

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



TESIS

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO DEL
YACIMIENTO EPITERMAL DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO,
PROVINCIA DE LUCANAS, REGIÓN AYACUCHO - PERÚ, 2023**

PRESENTADO POR:

Br. JUAN JOSE ZECENARRO CHOQUE

Br. PERCY MEZA CABRERA

**PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO GEÓLOGO**

ASESOR:

Mgt. JOSE DIONICIO CARDENAS ROQUE

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada:

"Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico del Yacimiento Epitermal de Unidad Mimera Apumayo, Provincia de Lucanas, Región Ayacucho - Perú, 2023"

presentado por: Percy Meza Cabrera con DNI Nro.: 47212875 presentado por: Juan José Zeconairo Choque con DNI Nro.: 47220295 para optar el título profesional/grado académico de Ingeniero Geólogo

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 6.....%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 09 de Diciembre de 2024



Firma

Post firma José Dionicio Cardenas Roque

Nro. de DNI 23873595

ORCID del Asesor 0000-0002-5261-419X

Se adjunta: Identificador de entrega
trm:oid:::27259:41#059377

Juan José Zecenarro Choque

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO DEL YACIMIENTO EPITERMAL DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:414059377

Fecha de entrega

8 dic 2024, 10:17 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

9 dic 2024, 7:44 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

3erBorrador_JJZCH_PMC.pdf

Tamaño de archivo

11.6 MB

221 Páginas

46,987 Palabras

246,123 Caracteres

6% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
68 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a Dios por bendecirme la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, y ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Agradecemos a la Universidad Nacional de San Antonio Abad de Cusco (UNSAAC) por habernos acogido y abierto las puertas para poder estudiar nuestra carrera. Así como, a los diferentes docentes que nos brindaron sus conocimientos para seguir mejorando continuamente.

A nuestro amigo y asesor Ing. José D. Cárdenas Roque por su motivación y ganas de transmitirnos sus conocimientos, brindarnos su apoyo y consejos en el desarrollo de la presente tesis.

A nuestros padres y madres por todos sus consejos, recomendaciones y alientos para seguir creciendo profesionalmente frente a cualquier adversidad.

A nuestros amigos y compañeros de trabajo porque gracias a ellos ganamos la experiencia técnica necesaria para el desarrollo de la presente tesis de investigación.

RESUMEN

El desarrollo del “Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico del Yacimiento Epitermal de la Unidad Minera Apumayo” muestra que el sistema hidrogeológico está dominado por las secuencias volcánicas de los grupos Barroso (UH-GB) y Tacaza (UH-GT). Conceptualmente, el Grupo Barroso se comportaría como un medio fracturado “Poco Permeable” con valores de permeabilidad de $1e-7$ y $1e-4$ m/s; y el Grupo Tacaza como un medio fracturado de “Baja Permeabilidad” con valores de permeabilidad de $1e-9$ y $1e-7$ m/s. Además, los gradientes muestran medios fracturados de “Baja Permeabilidad a Impermeables” a mayores profundidades.

La precipitación total anual (PTA) del área de estudio varía entre los 425.4 mm/año para la Microcuenca Cuchuhuasi y 570 mm/año para la Microcuenca Auropata, donde la época húmeda se distribuye entre los meses lluviosos de octubre a marzo y los meses secos entre mayo a agosto, mientras que los meses de transición podrían ser abril y setiembre. Por otro lado, la recarga por infiltración de lluvia fue estimada en el orden de 70 a 80 mm/año, lo que representaría una tasa de recarga al sistema hidrogeológico en el orden del 13 al 18% de la precipitación total anual.

El agua subterránea fluye de direcciones SE a NW, E a W, NE a SW y NW a SE influenciado por las delimitaciones hidrológicas de cada microcuenca; donde las recargas se originarían en las partes altas (cotas piezométricas de 4200 msnm hacia la parte alta de las microcuencas) y descargarían hacia los fondos de las quebradas y/o ríos (cotas piezométricas de 3800 msnm hacia las partes de descarga de las microcuencas). Las características químicas presentes denotan aguas jóvenes y/o locales de composición Iónica Bicarbonatada Cálcica, Bicarbonatada Sódica y Sulfatadas Cálcica asociados a procesos de alteración de las rocas volcánicas de composición andesítica.

Los caudales base mensuales (promedio), estimados con el método de Eckhardt, oscilan entre los 5 a 20 L/s, mientras que, los simulados en régimen transitorio (2014 – 2019) oscilan entre los 3 a 17 L/s. El modelo numérico no muestra la generación de filtraciones en el Pad de Lixiviación, Botadero Ayahuanca, Botadero Huamanloma y Tajo Ayahuanca desde las actividades de Pre-Minado hasta la fase operativa de diciembre 2019, lo cual es coherente con los reportes de campo históricos de Apumayo y las observaciones realizadas en la visita de campo entre el 2018 y 2019. Por otro lado, se simularon flujos en el orden de 0.78 y 1 L/s hacia los tajos Huamanloma y Apumayo, durante la Fase 3 (2017) en adelante para el Tajo Huamanloma y la Fase 1 (2015) en adelante para el Tajo Apumayo, así como, filtraciones del orden de 1 L/s para el Botadero Apumayo. Estas estimaciones son congruentes, puesto que en las visitas de campo del 2018 y 2019 se evidenciaron filtraciones y humedad hacia las paredes del Tajo Huamanloma y filtraciones en el orden de 2 a 3 L/s en el Tajo Apumayo. Estos datos en conjunto respaldan de manera adecuada los planteamientos del modelo hidrogeológico conceptual para el área de estudio.

PALABRAS CLAVE

Hidrología, geología, hidráulica subterránea, permeabilidad, hidroquímica, composición iónica, piezómetro, modelo hidrogeológico.

ABSTRACT

The development of this research work, shows that the hydrogeological system is dominated by the volcanic sequences of the Barroso (UH-GB) and Tacaza (UH-GT) groups. Conceptually, the Barroso Group would behave as a “Slightly Permeable” fractured medium with permeability values of $1e-7$ and $1e-4$ m/s; and the Tacaza Group as a “Low Permeability” fractured medium with permeability values of $1e-9$ and $1e-7$ m/s. Additionally, the gradients show “Low Permeability to waterproof” fractured media at greater depths.

The total annual precipitation (PTA) of the study area varies between 425.4 mm/year for the Cuchuhuasi Microbasin and 570 mm/year for the Auropata Microbasin, where the wet season is distributed between the rainy months from October to March and the dry months. between May to August, while the transition months could be April and September. On the other hand, recharge due to rain infiltration was estimated in the order of 70 to 80 mm/year, which would represent a recharge rate to the hydrogeological system in the order of 13 to 18% of the total annual precipitation.

Groundwater flows from SE to NW, E to W, NE to SW and NW to SE directions influenced by the hydrological delimitations of each micro-basin; where the recharge would originate in the high parts (piezometric levels of 4200 meters above sea level towards the upper part of the microbasins) and would discharge towards the bottoms of the streams and/or rivers (piezometric levels of 3800 meters above sea level towards the discharge parts of the microbasins). The chemical characteristics present denote young and/or local waters of Calcium Bicarbonate Ionic, Sodium Bicarbonate and Calcium Sulphated composition associated with alteration processes of volcanic rocks of andesitic composition.

The monthly base flows (average), estimated with the Eckhardt method, range between 5 to 20 L/s, while those simulated in the transitional regime (2014 - 2019) range between 3 to 17 L/s. The numerical model does not show the generation of leaks in the Leaching Pad, Ayahuanca Dump, Huamanloma Dump and Ayahuanca Pit from the Pre-Mining activities to the operational phase of December 2019, which is consistent with the historical field reports from Apumayo and the observations made during the field visit between 2018 and 2019. On the other hand, flows were simulated in the order of 0.78 and 1 L/s towards the Huamanloma and Apumayo pits, during Phase 3 (2017) onwards for the Huamanloma Pit and Phase 1 (2015) onwards for the Apumayo Pit, as well as leaks of the order of 1 L/s for the Apumayo Dump. These estimates are consistent, since in the field visits in 2018 and 2019, leaks and humidity were evident towards the walls of the Huamanloma Pit and leaks in the order of 2 to 3 L/s in the Apumayo Pit. These data together adequately support the approaches of the conceptual hydrogeological model for the study area.

KEYWORDS

Hydrology, geology, underground hydraulics, permeability, hydrochemistry, ionic composition, piezometer, hydrogeological model.

Tabla de contenido

CAPITULO I ASPECTOS GENERALES.....	23
1.1 Introducción	23
1.2 Ubicación y acceso	24
1.3 Historia de la unidad minera Apumayo	25
1.4 Planteamiento del problema.....	26
1.4.1 Problema general.....	27
1.4.2 Problemas específicos	27
1.4.3 Justificación.....	28
1.4.3.1 Valor teórico.....	28
1.4.3.2 Valor práctico	29
1.4.3.3 Valor social.....	29
1.5 Objetivos de la Investigación.....	29
1.5.1 Objetivo General	29
1.5.2 Objetivos específicos.....	29
1.6 Hipótesis	30
1.6.1 Hipótesis general	30
1.6.2 Hipótesis específica.....	30
1.7 Metodología de la Investigación.....	31
1.7.1 Unidad de análisis.....	32
1.7.2 Población de estudio.....	32
1.7.3 Tamaño de muestra.....	32

1.7.4	Selección de muestra	32
1.7.5	Identificación de variables.....	33
1.8	Metodología de trabajo	33
1.8.1	Etapa 1: Precampo	33
1.8.2	Etapa 2: Campo	33
1.8.3	Etapa 3: Post campo	34
CAPITULO II MARCO TEORICO.....		35
2.1	Marco referencial.....	35
2.1.1	Antecedentes.....	35
2.2	Bases teóricas.....	38
2.2.1	Área de Drenaje (A)	38
2.2.2	Perímetro (P)	39
2.2.3	Longitud (L)	39
2.2.4	Coefficiente de Compacidad (Kc)	39
2.2.5	Factor de Forma (Kf).....	40
2.2.6	Pendiente Media (%).....	40
2.2.7	Método de Isoyetas.....	41
2.2.8	Temperatura.....	42
2.2.9	Evapotranspiración	42
2.2.10	Método de Lutz Scholtz.....	42
2.2.11	Ecuación de Balance Hídrico (CM).....	43
2.2.12	Coefficiente de Escorrentía (C)	44

2.2.13	Precipitación Efectiva (PE)	44
2.2.14	Método de Eckhardt	46
2.2.15	Unidad Estratigráfica.....	46
2.2.15.1	Grupo Tacaza (PN-t)	46
2.2.15.2	Grupo Barroso (Qp-b-and)	47
2.2.16	Esquema de un Cuerpo Epitelmal de Alta Sulfuración.....	47
2.2.17	Conductividad Hidráulica (K)	48
2.2.18	Ensayos Durante la Perforación	49
2.2.18.1	Lugeon (Packer Test).....	49
2.2.18.2	Lefranc (Carga Constante y Carga Variable)	56
2.2.19	Ensayos Posteriores a la Perforación.....	59
2.2.19.1	Pruebas de Bombeo	59
2.2.20	Transmisividad (T) y Coeficiente de Almacenamiento (S).....	62
2.2.21	Balance Iónico (IBE).....	63
2.2.22	Diferencia Porcentual Relativa (DPR)	64
CAPITULO III METODOLOGIA APLICADA.....		66
3.1	Hidrología	66
3.1.1	Sistemas Hidrográficos.....	66
3.1.1.1	Características Fisiográficas	66
3.1.2	Climatología	67
3.1.2.1	Precipitación (P)	67
3.1.2.1.1	Validación de Precipitación Satelital TRMM	69

