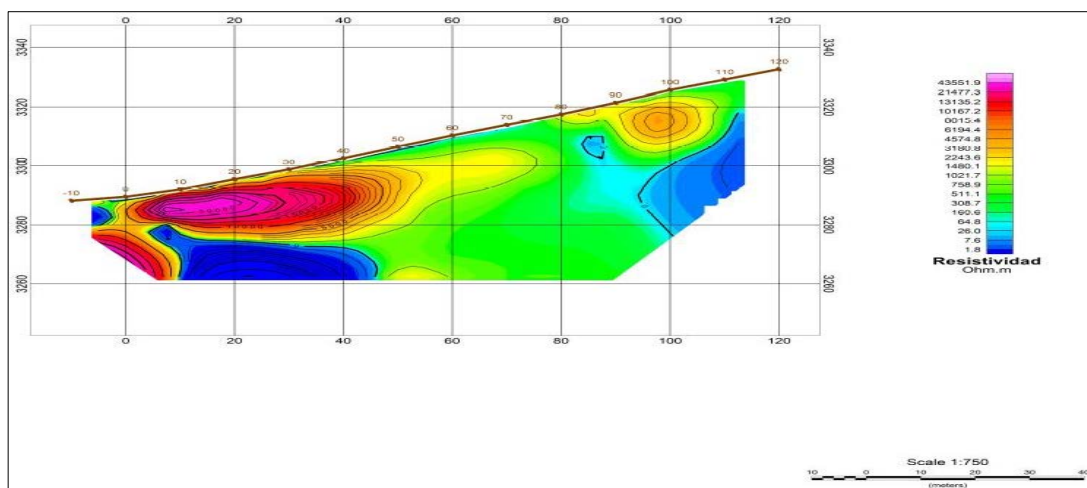


*Figura 5.18 Sección tomográfica eléctrica interpretada – Línea 1*

*\*Fuente: Elaboración propia*

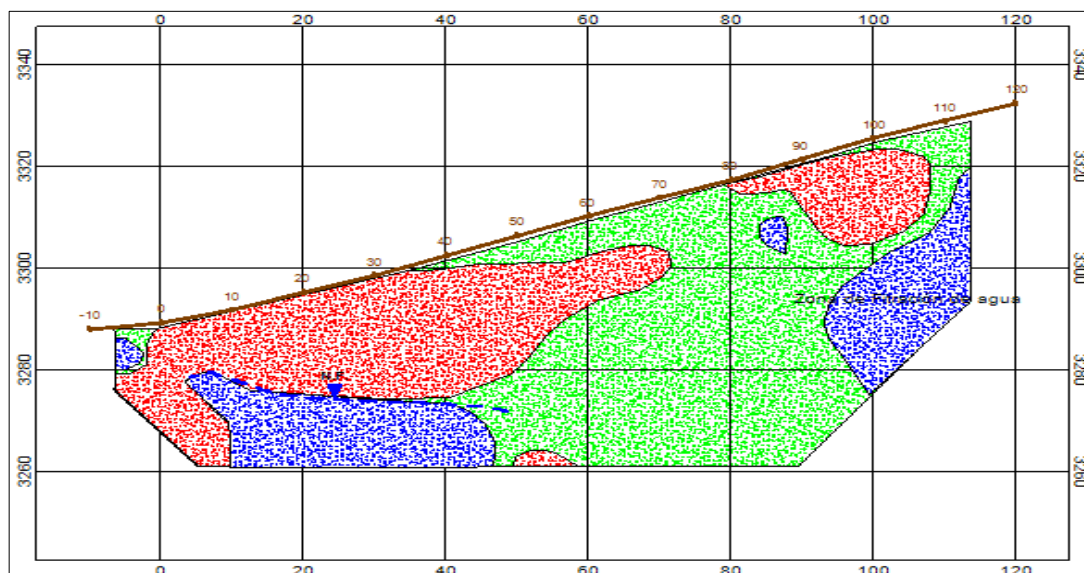
Se muestra la Sección Tomográfica Eléctrica – Línea 2 (figura 5.19) y la Sección Interpretada (figura 5.20) correspondiente.

En ambas figuras se puede observar en la parte inferior izquierda la posible zona de un acuífero confinado por debajo de un cuerpo impermeable.



*Figura 5.19 Sección Tomografía Eléctrica – Línea 2*

*\*Fuente: Elaboración propia*

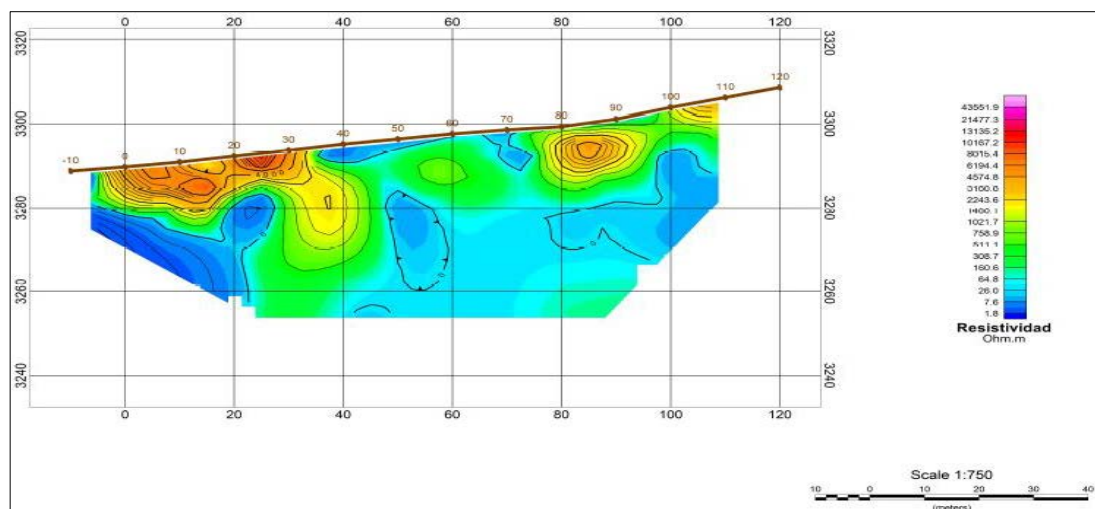


*Figura 5.20 Sección tomográfica eléctrica interpretada – Línea 2*

*\*Fuente: Elaboración propia*

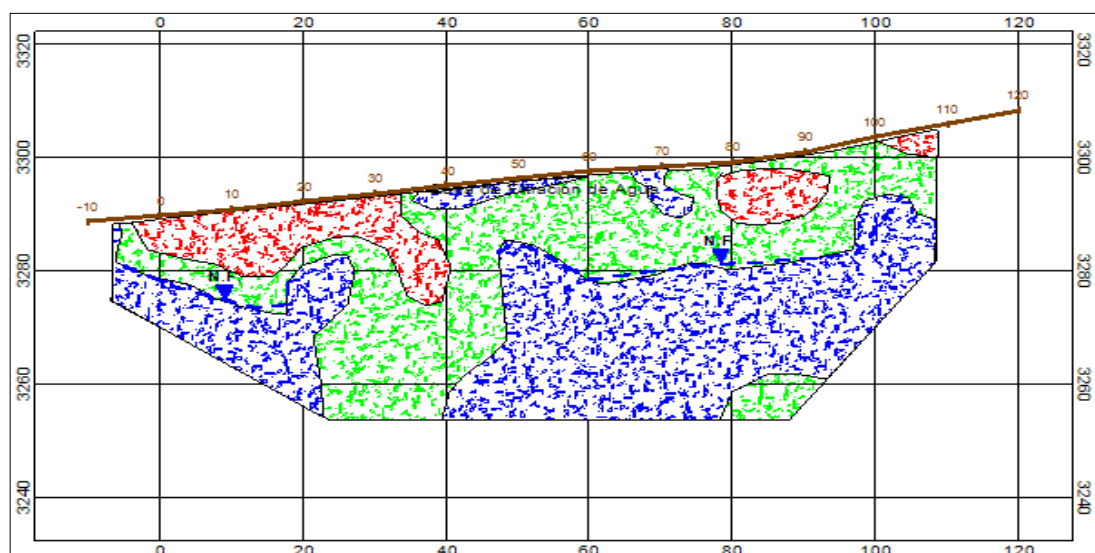
Se muestra la Sección Tomográfica Eléctrica – Línea 3 (figura 5.21) y la Sección Interpretada (figura 5.22) correspondiente.

Se presenta pequeñas anomalías superficiales de color azul en la parte central y se asocian a posibles filtraciones.



*Figura 5.21 Sección Tomografía Eléctrica – Línea 3*

*\*Fuente: Elaboración propia*



*Figura 5.22 Sección tomográfica eléctrica interpretada – Línea 3*

*\*Fuente: Elaboración propia*

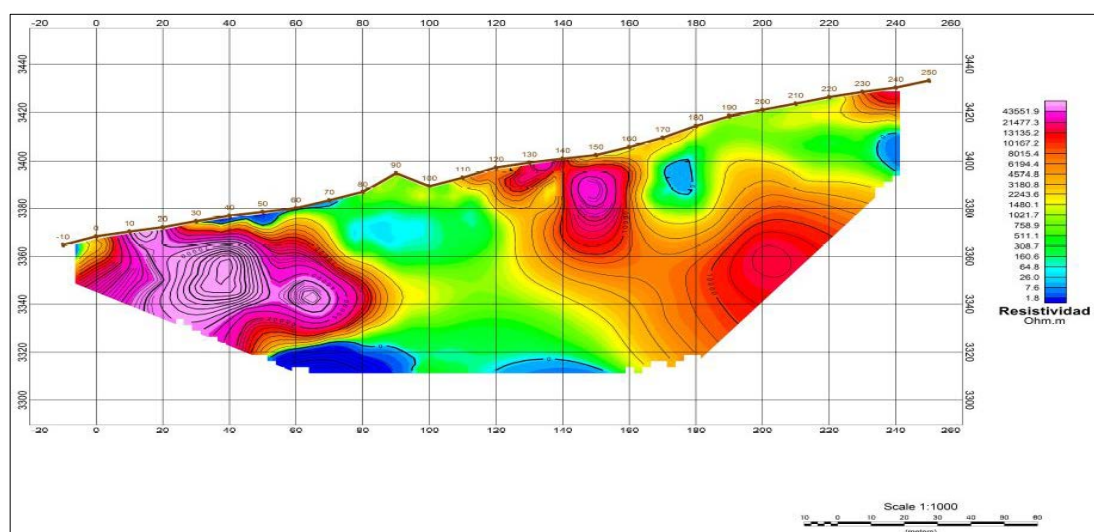


- **Zona Shiracmaca**

Se muestra la Sección Tomográfica Eléctrica – Línea 4 (figura 5.23) y la Sección Interpretada (figura 5.24) correspondiente.

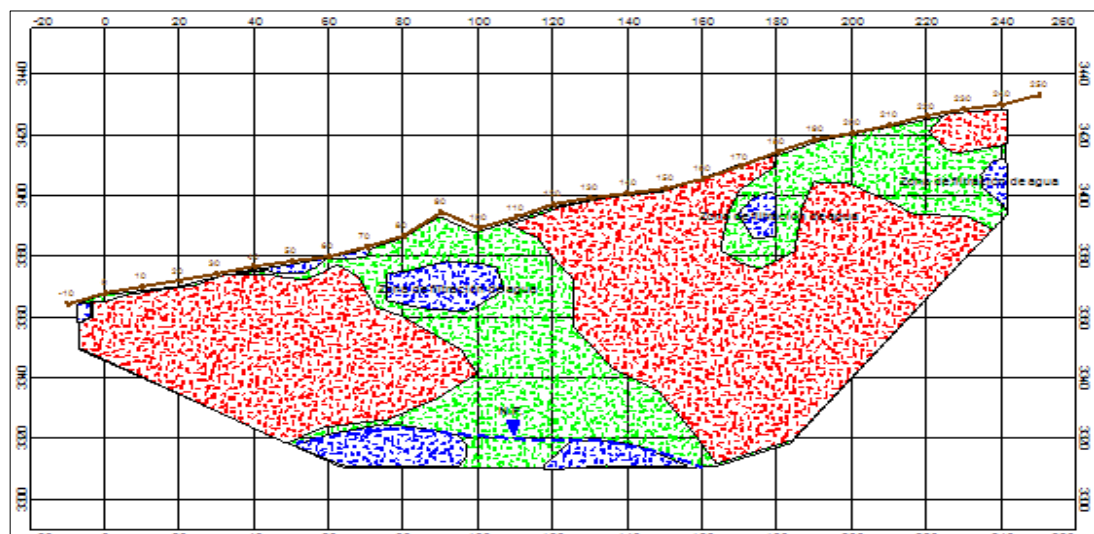
Se presenta dos cuerpos de grandes dimensiones dividiendo las zonas de filtración.

También hay dos cuerpos de agua a profundidad.



*Figura 5.23 Sección Tomografía Eléctrica – Línea 4*

*\*Fuente: Elaboración propia*

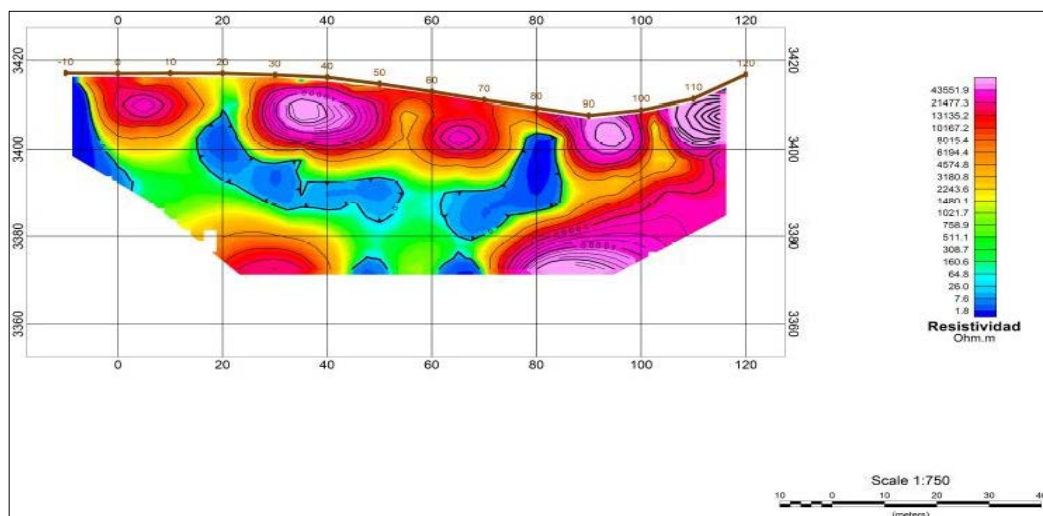


*Figura 5.24 Sección tomográfica eléctrica interpretada – Línea 4*

*\*Fuente: Elaboración propia*

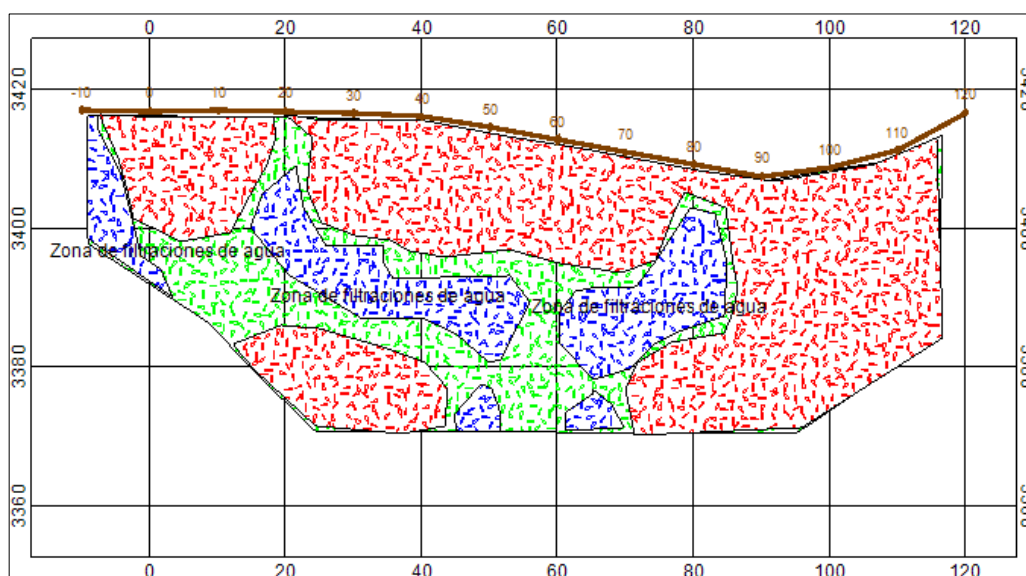
Se muestra la Sección Tomográfica Eléctrica – Línea 5 (figura 5.25) y la Sección Interpretada (figura 5.26) correspondiente.

Se puede observar en las imágenes que en casi la totalidad de la línea hay la presencia de roca impermeable y existen cuerpos de agua que tuvieron su origen por filtraciones a través de fracturas.



*Figura 5.25 Sección Tomografía Eléctrica – Línea 5*

*\*Fuente: Elaboración propia*



*Figura 5.26 Sección tomográfica eléctrica interpretada – Línea 5*

*\*Fuente: Elaboración propia*

Por último, se muestra la Sección Tomográfica Eléctrica – Línea 6 (figura 5.27) y la Sección Interpretada (figura 5.28) correspondiente.