3.1.2.1.2	Precipitación Media Anual – Método de Isoyetas.....	73
3.1.2.2	Temperatura (T).....	73
3.1.2.3	Evapotranspiración (ETR).....	74
3.1.3	Régimen de Caudales	74
3.1.3.1	Generación de Caudales Mensuales – Método Lutz Scholz....	75
3.1.3.1.1	Cálculo y Calibración de Caudales Mensuales por Microcuenca	75
3.1.3.1.2	Cálculo del Caudal Base – Método Eckhardt.....	75
3.2	Geología.....	75
3.2.1	Unidades Estratigráficas.....	75
3.2.1.1	Grupo Tacaza (PN-t)	76
3.2.1.2	Grupo Barroso (Qp-b-and)	76
3.2.1.3	Depósitos Fluvio-Aluviales (Q-fl/al).....	77
3.2.1.4	Depósitos Antrópicos (Q-an).....	77
3.2.2	Geología Estructural.....	77
3.2.3	Tipo de Yacimiento y Alteraciones.....	79
3.2.4	Construcción del Modelo Geológico 3D.....	79
3.3	Ensayos Hidráulicos	79
3.3.1	Parámetros Hidráulicos	80
3.3.1.1	Conductividad Hidráulica (K).....	80
3.3.1.2	Transmisividad (T) y Coeficiente de Almacenamiento (S).....	81
3.4	Hidroquímica	82

3.4.1	Parámetros Hidroquímicos	83
3.4.2	Estaciones de Muestreo y Monitoreo	84
3.4.3	Control de Calidad.....	87
3.4.4	Parámetros Fisicoquímicos de Campo	90
3.4.5	Composición Iónica del Agua Subterránea	92
3.4.6	Procesos Hidroquímicos	93
3.5	Monitoreo de Niveles Piezométricos	94
3.5.1	Puntos de observación	95
3.6	Modelo Hidrogeológico Numérico	97
3.6.1	Construcción del Modelo.....	98
3.6.1.1	Definición de la Malla de Cálculo y Dominio del Modelo	98
3.6.1.1.1	Definición del Dominio	98
3.6.1.1.2	Definición del Dominio	100
3.6.1.1.3	Construcción del Modelo Hidrogeológico Numérico 3D.....	102
3.6.1.1.4	Condiciones de Borde.....	104
3.6.1.2	Representación de Componentes de Ingeniería.....	106
3.6.1.2.1	Botaderos y Pad de Lixiviación.....	106
3.6.2	Calibración en Régimen Estacionario Pre-Minado 2010 – 2014 .	107
3.6.2.1	Metodología de la Calibración en Régimen Estacionario	108
3.6.2.1.1	Selección de Piezómetros para la Calibración en Régimen Estacionario	108
CAPITULO IV ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS...		111

4.1	Características Fisiográficas	111
4.1.1	Área de drenaje (A)	111
4.1.2	Perímetro (P)	111
4.1.3	Longitud (L)	111
4.1.4	Coefficiente de compacidad (Kc)	111
4.1.5	Factor de Forma (Kf).....	112
4.1.6	Pendiente Media (%).....	112
4.2	Precipitación Media Anual y Mensual.....	113
4.3	Caudales Anuales y Mensuales Estimados.....	115
4.3.1	Caudales de Escorrentía por Microcuenca – Método Lutz Scholz.....	115
4.3.2	Caudal Base por Microcuenca – Método Eckhardt.....	122
4.4	Geología y Geología Estructural.....	129
4.4.1	Configuración Estructural Base (Preliminar)	133
4.4.2	Modelo Geológico 3D	135
4.5	Conductividad Hidráulica (K).....	137
4.6	Transmisividad (T) y Coeficiente de Almacenamiento (S)	140
4.7	Parámetros Fisicoquímicos del Agua Subterránea	141
4.7.1	Microcuenca Jailpasca.....	141
4.7.2	Microcuenca Huamanloma.....	141
4.7.3	Microcuenca Jispicahua.....	142
4.7.4	Microcuenca Parapacancha	143
4.7.5	Microcuenca Chaviña.....	144

4.8	Composición Iónica del Agua Subterránea.....	146
4.9	Procesos Hidroquímicos del Agua Subterránea.....	150
4.10	Hidrogramas Históricos de Niveles de Agua Subterránea.....	153
4.10.1	Zona Pad de Lixiviación.....	154
4.10.2	Zona Diques.....	155
4.10.3	Zona Tajo y Botadero Apumayo	156
4.10.4	Zona Tajo y Botadero Ayahuanca	157
4.10.5	Zona Tajo y Botadero Huamanloma	158
4.11	Modelo Hidrogeológico Conceptual	160
4.11.1	Balance del Acuífero	160
4.11.1.1	Entradas al Sistema Acuífero	161
4.11.1.1.1	Recarga del Acuífero	161
4.11.1.2	Salida del Sistema Acuífero	163
4.11.1.2.1	Extracción de los Tajos.....	163
4.11.1.2.2	Descargas hacia la Microcuencas	164
4.11.2	Unidades Hidrogeológicas.....	165
4.11.2.1	UH-GB: Grupo Barroso	166
4.11.2.2	UH-GT: Grupo Tacaza	167
4.11.3	Piezometría y Dirección de Flujo	169
4.11.4	Descripción del Modelo Hidrogeológico Conceptual	178
4.12	Resultados de la Calibración en Régimen Estacionario 2014.....	180
4.12.1	Estadísticas de Calibración.....	180

4.12.2	Valores de Conductividad Hidráulica y Recarga Calibrada.....	184
4.12.3	Consideraciones Conductividad Hidráulica y Balance del Acuífero	
	186	
4.12.3.1	Unidades Hidrogeológicas.....	186
4.12.3.2	Balance del Acuífero	189
4.12.4	Nivel de Agua Simulados en Régimen Estacionario Pre-Minado	
2014	193	
4.13	Resultados Calibración en Régimen Transitorio Operativo 2014 – 2019	
	198	
4.13.1	Estadísticas de Calibración Transitoria 2014 – 2019	198
4.13.2	Niveles de agua y Caudales Estimados Calibración Transitoria 2014	
– 2019	201	
4.13.3	Consideraciones Piezometría Campo, Régimen Estacionario y	
Transitorio	209	
4.13.3.1	Piezometría y Dirección de Flujo	209
CAPITULO V DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		212
5.1	Estimaciones de la Precipitación Total Anual (PTA).....	212
5.2	Estimaciones Teóricas del Caudal de Escorrentía y Caudal Base	213
5.3	Composición Iónica y Procesos Hidroquímicos del Agua Subterránea	
	215	
5.4	Balance de Masa del Modelo Numérico en Régimen Estacionario....	216
5.5	Niveles Piezométricos Simulados en Régimen Estacionario.....	218

CONCLUSIONES.....	219
RECOMENDACIONES	222
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	224
ANEXOS.....	228

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Límite Superior para la Precipitación Efectiva</i>	45
Tabla 2 <i>Coefficientes para Determinar la Precipitación Efectiva</i>	45
Tabla 3 <i>Rangos de Valores de Conductividad Hidráulica en Función a las Características de los Materiales en Terreno</i>	49
Tabla 4 <i>Parámetros Máximos y Mínimos Variables Experimentales</i>	53
Tabla 5 <i>Potencial del Acuífero Basado en la Transmisividad (T).....</i>	62
Tabla 6 <i>Valores Típicos de Coeficiente de Almacenamiento (S).....</i>	62
Tabla 7 <i>Estaciones Meteorológicas Operadas por SENAMHI</i>	68
Tabla 8 <i>Estaciones Virtuales TRMM.....</i>	68
Tabla 9 <i>Precipitaciones Promedio Mensual (mm) entre 1998 a 2017.....</i>	71
Tabla 10 <i>Temperatura Promedio mensual 1964 a 2014 – Estación Coracora</i>	74
Tabla 11 <i>Evapotranspiración Total Mensual y Total Anual</i>	74
Tabla 12 <i>Principales Iones del Agua Subterránea</i>	83
Tabla 13 <i>Estaciones de Muestreo Hidroquímico – Agua Subterránea</i>	85
Tabla 14 <i>Resultados de Análisis Metales Disueltos Laboratorio en mg/L (ICP – MS)</i>	88
Tabla 15 <i>Resultados de Análisis Metales Disueltos Laboratorio en meq/L (ICP – MS)</i>	89

Tabla 16 <i>Resultados de Balance Iónico (IBE)</i>	89
Tabla 17 <i>Monitoreo de Propiedades Fisicoquímicas Piezómetros Tipo Casagrande</i>	90
Tabla 18 <i>Monitoreo Propiedades Fisicoquímicas Piezómetros</i>	91
Tabla 19 <i>Clasificación del Grado de Acidez</i>	91
Tabla 20 <i>Ratio de Iones y Reacciones de Alteración de Minerales en el Agua Subterránea</i>	94
Tabla 21 <i>Monitoreo de Niveles de Agua Subterránea 2018 y 2019</i>	96
Tabla 22 <i>Puntos de Observación Calibración Régimen Estacionario</i>	109
Tabla 23 <i>Resumen de Parámetros Geomorfológicos de las Microcuencas ...</i>	112
Tabla 24 <i>Precipitación Total Mensual y Anual en las Microcuencas – Método Isoyetas</i>	113
Tabla 25 <i>Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Auropata</i>	116
Tabla 26 <i>Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Chaviña</i>	117
Tabla 27 <i>Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Cuchuhuasi</i>	118
Tabla 28 <i>Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Jailpasca</i>	119
Tabla 29 <i>Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Huamanloma</i>	120
Tabla 30 <i>Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Jispicahua</i>	121
Tabla 31 <i>Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Parapacancha</i>	122
Tabla 32 <i>Estimaciones de Caudales Base Mensual y Anual – Microcuenca Auropata</i>	123
Tabla 33 <i>Estimaciones de Caudales Base Mensual y Anual – Microcuenca Chaviña</i>	123
Tabla 34 <i>Estimaciones de Caudales Base (m³/s) – Microcuenca Cuchuhuasi</i>	124

Tabla 35 <i>Estimaciones de Caudales Base Mensual y Anual – Microcuenca Jailpasca</i>	125
Tabla 36 <i>Estimaciones de Caudales Base (m³/s) – Microcuenca Huamanloma</i>	126
Tabla 37 <i>Estimaciones de Caudales Base Mensual y Anual – Microcuenca Jispicahua</i>	127
Tabla 38 <i>Estimaciones de Caudales Base (m³/s) – Microcuenca Parapacancha</i>	127
Tabla 39 <i>Unidades Litológicas Presentes en el Área de Estudio</i>	130
Tabla 40 <i>Valores Conductividad Hidráulica de Acuerdo con el Modelo Geológico 3D</i>	138
Tabla 41 <i>Valores Conductividad Hidráulica de Acuerdo con la Profundidad Evaluada</i>	139
Tabla 42 <i>Valores de Parámetros hidráulicos Durante la Prueba de Bombeo</i>	140
Tabla 43 <i>Facies de Agua Subterránea</i>	147
Tabla 44 <i>Valores de Recarga Estimados</i>	162
Tabla 45 <i>Valores de Caudal Base Estimados</i>	165
Tabla 46 <i>Características Unidades Hidrogeológicas</i>	166
Tabla 47 <i>Parámetros Estadísticos de Calibración Pre-Minado 2014</i>	183
Tabla 48 <i>Diferencias de Niveles Medidos vs Niveles Simulados Calibración Estacionaria</i>	183
Tabla 49 <i>Balance Hídrico Calibración Estacionaria Pre-Minado 2014</i>	184
Tabla 50 <i>Conductividades Hidráulicas Calibradas Pre-Minado 2014</i>	185
Tabla 51 <i>Recarga Calibradas Pre-Minado 2014</i>	185

Tabla 52 <i>Valores de Caudal Base Acumulados Anuales Conceptuales vs Simulados</i>	190
Tabla 53	201
Tabla 54 <i>Puntos de Observación Medidos en Campo vs Simulados (Régimen Estacionario y Transitorio)</i>	210
Tabla 55 <i>Estimaciones de Caudal de Escorrentía y Caudal Base Históricos y Actual</i>	214
Tabla 56 <i>Facie d Agua Históricos y Actual</i>	216

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Mapa de ubicación</i>	25
Figura 2 <i>Distribución Visual y Cálculo de la Precipitación con el Método de Isoyetas</i>	42
Figura 2 <i>Esquema Estructural de un Cuerpo Epitermal de Alta Sulfuración..</i>	48
Figura 3 <i>Esquema Simplificado Ensayos Lugeon Packer Simple</i>	51
Figura 4 <i>Mapa Estaciones Meteorológicas Virtuales y SENAMHI</i>	73
Figura 5 <i>Controles Estructurales Regionales Presentes en el Área de Estudio</i>	78
Figura 6 <i>Distribución Sondajes con Ensayos Hidráulicos Durante y Posterior a la Perforación</i>	82
Figura 7 <i>Estaciones de Muestreo</i>	87
Figura 8 <i>Estaciones de Monitoreo de Niveles de Agua Subterránea</i>	97
Figura 9 <i>Dominio del Modelo Hidrogeológico Numérico Preminado 2014 y Operacional 2019</i>	100