Se observan dos principales zonas de filtración en la parte superficial y también existen dos bloques de roca impermeable dividiendo estos dos bloques de agua.

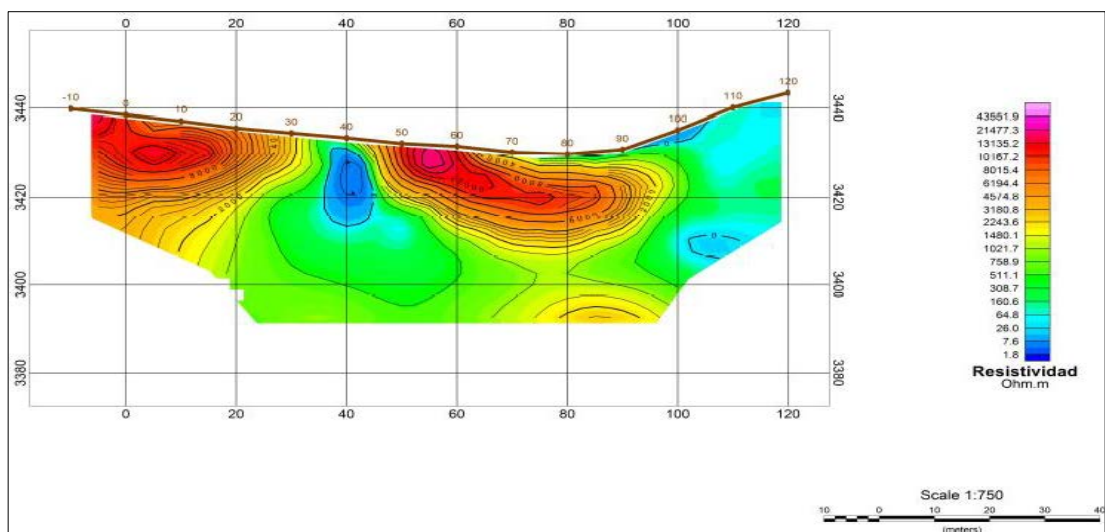


Figura 5.27 Sección Tomografía Eléctrica – Línea 6

\*Fuente: Elaboración propia

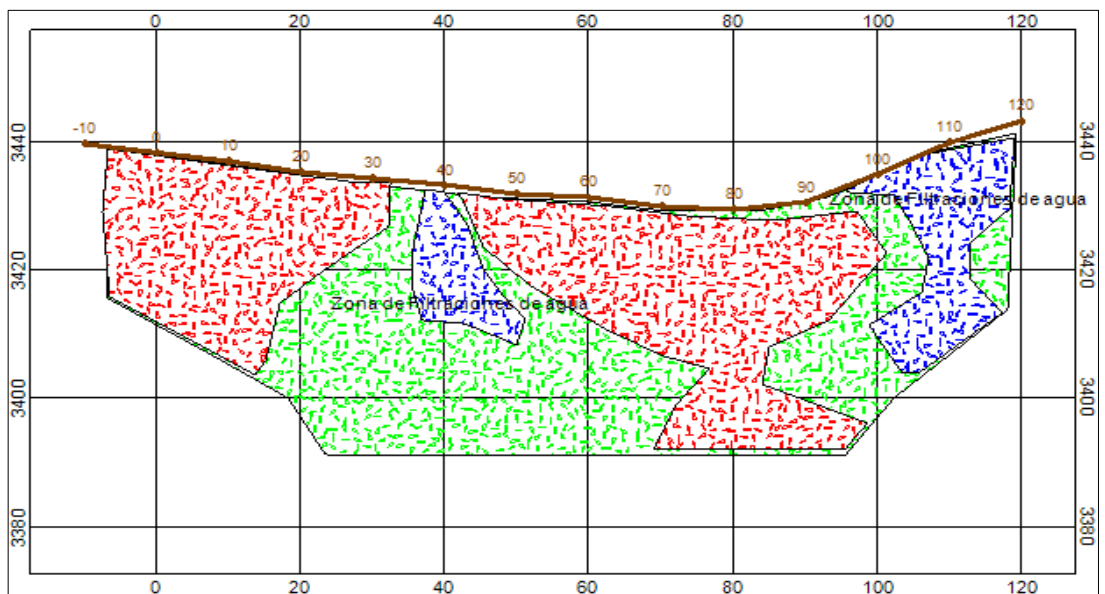


Figura 5.28 Sección tomográfica eléctrica interpretada – Línea 6

\*Fuente: Elaboración propia

### 5.4.3 Hidroquímica

Se realizó una campaña de muestreo de nueve piezómetros y un afloramiento, además se tomó registro de una muestra duplicada para control de calidad.

Los piezómetros monitoreados se encuentran en puntos estratégicos, emplazados en unidades hidrogeológicas de mayor interés, que a su vez se hallan en zonas donde existe interacción hidroquímica (contacto) entre los componentes de la Unidad Minera y el ambiente hidrogeológico.

Según los manuales de muestreo de agua, en los puntos escogidos se registraron con un equipo portátil los parámetros fisicoquímicos de campo: temperatura (°C), pH y conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Los puntos muestreados, así como el afloramiento localizado en la parte baja del afloramiento del Botadero Norte se detallan en la tabla 5.8 mientras que en la figura 5.29 se muestra el mapa con la ubicación de los puntos anteriormente mencionados.

*Tabla 5.8 Relación de puntos de monitoreo*

Punto	Coordenadas UTM, WGS 84 Zona 17S		Cota (m s.n.m.)	Descripción
	Este (m)	Norte (m)		
AFL-01	829938	9132708	3184	Afloramiento ubicado abajo del Pad de Lixiviación 1
PZ-HT-03	829733	9134013	3300	Piezómetro Ubicado en la zona Norte del Tajo
PZ-HT-04	829915	9132373	3507	Piezómetro, a 850 m. de la margen derecha de la Qda. Colorada
PZ-HT-05	831367	9132905	3293	Piezómetro, ubicado al costado del colegio de Coigobamba
PZ-HT-06	830898	9131967	3407	Piezómetro, zona Coigobamba, cerca de Pad Fase 5
PZ-HT-07	830246	9135374	3094	Piezómetro, margen izquierda de la parte alta de la Qda. Chamis
PZ-HT-09	828939	9132855	3251	Piezómetro, a 100 m. de la margen derecha de la Qda. Colorada
PZ-HT-10	830466	9134063	3273	Piezómetro localizado entre Tajo y Botadero
PZ-HT-12	829068	9133331	3200	Piezómetro, entre Qda. Colorada y Tajo
PZ-HT-13	831916	9133153	3343	Piezómetro ubicado en zona conocida como Loma Redonda

*\*Fuente: Elaboración propia*

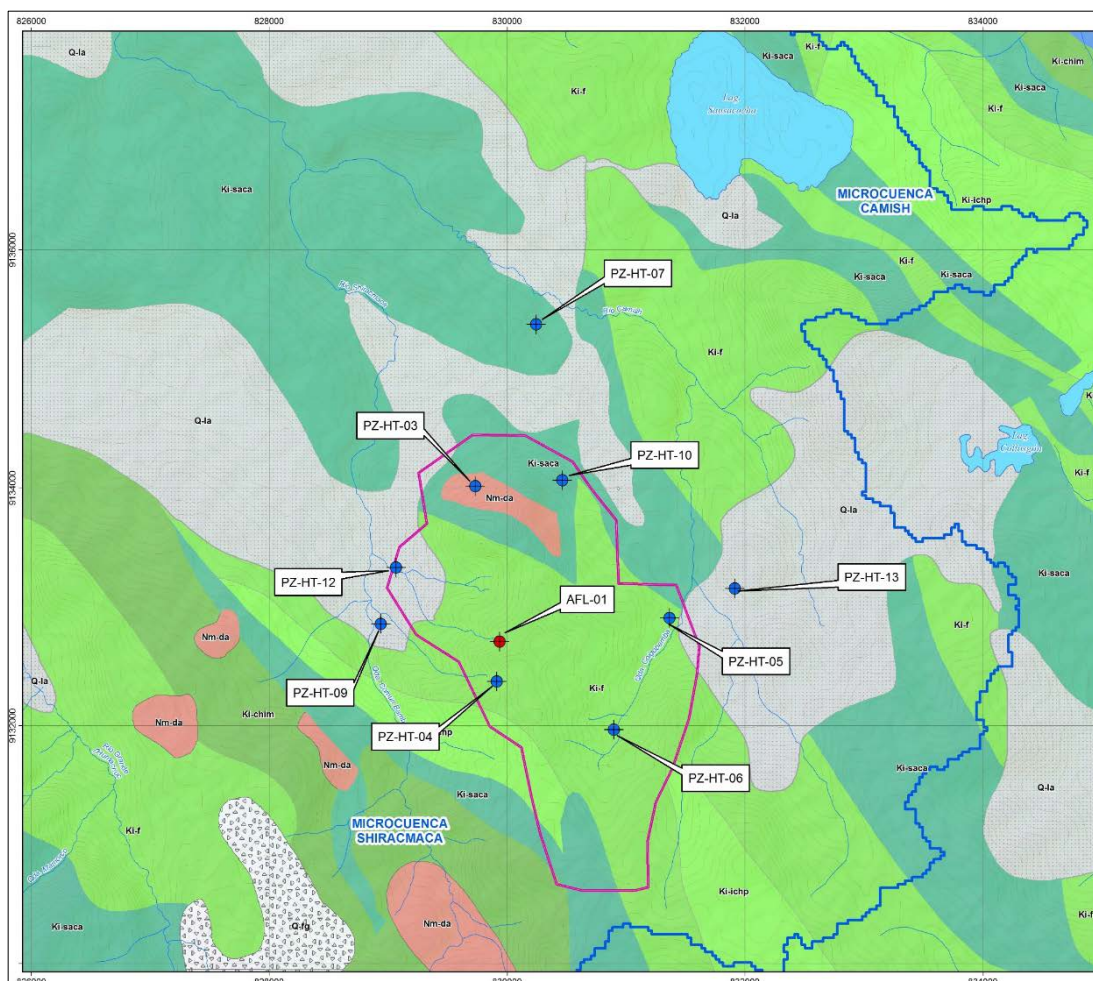


Figura 5.29 Ubicación de los puntos de monitoreo

\*Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.3.1 Parámetros Físicoquímicos

Los parámetros registrados en campo y los informes de laboratorio (ver anexo “resultado de laboratorio – compilado de concentraciones”) deben ser comparados para verificar consistencia entre ambos. Los datos de Conductividad Eléctrica (CE) y pH son considerados más representativos en el análisis físicoquímico.

### - Conductividad Eléctrica (CE)

En las evaluaciones se verificó que el punto PZ – HT – 07 tiene le registro de más alta conductividad eléctrica (418.9  $\mu$ S/cm).

En promedio, los valores de CE varían entre 90 a 219  $\mu$ S/cm en la microcuenca Shiracmaca y entre 99 a 418.9  $\mu$ S/cm en la microcuenca Cámish, lo cual nos sugiere la presencia de ligera salinidad presente en las formaciones Farrat y Santa – Carhuaz. El mapa de Isoconductividad Eléctrica se presenta en la figura 5.30.

### - Potencial de Hidrógeno (pH)

Los valores de pH registrados en la zona de estudio se encontraron en rango neutral. En el piezómetro PZ – HT – 07 se encontraron los valores más altos (pH 8.64) en concordancia como ocurrió con los valores de CE. Mientras que en el punto PZ – HT – 03 se encuentra el valor más ácido, localizado cerca al tajo.

En la tabla 5.9 se detallan los valores de pH y CE, además también se muestra la temperatura y los sólidos totales disueltos (TDS).

*Tabla 5.9 Parámetros fisicoquímicos de los puntos muestreados*

Punto	Coordenadas UTM WGS84 17S		Cota	Parámetros Evaluados			
	Este (m)	Norte (m)	(m.s.n.m.)	pH	T (C°)	CE (us/cm)	TDS (mg/l)
AFL-01	829938	9132708	3184	6.39	14.5	218.8	176.8
PZ-HT-03	829733	9134013	3300	5.53	15	93	68
PZ-HT-04	829915	9132373	3507	7.08	12.6	181	154
PZ-HT-05	831367	9132905	3293	8.07	13	163.4	136
PZ-HT-06	830898	9131967	3407	8.1	15.4	383	304.2
PZ-HT-07	830246	9135374	3094	8.64	18	418.9	313.95
PZ-HT-09	828939	9132855	3251	7.63	15.6	143	107.9
PZ-HT-10	830466	9134063	3273	7.8	17	99	72.15
PZ-HT-12	829068	9133331	3200	7.64	19	223.4	165.1
PZ-HT-13	831916	9133153	3343	7.57	16	79.3	59.15

*\*Fuente: Elaboración propia*

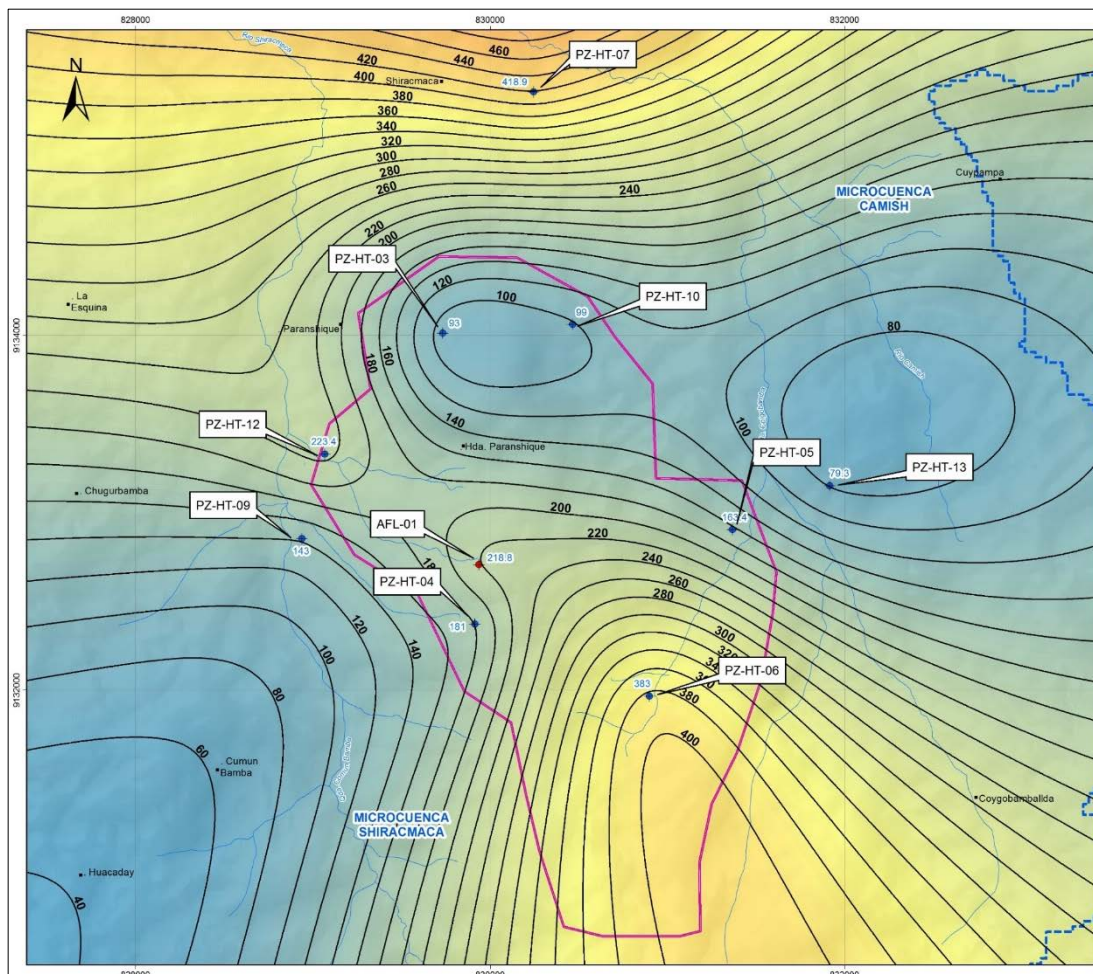


Figura 5.30 Mapa de isoconductividad eléctrica de la zona de estudio

\*Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.3.2 Composición Iónica

Los puntos de muestreo fueron agrupados por facies predominantes en el agua en un diagrama Piper (figura 5.31) y mediante los diagramas ternarios Stiff se presenta la predominancia iónica los cuales son mostrados en la figura 5.32.

La facie bicarbonatada sódica ( $\text{HCO}_3 - \text{Na}$ ) se presenta en dos puntos: El PZ – HT – 07 y el PZ – HT – 06. Estos puntos, localizados en la parte baja de la cuenca suponen

una mezcla de aguas subterráneas de diferentes formaciones en contacto con aguas superficiales.

La facie sulfatada cálcica ( $\text{SO}_4 - \text{Ca}$ ) se presenta en dos puntos: PZ – HT – 03 y en el afloramiento AFL – 01. Estos puntos al estar cerca al Tajo y Pad de Lixiviación respectivamente indican un contacto entre las aguas subterráneas con los componentes de la Unidad Minera.

La facie bicarbonatada cálcica se presenta en los demás puntos: PZ – HT – 04, PZ – HT – 05, PZ – HT – 09, PZ – HT – 10, PZ – HT – 12 y PZ – HT – 13. Estos puntos al estar ubicados aguas arriba de la Unidad Minera y estar emplazados en las formaciones geológicas cuaternarias tienen relación con la presencia del anión bicarbonato. Las aguas en este tipo de facies tienen corto recorrido.