Figura 10 <i>Criterios de Calidad – Angulo Interior Máximo de Triángulos e Incumplimiento del Criterio de Delaunay</i>	102
Figura 11 <i>Vistas Comparativas del Modelo Geológico 3D (Leapfrog) y Numérico 3D (FEFLOW)</i>	104
Figura 12 <i>Condiciones de Borde del Modelo</i>	106
Figura 13 <i>Estas de Crecimiento de Botaderos y Pad de Lixiviación 2014 al 2019</i>	107
Figura 14 <i>Mapa de Isoyetas – Precipitación Total Anual</i>	115
Figura 15 <i>Mapa Geológico Integrado</i>	132
Figura 16 <i>Secciones Geológicas</i>	133
Figura 17 <i>régimen de Fallamiento Inverso y Estructuras Típicas de Riedel</i> .	134
Figura 18 <i>Vista Secciones Geológicas Interpretativas y Fallas Principales</i> .	136
Figura 19 <i>Vista del Modelo Geológico 3D Final</i>	137
Figura 20 <i>Recarga Potencial Estimada</i>	162
Figura 21 <i>Esquema de Clasificación de Acuíferos – Struckmeier (1995)</i>	169
Figura 22 <i>Mapa Hidrogeológico</i>	173
Figura 23 <i>Sección Hidrogeológica Regionales</i>	176
Figura 24 <i>Sección Hidrogeológica Locales</i>	177
Figura 25 <i>Piezometría Modelada (Free Surface) Calibración Estacionaria</i> . 195	
Figura 26 <i>Secciones Hidrogeológicas Regionales Calibración Estacionaria 2014</i>	196
Figura 27 <i>Secciones Hidrogeológicas Locales Calibración Estacionaria 2014</i>	197
Figura 28 <i>Piezometría Modelada (Free Surface) Calibración Transitoria Año 2019</i>	203

Figura 29 *Secciones Hidrogeológicas Regionales Calibración Estacionaria*
2014 204

Figura 30 *Secciones Hidrogeológicas Locales Calibración Estacionaria 2014*
..... 205

Índice de Gráficos

Gráfico 1 <i>Patrones Típicos Pruebas Lugeon (Houlsby 1976)</i>	56
Gráfico 2 <i>Esquema Simplificado Ensayo Lefranc</i>	57
Gráfico 3 <i>Esquema de Validación de la Precipitación TRMM cada 1km2</i>	70
Gráfico 4 <i>Precipitación Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM Puquio</i> <i>Periodo 1998 a 2017</i>	70
Gráfico 5 <i>Precipitación Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM</i> <i>Coracora Periodo 1998 a 2017</i>	71
Gráfico 6 <i>Precipitación Promedio Mensual Multianual (mm) Estaciones</i> <i>Virtuales (1998 – 2017) y SENAMHI (1964 – 2017)</i>	72
Gráfico 7 <i>Precipitación Mensual Total Microcuencas</i>	114
Gráfico 8 <i>Caudales de Escorrentía - Bases Mensuales y Anuales Estimados vs</i> <i>Caudales Observados</i>	129
Gráfico 9 <i>Distribución Probabilística y Vertical de la Conductividad Hidráulica</i>	139
Gráfico 10 <i>Variación del pH y CE Época Húmeda (noviembre – diciembre 2018)</i> <i>y Época de Transición (marzo – abril 2019)</i>	145
Gráfico 11 <i>Variación del TDS y Temperatura Época Húmeda (noviembre –</i> <i>diciembre 2018) y Época de Transición (marzo – abril 2019)</i>	146
Gráfico 12 <i>Diagrama Piper Piezómetros y Manantial – Época Húmeda</i> <i>(diciembre 2018)</i>	149
Gráfico 13 <i>Diagrama Piper Piezómetros y Manantial: Época Seca (julio 2010)</i> <i>y Época Húmeda (diciembre 2018)</i>	150
Gráfico 14 <i>Gráfico Mifflin (Flujo Asociado) y Gibbs del Agua Subterránea</i> <i>(Proceso Asociado)</i>	151

Gráfico 15 <i>Diagramas Bivariados del HCO₃¹⁻ (meq/L) vs otros parámetros hidrogeoquímicos (Ca²⁺, Mg²⁺, Na¹⁺ y K¹⁺).....</i>	153
Gráfico 16 <i>Hidrogramas Pad de Lixiviación vs Precipitación Diaria.....</i>	155
Gráfico 17 <i>Hidrogramas Diques vs Precipitación Diaria</i>	156
Gráfico 18 <i>Hidrogramas Tajo y Botadero Apumayo vs Precipitación Diaria</i>	157
Gráfico 19 <i>Hidrogramas Tajo y Botadero Ayahuanca vs Precipitación Diaria</i>	158
Gráfico 20 <i>Hidrogramas Tajo y Botadero Huamanloma vs Precipitación Diaria</i>	159
Gráfico 21 <i>Resultados Calibración Estacionaria en Condiciones de Pre-Minado 2014</i>	182
Gráfico 22 <i>Distribución Vertical de la Conductividad Hidráulica Conceptual vs Simulada</i>	187
Gráfico 23 <i>Resultados Calibración Transitoria 2014 – 2019</i>	200
Gráfico 24 <i>Caudales Estimados en Microcuencas Calibración Transitoria 2014 – 2019</i>	207
Gráfico 25 <i>Caudales Estimado de Componentes Calibración Transitoria 2014 – 2019</i>	208

Índice de Fotografías

Foto 1 <i>Proceso de Recolección de Muestras de Agua Subterránea</i>	86
Foto 2 <i>Estado Tajos Año 2019</i>	164

CAPITULO I ASPECTOS GENERALES

1.1 Introducción

La unidad minera Apumayo, se ubica en las comunidades campesinas de Para, Chaviña y Sancos, en los distritos de Chaviña y Sancos, provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho. Esta unidad minera comprende la explotación de tres (03) yacimientos: Apumayo, Huamán Loma y Ayahuanca, mediante un proceso de minado a tajo abierto. Para elaborar el modelo hidrogeológico conceptual y numérico de este yacimiento de tipo epitermal, se debe revisar toda la información libre disponible y estudios previos hechos, así como, el desarrollo de campañas de campo para la recolección de data hidrogeológica. Las campañas desarrolladas en periodos diferidos permiten el inventario de fuentes de agua de origen subterráneo tales como manantiales y piezómetros, así como la toma de muestras para el análisis hidroquímico del recurso hídrico subterráneo. Adicionalmente, se debe evaluar la presencia de fuentes de agua de origen subterránea en cada uno de los componentes del minado (Tajos, Botaderos y Pad de Lixiviación) e incorporarlos al modelo hidrogeológico conceptual resultante en el área de operación de la mina.

En los proyectos mineros, es necesario conocer la interacción del agua subterránea con el proceso continuo operativo de excavación del tajo, pues esto es fundamental para ver el grado de afectación que pueda generar. En el caso del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, se necesita conocer el nivel freático, ya que es el punto de partida para poder definir el modelo conceptual y en base a esto definir por ejemplo que zonas del tajo requieren extracción o no de agua. Además, se requiere como base conocer la geología, hidrogeología, red piezométrica, pozos de agua y una óptima recolección de datos de agua subterránea para realizar este modelo.

Además, no existe un proceso de drenaje mina propiamente dicho para control del agua subterránea, debido a los bajos ingresos de agua hacia los tajos, probablemente controlado por la época de lluvias, donde, se asume que los niveles de agua se encuentran por debajo del punto más bajo del proceso de minado de los tajos.

El análisis de esta información plantea la existencia de un sistema hidrogeológico complejo dominado por secuencias volcánicas del Grupo Tacaza y Grupo Barroso que interactúan con depósitos cuaternarios fluvioglaciares. El primer flujo superficial (SH/local) dominado por depósitos cuaternarios de 5 a 10 metros y rocas volcánicas fracturadas y alteradas del Grupo Barroso, se asume que, juegan un papel de acuíferos libres pobres y acuitardos que retienen parcialmente la infiltración por precipitación generando flujos locales con niveles freáticos y/o piezométricos superficiales y puntos de descarga muy cercanos al área de recarga. Por otro lado, se asume un flujo regional profundo (SH/P) presente en las rocas volcánicas a niveles profundos, cuya recarga interactúa con parte de la infiltración por precipitación, posiblemente, por flujos regionales con registro de nivel de agua y/o piezométricos más profundos.

1.2 Ubicación y acceso

El proyecto Apumayo, se ubica en distrito de Chaviña, Provincia de Lucanas, Región de Ayacucho. Geográficamente, se localiza en la zona sur occidental del territorio peruano, en la región central de la Cordillera de los Andes, a una altitud de 4200 msnm.

El acceso a la Unidad Minera Apumayo, se realiza por la ruta: Lima – Nazca – Puquio – Desvío – Unidad Minera Apumayo, siendo este trayecto por vía asfaltada, afirmado y finalmente trocha carrozable. Se puede acceder a planta del lugar de las siguientes maneras.

Lima – Nazca, vía Asfaltada, 444 km, 6 horas de viaje.

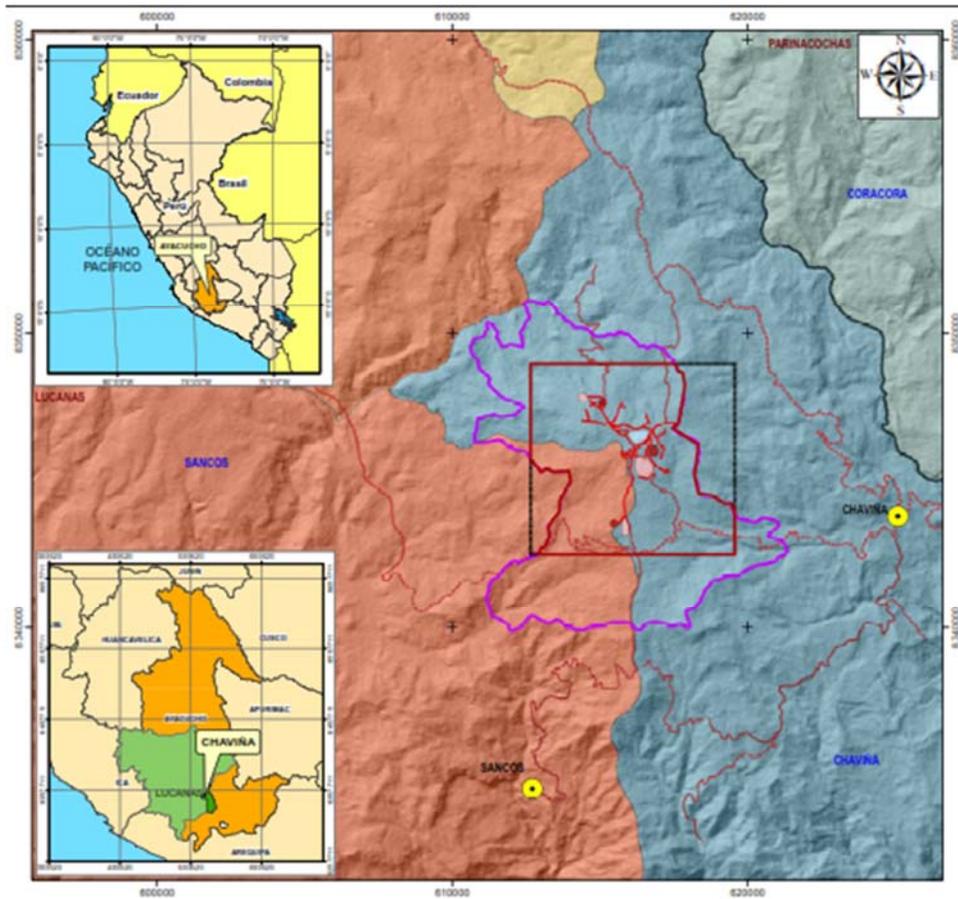
Nazca – Puquio, vía Asfaltada, 157 km, 3 horas de viaje.

Puquio – Desvío, vía Afirmada, 58 km, 2 horas de viaje.

Desvío – Proyecto, Trocha Carrozable, 13 km, 0.3 horas de viaje.