Respecto a las facies por microcuencas, existen homogeneidad en los puntos muestreados ya que las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio comprenden mayormente de calizas y areniscas. Aguas arriba de la Unidad Minera se presenta una mayor concentración de iones y conforme se sigue el curso aguas abajo en quebradas, torrentes se puede encontrar la presencia de iones más disueltos y de menor concentración. En la tabla 5.10 se hace la descripción del tipo de agua predominante según la unidad geológica presente.

En los depósitos cuaternarios, predominan facies bicarbonatadas cálcicas, mientras en las dacitas, al estar en contacto con los componentes de la Unidad Minera, presenta una facie sulfatada cálcica. Por último, se resalta en las formaciones Farrat y Santa una variabilidad hidroquímica. El anión bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ) es el más predominante en las aguas de la zona de estudio debido a la presencia de areniscas y calizas provenientes



de las formaciones Farrat y Santa. Estas unidades se componen de sílice y carbonatos que al contacto con el agua forman iones bicarbonato e hidronio.

Tabla 5.10 Tipos de agua según formación geológica

Código punto de muestreo	Unidad Geológica	Tipo de agua predominante
AFL – 01	Fm. Farrat	SO <sub>4</sub> -Ca
PZ – HT – 03	Dacita	SO <sub>4</sub> -Ca
PZ – HT – 04	Fm. Farrat	HCO <sub>3</sub> -Ca
PZ – HT – 05	Fm. Farrat	HCO <sub>3</sub> -Ca
PZ – HT – 06	Fm. Farrat	HCO <sub>3</sub> -Na
PZ – HT – 07	Fm. Santa	HCO <sub>3</sub> -Na
PZ – HT – 09	Dep. Lacustre	HCO <sub>3</sub> -Ca
PZ – HT – 10	Fm. Santa	HCO <sub>3</sub> -Ca
PZ – HT – 12	Dep. Lacustre	HCO <sub>3</sub> -Ca
PZ – HT – 13	Dep. Aluvial	HCO <sub>3</sub> -Ca

\*Fuente: Elaboración propia

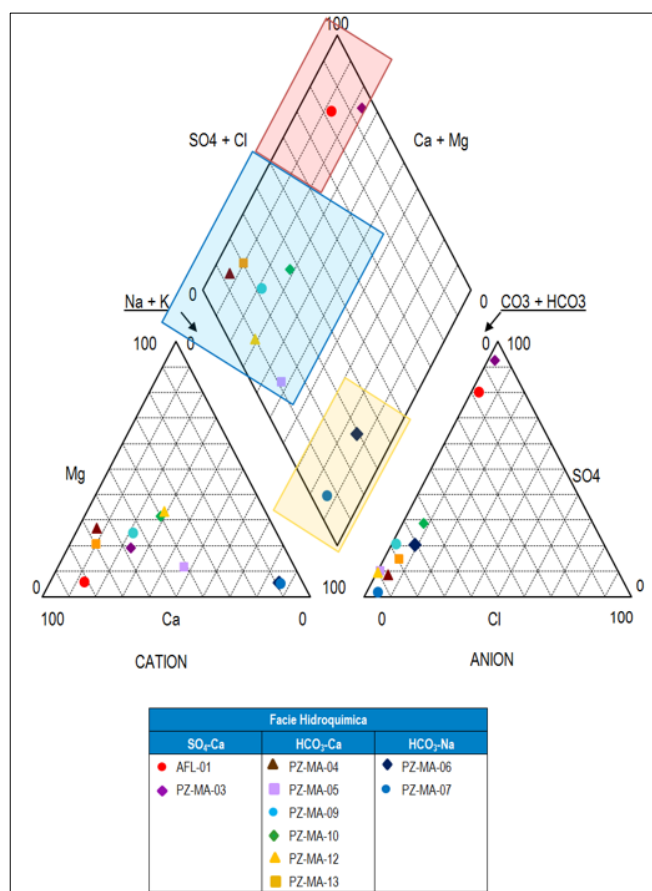


Figura 5.31 Diagrama Piper de las muestras de agua subterránea

\*Fuente: Elaboración propia

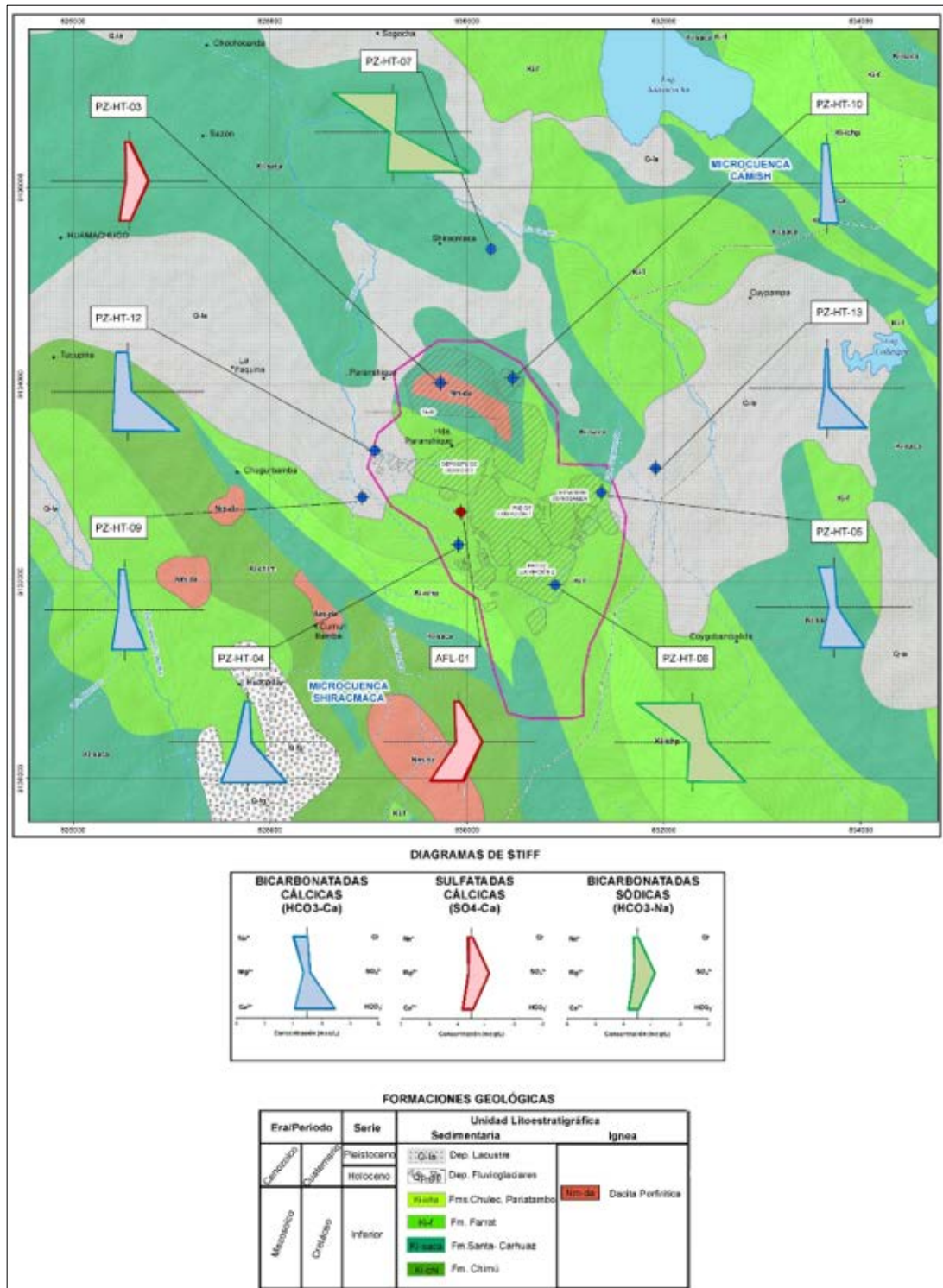


Figura 5.32 Distribución de Diagramas Stiff

\*Fuente: Elaboración propia

### 5.4.3.3 Resultados

Producto del estudio hidroquímico se afirma la variación del pH ligeramente alcalino a neutro en los cuerpos de agua. En la areniscas y calizas se puede distinguir pH más alto producto de su composición mientras que la conductividad eléctrica también presenta valores altos en calizas.

Respecto a los diagramas de Piper y Stiff se llega a diferenciar que las dos microcuencas principales presentan una tendencia bicarbonatada cálcica ( $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ ), siendo de mayor concentración en la zona de Shiracmaca. En la zona del tajo se presenta la facie sulfatada cálcica ( $\text{SO}_4 - \text{Ca}$ ) asociada a la mineralización de la dacita, en donde la oxidación de los sulfuros afecta la calidad del agua subterránea.

La concentración de los metales es alta en cuanto al aluminio, hierro y manganeso que sobrepasaron los límites del ECA (Estándar Calidad Ambiental) en los piezómetros muestreados y requieren ser monitoreados constantemente por la Unidad Minera para evitar problemas sociales – ambientales.

### 5.4.4 Hidrodinámica Subterránea

Para el análisis se realizaron pruebas Air Lift en los piezómetros cercanos a fin de tener una idea del caudal referencial a obtener una vez que se hagan la perforación de los pozos exploratorios. Tenemos los siguientes pozos propuestos en la tabla 5.11.

*Tabla 5.11 Pozos exploratorios propuestos*

Pozo	Este	Norte	Zona
PW – HT – 01	169624 (WGS84 – 18S)	9132934	Coigobamba
PW – HT – 02	829516 (WGS84 – 17S)	9132430	Shiracmaca

*\*Fuente: Elaboración propia*

- **Pozo PW – HT – 01**

Este pozo se ubica cercano al piezómetro PZ – HT – 05 (figura 5.33) a una distancia aproximada de 30 metros.



*Figura 5.33 Ubicación pozo exploratorio PW – HT – 01*

*\*Fuente: Elaboración propia*

Para la evaluación se realizaron a diferentes profundidades las pruebas Air Lift conforme se avanzaba en la perforación. En cada prueba se procede a la inyección de aire al sondaje para luego captar volúmenes de agua en un recipiente externo. En forma complementaria se toma los datos de parámetros de campo necesarios para evaluar la calidad de agua de la misma muestra.

En la figura 5.34, figura 5.35 y figura 5.36 se muestran las pruebas realizadas en el sondaje PZ – HT – 05 y los datos obtenidos, así como los gráficos relacionando el caudal con la conductividad eléctrica y el pH.

En la figura 5.34 se obtiene un caudal promedio de 3.5 l/s con un tiempo acumulado de 1 hora 50 minutos. El pH comienza en 5 y se estabiliza a neutro conforme se avanza en el tiempo, mientras la conductividad eléctrica se mantiene constante.

ÁREA:	Colegio Coigobamba	ELEVACIÓN (msnm):	3293.50	PROFUNDIDAD LV:	32.00
POZO:	PZ-HT-05 (1)	FECHA INICIO:	5/03/2017	FECHA FIN:	5/03/2017
COORDENADAS (m) E:	831396.86	HORA DE INICIO:	15:05	HORA DE FIN:	4:55 p.m.
N:	9132905.40	SUPERVISOR:	Enikson U.	PROFUNDIDAD POZO:	35.00

Presión del Compressor (psi)	Fecha	Hora (hora)	Periodo del Ensayo	Tiempo Acumulado (min)	Caudal (l/s)	Volumen Acumulado (m <sup>3</sup> )	Parámetros Físicoquímicos In-Situ					Litología	Comentarios
							pH	Temp. (°C)	C.E. (µS/cm)	TDS (mg/l)	Eh (mv)		
80	5/03/2017	15:05	0.00	5.00	3.45	0.00	5.70	16	130.1	102.05	-1632.1	Grawaca	Color marrón claro
80	5/03/2017	15:15	10.00	10.00	2.98	1.79	6.42	17.6	131.4	98.8	--	Grawaca	Color marrón oscuro
80	5/03/2017	15:25	20.00	30.00	3.79	4.55	6.81	18.0	141.3	107.25	--	Grawaca	Color gris oscuro
80	5/03/2017	15:35	30.00	60.00	3.61	6.50	7.06	17.6	145.4	109.65	--	Grawaca	Color gris oscuro
80	5/03/2017	15:50	45.00	105.00	3.63	0.00	7.23	18.3	140	112.45	--	Grawaca	Color gris oscuro
80	5/03/2017	16:05	60.00	165.00	3.63	13.08	7.48	17.4	146.4	109.2	--	Grawaca	Color gris oscuro
80	5/03/2017	16:25	80.00	245.00	3.68	17.67	7.68	16.9	145.6	109.85	--	Grawaca	Color gris claro
80	5/03/2017	16:55	110.00	355.00	3.70	24.44	7.84	17.1	143.5	111.15	--	Grawaca	Color marrón claro

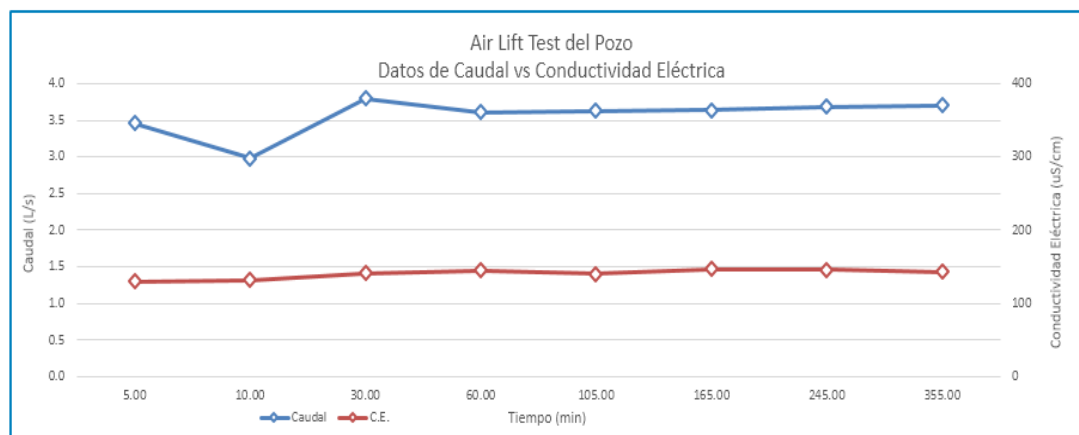
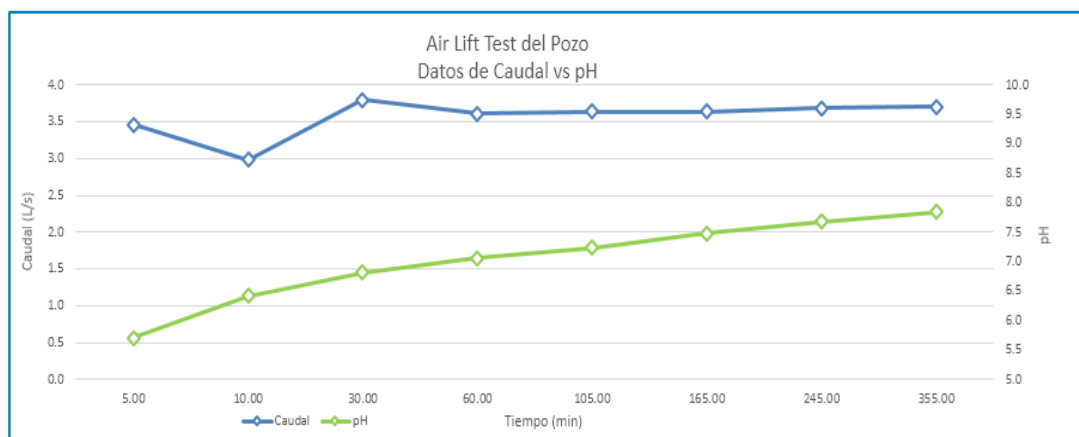


Figura 5.34 Prueba Air Lift (PZ – HT – 05) a profundidad de 35.00 metros

\*Fuente: Elaboración propia

En la figura 5.35 se obtiene un caudal promedio de 2.8 l/s con un tiempo acumulado de 1 hora 30 minutos. El pH comienza con un valor de 6 y asciende hasta 8.5 conforme se avanza en el tiempo, mientras la conductividad eléctrica se mantiene constante.