Lima – Nazca Asfaltado, 444 km, 6 horas de viaje.

Figura 1
Mapa de ubicación



Fuente: Elaboración propia 2024.

1.3 Historia de la unidad minera Apumayo

A continuación, se resume la historia del proceso adquisitivo y desarrollo de la Unidad Minera Apumayo.

Inicialmente, Minera Andina de Exploraciones S.A.A; mediante escritura pública de Opción y Cesión Minera de fecha 25 de enero de 2010, otorgada una opción de transferencia respecto de los derechos mineros a favor de Anabí S.A.C, y con fecha 02 de febrero del 2010, se realizó la anotación registral del contrato de cesión minera de los derechos mineros Apurímac 41 y Apurímac 42, a favor de Anabí S.A.C.

Posteriormente, por escritura Pública del 02 de julio del 2012 y Aclaratoria de fecha 06 de julio del 2012, Anabí S.A.C., otorga cesión de posición contractual de sus concesiones Apurímac 41 y Apurímac 42 a favor de Apumayo S.A.C.

Finalmente, el 10 de septiembre del 2013 fue aprobada la concesión de beneficio “Apumayo” con Resolución Directoral N.º 235-2013-MEM/DGM al titular minero Apumayo S.A.C. con un área actual de 326.94 hectáreas en el distrito de Chavitas, provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho.

1.4 Planteamiento del problema

Todos los procesos de actividad minera extractiva a tajo abierto o subterráneo interactúan con el recurso hídrico superficial y subterráneo, por lo que es necesario comprender y entender la dinámica de flujo, interacción de agua superficial y subterránea, hidroquímica y volúmenes de ingreso y salida a través del medio fisurado y detrítico presente dentro sistema hidrogeológico.

Particularmente en la unidad minera Apumayo, previo a este estudio, no existe un diseño ni drenajes definidos, por lo cual no hay un control preciso sobre las aguas subterráneas existentes. Se asume que el nivel de agua se encuentra por debajo del nivel de minado. Así mismo al no conocer el comportamiento de estas aguas, no se puede administrar de correcta manera el uso direccionado para mejorar el desempeño de la operación minera en general, puesto que esta agua puede servir para diferentes usos tales

como regadío de vías para disminuir la polución y favorecer el mejoramiento de las vías de la mina.

Para conocer las condiciones del modelo hidrogeológico conceptual actual del área de influencia de los componentes de la Unidad Minera Apumayo, se requiere de la ejecución de estudios de caracterización mediante estudios geológicos, hidrológicos, hidrogeoquímica, hidráulica y parametrización de unidades hidrogeológica que permitan la construcción del modelo hidrogeológico conceptual que representa de manera ideal y simplificada las condiciones actuales de interacción entre el medio hidrogeológico y los componentes en operación. Adicionalmente, para un sustento cuantitativo se plantea evaluar estas condiciones mediante un modelo hidrogeológico numérico el cual permitirá validar los resultados obtenidos en el modelo hidrogeológico conceptual.

1.4.1 Problema general

- ¿Cómo es el modelo hidrogeológico conceptual y numérico del yacimiento epidermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú?

1.4.2 Problemas específicos

- ¿Cuáles son las condiciones hidrológicas como parte del proceso de recarga al sistema hidrogeológico del yacimiento epidermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú?
- ¿Qué condiciones geológicas y estructurales están presentes en el sistema hidrogeológico del yacimiento epidermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú?
- ¿Cuáles son las condiciones hidrogeológicas presentes en el sistema hidrogeológico del yacimiento epidermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú?

- ¿Cuáles son las condiciones hidroquímicas y parámetros fisicoquímicos presentes en el sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú?
- ¿Cómo se validan los resultados del modelo hidrogeológico conceptual del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú?

1.4.3 Justificación

Los estudios relacionados al recurso hídrico subterráneo son de suma importancia, especialmente en zonas donde los recursos son limitados. Esta importancia radica en que el agua subterránea sostiene diferentes tipos de ecosistemas (bofedales, humedales, lagunas, etc.). Es así como las actividades antrópicas, que en nuestro caso es un proceso extractivo a tajo abierto, pueden generar impactos en los recursos hídricos, con una remediación final que puede ser en muchos casos muy costoso y difícil de remediar.

Al ser un proyecto de extracción a tajo abierto, se percibe la necesidad de conocer a detalle el comportamiento del recurso hídrico existente, tales como agua superficial y sobre todo de las aguas subterráneas. En tal sentido este trabajo de investigación presentará aportes y un mejor conocimiento sobre el comportamiento de dichos recursos para así mejorar de manera directa los trabajos dentro de la operación minera.

1.4.3.1 Valor teórico

Este tipo de estudios y modelos son relativamente nuevos en proyectos mineros de la región, por lo que diseñar el modelo hidrogeológico conceptual y numérico en dicho proyecto puede utilizarse más adelante como una contribución a la metodología para este tipo de estudios y de esta manera contribuir a los conocimientos en el ámbito de hidrogeológico.

1.4.3.2 Valor práctico

Tener actualizado del modelo hidrogeológico conceptual, el cual a su vez permite generar un modelo hidrogeológico numérico, interactúan directamente con los diferentes componentes en la etapa de operación, los cuales son de vital importancia para comprender el ciclo y régimen del agua subterránea presente en el área de influencia de la actividad minera.

1.4.3.3 Valor social

En toda operación minera formal es de suma importancia controlar el tema de la contaminación del agua, por lo que es necesario conocer el comportamiento, dirección y flujos de las aguas subterráneas, ya que se desea evitar a toda costa que aguas contaminadas pudiesen llegar a fuentes destinadas a consumo y otras actividades que requieran el uso de este recurso fuera de la operación minera.

1.5 Objetivos de la Investigación

1.5.1 Objetivo General

- Definir el modelo hidrogeológico conceptual y numérico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar las condiciones hidrológicas como parte del proceso de recarga al sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú.
- Identificar las condiciones geológicas y estructurales presentes en el sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú.

- Determinar las condiciones hidrogeológicas presentes en el sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú.
- Identificar las condiciones hidroquímicas y parámetros fisicoquímicos presentes en el sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú.
- Validar los resultados del modelo hidrogeológico conceptual mediante un modelo hidrogeológico numérico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

El modelo hidrogeológico conceptual y numérico de la unidad minera Apumayo muestra la existencia de un sistema hidrogeológico complejo dominado por secuencias volcánicas del Grupo Tacaza y Grupo Barroso que interactúan con depósitos cuaternarios fluvio-glaciares en un entorno poco permeable y de baja permeabilidad.

1.6.2 Hipótesis específica

- Las condiciones hidrológicas como parte del proceso de recarga al sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, son las adecuadas y están dominados por depósitos cuaternarios y rocas volcánicas fracturadas y alteradas del Grupo Barroso.
- Geológicamente, en el yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, dominan las secuencias volcánicas (en su mayoría andesitas y algo de dacitas). Estructuralmente el medio está controlado por sistemas de fallas NW, de carácter inverso sinextral.

- Hidrogeológicamente, en el yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, se muestra un contexto de permeabilidad variable, además de predominar los acuíferos libres.
- El comportamiento hidroquímico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, muestra facies hidroquímica y parámetros fisicoquímicos de pH, conductividad eléctrica y temperatura que denotan tendencias al equilibrio en el medio hidrogeológico.
- El modelo hidrogeológico conceptual sirve como base, en conjunto con la topografía 3D, modelo geológico 3D y propiedades de los materiales para generar el modelo hidrogeológico numérico de la unidad minera Apumayo. De esta manera el modelo hidrogeológico numérico valida de manera correcta el modelo hidrogeológico conceptual.

1.7 Metodología de la Investigación

En todas las investigaciones de un determinado tema se busca conocer, construir, actuar y poder modificar una determinada problemática. Dentro de los cuales se ubican las investigaciones realizadas enfocadas a la ingeniería civil (Borja Suárez, 2016).

En ese sentido el presente trabajo será aplicada no experimental, ya que se recopilarán, describirán y aplicarán métodos ingenieriles para la recolección y análisis de los datos a usar, sin modificar las metodologías ya establecidas y así generar un correcto modelo hidrogeológico conceptual y numérico.

Según Borja, M (2016), que define que una manera o forma confiable para poder conocer la realidad es mediante la recolección y análisis de los datos, con los cuales se logran a llegar responder las preguntas de investigación y probar las hipótesis. Este tipo de investigación se sustenta en mediciones numéricas, para así poder establecer los patrones de comportamiento en una población.

Este trabajo tiene un enfoque cuantitativo, debido a que se empleará el análisis numérico, además de la revisión de documentos relacionados (Walsh, 2010, HGS, 2015, Atocsa, 2017 e Hydroterra, 2019).

El nivel de la investigación será descriptivo, ya que se describe a partir de datos recopilados, obtenidos y analizados el modelo hidrogeológico tanto el conceptual como el numérico.

1.7.1 Unidad de análisis

Para la presente investigación el objeto de estudio del que se debe obtener la información corresponde a las unidades hidrogeológicas del yacimiento de la unidad minera Apumayo.

1.7.2 Población de estudio

La población de estudio como el conjunto de todos los casos que concuerdan con las determinadas especificaciones, que pueden estar constituido por personas, animales, registros médicos entre otros, Hernández, Fernández y Baptista (2014).

En el presente trabajo la población sobre la cual se realizará el estudio corresponde al yacimiento minero Apumayo.

1.7.3 Tamaño de muestra

En el presente trabajo se utilizarán 23 muestras tomadas de piezómetros y 02 muestras tomadas de 02 manantiales, pertenecientes al yacimiento minero Apumayo.

1.7.4 Selección de muestra

Para los trabajos de modelamiento hidrogeológico conceptual y numérico, el muestreo es de tipo probabilística, pues se requiere de información tomada en piezómetros que abarquen la mayor cantidad de datos para el respectivo modelamiento (Borja, 2016).

1.7.5 Identificación de variables

Los variables que intervienen en la presente investigación son:

Independiente; Modelo hidrogeológico conceptual

Dependiente; Modelo hidrogeológico numérico.

1.8 Metodología de trabajo

Se plantean las siguientes etapas de trabajo para la presente investigación:

1.8.1 Etapa 1: Precampo

- Trabajo de gabinete (setiembre y noviembre de 2018)
 - Recopilación de información bibliográfica para el entendimiento del estado previo de las condiciones hidrogeológicas (variables involucradas).
 - Revisión de antecedentes que involucren la caracterización hidrogeológica de la unidad minera Apumayo.

1.8.2 Etapa 2: Campo

- Época húmeda (noviembre y diciembre 2018)
 - Mapeo Geológico – Hidrogeológico.
 - Inventario de fuentes de agua de origen subterráneo.
 - Monitoreo de la red de piezómetros.
 - Muestreo de fuentes de agua de origen subterráneo.
 - Supervisión parcial de las perforaciones hidrogeológicas.
- Época de transición (mazo y abril 2019)
 - Mapeo Geológico – Hidrogeológico.

- Inventario de fuentes de agua de origen subterráneo.
- Monitoreo de la red de piezómetros.
- Supervisión parcial de las perforaciones hidrogeológicas.

1.8.3 Etapa 3: Post campo

- Época húmeda (enero y diciembre 2019)
 - Interpretación e Integración Geológico – Hidrogeológico preliminar.
 - Interpretación de sondajes geológicos históricos y nuevos hasta el 2019.
 - Análisis de parámetros fisicoquímicos de las fuentes de agua subterránea.
 - Análisis de datos hidroquímicos de las fuentes de agua subterránea.
 - Elaboración del modelo hidrogeológico conceptual preliminar.
 - Elaboración del modelo hidrogeológico numérico preliminar.
- Época de transición (enero 2020 a diciembre 2023)
 - Interpretación e Integración Geológico – Hidrogeológico final.
 - Análisis de parámetros fisicoquímicos de las fuentes de agua subterránea.
 - Elaboración del modelo hidrogeológico conceptual final.
 - Elaboración del modelo hidrogeológico numérico final.
 - Discusión de resultados del modelo conceptual y numérico.
 - Redacción del informe final de tesis.

CAPITULO II MARCO TEORICO

2.1 Marco referencial

2.1.1 Antecedentes

En el 2010, Apumayo encargó a Walsh Perú S.A. la realización del “Estudio Hidrológico-Hidrogeológico para el Proyecto Apumayo” con la finalidad de complementar el “Estudio de Impacto Ambiental” con las siguientes consideraciones:

- La precipitación total anual estimada fue de 820.1 mm/año para un año promedio (1964 – 2009).
- Las aguas subterráneas presentan una facie “Bicarbonatada – Cálctica” para los piezómetros (PZAP-02, PZAP-03, PZAP-05 y PZAP-07), facie “Sulfatada – Sódica” para el piezómetro (PZAP-01), y finalmente, una facie “Sulfatada – Cálctica” para el piezómetro (PZAP-08) para julio 2010.
- El balance de masa del modelo numérico permitió calibrar una recarga total por precipitación de 31750.4 m³/d (367.5 L/s) y una descarga total de 31756.7 m³/d (365.5L/s) en régimen estacionario 2010. La descarga se divide en 18878.9 m³/d (218.5 L/s) asociado a las quebradas y/o ríos y 12877.7 m³/d (149 L/s) asociado a la evapotranspiración.

En el 2015, Apumayo encargó a HGS Perú S.A. la realización del “Estudio Hidrológico-Hidrogeológico para la Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero Apumayo” con la finalidad de complementar la “Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Minero Apumayo” con las siguientes consideraciones:

- La precipitación total media anual estimada fue de 877.6 mm/año para un año promedio (1964 – 2014).

- Los caudales de esorrentía anuales estimados para las microcuencas, a través de Método de Lutz Scholtz, ascienden a 1777.3 L/s para la Jailpasca, 1135.7 L/s para Jispicahua, 1170.1 L/s para Chaviña, 1160.5 L/s para Huamanloma, 422.5 L/s para Cuchuhuasi, 684.1 L/s para Parapacancha y 567.8 L/s para Auropata.
- Los caudales base anuales estimados para las microcuencas, a través del Método de Eckhardt, ascienden a 835.4 L/s para la Jailpasca, 533.9 L/s para Jispicahua, 549.4 L/s para Chaviña, 545.2 L/s para Huamanloma, 198.5 L/s para Cuchuhuasi, 321.2 L/s para Parapacancha y 267.2 L/s para Auropata.
- El agua subterránea presenta una facie “Bicarbonatada – Sódica” para el piezómetro (CASB-APU-01) para noviembre 2014.
- El balance de masa del modelo numérico permitió calibrar una recarga total por precipitación de 367.5 L/s y una descarga total de 367.6 L/s en régimen estacionario, no se especifica la fecha exacta de calibración.
- La piezometría simulada en régimen estacionario se distribuye en cotas piezométricas del orden de 4000 msnm (hacia las partes altas de las microcuencas) a casi 3600 msnm (hacia las partes de descarga de las microcuencas).

En el 2017, Atoccsa como parte del desarrollo de la Maestría en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente en la Universidad Politécnica de Valencia desarrolló el “Análisis y Mejoramiento del Modelo Numérico Hidrogeológico de la Unidad Minera Apumayo” con las siguientes apreciaciones:

- Toma en consideración lo planteado en el modelo hidrogeológico conceptual de HGS (2015).

- El balance de masa del modelo numérico permitió calibrar una recarga total de 31750.4 m³/d (367.5 L/s) y una descarga total de 31756.7 m³/d (367.6 L/s) en régimen estacionario diciembre 2013. La recarga se divide en infiltración de 27782.5 m³/d (321.6 L/s), carga constante de 1.3 m³/d (0.02 L/s) y quebradas 12444.6 m³/d (144 L/s), mientras que, la descarga se divide en 18878.9 m³/d (218.5 L/s) asociado a las quebradas y/o ríos y 12877.7 m³/d (149 L/s) asociado a la evapotranspiración. Adicionalmente, se realizó la simulación en régimen transitorio desde diciembre 2013 hasta diciembre 2016.
- El posible impacto negativo del agua subterránea ante un evento de filtraciones en el Pad de Lixiviación no fue altamente significativo a corto plazo, pues en ninguno de los siete (07) escenarios establecidos se detectó la presencia de contaminantes al cabo de los 30 años de simulación en el piezómetro (PZD-APU-02), ubicado a 750 m aguas debajo del Pad de Lixiviación, por lo que, se puede decir que el proceso de movimiento de la pluma contaminante es muy lento, teniendo en cuenta que se consideró como un contaminante conservativo.
- La piezometría simulada en régimen estacionario se distribuye en cotas piezométricas del orden de 4200 msnm (hacia las partes altas de las microcuencas) a casi 3550 msnm (hacia las partes de descarga de las microcuencas).

En el 2019, Apumayo encargó a HydroTerra S.A.C la realización de la “Actualización del Estudio de Hidrogeología de la Unidad Minera Apumayo” con las siguientes consideraciones:

- La precipitación total media anual estimada fue de unos 586.5 mm/año para un año promedio (1998 – 2017).
- El agua subterránea presenta una facie “Sulfatada – Cálctica” para los piezómetros (PZ-PAD-01, PZ-PAD-03, CASB-APU-02, PZAP-09 y CASB-APU-03) y manantial (MA-AQ-01), facie “Bicarbonatada Cálctica – Sódica” para los piezómetros (PZ-PAD-02 y PZAP-03), y finalmente, facie “Carbonatada – Cálctica” para el piezómetro (AYA-SUB-05) diciembre 2018.
- El balance de masa de modelo numérico permitió calibrar una recarga total de 176 L/s y una descarga 176.5 L/s en régimen estacionario diciembre 2018. La descarga se divide en 160 L/s asociado a las quebradas y/o ríos, 14 L/s asociado a los manantiales y 2.5 L/s asociado a los tajos abiertos.
- El balance de masa de modelo numérico permitió calibrar una recarga total de 163.9 L/s y una descarga 164.4 L/s en régimen transitorio diciembre 2019. La descarga se divide en 148.3 L/s asociado a las quebradas y/o ríos, 13.2 L/s asociado a los manantiales y 3.2 L/s asociado a los tajos abiertos.
- La piezometría simulada en régimen estacionario se distribuye en cotas piezométricas del orden de 4260 msnm (hacia las partes altas de las microcuencas) a casi 3750 msnm (hacia las partes de descarga de las microcuencas).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Área de Drenaje (A)

Se refiere al área proyectada sobre un plano horizontal, medida de los límites de la microcuenca que sigue la divisorio hidrológica (divortium acuarium). En general, desde un punto de vista hidrológico es importante, pues determina el potencial de

volumen de escorrentía proporcionado por la tormenta que cubre el área completa (HydroTerra, 2019).

2.2.2 Perímetro (P)

El perímetro está definido por el contorno que delimita el área de la microcuenca y la longitud de la línea divisoria de aguas que se le conoce como “divortium acuarium” (HydroTerra, 2019).

2.2.3 Longitud (L)

La longitud del cauce principal es la distancia media a lo largo del curso fluvial de mayor orden, desde las nacientes hasta el final de este. El desarrollo longitudinal del colector principal es una magnitud útil y de efecto importante en la respuesta hidrológica de la microcuenca, ya que en un río corto los efectos de la precipitación se reflejan más rápidamente que en un río largo (HydroTerra, 2019).

2.2.4 Coeficiente de Compacidad (Kc)

La forma superficial de las microcuencas es de interés, porque, proporciona un índice de la velocidad con que las aguas tardan en concentrarse en la sección de descarga de la cuenca. La peligrosidad de una cuenca aumenta si el coeficiente Kc se acerca a la unidad o a una forma redonda (HydroTerra, 2019). En general Kc es mayor a 1, siendo fórmula la siguiente:

$$Kc = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

P: Perímetro de la cuenca.

A: Área de la cuenca.

2.2.5 Factor de Forma (Kf)

Este factor establece la dinámica esperada de la escorrentía superficial en una cuenca, teniendo en cuenta que, aquellas cuencas con formas alargadas tienden a presentar un flujo de agua más veloz a comparación de las cuencas redondeadas, logrando así una evacuación de la cuenca más rápida y con mayor desarrollo de energía cinética en el arrastre de sedimentos hacia el nivel base. Una cuenca tiende a ser alargada si el factor de forma tiende a cero (0), mientras que, su forma es redonda a medida que el factor de forma tiende a uno (1) (HydroTerra, 2019). El factor de forma este definido por la siguiente expresión:

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

Kf: fator de forma.

A: área de la cuenca.

L: longitud de la cuenca.

2.2.6 Pendiente Media (%)

De acuerdo con el uso de suelo y la red de drenaje, la pendiente influye en el comportamiento de la microcuenca afectando directamente el escurrimiento de las aguas de lluvia; en otras palabras, en la magnitud y en el tiempo de formación de una creciente en el cauce principal (HydroTerra, 2019).. La pendiente está definida por la siguiente expresión:

$$Ic = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

Ic: pendiente media del río

HM: cota máxima

Hm: cota mínima

L: longitud media en planta

2.2.7 Método de Isoyetas

La precipitación media se considera como la lámina de agua, altura uniforme sobre toda el área considerada, haciendo referencia a un periodo previamente considerado. Esto es considerado como una simplificación o abstracción debido a que la lluvia real obedece a distribuciones espaciales más complejas. Este método determina las líneas de igual altura de precipitación, en todo el plano, y después se calcula el área entre las isoyetas y para así determinar la precipitación entre estas (Batemán, 2007). La expresión usada para ese cálculo se expresa a continuación:

$$P_m = \frac{\sum(P_i * A_i)}{A_t} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

P_i: precipitación promedio entre dos curvas de isoyetas consecutivas (mm).

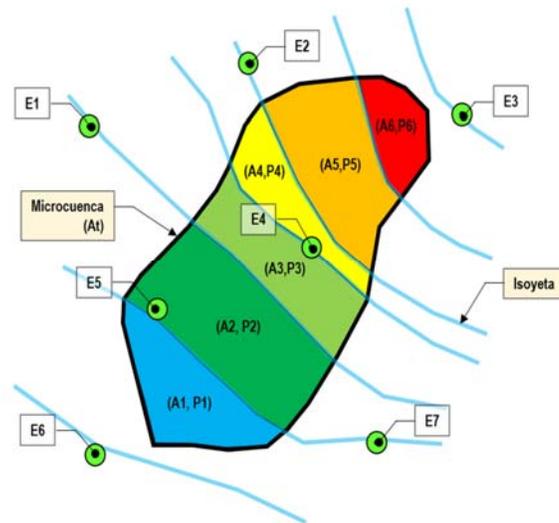
A_i: área delimitada por las dos curvas isoyetas (km²).

A_t: área total de la microcuenca considerada (km²).

La **Figura 2** muestra el uso visual del método de isoyetas para la determinación de la precipitación media de una microcuenca con el uso estaciones meteorológicas aledañas.

Figura 2

Distribución Visual y Cálculo de la Precipitación con el Método de Isoyetas



Fuente: Modificado de Bateman (2007)

2.2.8 Temperatura

Es una magnitud escalar que se define como la cantidad de energía cinética de las partículas de una masa gaseosa, líquida o sólida. Cuanto mayor es la velocidad de las partículas, mayor es la temperatura y viceversa. Además, la temperatura está relacionada con la noción de frío (menor temperatura) y de calor (mayor temperatura) (HydroTerra, 2019). En general, expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente.

2.2.9 Evapotranspiración

La evapotranspiración se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación (HydroTerra, 2019).

2.2.10 Método de Lutz Scholtz

El modelo planteado por Lutz Scholtz se desarrolla mediante un modelo determinístico (balance hídrico), para generar caudales promedio para un año. Debido a

la carencia de registros hidrométricos en la sierra peruana, se desarrolló el modelo considerando parámetros físicos y meteorológicos, los cuales pueden obtenerse con mediciones cartográficas y de campo (Scholz, 1980, tomado de Sancho, 2022).

2.2.11 Ecuación de Balance Hídrico (CM)

La ecuación fundamental que describe el balance hídrico mensual en “mm/mes” está representada por la siguiente expresión propuesta por Fisher (Sholz, 1980):

$$CM_i = P_i - D_i + G_i - A_i \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

CM_i: caudal mensual (mm/mes)

P_i: precipitación mensual sobre la microcuenca (mm/mes)

D_i: déficit de escurrimiento (mm/mes).

G_i: gasto de la retención de la cuenca (mm/mes).

A_i: abastecimiento de la retención (mm/mes).