ÁREA:	Colegio Coigobamba	ELEVACIÓN (msnm):	3304	PROFUNDIDAD LV:	46.00
POZO:	PZ-HT-05 (2)	FECHA INICIO:	6/03/2017	FECHA FIN:	6/03/2017
COORDENADAS (m):	E: 831366.86	HORA DE INICIO:	09:40	HORA DE FIN:	12:20
	N: 9132905.40	SUPERVISOR:	Erikson U.	PROFUNDIDAD POZC:	50.00

Presión del Compressor (psi)	Fecha	Hora (hrs)	Periodo del Ensayo	Tiempo Acumulado (min)	Caudal (l/s)	Volumen Acumulado (m <sup>3</sup> )	Parámetros Físicoquímicos In-Situ					Litología	Comentarios
							pH	Temp. (°C)	C.E. (µS/cm)	TDS (mg/l)	Eh (mv)		
80	6/03/2017	15:45	0.00	0.00	2.89	0.00	6.03	16.7	137.5	105.95	-973.3	Grawaca	Color gris claro
80	6/03/2017	15:50	20.00	20.00	2.78	3.34	7.09	16.3	160.5	129.35	--	Grawaca	Color gris oscuro
80	6/03/2017	15:55	40.00	40.00	2.54	6.11	7.23	16.4	171.8	133.9	-1060.2	Grawaca	Color gris oscuro
80	6/03/2017	16:05	60.00	60.00	2.79	10.06	7.63	16.3	175.4	136.5	-855.2	Grawaca	Color gris oscuro
80	6/03/2017	16:15	80.00	80.00	2.89	13.86	7.94	16.2	174.2	135.85	-871.2	Grawaca	Color gris oscuro
80	6/03/2017	16:25	100.00	100.00	2.94	17.62	8.16	16.1	171.9	134.05	-857.2	Grawaca	Color gris oscuro
80	6/03/2017	16:40	120.00	120.00	2.64	18.99	8.34	16.0	170.4	133.9	-827	Grawaca	Color gris oscuro
80	6/03/2017	16:55	140.00	140.00	2.83	23.80	8.45	16.1	170.3	133.25	-876.6	Grawaca	Color gris oscuro
80	6/03/2017	17:15	160.00	160.00	2.95	28.28	8.52	16.0	167.4	131.3	-966.2	Grawaca	Color gris oscuro

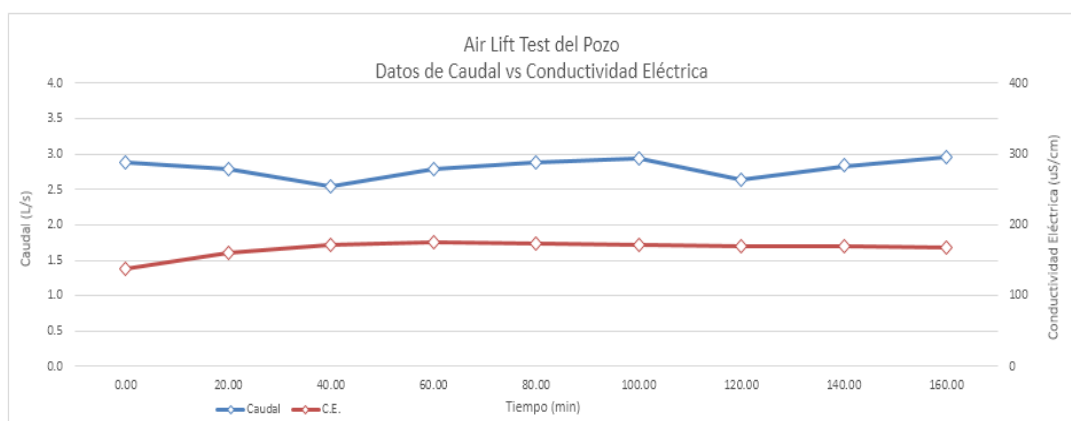
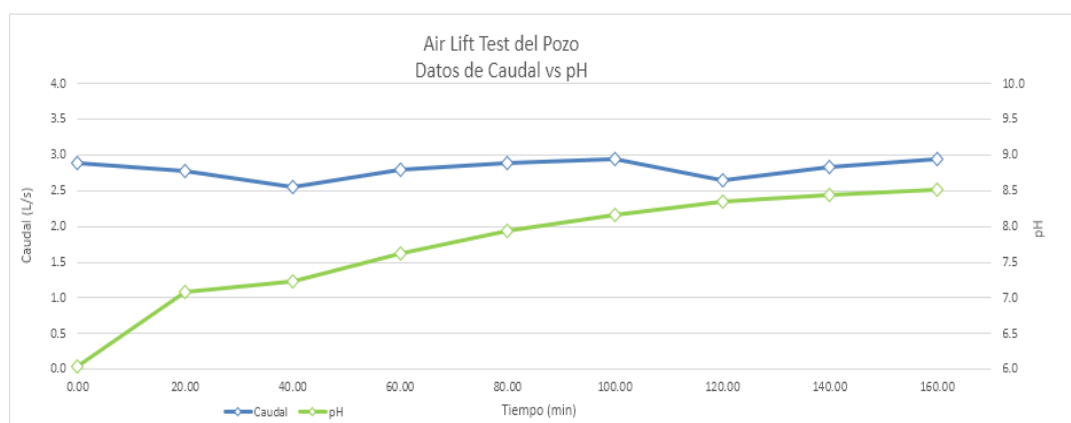


Figura 5.35 Prueba Air Lift (PZ – HT – 05) a profundidad de 50.00 metros

\*Fuente: Elaboración propia

En la figura 5.36 se obtiene un caudal promedio de 2.9 l/s con un tiempo acumulado de 1 hora 30 minutos. El pH comienza con un valor de 6.2 y asciende hasta 7.8 conforme se avanza en el tiempo, mientras la conductividad eléctrica se mantiene constante.

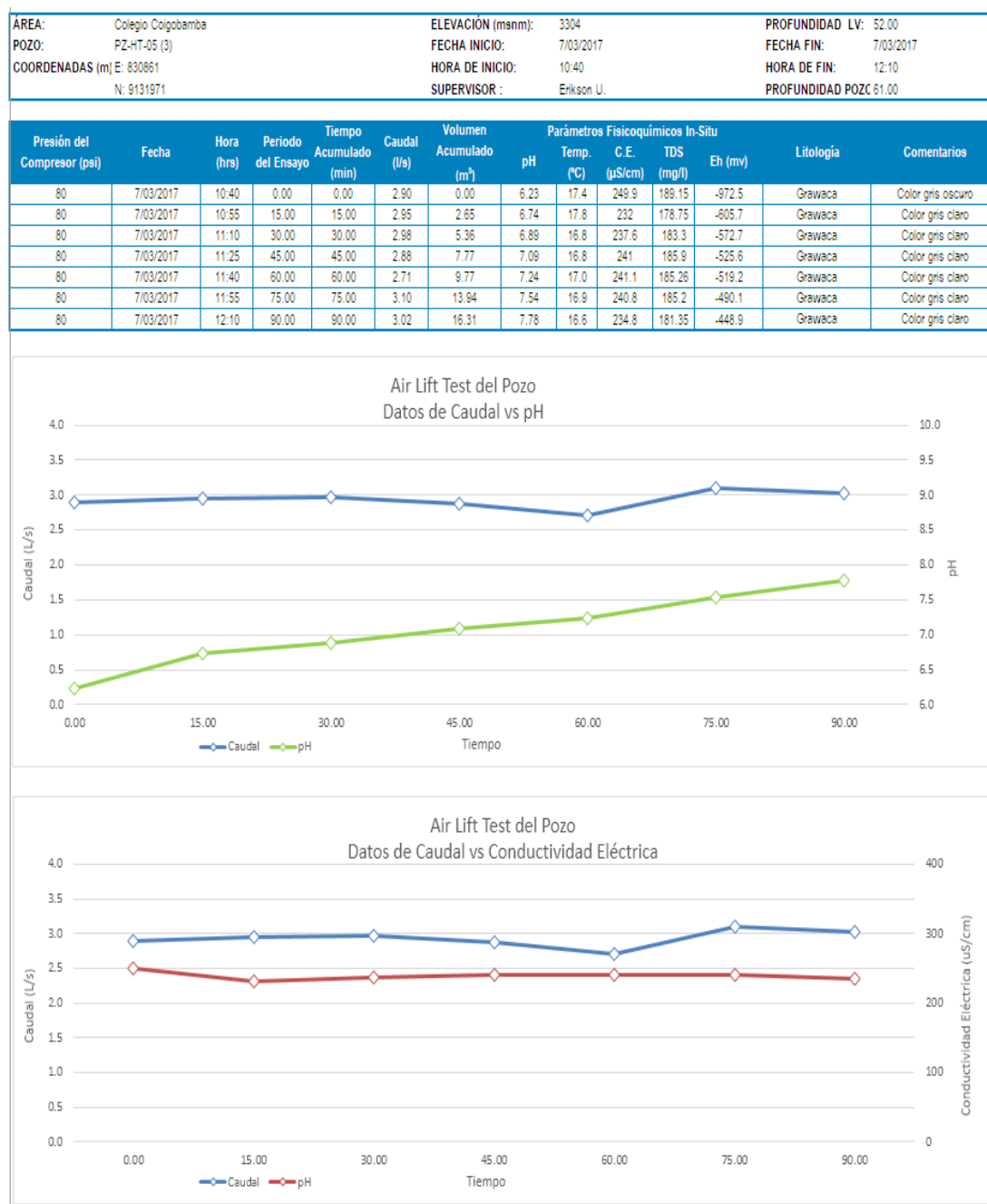


Figura 5.36 Prueba Air Lift (PZ – HT – 05) a profundidad de 61.00 metros

\*Fuente: Elaboración propia

- **Pozo PW – HT – 02**

Este pozo se ubica a 400 metros aguas arriba del piezómetro PZ – HT – 04 y a 700 metros aguas arriba del piezómetro PZ – HT – 09. El pozo propuesto (figura 5.37) se ubica en la Zona 17 M.



*Figura 5.37 Ubicación pozo exploratorio PW – HT – 02*

*\*Fuente: Elaboración propia*

Esta zona se caracteriza por ser la más occidental del proyecto (menos explorada) y los pozos ubicados en este lado tienen un nivel de agua cercano a la superficie, dificultando los trabajos de perforación e instalación de piezómetro.

En la figura 5.38 y figura 5.39 se muestran las pruebas realizadas en el sondaje PZ – HT – 04 y los datos obtenidos, así como los gráficos relacionando el caudal con la conductividad eléctrica y el pH.



En la figura 5.38 se obtiene un caudal promedio de 2.0 l/s con un tiempo acumulado de 2 horas 35 minutos. El pH comienza con un valor de 4.3 y se estabiliza en 6.4 conforme se avanza en el tiempo, mientras la conductividad eléctrica comienza con valores altos y se estabiliza con 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

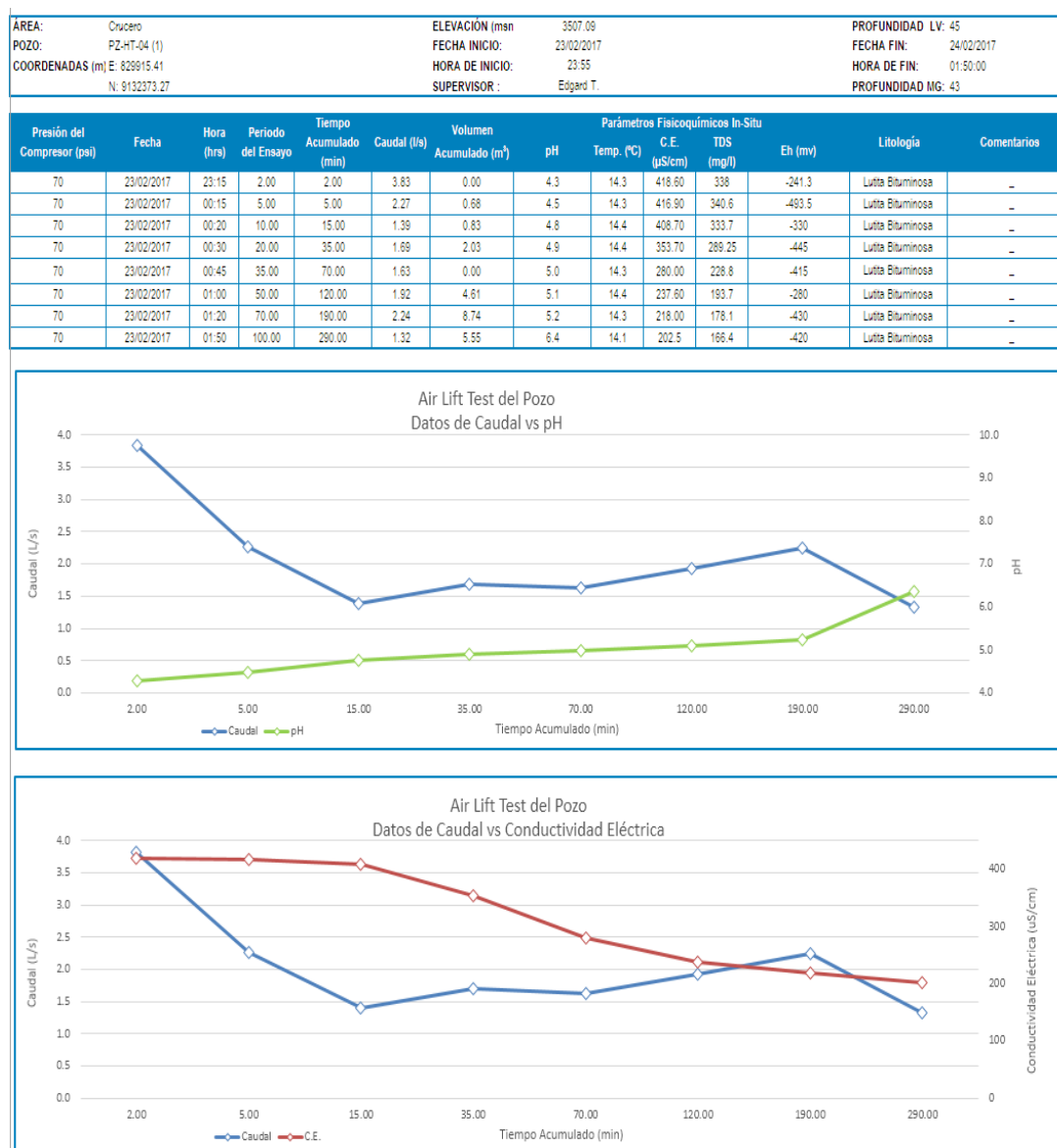


Figura 5.38 Prueba Air Lift (Sondaje PZ – HT – 04) a profundidad de 47.00 metros

\*Fuente: Elaboración propia

En la figura 5.39 se obtiene un caudal promedio de 1.95 l/s con tendencia a la disminución y un tiempo acumulado de 1 hora 50 minutos. El pH comienza con un valor de 4.5 y se estabiliza en 6.9 conforme se avanza en el tiempo, mientras la conductividad eléctrica comienza con valores altos y se estabiliza con 154  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

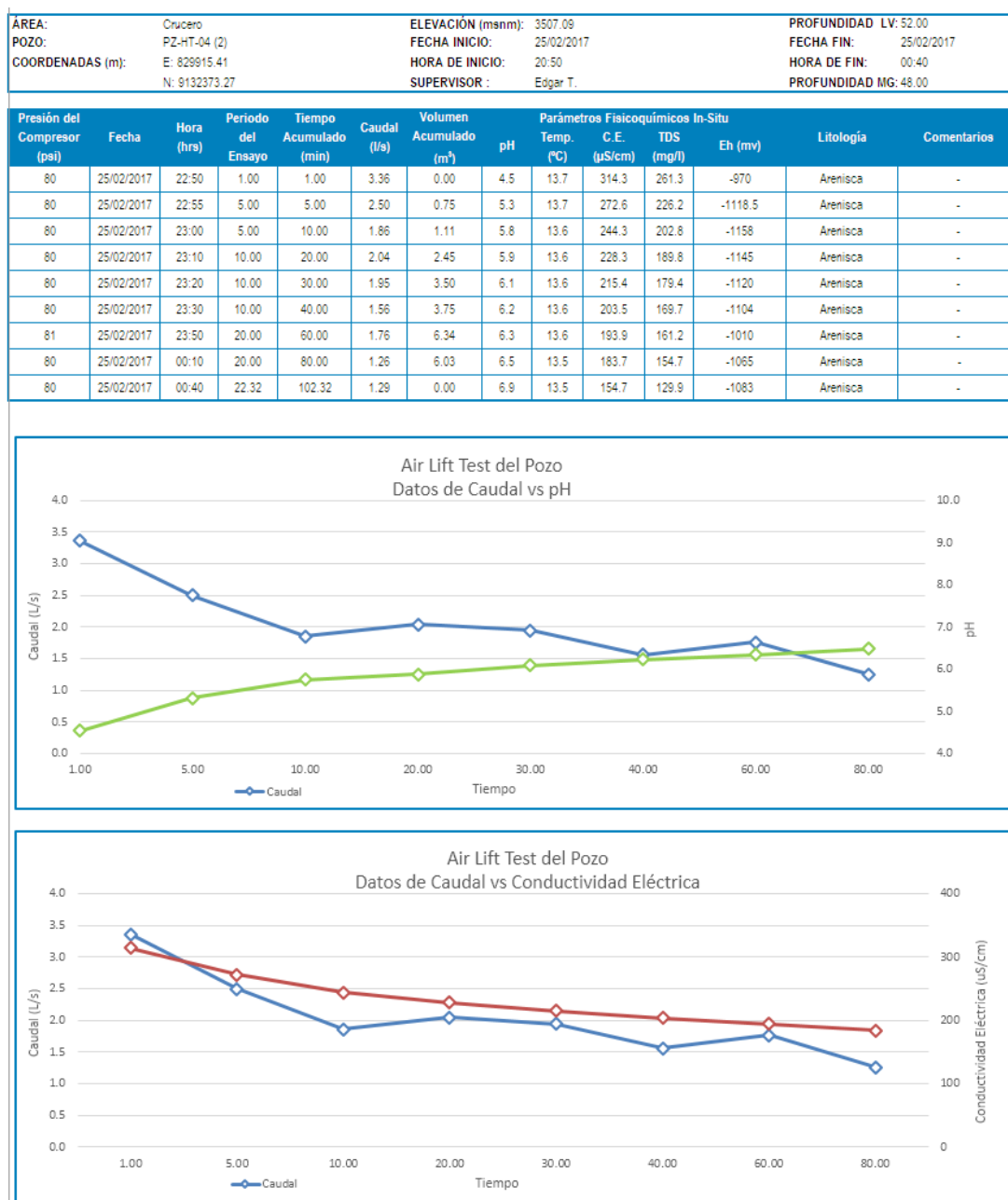


Figura 5.39 Prueba Air Lift (Sondaje PZ – HT – 04) a profundidad de 55.44 metros

\*Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo se toman dos pruebas Air Lift en el sondaje PZ – HT – 09 a diferentes profundidades conforme se avanza en la perforación. Se detallan en la figura 5.40 y figura 5.41 las pruebas realizadas.

En la figura 5.40 se obtiene un caudal promedio de 2.64 l/s con tiempo total de 1 hora 15 minutos. El pH comienza con un valor de 6.4 y se estabiliza en 7.3 conforme se avanza en el tiempo, mientras la conductividad eléctrica comienza con valores altos y se estabiliza con 143  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



Figura 5.40 Prueba Air Lift (Sondaje PZ – HT – 09) a profundidad de 66.90 metros

\*Fuente: Elaboración propia

En la figura 5.41 se obtiene un caudal promedio de 0.28 l/s con tiempo total de 2 horas. El pH comienza con un valor de 8.7 y se estabiliza en 7.7 conforme se avanza en el tiempo, mientras la conductividad eléctrica comienza en 41.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y tiene tendencia al ascenso hasta llegar a los 102  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

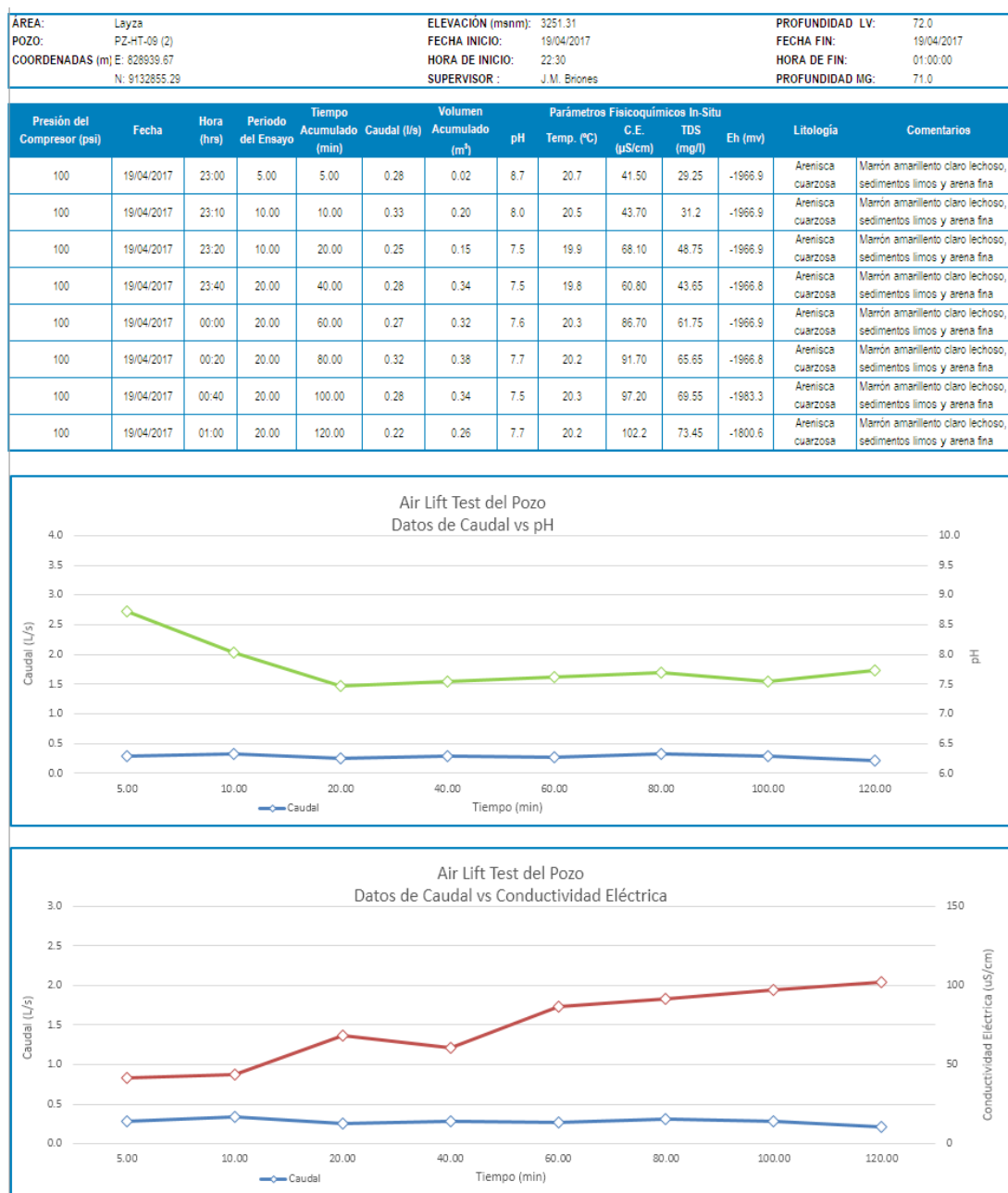


Figura 5.41 Prueba Air Lift (Sondaje PZ – HT – 09) a profundidad de 76.00 metros

\*Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.4.1 Propuesta Pozos – Punto de Captación

En las zonas de Coigobamba y Shiracmaca se tienen planeado ejecutar los pozos para los objetivos establecidos.

Teniendo como base la prospección geofísica, el monitoreo de niveles en los piezómetros cercanos para los pozos propuestos PW – HT – 01 y PW – HT – 02, así como también los ensayos hidráulicos realizados (Pruebas Air Lift) y la litología observada durante las perforaciones y mapeo de campo se decidió ubicar a estos pozos en las partes bajas, a fin de poder extraer un caudal que pueda ser controlado para las necesidades de la Unidad Minera.

##### - Profundidad y Diámetro

Los resultados de los ensayos hidráulicos han sugerido una profundidad de 80 metros para ambos pozos, un diámetro de perforación de 14” (35.56 cm) y un entubado de 8” (20.32 cm). En la tabla 5.12 se visualiza las características técnicas de los pozos y en la figura 5.42 se observa un gráfico preliminar de los pozos a ejecutarse.

*Tabla 5.12 Características técnicas de los pozos exploratorios*

<b>DISEÑO DE POZO EXPLORATORIO</b>	
Diámetro Perforación	14"
Diámetro Tubería de Acero	8"
Tramo de Tubería Ranurada	20 - 79 m
Tramo de Tubería Ciega	0 - 20 m
Tramo Gravilla 3 - 5 mm	10 - 80 m
Tramo Bentonita Pellets 3/8	5 - 10 m
Tramo Grouting (Cemento + Bentonita)	0 - 5 m

*\*Fuente: Elaboración propia*

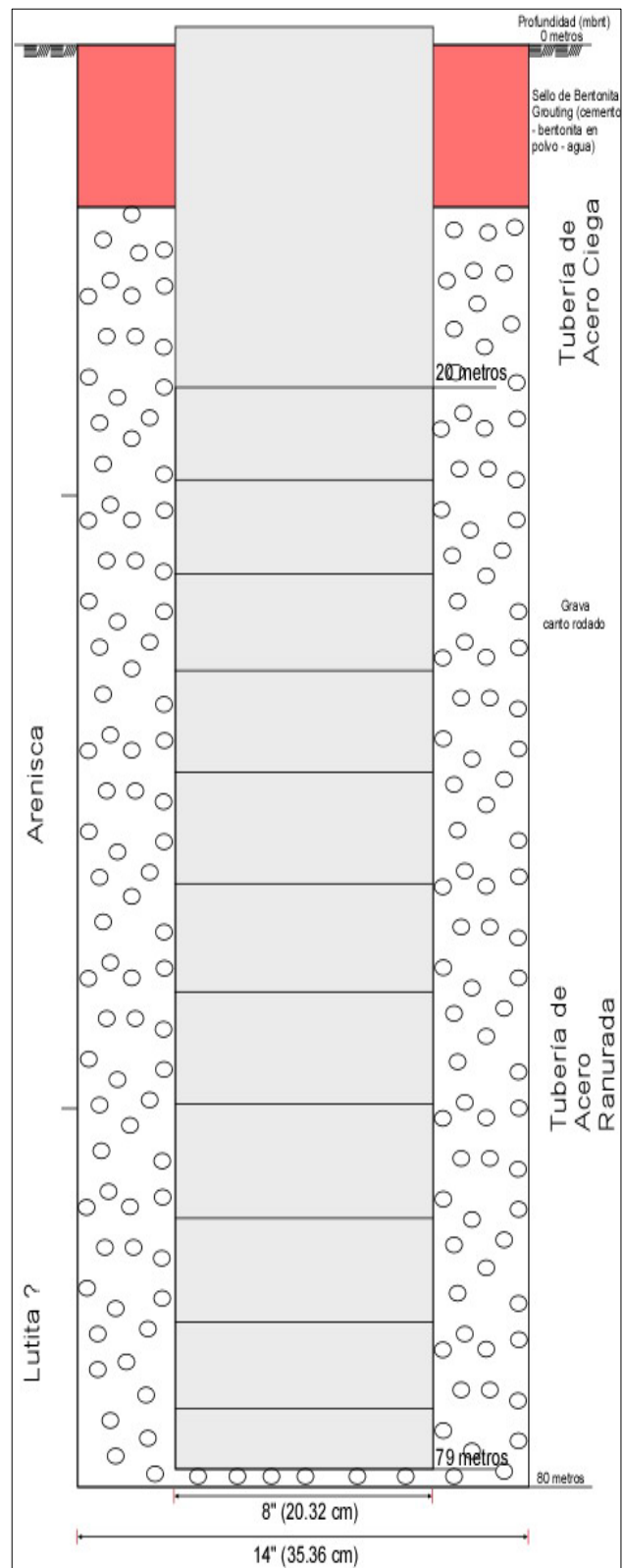


Figura 5.42 Gráfico preliminar de los pozos exploratorios

\*Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.4.2 Demanda de Agua

La Unidad Minera en la zona de estudio requiere de agua para su uso en los diferentes componentes, así como para el consumo humano (Potable).

Los dos pozos proyectados serán las fuentes de agua subterránea para el abastecimiento complementario durante los meses de déficit de agua (estrés hídrico).

Según el Área de Operaciones de la Unidad Minera el caudal de explotación máximo requerido a producir son 20 l/s por cada uno de los pozos los cuales estarán bajo un régimen de uso dependiendo de sus necesidades (Ver tabla 5.13).

Tabla 5.13 Régimen de Aprovechamiento por pozo exploratorio

Régimen de Bombeo (m <sup>3</sup> )				
Pozo Exploratorio	Horas al Día	Días a la Semana	Semanas al Mes	Meses al Año
	18	7	4	4
PW - HT - 01	1296	9072	38880	155520
PW - HT - 02	1296	9072	38880	155520

\*Fuente: Elaboración propia

La demanda de agua total necesaria por la Unidad Minera al mes es de 77,760 m<sup>3</sup>/mes, si consideramos los dos pozos y los meses entre junio a setiembre, el total requerido será 0.311 Hm<sup>3</sup>/año (Ver tabla 5.14).

Tabla 5.14 Demanda de Agua de la Unidad Minera

Pozo	Demanda (l/s)	Volumen de Demanda Mensual (m <sup>3</sup> )												Volumen Total Anual (Hm <sup>3</sup> )
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
PW - HT - 01	20	--	--	--	--	--	38880	38880	38880	38880	--	--	--	0.156
PW - HT - 02	20	--	--	--	--	--	38880	38880	38880	38880	--	--	--	0.156
Total	40	--	--	--	--	--	77760	77760	77760	77760	--	--	--	0.312

\*Fuente: Elaboración propia

### 5.4.4.3 Disponibilidad de Agua

Los flujos subterráneos transitan por areniscas cuarzosas pertenecientes a la Formación Farrat (considerada como la unidad de mayor importancia), ya que éstos fluyen por las fracturas y tienen comportamiento libre en algunos casos, evidenciado en algunos manantiales cercanos a la zona de estudio.

En la actualidad no se ha registrado el uso de aguas subterráneas, se han identificado algunos manantiales cerca a la Unidad Minera y tomando un radio de 1 kilómetro desde cada punto de captación se presenta en la tabla 5.15 los valores de disponibilidad de agua por cada uno de los pozos propuestos.

*Tabla 5.15 Disponibilidad de Agua Subterránea*

<b>Cuadro de disponibilidad de agua</b>	
<b>Disponibilidad Pozo PW - HT - 01</b>	
Volumen Acuífero (m <sup>3</sup> )	15707800
Recarga por Precipitación (m <sup>3</sup> )	602000
Descarga por Manantiales (m <sup>3</sup> )	16714
Volumen Disponible (hm <sup>3</sup> )	16.29
<b>Disponibilidad Pozo PW - HT - 02</b>	
Volumen Acuífero (m <sup>3</sup> )	2886300
Recarga por Precipitación (m <sup>3</sup> )	763000
Descarga por Manantiales (m <sup>3</sup> )	315.36
Volumen Disponible (hm <sup>3</sup> )	3.64
<b>Demanda de Agua Subterránea por pozo propuesto</b>	
Volumen de Demanda por Pozo (hm <sup>3</sup> )	0.156

*\*Fuente: Elaboración propia*

El balance hídrico (tabla 5.16) en las zonas Coigobamba y Shiracmaca detallan que la infiltración de las aguas de lluvia en el suelo es alta y que luego existe un sistema de retorno de flujo y que luego junto con la escorrentía subsuperficial y superficial configuran el caudal total.



Tabla 5.16 Balance Hídrico por pozo

Parámetros	Volumen Mensual Pozo PW - HT - 01 (m <sup>3</sup> )												Volumen Total Anual (hm <sup>3</sup> )
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
<b>Oferta Total de Agua</b>	16290000	16290000	16290000	15089086	15089086	15089086	15089086	15089086	15089086	15089086	15089086	16290000	185.9
<b>Demanda Total de Agua</b>						38880	38880	38880	38880				0.2
<b>Balance</b>	16290000	16290000	16290000	15089086	15089086	15050206	15050206	15050206	15050206	15089086	15089086	16290000	185.7
Parámetros	Volumen Mensual Pozo PW - HT - 02 (m <sup>3</sup> )												Volumen Total Anual (hm <sup>3</sup> )
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
<b>Oferta Total de Agua</b>	3640000	3640000	3640000	2122985	2122985	2122985	2122985	2122985	2122985	2122985	2122985	3640000	31.5
<b>Demanda Total de Agua</b>						38880	38880	38880	38880				0.2
<b>Balance</b>	3640000	3640000	3640000	2122985	2122985	2084105	2084105	2084105	2084105	2122985	2122985	3640000	31.3

\*Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO VI**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

El presente capítulo tiene como objetivo comprender las condiciones hidrogeológicas de la zona de estudio. El desarrollo de este punto comprende la interrelación de lo visto en los capítulos anteriores.

#### **6.1 Condiciones Geológicas – Estructuras Mayores**

En la interpretación geológica de las estructuras se observa y se registra las condiciones geológicas superficiales (aflorantes) y se proyecta las condiciones subterráneas. Las estructuras regionales de primer orden sugieren una conceptualización hidrogeológica, de manera que se relaciona el funcionamiento hidráulico subterráneo con la alimentación del acuífero y el tránsito de las aguas subterráneas. Los grandes lineamientos forman estructuras dominantes, los cuales a través de los componentes regionales (lagunas) están conectados.

Estas estructuras tienen una dirección generalizada en sentido NE – SO, formando una ramificación del Sistema Andino. Los pliegues asociados a las fallas inversas definen una extensión regional en la zona de estudio.

El lugar donde se ubica la Unidad Minera es el resultado de esfuerzos compresionales y extensionales que produjeron zonas mineralizadas, teniendo como origen fallas del tipo normal e inverso. Por lo tanto, la secuencia sedimentaria sufrió levantamiento, luego se plegó y por último fue sometida a diferentes procesos erosivos durante varios periodos hasta la actualidad.

## **6.2 Conductividad Hidráulica por Formación Geológica**

Existe una dispersión de datos los cuales se puede interpretar para entender las rocas en la zona de estudio. La recopilación de los resultados de los ensayos realizados durante las perforaciones nos ayuda a determinar las características hidráulicas, sin embargo, las capas horizontales de rocas no siempre tendrán un único valor. Se puede presentar variaciones tales como: plegamiento, grado de alteración, fracturamiento y presencia de fallas que afectarán las características hidráulicas.

Los rangos mostrados se obtienen luego de la integración de la relación de los ensayos realizados con datos coherentes. De acuerdo a las características del material y a la profundidad que se encuentran, las formaciones presentan relación con una determinada conductividad hidráulica (figura 6.1). En forma adicional, dado que la media geométrica (MG) es un valor medio representativo, se presenta en la tabla 6.1 los valores de conductividad hidráulica por formación geológica.