Sancho (2022) indica que para el uso de la ecuación de Scholz (1980) se debe tener en consideración lo siguiente:

- La retención almacenada durante los meses húmedos es liberada durante los meses secos, por lo tanto, el gasto y abastecimiento se consideran iguales: $G_i = A_i$.
- La precipitación presenta pérdidas, debido a ello se sustituye la expresión $P_i = CP$ considerando C como el coeficiente de escorrentía, el cual representa las pérdidas de la precipitación.

2.2.12 Coeficiente de Escorrentía (C)

El coeficiente de escorrentía se determina por el método de L. Turc (Sancho, 2022), el cual se expresa por la siguiente expresión matemática:

$$C = \frac{P - D}{P} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

C: coeficiente de escorrentía (mm/año).

P: precipitación total anual (mm/año).

D: déficit de escorrentía (mm/año).

Además, se deben tener las siguientes consideraciones para el cálculo del déficit de escorrentía, con la siguiente expresión:

$$D = P * \frac{1}{\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{0.5}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$T = 197 - 23.1\ln(H) \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

L: coeficiente de la temperatura.

T: temperatura media anual (°C).

H: altura media de la cuenca.

2.2.13 Precipitación Efectiva (PE)

La precipitación efectiva se encuentra condicionada al coeficiente de escorrentía, el cual, es considerado como el promedio en la zona de interés, debido a ello el coeficiente

de escorrentía es la relación entre la precipitación efectiva y la precipitación total (Cortéz, 2018). Además, la precipitación efectiva se calcula en base al método del USBR, en su forma polinomial de quinto grado (Sholtz, 1980 tomado de Sancho, 2022):

$$PE = a_0 + a_1P^1 + a_2P^2 + a_3P^3 + a_4P^4 + a_5P^5 \text{ (Ecuación 10)}$$

Donde:

PE: precipitación efectiva (mm/mes).

P: precipitación total mensual (mm/mes).

ai: coeficiente del polinomio.

Tabla 1

Límite Superior para la Precipitación Efectiva

Curva	Ecuación	Rango
Curva I	PE = P - 120.6	P > 177.8 mm/mes
Curva II	PE = P - 86.4	P > 152.4 mm/mes
Curva III	PE = P - 59.7	P > 127.0 mm/mes

Fuente: Scholz (1980) tomado de Sancho (2022)

En el caso de la precipitación total media mensual supere el límite indicado en la **Tabla 1** la precipitación efectiva se determinará mediante la ecuación previamente descrita, tomando los valores de coeficientes de acuerdo con la **Tabla 2**.

Tabla 2

Coefficientes para Determinar la Precipitación Efectiva

Coefficiente	Curva I	Curva II	Curva II
a0	-0.018	-0.021	-0.028
a2	-0.0185	0.1358	0.2756
a3	0.001105	-0.002296	-0.004103
a4	-1.20E-05	4.35E-05	5.53E-05
a5	1.44E-07	-8.90E-08	1.24E-07

Fuente: Scholz (1980) tomado de Sancho (2022)

2.2.14 Método de Eckhardt

Eckhardt, 2004 tomado de Cardno Latinoamérica, 2022) propuso un algoritmo para los filtros digitales que tenían en cuenta tanto el parámetro de filtro α y BFImax (Maximum Baseflow Index). Este método aporta un sentido más físico al análisis de cálculo de caudal base. El algoritmo de Eckhardt (2004) tiene la siguiente expresión:

$$b_t = \frac{(1 - \text{BFImax}) * \alpha * b_{t-1} + (1 - \alpha) * \text{BFImax} * Q_t}{1 - \alpha * \text{BFImax}} \text{ (Ecuación 11)}$$

Donde:

b_t : caudal filtrado en el instante t .

b_{t-1} : caudal base filtrado en el instante $t-1$.

α : es el parámetro de filtro con un rango de variación entre los 0.925 y 0.980.

Q_t : caudal total en el instante t .

BFImax: es el valor máximo de la ratio del caudal base – caudal total, y toma los valores de 0.80 para corrientes perennes con acuíferos porosos, 0.50 para corrientes efímeras con acuíferos porosos y 0.25 para corrientes perennes con acuíferos de roca dura.

2.2.15 Unidad Estratigráfica

Una unidad estratigráfica es un volumen de roca de origen identificable y rango de edad relativo que se define por sus rasgos (facies) petrográficos, litológicos o paleontológicos distintivos y dominantes, fácilmente mapeados y reconocibles, que la caracterizan (INGEMMET , 2017).

2.2.15.1 Grupo Tacaza (PN-t)

Litológicamente, está compuesto por flujos andesíticos verdosos, areniscas y limolitas gris violáceas con aglomerados (INGEMMET , 2017). La edad asignada a este

grupo corresponde al techo del Sistema Paleógeno y base del Sistema Neógeno, donde, la edad relativa es de 23.03 ma (INGEMMET , 2017).

2.2.15.2 Grupo Barroso (Qp-b-and)

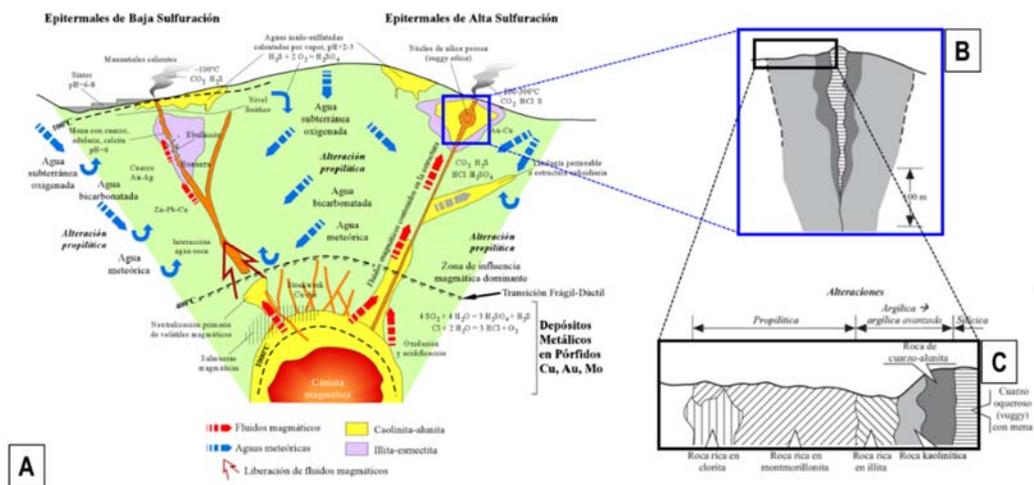
Litológicamente, este compuesto por lavas andesíticas (INGEMMET , 2017). La edad asignada a este grupo corresponde al Sistema Neógeno y base del Sistema Cuaternario, más específicamente, a la Serie Plioceno – Pleistoceno, donde, la edad relativa es de 5.33 a 0.01 ma (INGEMMET , 2017).

2.2.16 Esquema de un Cuerpo Epitermal de Alta Sulfuración

La **Figura 3 A** muestra el esquema comparativo (no escalado) de la estructura, procesos, tipo de alteración, volátiles liberados, temperaturas, pH, tipos de fluidos y reacciones involucradas en la formación de los depósitos epitermales de baja y alta sulfuración (Campubrí & Albinson, 2006). Mientras que, la **Figura 3 B y C** muestra el esquema estructural de un cuerpo epitermal de alta sulfuración típico, basado en los depósitos de Summitville en Colorado (Stoffregen, 1987), mostrando la morfología de cuña del núcleo de sílice oquerosa (vuggy sílica), con una ampliación que ilustra la zonificación de alteraciones características desde el núcleo de sílice a la roca encajonante inalterada (Campubrí & Albinson, 2006).

Figura 3

Esquema Estructural de un Cuerpo Epitermal de Alta Sulfuración



Fuente: Compilado de Camprubi (2006)

2.2.17 Conductividad Hidráulica (K)

En la práctica, el trabajo más esencial es la determinación de los parámetros del acuífero, entre ellos, la conductividad hidráulica, que, describe la facilidad con que el agua puede moverse a través de los espacios vacíos interconectados del medio hidrogeológico ya sea granular o roca (Custodio y Llamas, 1983). La **Tabla 3** muestra los rangos de análisis de la conductividad hidráulica planteados por Custodio y Llamas (1983) en función de los materiales evaluados (suelo o macizo rocoso). Además, del posible comportamiento hidráulico (impermeables menores a $1e-09$ m/s, baja permeabilidad entre $1e-09$ a $1e-07$ m/s, poco permeable entre $1e-07$ a $1e-04$ m/s, permeable entre $1e-04$ a $1e-01$ m/s y muy permeable superiores a $1e-01$ m/s).

Tabla 3

Rangos de Valores de Conductividad Hidráulica en Función a las Características de los Materiales en Terreno

Valores	Conductividad Hidráulica (Permeabilidad)										
	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
m/s :											
m/d :	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴
Comportamiento hidráulico	Impermeable	Baja Permeabil.	Poco permeable				Permeable			Muy permeable	
	Acuícludo	Acuitardo	Acuífero pobre				Acuífero medio a bueno			Acuífero	
Ejemplos de tipos de Materiales	Arcilla compacta	Limo Arenoso Limo Arcilla limosa	Arena fina arena limosa				Arena limpia, arenas y gravas finas			Grava Gruesa, bolos	
Tipología de Rocas en función a su grado de fracturamiento	Macizos Rocosos										
	Roca sana	Rocas con Bajo grado de Fracturación		Rocas con alto Grado de fracturación			Rocas con muy alto grado de fracturación (karst,...)				

Fuente: Custodio y Llamas (1983)

2.2.18 Ensayos Durante la Perforación

2.2.18.1 Lugeon (Packer Test)

Este ensayo es usado con la finalidad de obtener la estimación de la permeabilidad en ciertos tramos, del macizo rocoso, durante la perforación mediante el uso de un packer neumático simple. Para aislar y/o sellar el tramo de ensayo, el packer deberá ser presurizado con la inyección de gas nitrógeno el cual no deberá exceder la presión máxima según especificaciones técnicas del packer usado; esta expansión entre la pared del sondaje y la tubería de perforación sellará el tramo evaluado. Posteriormente, se registra el caudal de ingreso a las fracturas y/o discontinuidades de la roca en el tramo obturado a una presión determinada y constante. Es usual aplicar tres (03) niveles de presión, para un mismo ensayo, que se distribuyen en cinco (05) etapas de manera ascendente y descendente. Una sola etapa consiste en mantener una presión de inyección por un periodo de 10 minutos, previa estabilización de la presión, registrando el consumo

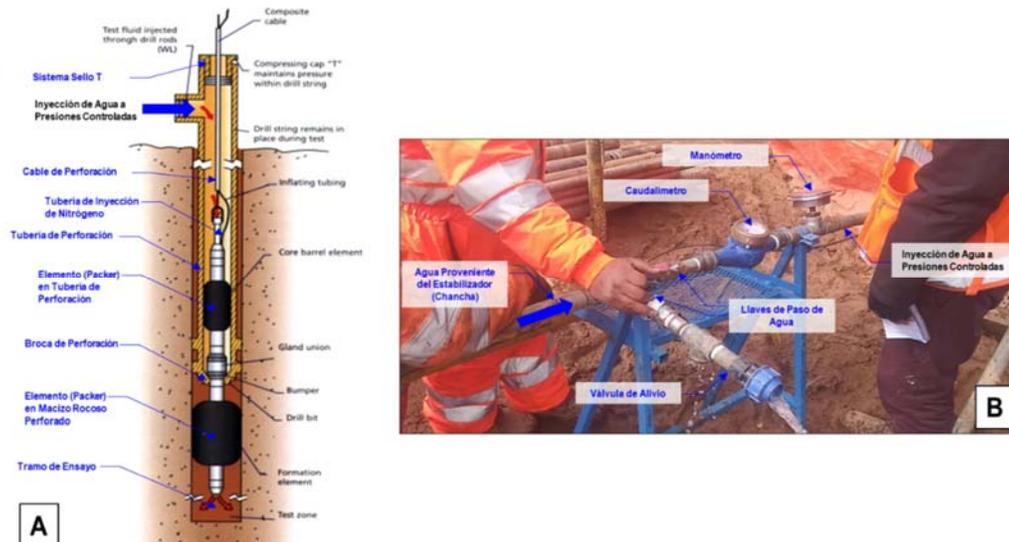
de agua a través del caudalímetro. La presión va incrementando desde la primera etapa (correspondiente al 25% de la presión máxima), segunda etapa (correspondiente al 50% de la presión máxima), tercera etapa (correspondiente al 75% de la presión efectiva máxima), mientras que el cuarto y quinto estadio corresponden a presiones equivalentes al primer y segundo estadio (Arévalo, 2008)..