Tabla 6.1 Rango de Conductividad por Formación Geológica

Formación Geológica	Rango de Profundidades (mbnt)	Número de Ensayos	Conductividad Hidráulica (m/d)		Media Geométrica por Formación (m/d)
			Mín	Máx	
Santa - Carhuaz	0 - 130	19	9.34E-03	9.85E-02	3.30E-02
Farrat	0 - 100	64	4.29E-02	1.42E-01	8.50E-02
Dacita	0 - 100	10	4.29E-02	1.56E-01	4.28E-02

\*Fuente: Elaboración propia

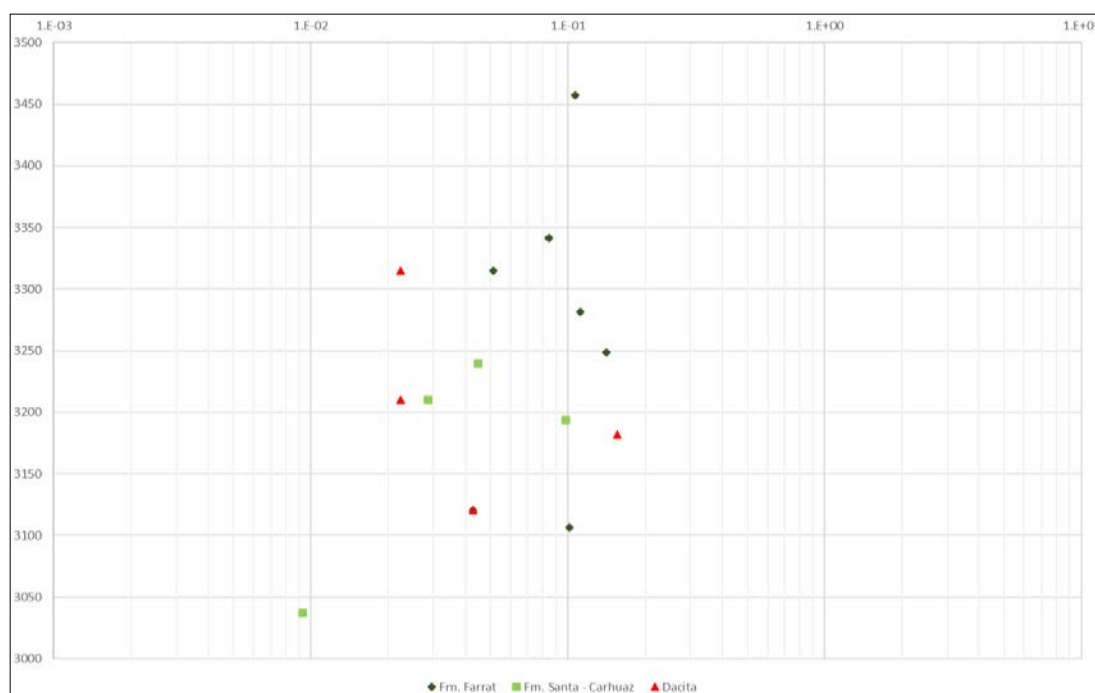


Figura 6.1 Formación geológica, cota (msnm) y conductividad hidráulica (m/d)

\*Fuente: Elaboración propia

### 6.3 Unidades Hidrogeológicas

Parte del análisis hidráulico y la caracterización geológica mediante los registros litológicos de los sondajes perforados y los afloramientos rocosos superficiales vistos son resumidos en las Unidades Hidrogeológicas (UH). A continuación, se describen las siguientes unidades y en la figura 6.2 su representación gráfica.

- **Unidad Hidrogeológica Sedimentaria 1 (UH – 01)**

Compuestas por areniscas cuarzosas con intercalaciones de limolitas escasas pertenecientes al Cretáceo Inferior. Los materiales de esta unidad se encuentran al Sur y Oeste de la zona de estudio. El afloramiento de esta unidad tiene una extensión regional y el tránsito del flujo es a través de la porosidad secundaria (fracturamiento), presentando por otra parte una escasa porosidad intergranular.

Se le considera como un acuífero confinado superficial de recuperación rápida, siendo parte fundamental del esquema hidrogeológico del área de estudio. En esta unidad se encuentran instalados la mayoría de piezómetros y también los manantiales inventariados los cuales producen descargas de flujos subterráneos.

- **Unidad Hidrogeológica Sedimentaria 2 (UH – 02)**

Compuesta por rocas carbonatadas con intercalaciones de areniscas y lutitas calcáreas y alternancia de arcillitas y limolitas pertenecientes al Cretáceo Inferior. Los materiales de esta unidad se ubican al norte y este de la zona de estudio. Su afloramiento es de extensión regional y es similar a la UH – 01 en cuanto a las características porosas. Se le considera un acuífero confinado profundo de recuperación lenta. Pocos piezómetros durante su instalación cortaron esta unidad y no se tiene registros de manantiales cercanos ubicados en éste.

- **Unidad Hidrogeológica Volcánica (UH – 03)**

Representado por las dacitas porfiríticas dentro de la zona de estudio, pertenecen al Terciario Superior. Presenta una porosidad netamente secundaria teniendo una conductividad hidráulica moderada – alta. Esta unidad es considerada un acuífero fracturado de solo tránsito, aportando sus aguas a las UH – 01 y UH – 02. Las dacitas

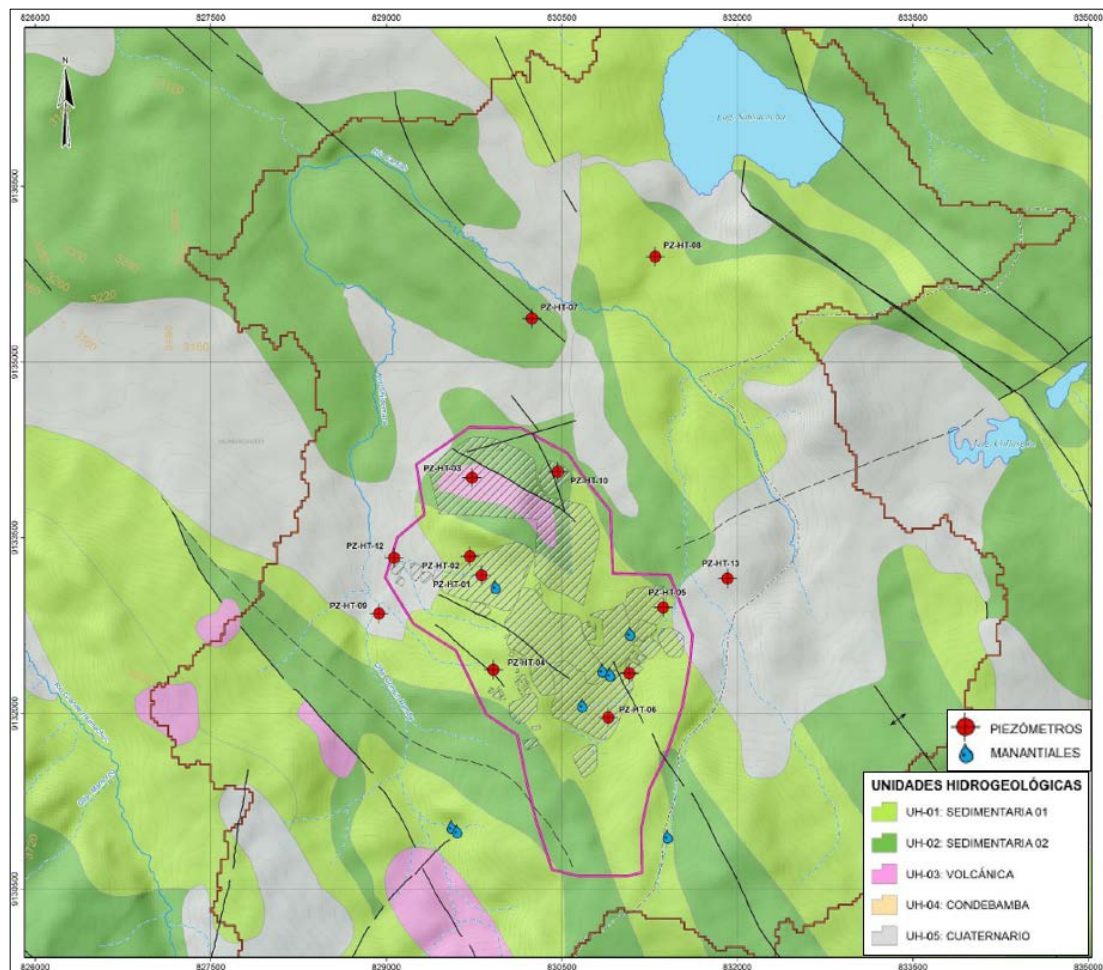
están emplazadas en la parte central del Proyecto, mientras que en otras zonas actúa como barrera hidráulica.

- **Unidad Hidrogeológica Condebamba (UH – 04)**

Esta unidad conformada por conglomerados y areniscas no compactas pertenece al Terciario Superior. Presenta una conductividad hidráulica moderada – alta debido a la deposición de un lago antiguo que cubría la zona sur del área de estudio. En la figura 6.2 se observa el afloramiento de esta unidad en extremo noreste el cual presenta una influencia de rápida recarga debido a su litología. Se le considera un acuífero libre, sin embargo, no se tiene registros efectuados en ella y es importante mencionar que está alejado del área de influencia directa.

- **Unidad Hidrogeológica Cuaternario (UH – 05)**

Compuesto por depósitos recientes: aluviales, fluvio-glaciares, lacustres están conformados por material fino, arenas y gravas. Esta unidad se le puede considerar como un acuífero libre. Presenta una alta porosidad intergranular de los materiales recientes y en conexión con el cuerpo rocoso. Los flujos se movilizan por gravedad a través de las fracturas.



*Figura 6.2 Unidad Hidrogeológicas del área de estudio*

*\*Fuente: Elaboración propia*

## 6.4 Acuífero

Perteneciente al Cretáceo Inferior consiste en una serie de areniscas cuarzosas con cuarcitas, en estratos delgados a medios, presentando fracturamiento moderado a intenso, de origen sedimentario de ambiente de playa.

La porosidad de mayor relevancia es la secundaria donde predomina el fracturamiento y se le considera un acuífero confinado de recuperación rápida.

La recarga del acuífero ocurre principalmente por la infiltración de las aguas en las formaciones cuaternarias producto de las precipitaciones en las partes altas de las microcuencas.

#### **6.4.1 Napa Freática**

Los datos iniciales de los niveles de agua subterráneos son registrados a través de la red piezométrica. El sentido inferido del flujo subterráneo se correlaciona con la variación topográfica.

Para un mejor entendimiento del comportamiento hidráulico se presentan los siguientes mapas:

- Isopropfundidades (figura 6.3), relacionado a la diferencia de profundidades en metros con respecto a la superficie
- Hidroisohipsas (figura 6.4), relacionado a la medida en cotas absolutas (msnm).



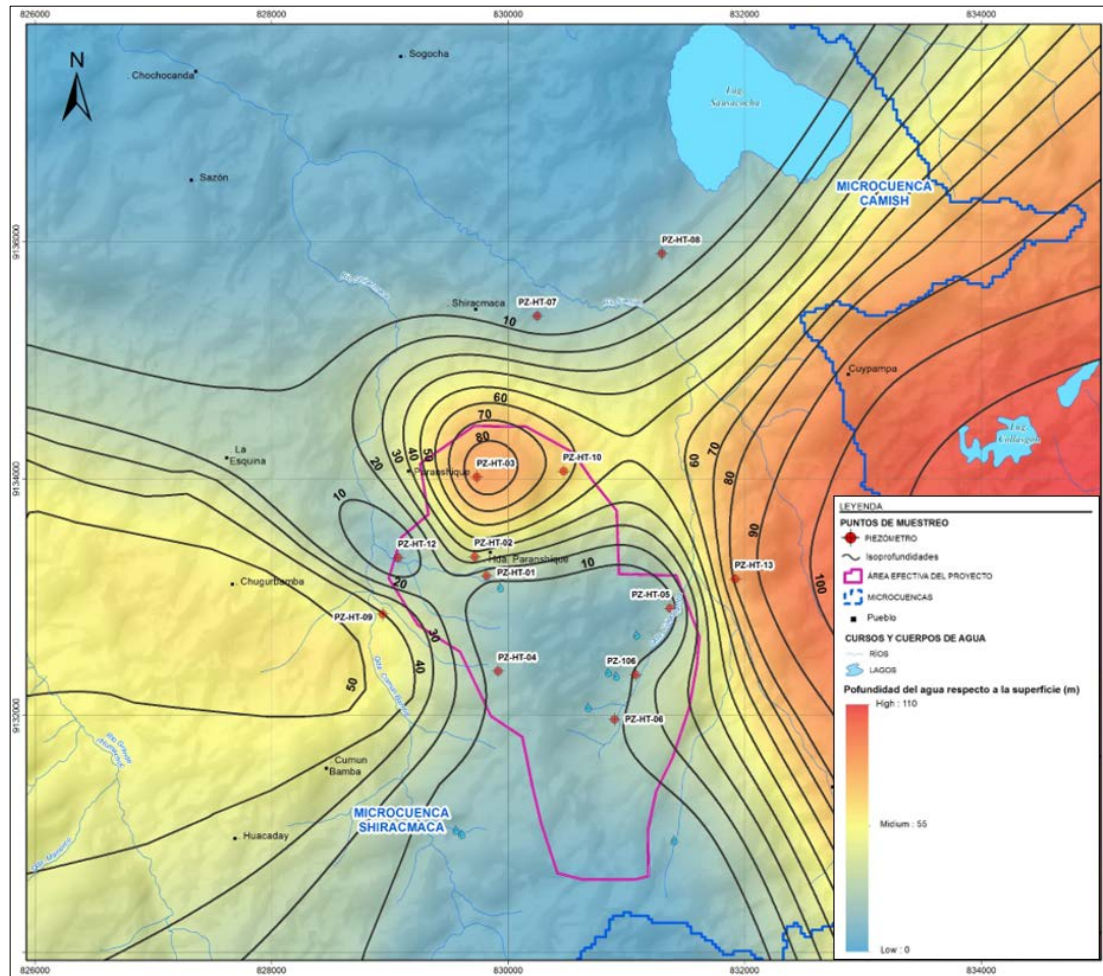


Figura 6.3 Mapa de isoprofundidades de la zona de estudio

\*Fuente: Elaboración propia

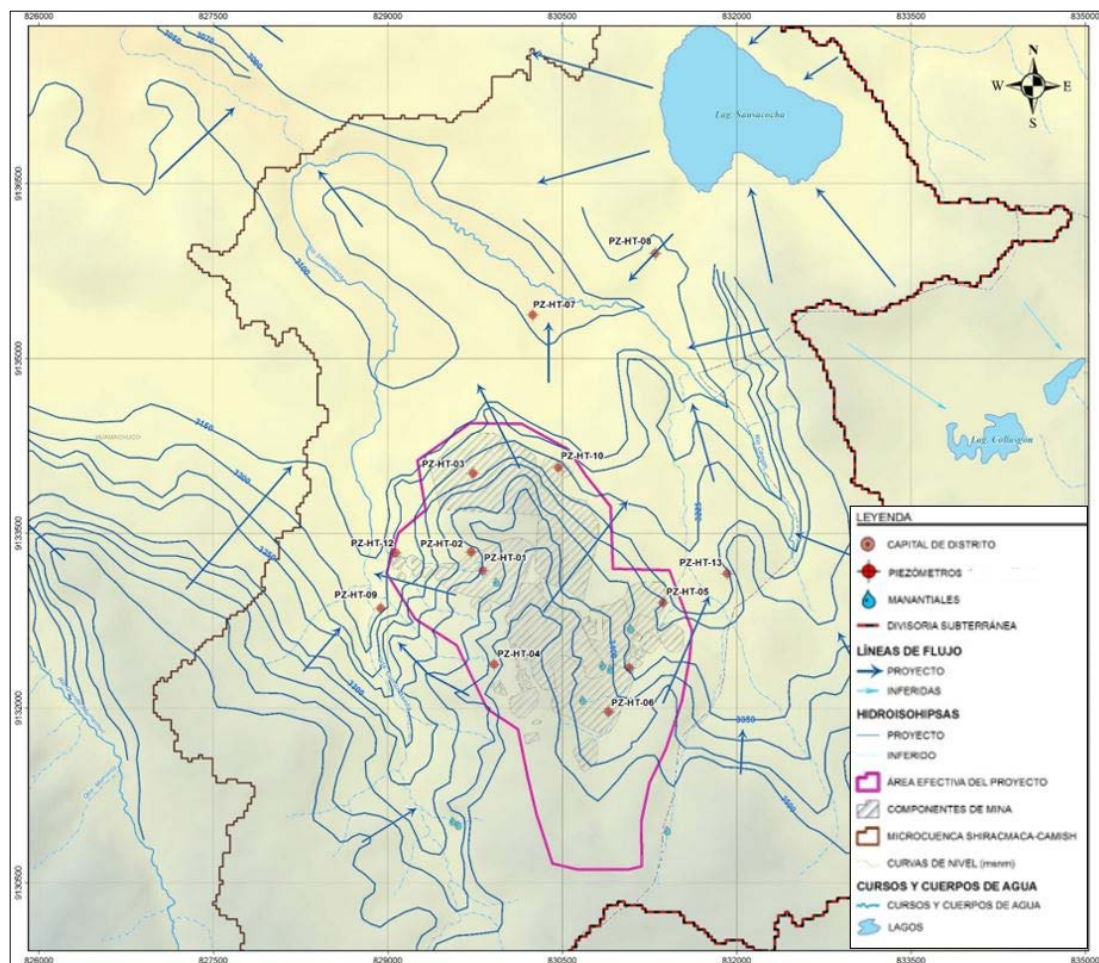


Figura 6.4 Mapa de hidroisohipsas de la zona de estudio

\*Fuente: Elaboración propia

## 6.5 Síntesis del Modelo Conceptual

Las estructuras tectónicas enmarcan las condiciones hidrogeológicas lo cual se refleja en la zona de estudio. Se destaca la presencia de cadenas montañosas con quebradas intermedias tales como Coigobamba y Shiracmaca.

Existen afloramientos plegados asociados a las formaciones de mayor extensión regional como la formación Farrat el cual junto con la formación Santa Carhuáz forman parte de las unidades hidrogeológicas UH – 01 y UH – 02.

La unidad hidrogeológica UH – 03 es de naturaleza ígnea y está ubicada en la parte central del yacimiento. Esta unidad es fisurada y cumple un importante funcionamiento en cuanto a la calidad de aguas en la zona de estudio.

La unidad hidrogeológica UH – 04 está ubicado relativamente lejos del proyecto, pero es importante hidrogeológicamente dado que es una zona propicia para la recarga.

La unidad hidrogeológica UH – 05 la más reciente y de naturaleza cuaternaria, está compuesto en su mayoría de conglomerados con intercalación de limos y arcillas. Esta unidad permite la infiltración de las aguas de la parte superficial hacia el subsuelo y los materiales generalmente se les puede encontrar en los ríos, quebradas y bordes de las principales lagunas.

En la figura 6.5 se observa la representación en 3D de la zona de estudio con las direcciones de flujo y las formaciones geológicas. Se nota la topografía del terreno y el sentido de las aguas.

El modelo conceptual presentado ha sido elaborado en gabinete con el software Leapfrog para realizar el modelo geológico base de la zona de estudio con énfasis en los rasgos hidrogeológicos que se incluyeron para su mejor análisis.

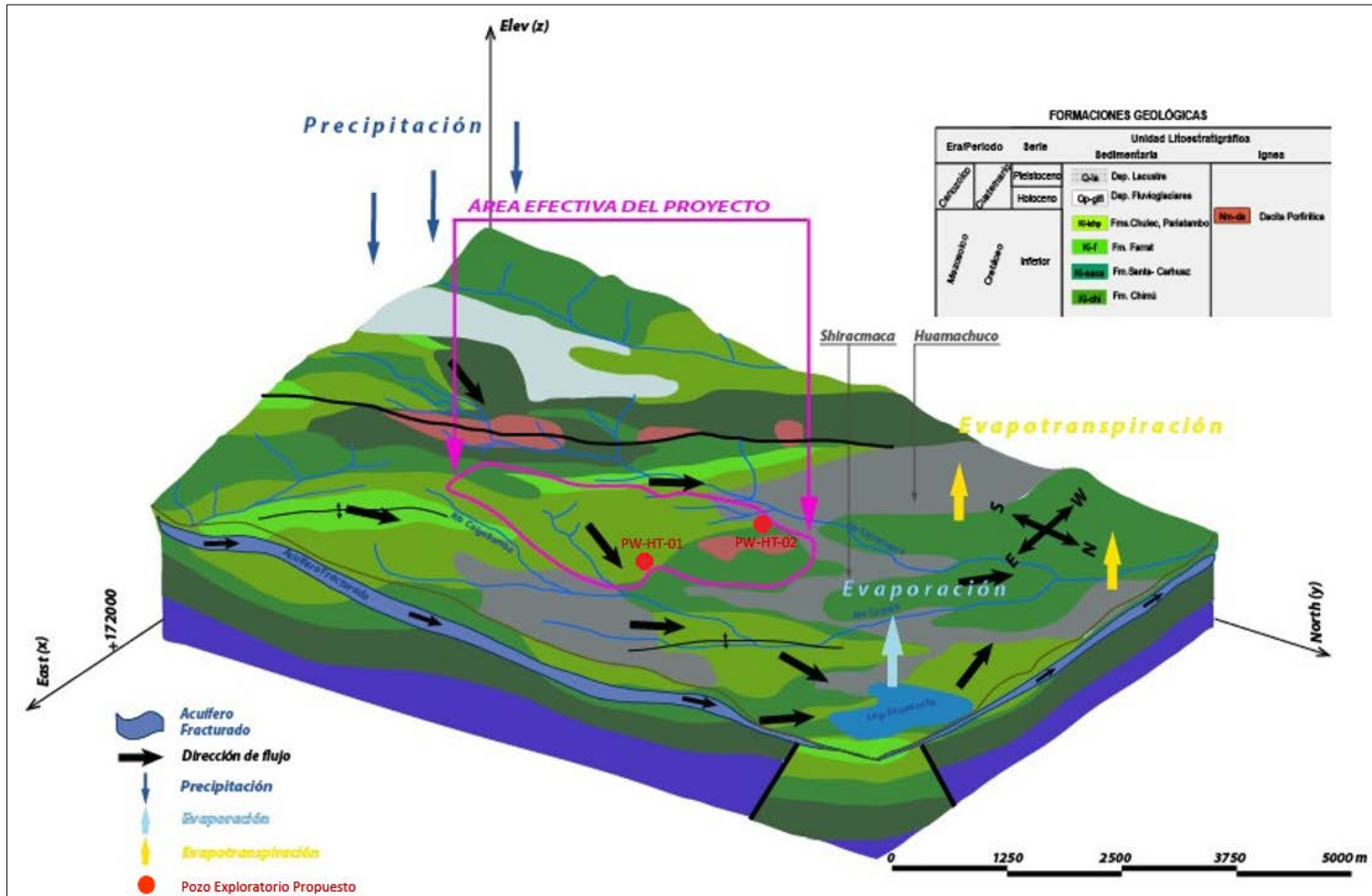


Figura 6.5 Modelo Conceptual de la zona de estudio

\*Fuente: Elaboración propia

## CONCLUSIONES

- En la zona de estudio predominan rocas sedimentarias clásticas y también rocas intrusivas cortando estas secuencias sedimentarias. Estos materiales sedimentarios propician la dirección de los flujos subterráneos.
- El principal acuífero y por sus características litológicas es la formación Farrat, consistente en gruesas capas de areniscas, ya que es capaz de almacenar las aguas subterráneas
- Se agruparon las formaciones geológicas para establecer cinco unidades hidrogeológicas. Las características de estas unidades son sedimentarias, volcánicas o depósitos cuaternarios.
- Las tomografías eléctricas realizadas durante la prospección geofísica definieron las zonas más compactas como resistivas y las zonas menos compactas como conductivas.
- Los niveles de agua en la zona de Shiracmaca varían entre los 10 y 40 metros de profundidad; mientras en la zona de Coigobamba las aguas subterráneas están entre los 40 y 80 metros de profundidad.
- Los puntos de muestreo fueron agrupados según las facie predominante, siendo la facie bicarbonatada cálcica la que más se encontró. Esto se explica por la presencia de areniscas y calizas.
- En la zona de estudio actualmente no se hace uso de aguas subterráneas, éstas serán usadas durante la temporada seca y el volumen que se requiere es muy inferior al volumen disponible.

## RECOMENDACIONES

- En la zona se deben continuar con los estudios complementarios para dar mayor detalle a los trabajos.
- En base a la prospección geofísica, se puede sugerir la ubicación de más puntos para poder instalar pozos de producción.
- Conforme se realicen nuevas perforaciones en la zona de estudio se debe actualizar la base geológica.
- El registro del nivel de agua los piezómetros pertenecientes a la Unidad Minera deben ser permanente por parte del personal encargado. Estos monitoreos deben ser con frecuencia establecida para establecer la variabilidad de los niveles freáticos.
- La toma de muestras de agua de los piezómetros y su análisis también debería realizarse trimestralmente para evaluar la calidad de las aguas subterráneas.
- El registro de parámetros fisicoquímicos tales como pH y conductividad eléctrica debe realizarse tanto a las aguas superficiales (manantiales, ríos y lagunas) y las aguas subterráneas (piezómetros y pozos) para verificar si no están contaminando al medio ambiente.

### REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Acosta, J. y Sampere, T. (2017). *Evolución Tectónica y Metalogenética del Perú*. Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores (10). ProExplo 2017. Instituto de Ingenieros de Minas de Perú. Lima, Perú.
- Apello, C.A.J. (2017). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Second Edition, pp. 649.
- Audebaud, E., Capdevila, R., Dalmayrac, B., Debelmas, J., Laubacher, G., Lefevre, C., Marocco, R., Martinez, C., Mattauer, M., Megard, F., Paredes, J. & Tomasi, P. (1973). *Les Traits Géologiques Essentiels del Andes Centrales (Pérou-Bolivia)*. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, vol. 15, pp. 73.
- Blas, E. (2016). *Evolución geoquímica de las aguas subterráneas en el valle del río Piura, subcuenca Chulucanas*. [Tesis de Grado para obtener el Título Profesional de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú].
- Brassington, R. (2006). *Field Hydrogeology the Geological Field Guide Series*. Third Edition, pp. 264.
- Chirme, E. (2020). *Estimación de parámetros hidráulicos mediante ensayos de recuperación de air – lift en taladros de exploración aplicado en la mina Antapaccay*. [Tesis de Grado para obtener el Título Profesional de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa, Perú].

- Custodio, E. y Lamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea – Tomo I y II*. Segunda Edición. Barcelona, España.
- De León, H., Dávila, R. y Aranda, L. (2013). *Diagnóstico del estado de las aguas subterráneas de Monterrey/México, aplicando hidrogeología urbana*. México D.F.
- Evans, D., Letient, H. & Aley, T. (2005). *Aquifer vulnerability mapping in karstic terrain Antamina mine, Peru*. Lima, Perú.
- Fetter, C.W. (2001). *Applied Hydrogeology*. 4<sup>th</sup> Edition. Prentice Hall, New Jersey.
- Galdós, H. (2019). *Hidrogeología de las filtraciones de agua en la mina Uchucchacua usando trazadores isotópicos naturales*. [Tesis de Grado para obtener el Título Profesional de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú].
- GEOCATMIN. (2019). *Cuadrángulo de Cajabamba 16-g-II*. Lima – Perú.
- Hydroterra SAC. (2017). *Estudio Hidrológico, Hidrogeológico y de Manejo de Aguas – Proyecto El Toro*. Lima, Perú.
- Islam, R., Singh, R. & Khan, R. (2016). *Methods of Estimating Ground water Recharge*. Department of Civil Engineering, King Khalid University, Abha, KSA.
- Kovalevsky, V.S., Kruman, G.P. & Rushton, K.R. (2004). *Groundwater Studies, An International Guide for Hydrogeological Investigations*.
- Marín, K. & Sangay, J. (2020). *Estudio Hidrogeológico mediante tomografía geoeléctrica para la localización de aguas subterráneas en el centro poblado*



*La Huaracilla – Jesús – Cajamarca 2020*. [Tesis de Grado para obtener el Título Profesional de Ingeniero Geólogo. Universidad Privada del Norte. Cajamarca, Perú].

Ministerio del Ambiente. (2017). *Modificatoria de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental de Agua, DS-072-2017-MINAM*. Gobierno de Perú.

Monsalve, S.G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Segunda Edición, pp. 191-192.

Orlich, G. (2001). *Mineralogical Analysis – Geo-Metallurgy Laboratory of Newmont Company*. Cajamarca, Perú.

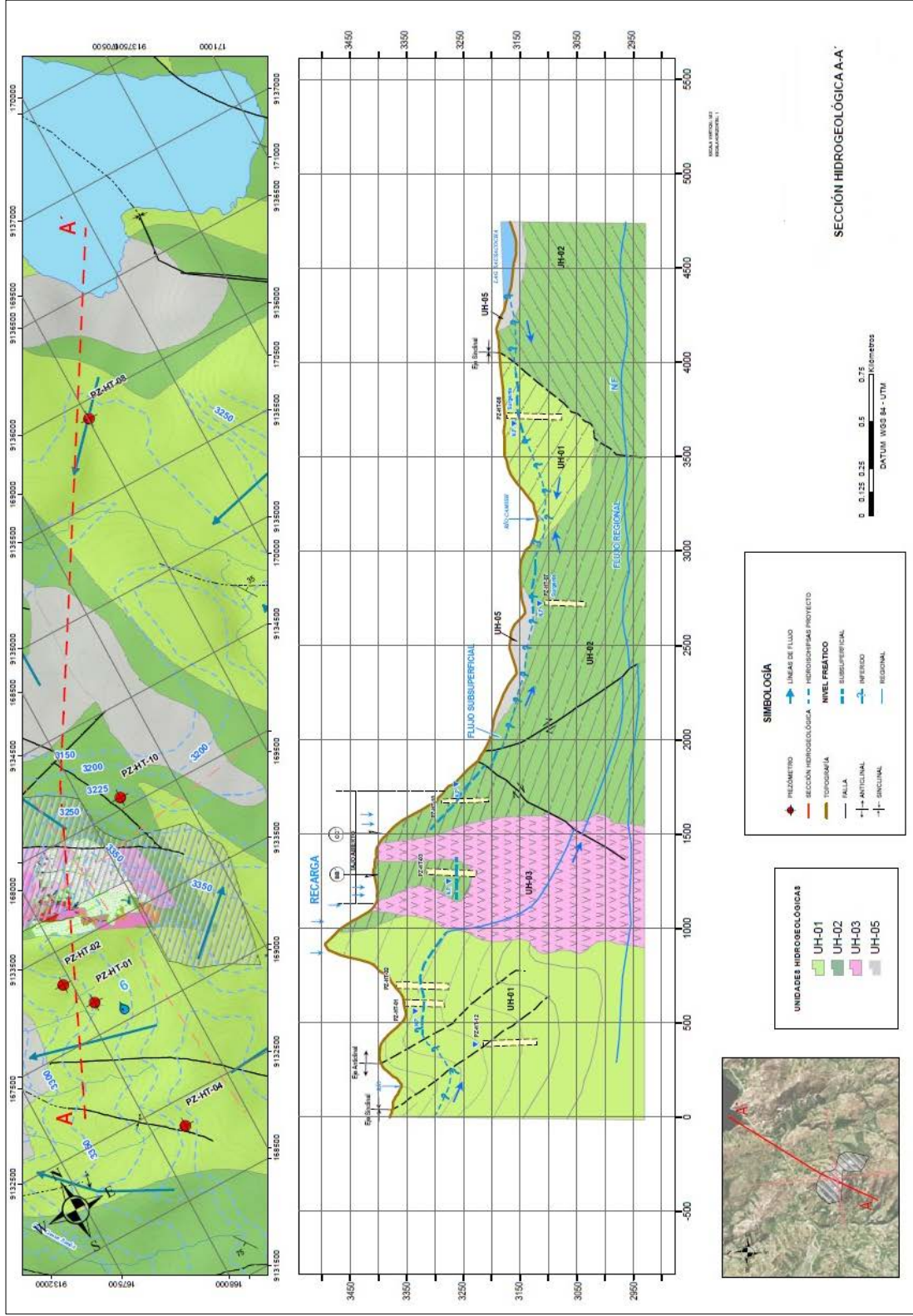
Rivera, L. (1980). *Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba: hojas 15-f, 15-g y 16-g*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET, boletín N°31. Lima, Perú.

Roscoe Moss Company. (1990). *Handbook of Groundwater Development*. United States of América.

Singhai, B.B.S. & Gupta, R.P. (2010). *Applied Hydrogeology of fractured Rocks*. Indian Institute of Technology Roorkee, Roorkee, India. Second Edition, pp. 408.

Weight, W.D. & Sonderegger, J.L. (2001). *Manual of Applied Field Hydrogeology*. McGraw – Hill, New York.