La presión efectiva máxima se fija tomando como base la simplificación de multiplicar la profundidad del bulbo o tramo de ensayo por 0.2 y 0.25, dependiendo que se trate de macizo rocosos meteorizados y fracturados o en buen estado; considerando pesos específicos entre 2 y 2.5 Tn/m³ y tramos donde no se ha alcanzado el nivel freático (únicamente presión litostática), mientras que, para tramos sumergidos el peso efectivo se afecta en una unidad, de modo que los factores simplificados para tramos debajo del nivel freático (presión litostática e hidrostática) resultan ser 0.1 y 0.15 (Arévalo, 2008).

La **Figura 4** muestra el esquema general del ensayo de Lugeon con el uso de un packer simple. **Figura 4 A** muestra la configuración general de instalación del packer simple dentro de una perforación diamantina con apoyo de la tubería y cable de perforación (GEOTECHNO, 2024), mientras que, la **Figura 4 B** muestra la configuración del tablero de control del caudal a presiones controladas que son inyectadas al tramo seleccionado a evaluar.

Figura 4

Esquema Simplificado Ensayos Lugeon Packer Simple



Fuente: Modificado de GEOTECHNO (2024)

Normalmente, la unidad de Lugeon se define como el gasto de 1 litro de agua en un metro del tramo de ensayo a una presión efectiva de 10 Kg/cm², y su equivalencia en términos de permeabilidad es 1.3e-05 cm/s (Arévalo, 2008). Sin embargo, las ecuaciones de Hvorslev (1951), U.S. Bureau of Reclamation (1951) y Moye (1967) son, también, ampliamente usadas para la interpretación de los ensayos de presión de agua (Hamm, y otros, 2007).

La ecuación de Hvorslev (1951) considera la ocurrencia de entrada y salida solo a través de la sección del sondaje de perforación, con las siguientes consideraciones:

$$K = \frac{Q}{2\pi L H_0} \ln \left[\frac{L}{2r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2r_w} \right)^2} \right] \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$H_0 = H_w + H_p - H_L \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

K: es la conductividad hidráulica

Q: es la tasa de flujo

r_w : es el radio del sondaje de perforación

L: longitud del tramo de ensayo

H_o : incremento de la carga hidráulica.

H_w : distancia desde el manómetro de presión al nivel del agua subterránea

H_p : presión de inyección de agua

HL: es la pérdida de presión

La ecuación de U.S Bureau of Reclamation (1951), es matemáticamente la misma que la ecuación de Hvorslev, Ecuación 12, salvo por la diferencia de \sinh^{-1} :

$$K = \frac{Q}{2\pi L H_o} \sinh^{-1} \left[\frac{L}{2r_w} \right], \text{ si } 10 > \frac{L}{r_w} > 1 \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$K = \frac{Q \ln \left[\frac{L}{2r_w} \right]}{2\pi L H_o} \text{ con } \frac{L}{r_w} > 10 \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:

K: es la conductividad hidráulica

Q: es la tasa de flujo

r_w : es el radio del sondaje de perforación

L: longitud del tramo de ensayo

H_o : incremento de la carga hidráulica.

La ecuación de Moye (1967), también, es matemáticamente, similar a las ecuaciones previas, con las siguientes consideraciones:

$$K = \frac{Q}{2\pi L H_o} \ln \left[\frac{mL}{2r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{mL}{2r_w} \right)^2} \right] \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

K: es la conductividad hidráulica

Q: es la tasa de flujo

rw: es el radio del sondaje de perforación

L: longitud del tramo de ensayo

Ho: incremento de la carga hidráulica.

m: factor de anisotropía ($m = \sqrt{K_r/K_z}$)

Fuentes (2014) desarrolló experimentos para evaluar la influencia de cinco (05) variables involucradas en el cálculo de la conductividad hidráulica (tramo de ensayo, radio de alcance, caudal, carga hidráulica y radio de perforación) con un total de las 3125 combinaciones, de las cuales se tiene 625 combinaciones para cada parámetro.

La **Tabla 4** muestra las cinco (05) variables consideradas para estos experimentos tomando consideraciones técnicas, logísticas y/o teóricas (Fuertes, 2014).

Tabla 4

Parámetros Máximos y Mínimos Variables Experimentales

Variable	Mínimo	Máximo
Tramo - L (m)	0.5	10
Alcance - R (m)	0.5	100
Caudal - Q (m3/s)	1.7e-06	1.5e-03

Carga Hidráulica – H (m)	10	100
Radio de Perforación – r (m)	3e-02	0.1

Fuente: Fuentes (2014)

Las consideraciones generales de la influencia de estas variables (Fuentes, 2014), se muestran a continuación:

- Tramos de ensayo (L): para valores mínimos o iguales a 0.5 m, el 75% de los casos de conductividad hidráulica se ubica en valores inferiores a 0.4×10^{-4} m/s; mientras que, para valores superiores a 0.5 m los valores de conductividad hidráulica son casi constantes. Sin, embargo, el rango disminuye a medida que aumenta el tramo de ensayo. Por lo tanto, si evaluáramos tramos muy grandes en comparación a con los valores típicos de los ensayos de Lugeon, la conductividad hidráulica tendría una tendencia a cero; lo cual no es real en un medio fracturado, donde si aumentamos el tramo de ensayo se tendría un mayor número de discontinuidades que aportarían con su conductividad hidráulica.
- Carga Hidráulica (H): la conductividad hidráulica disminuye a medida que aumenta la carga hidráulica, ya que al momento de realizar el ensayo se tiene una limitante tecnológica, donde las bombas de inyección de agua con buenas especificaciones pueden generar un valor máximo inyección conocido de 900 mca; si es empleado en un medio poco fracturado y buena saturación las presiones máximas se alcanzan fácilmente, mientras que, si el medio que se intenta saturar tiene un alto grado de fracturación y se lleva a la misma presión que el medio no tan saturado tendría un valor de conductividad hidráulica mayor a este. Por lo tanto, a medida que se aumenta la carga hidráulica se esperaría un aumento proporcional del valor

de la conductividad hidráulica; sin embargo, valores grandes de carga hidráulica no se estarían representando posibles condiciones geomecánicas en el macizo rocoso naturalmente fracturado.

- Radio de Perforación (r): valores usualmente empleados no muestran grandes variaciones en la estimación de la conductividad hidráulica. Por lo tanto, no se obtendrían variaciones considerables si el radio de la perforación aumenta.
- Alcance de Ensayo (R): las estimaciones de conductividad hidráulica mantienen una tendencia creciente a medida que aumenta el alcance del ensayo. Lo cual es congruente con el medio y la realización de la prueba, debido a que si se tiene un mayor alcance es porque el medio lo permite, mostrando una mayor conductividad. Es preciso aclarar que, el alcance del ensayo sólo es posible determinarlo con la implementación de un pozo de observación; este generalmente nunca es construido, lo que no permite tener un dato confiable en este tipo de ensayos.

La selección final del estadio representativo para la estimación de la conductividad hidráulica se basa en los comportamientos y/o patrones de flujo observados por Houlby (1976). El **Gráfico 1** muestra cinco (05) patrones típicos de flujo (Houlby, 1976) durante los ensayos de inyección tipo Lugeon. El **Gráfico 1 A** muestra un flujo laminar y la permeabilidad se estima con el promedio de todos los valores Lugeon obtenidos, **Gráfico 1 B** muestra un flujo turbulento y la permeabilidad se estima con valor Lugeon correspondiente a la presión máxima, **Gráfico 1 C** muestra un flujo dilatación y la permeabilidad se estima con el valor Lugeon promedio correspondiente a las presiones mínimas y/o medias, **Gráfico 1 D** muestra un flujo erosión y la permeabilidad se estima

con el valor Lugeon más alto estimado, y finalmente, **Gráfico 1 E** muestra un flujo relleno y la permeabilidad se estima con el valor Lugeon mínimo estimado.

Gráfico 1

Patrones Típicos Pruebas Lugeon (Houlsby 1976)

Tipo	Estado	Presiones de Prueba	Patrones Calculados	Características de Patrones	Valor a usar como "K"	Curva de Interpretación
Flujo Laminar	1°			Los 5 valores Lugeon son aproximadamente iguales	Se usa el promedio de los 5 valores	
	2°					
	3°					
	4°					
	5°					
Flujo Turbulento	1°			El valor Lugeon más bajo ocurre en la presión máxima	Se usa el valor para la presión máxima	
	2°					
	3°					
	4°					
	5°					
Flujo Dilatación	1°			El valor Lugeon más alto ocurre en la presión máxima	Se usa el valores de Lugeon para las presiones mínimas y/o medias	
	2°					
	3°					
	4°					
	5°					
Flujo Erosión	1°			Los valores Lugeon aumentan en el proceso de la prueba (por cambios en medio rocoso)	Se usa el valor para más alto	
	2°					
	3°					
	4°					
	5°					
Flujo Relleno	1°			Los valores Lugeon decrecen en el proceso de la (los vacíos son gradualmente rellenos)	Se usa el valor para más bajo	
	2°					
	3°					
	4°					
	5°					

Fuente: Modificado de Houlsby (1976)

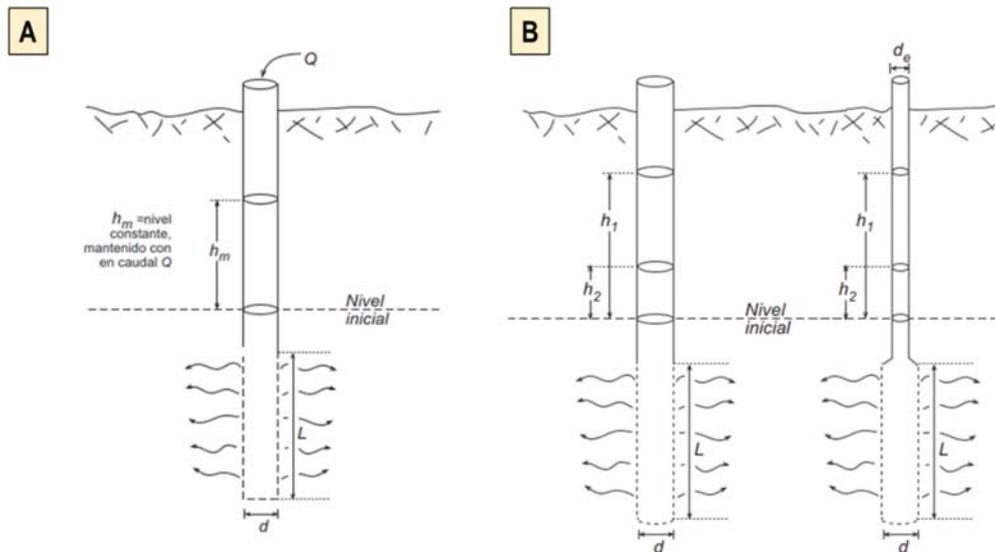
2.2.18.2 Lefranc (Carga Constante y Carga Variable)

Este ensayo, inicialmente, fue usado para estimar la conductividad hidráulica en suelos. Posteriormente, fue adaptado a un medio rocoso, generalmente en los primeros

metros de perforación, donde el macizo rocoso es más débil y fuertemente fracturado. Para la aplicación de este método, existen dos (02) variantes. El **Gráfico 2 A** muestra la variante constante, donde el objetivo es mantener un nivel constante manteniendo un caudal de inyección constante, mientras que, el Gráfico 2 B muestra la variante variable, donde el objetivo es medir los descensos generados por la inyección de un determinado volumen de agua y/o barra, denominado slug test por Sánchez (2014)).