## **ANEXOS**



SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA A-A'

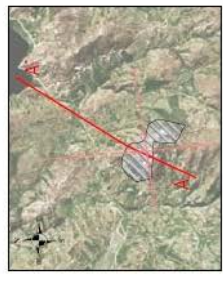


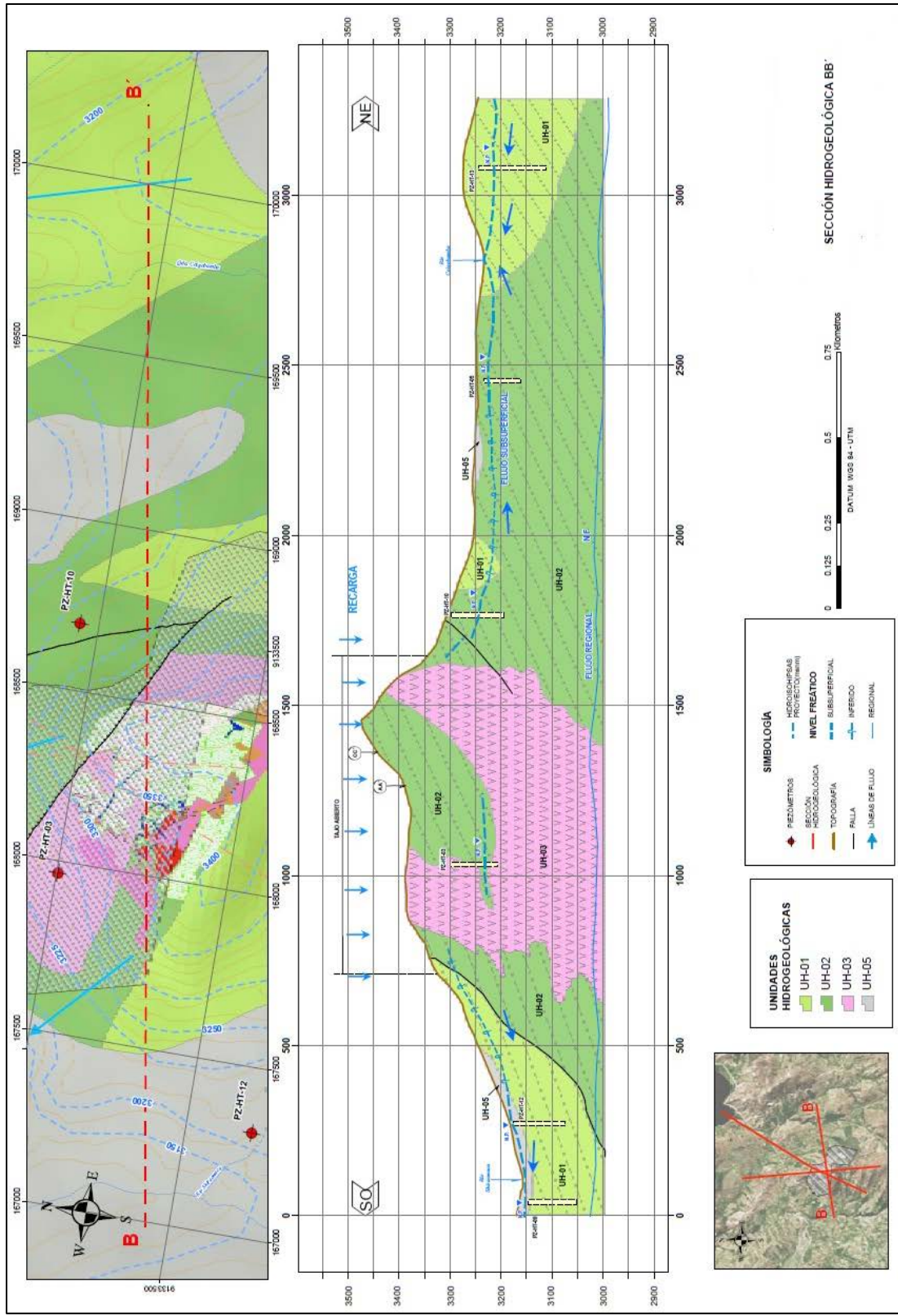
**SIMBOLOGÍA**

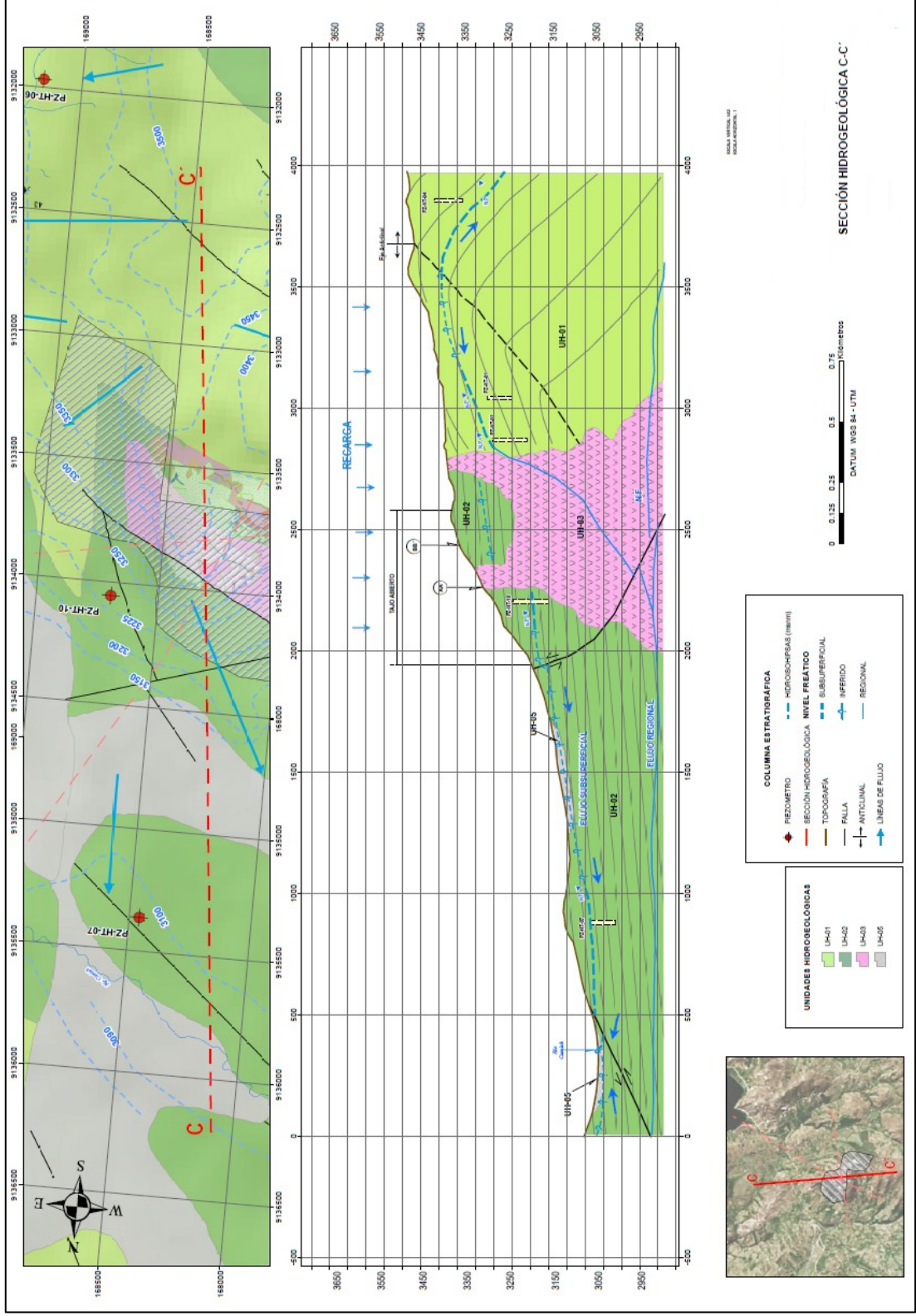
- REJAMETRO
- SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA
- TOPOGRAFÍA
- FALLA
- ANTICLINAL
- SINCLINAL
- LINEAS DE FLUJO
- HIPODISYNAS PROYECTO
- NIVEL FREÁTICO
- FLUJO SUBSUPERFICIAL
- INFERIDO
- REGIONAL

**UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS**

- UH-01
- UH-02
- UH-03
- UH-05







SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA C-C

ESCALA: 1:50000

0 0.125 0.25 0.5 0.75 Kilómetros  
DATUM WGS 84 - UTM

- COLUMNA ESTRATIGRÁFICA**
- PIEZOMETRO
  - SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA
  - TOPOGRAFÍA
  - FALLA
  - ANTICLINAL
  - LÍNEAS DE FLUJO
- NIVEL FREÁTICO**
- HIPOCENSTRAS (máxim)
  - SUBSUPERFICIAL
  - INFERIO
  - REGIONAL

- UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS**
- UH-01
  - UH-02
  - UH-03
  - UH-05



COMPLILADO DE CONCENTRACIONES DE MUESTRAS													
	Revisión		A										
Proyecto:	Fecha		Junio 2017										
Cliente:	Proyecto N°		30004.16										
Ubicación:	Elaborado por:		E. Urrutubay										
	Revisado por:		A. Comejo										
N° muestra impuesto por el laboratorio	210824/2017-11	228285/2017-10	215081/2017-10	228284/2017-10	210827/2017-10	215094/2017-10	221427/2017-10	215093/2017-10	221423/2017-10	215092/2017-10	228289/2017-10		
Fecha de Muestreo	31/05/2017	09/06/2017	02/06/2017	09/06/2017	31/05/2017	02/06/2017	06/06/2017	02/06/2017	06/06/2017	02/06/2017	09/06/2017		
Hora de Muestreo	8:40:00	8:20:00	8:40:00	18:00:00	8:30:00	11:30:00	11:30:00	14:30:00	11:00:00	10:25:00	13:00:00		
Tipo de muestra	Aguja Subterránea	Aguja Subterránea	Aguja Subterránea	Aguja Subterránea	Aguja Subterránea	Aguja Subterránea	Aguja Subterránea	Aguja Subterránea	Aguja Subterránea	Aguja Subterránea	Aguja Subterránea		
Código de muestra AZ1	AFL-01	PZ-MA-03	PZ-MA-04	PZ-MA-05	PZ-MA-06	PZ-MA-07	PZ-MA-09	PZ-MA-10	PZ-MA-11	PZ-MA-12	PZ-MA-13		
Analisis													
Aciditas y Gases	Unidad	LD											
Alcalinidad Total	mg/L		165	3.3	123.5	98.4	177.8	247	67.2	36.6	178.2	128.2	40.3
Alcalinidad por Hidróxido	mg CaCO3/L		<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Alcalinidad por Bicarbonatos	mg HCO3-/L		20.1	4	150.7	120.1	204.4	295.1	82	44.7	205.8	156.5	49.2
Alcalinidad por Carbonatos	mg CO3-/L												
Conductividad (Laboratorio)	µS/cm												
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L												
Demanda Química de Oxígeno	mg O2/L												
Como Huevo de Aislamiento	mg/L		0.006	0.062	0.037	0.236	0.784	0.248	0.161	0.037	0.805	0.783	0.065
Nitrogeno Amoniacal	mg/L		6.61	5.77	7.43	8.39	8.51	8.19	7.49	7.66	8.5	7.81	7.29
pH (Laboratorio)	Unidades pH		<0.0006										
CN libre	mg/L		<0.001										
CN total	mg/L												
Sólidos Totales Disueltos	mg/L		187	108	188	146	316	328	122	78	312	182	72
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L		84	129	1077	361	111	464	1683	106	104	243	42
Bromo (Br)	mg/L		<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004
Cloro (Cl)	mg/L		1.959	1.219	4.71	0.917	14.88	7.753	1.1	3.25	15.08	0.367	2.079
Fluoreo (F)	mg/L		0.005	0.014	0.16	0.172	0.174	0.564	0.114	0.06	0.177	0.173	0.045
Fosforo como fosfato (P-PO4-3)	mg/L		<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004
Nitrógeno como nitrato (N-NO3-)	mg/L		10.86	0.615	<0.002	0.03	0.124	<0.002	0.025	<0.002	0.125	<0.002	0.103
Nitrógeno como nitrato (N-NO2-)	mg/L		<0.004	0.01	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	0.019	<0.004	<0.004	<0.004	0.008
Sulfato (SO4-2)	mg/L		74.17	58.67	11.85	10.82	46.52	4.405	17.07	16.04	46.55	13.13	7.169
Aluminio Disuelto (Al)	mg/L		0.029	0.139	0.025	0.218	0.116	0.045	0.043	0.06	0.121	0.284	1.133
Antimonio Disuelto (Sb)	mg/L		0.00004	0.00715	0.0005	0.00102	0.00345	<0.00004	0.00321	0.00045	0.0035	0.00385	0.00042
Arsénico Disuelto (As)	mg/L		0.00003	0.00386	0.0023	0.00562	0.00214	<0.00003	0.00544	0.00063	0.00273	0.00181	0.00063
Bario Disuelto (Ba)	mg/L		0.0183	0.0142	0.015	0.152	0.0405	0.437	0.0348	0.0656	0.0402	0.0508	0.051
Berilio Disuelto (Be)	mg/L		<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002
Bismuto Disuelto (Bi)	mg/L		<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002
Boro Disuelto (B)	mg/L		0.002	<0.002	0.048	0.027	0.371	0.154	0.051	0.013	0.371	0.16	0.011
Cadmio Disuelto (Cd)	mg/L		<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001

Cromatografía Iónica

Metales Disueltos

Parámetros Fisicoquímicos

COMPILADO DE CONCENTRACIONES DE MUESTRAS											
	Revisión		A								
Proyecto:	Fecha		Junio 2017								
Cliente:	Proyecto N°		30004_16								
Ubicación:	Elaborado por:		E. Urushiy								
	Revisado por:		A. Cornejo								
N° muestra impuesto por el laboratorio:	2108212017-1.1	2262952017-1.0	2150912017-1.0	2150942017-1.0	2143272017-1.0	2143272017-1.0	2143272017-1.0	2150972017-1.0	2262952017-1.0		
Fecha de Muestreo	31/03/2017	08/06/2017	02/08/2017	02/08/2017	06/06/2017	06/06/2017	06/06/2017	02/08/2017	09/08/2017		
Hora de Muestreo	9:40:00	9:20:00	8:40:00	18:00:00	9:30:00	13:30:00	11:30:00	12:30:00	10:25:00		
Tipo de Muestra	Agua Subterránea	Agua Subterránea	Agua Subterránea	Agua Subterránea	Agua Subterránea	Agua Subterránea	Agua Subterránea	Agua Subterránea	Agua Subterránea		
Código de muestra A21	AE-L-01	PZ-MA-03	PZ-MA-44	PZ-MA-05	PZ-MA-06	PZ-MA-07	PZ-MA-09	PZ-MA-10	PZ-MA-11		
País	Perú	Perú	Perú	Perú	Perú	Perú	Perú	Perú	Perú		
Ubicación	Huamachuco - Sánchez Carnión - La Libertad	Huamachuco - Sánchez Carnión - La Libertad	Huamachuco - Sánchez Carnión - La Libertad	Huamachuco - Sánchez Carnión - La Libertad	Huamachuco - Sánchez Carnión - La Libertad	Huamachuco - Sánchez Carnión - La Libertad	Huamachuco - Sánchez Carnión - La Libertad	Huamachuco - Sánchez Carnión - La Libertad	Huamachuco - Sánchez Carnión - La Libertad		
LD											
Calcio Disuelto (Ca)	0.1	37.89	12.6	16.84	7.37	7.5	15.62	7.87	7.36	18.56	10.79
Cobalto Disuelto (Co)	0.0001	0.00114	0.00765	0.00741	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.00061	<0.0001	0.00066	0.00169
Cobre Disuelto (Cu)	0.00003	0.00778	0.05101	<0.00003	0.00195	<0.0003	0.00696	0.00106	0.00232	0.00896	0.00357
Cromo Disuelto (Cr)	0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Estronio Disuelto (Sr)	0.00003	<0.00003	<0.00003	0.0003	<0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Estronio Disuelto (Sr)	0.0002	0.0633	0.0595	0.0651	0.2521	0.1795	0.2458	0.035	0.2336	0.3208	0.0339
Fosforo Disuelto (P)	0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
Hierro Disuelto (Fe)	0.0004	0.0332	0.1911	1.022	0.1033	<0.0004	0.2959	0.0444	0.2195	0.7022	0.0396
Litio Disuelto (Li)	0.0001	<0.0001	0.0064	0.0108	0.01	0.0613	0.022	0.005	0.0592	0.0287	0.005
Magnesio Disuelto (Mg)	0.003	1.823	2.532	8.24	2.864	2.796	4.414	3.755	2.795	9.935	1.952
Manganeso Disuelto (Mn)	0.00003	0.10654	4.029	0.6129	0.04589	0.04487	0.12207	0.18765	0.01277	0.15737	0.18751
Mercurio Disuelto (Hg)	0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003	<0.00003
Molibdeno Disuelto (Mo)	0.00002	<0.00002	<0.00002	0.00347	0.0051	0.0036	0.0047	0.00101	0.00396	0.00169	<0.00002
Níquel Disuelto (Ni)	0.002	0.0488	0.0087	0.0017	0.0011	0.0027	0.0066	0.0018	0.0011	0.0006	0.0052
Plata Disuelta (Ag)	0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003
Plomo Disuelto (Pb)	0.0002	<0.0002	0.0059	<0.0002	0.0081	0.0007	<0.0002	<0.0002	0.0008	0.0017	0.0005
Potasio Disuelto (K)	0.04	1.77	1.81	2.31	1.49	4.49	5.85	1.29	4.45	4.39	3.03
Selenio Disuelto (Se)	0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004
Silicio Disuelto (Si)	0.2	2.9	4.7	7.2	4.8	4.1	4	9.8	3.4	3.6	2.9
Sodio Disuelto (Na)	0.006	6.897	5.987	3.93	22.09	88.87	7.187	6.44	82.02	16.41	1.795
Talio Disuelto (Tl)	0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002
Titanio Disuelto (Ti)	0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002
Uranio Disuelto (U)	0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003	<0.000003
Vanadio Disuelto (V)	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0004	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Zinc Disuelto (Zn)	0.01	<0.0100	1.218	0.0123	0.048	<0.0100	<0.0100	<0.0100	0.0235	0.0253	0.0252
Aluminio Total (Al)	0.002	1.327	0.978	6.632	8.162	10.01	4.769	2.207	1.29	1.748	0.688
Armonio Total (Sb)	0.00004	0.01817	0.00178	0.0012	0.0038	<0.0004	0.00501	0.0006	0.00387	0.00602	0.00091
Arsenico Total (As)	0.00003	0.02986	0.01428	0.01181	0.0048	0.0025	0.02023	0.00172	0.00401	0.00935	0.00211
Bario Total (Ba)	0.0001	0.024	0.0175	0.0488	0.2154	0.1433	0.0547	0.165	0.0544	0.0644	0.0641
Berilio Total (Be)											
Bismuto Total (Bi)											
Boro Total (B)											
Cadmio Total (Cd)	0.00001	<0.00001	0.00467	0.00037	<0.00001	<0.00001	0.00035	<0.00001	<0.00001	<0.00001	<0.00001
Metales Totales											