Gráfico 2

Esquema Simplificado Ensayo Lefranc



Fuente: Sánchez (2014)

El método de carga constante consiste en evaluar la permeabilidad del pozo de perforación en un intervalo específico añadiendo un flujo de agua y lograr un nivel de agua constante en la perforación (H_0). Asimismo, el flujo de agua es medido con la ayuda de un caudalímetro durante determinado periodo, que, generalmente son 10 minutos. Según el Manual Interno (WSP, 2024) la conductividad hidráulica se obtiene usando la siguiente expresión:

$$K = \frac{Q}{2\pi L H_0} \ln \left[\frac{mL}{2r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{mL}{2r_w} \right)^2} \right] \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

K: es la conductividad hidráulica

Q: es la tasa de flujo

r_w : es el radio del sondaje de perforación

L: longitud del tramo de ensayo

H_0 : incremento de la carga hidráulica.

m: factor de anisotropía ($m = \sqrt{(K_r K_z)}$)

El método de carga variable consiste en evaluar la permeabilidad del pozo de perforación en un intervalo específico, agregando un solo flujo de agua (no constante) hasta generar una sobrecarga hidráulica sobre el nivel de agua inicial. Asimismo, el descenso del nivel de agua es medido con ayuda de una sonda eléctrica durante un determinado periodo de tiempo, que, dependerá de la recuperación del nivel de agua inicial (generalmente hasta una recuperación del 85%). Según el Manual Interno (WSP, 2024) la conductividad hidráulica se obtiene usando la siguiente expresión:

$$K_H = \frac{d_e^2 \ln \left(\frac{2mL}{D} \right)}{8L(t_1 - t_2)} \ln \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde:

D: es el diámetro del sondaje de perforación

d_e : es el diámetro de la perforación

H1 y H2: descensos registrados en los tiempos t1 y t2

2.2.19 Ensayos Posteriores a la Perforación

2.2.19.1 Pruebas de Bombeo

En 2010, se desarrollaron pruebas de bombeo de bajo caudal en cuatro (04) piezómetros de tipo Casagrande de 2". Para este ensayo se emplearon una (01) bomba sumergible y tablero, un (01) Levelogger, una (01) sonda eléctrica y un (01) cronómetro. Asimismo, las metodologías aplicadas para el análisis de resultados hacen referencia a la metodología de "Theis - Jacob Correction" con bases centradas en las fórmulas de Theis y Jacob (IGME, 1984).

La fórmula de Theis refleja el análisis del cono de descensos en régimen variable, para la obtención de los parámetros de transmisividad y coeficiente de almacenamiento, con la siguiente expresión (IGME, 1984):

$$d = \frac{Q}{4\pi T} w(\mu) \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$\mu = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$w(\mu) = -0.5772 - \ln(\mu) + \mu - \frac{\mu^2}{2.2!} + \frac{\mu^3}{3.3!} - \dots \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde:

Q: caudal de bombeo constante

T: transmisividad

S: coeficiente de almacenamiento

t: tiempo transcurrido desde el inicio del bombeo

d: descenso

r: distancia a la que se produce el descenso “d”

W (μ): función pozo

La fórmula de Jacob, también considerada como una simplificación de la fórmula de Theis, debido a que la suma del tercer sumando y sucesivos es despreciable para valores de $\mu < 0.03$, por lo tanto, sustituyendo μ por los valores $(-0.5772 - \ln\mu)$, se obtiene la siguiente expresión:

$$d = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt}{r^2S} \text{ (Ecuación 22)}$$

$$d = 0.183 \frac{Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2S} \text{ (Ecuación 23)}$$

Donde:

Q: caudal de bombeo constante

T: transmisividad

S: coeficiente de almacenamiento

t: tiempo transcurrido desde el inicio del bombeo

d: descenso

r: distancia a la que se produce el descenso “d”

El método para interpretar conjuntamente todos los valores tomados en el ensayo consiste en lo siguiente:

$$t_0 = \frac{r^2S}{2.25T} \text{ (Ecuación 24)}$$

A partir de esta ecuación se obtiene:

$$d = 0.183 \frac{Q}{T} \log \frac{t}{t_0} \text{ (Ecuación 25)}$$

$$d = 0.183 \frac{Q}{T} \log(t) - 0.183 \frac{Q}{T} \log(t_0) \text{ (Ecuación 26)}$$

Expresión en la que si se toma “d” como función de “y log (t)” como una variable, es una recta de la forma:

$$y = mx + n \text{ (Ecuación 27)}$$

Por lo tanto,

$$y = d \text{ (Ecuación 28)}$$

$$x = \log(t) \text{ (Ecuación 29)}$$

$$m = \Delta d = 0.183 \frac{Q}{T} \text{ (Ecuación 30)}$$

Por consiguiente, la transmisividad (T) puede ser estimada de la siguiente expresión:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d} \text{ (Ecuación 31)}$$

Δd = descenso medido durante un ciclo logarítmico

Finalmente, para obtener el coeficiente de almacenamiento (S) sólo hay que medir el valor de “t” en el punto donde la recta ajustada corta al eje de las abscisas “t₀”. Lo que se resumen en la siguiente expresión:

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \text{ (Ecuación 32)}$$

2.2.20 Transmisividad (T) y Coeficiente de Almacenamiento (S)

En la práctica la transmisividad (T) nos indica la facilidad del agua para circular horizontalmente a través de una formación geológica; por lo tanto, estaría representado por la conductividad hidráulica y el espesor saturado e indirectamente proporcionaría información del potencial del acuífero (Zekai, 2015). Por otro lado, el coeficiente de almacenamiento (S), adimensional, es un parámetro que nos indica el agua que podemos obtener de acuíferos confinados y semiconfinados propiamente dichos; sin embargo, para acuíferos libres estaría representado por la porosidad eficaz (Sánchez (2014)).

La **Tabla 5** muestra los valores de transmisividad típicos para evaluar el potencial de los acuíferos basado en la transmisividad (Zekai, 2015), mientras que, la **Tabla 6** muestra los valores típicos de coeficiente de almacenamiento presentes en acuíferos libre, semiconfinados y confinados (Sanchez, 2014).

Tabla 5

Potencial del Acuífero Basado en la Transmisividad (T)

Transmisividad (m ² /d)	Potencial
T < 5	Insignificante
5 < T < 50	Bajo
50 < T < 500	Moderado
T > 500	Alto

Fuente: Zekai Sen (2015)

Tabla 6

Valores Típicos de Coeficiente de Almacenamiento (S)

Rango	Tipo Acuífero	Potencial
3e-1 – 1e-2	Libre	El agua proviene del vaciado de los poros (porosidad eficaz).
1e-3 – 1e-4	Semiconfinado	El agua proviene de la descompresión y de rezumes de capas confinantes.
1e-4 – 1e-5	Confinado	El agua proviene de la descompresión.

Fuente: Sánchez (2014)

2.2.21 Balance Iónico (IBE)

En general, los resultados de las muestras de agua procedentes del laboratorio son expresadas en miligramos por litro (mg/L) para todos los iones disueltos. Sin embargo, para el balance iónico estas concentraciones deberán ser expresadas en miliequivalentes por litro (meq/L); donde, es necesario dividir las concentraciones de los iones disueltos entre el peso equivalente de cada ion. Una vez hallada las concentraciones en meq/L, para determinar la aceptabilidad de los resultados del laboratorio. Para este fin se utiliza el criterio del error de equilibrio de carga o balance iónico, para cada estación de muestreo.

$$\text{IBE (\%)} = 100 \times \frac{\Sigma\text{cationes} - \Sigma\text{aniones}}{\Sigma\text{cationes} + \Sigma\text{aniones}} \quad (\text{Ecuación 33})$$

Donde:

IBE: error de balance iónico

Σ : sumatoria de cationes o aniones en miliequivalentes por litro (meq/L).

Una vez expresado los cationes y aniones en miliequivalentes por litro (meq/L), se debe tener en consideración dos puntos importantes (Zekai, 2015).

- Los límites de error debes estar preferiblemente dentro del $\pm 5\%$ o como máximo un $\pm 10\%$, si el error esta fuera de este rango puede existir límites de error analítico, cálculo de error o presencia de constituyentes no determinados.

Adicionalmente, Custodio y Llamas (1983), brinda rangos para aceptar o no el análisis de la muestra de agua, que en general dependen del valor de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$):

- Los límites de error debes estar preferiblemente dentro del $\pm 30\%$ para conductividades eléctricas inferiores a $50 \mu\text{S/cm}$, $\pm 10\%$ para conductividades eléctricas entre $50 \mu\text{S/cm}$ y $200 \mu\text{S/cm}$, $\pm 8\%$ para conductividades eléctricas entre $200 \mu\text{S/cm}$ y $500 \mu\text{S/cm}$, $\pm 4\%$ para conductividades eléctricas entre $500 \mu\text{S/cm}$ y $2000 \mu\text{S/cm}$ y $\pm 4\%$ para conductividades eléctricas superiores a los $2000 \mu\text{S/cm}$.

2.2.22 Diferencia Porcentual Relativa (DPR)

Para este control, no es necesario un tratamiento preliminar de los datos obtenidos del laboratorio, por lo tanto, los valores reportados son usados en miligramos por litro (mg/L), sin embargo, los valores analizados deben ser al menos cinco veces más grande que el valor de Límite del Método de Detección (MDL). Para determinar la precisión de los resultados de laboratorio, se hace uso del criterio de la diferencia porcentual relativa (DPR), para la muestra duplicada recolectada en el mismo lugar (muestreadas en el menor tiempo posible):

$$\text{DPR (\%)} = 100 \times \frac{[\text{Valor A} - \text{Valor B}]}{((\text{Valor A} + \text{Valor B}) * 1/2)} \quad (\text{Ecuación 34})$$

Donde:

DPR: diferencia porcentual relativa (Mitchell, 2006).

A: concentración del analito en mg/L de la muestra original (superior a 5 veces el MLD).

B: concentración del analito en mg/L de la muestra duplicada (superior a 5 veces el MLD).

Una vez calculada la diferencia residual porcentual, se debe tener en consideración lo siguiente (Mitchell, 2006):

- La data debe ser vista con precaución cuando el DPR sea más grande que el 25%, y el caso de triplicados superior al 18%.

CAPITULO III METODOLOGIA APLICADA

3.1 Hidrología

3.1.1 Sistemas Hidrográficos

Regionalmente, APUMAYO se encuentra en el ámbito de la Cuenca del Río Yauca que pertenece a la vertiente del Pacífico. Además, ubicada en el flanco occidental de la Cordillera de los Andes entre los departamentos de Ayacucho y Arequipa. Por otro lado, según la Metodología de Delimitación y Codificación Pfafstetter, de Unidades Hidrográficas del Perú, la Cuenca del Río Yauca es catalogada de Nivel 5 y Codificación 13716 (Ministerio de Agricultura - Autoridad Nacional del Agua , 2012).

Localmente, APUMAYO se ubica dentro del divortium acuarium de siete (07) microcuencas (Jailpasca, Jispicahua, Chaviña, Huamanloma, Cuchuhuasi, Parapacancha y Auropata). Las microcuencas Jispicahua y Chaviña se unen para formar la Subcuenca Río Calicanto, mientras que, las microcuencas Huamanloma, Cuchuhuasi, Parapacancha y Auropata son aportantes de la Subcuenca del Río Corralmayo.

3.1.1.1 Características Fisiográficas

Las características fisiográficas establecidas para el área de estudio fueron el área de drenaje (A), perímetro (P), longitud (L), coeficiente de compacidad (Kc), factor de forma (Kf) y pendiente media (%) basado en lo expuesto por (HydroTerra, 2019). Para la delimitación espacial de las siete (07) microcuencas se empleó el Software ArcMap 10.8.1. (©1999-2020 Esri Inc), donde, fue necesario contar principalmente con el modelo de elevación digital (DEM) del área de estudio correspondiente al año 2010. Esta fecha fue seleccionada debido a que las operaciones mineras comenzaron después de este periodo, por lo tanto, representaría las condiciones preoperacionales de la U.M. Apumayo. Los pasos resumidos de la “Extensión Arc Hydro Tools” se detalla a continuación:

- Determinar la dirección de flujo para cada celda (Flow Direction).
- Determinar la acumulación de flujo acumulado para cada celda (Flow Accumulation).
- Definición de las corrientes presentes en la zona (Stream Definition).
- Segmentación de las de las corrientes presentes en la zona (Stream Segmentation).
- Delimitación de las microcuencas presentes en la zona (Catchment Grid Delineation).
- Conversión de la delimitación de microcuencas presentes en la zona en polígonos (Catchment Polygon Processing).
- Generación de cauces principales presentes en la zona (Drainage Line Processing).
- Delimitación en formato vectorial de las cuencas (Adjoint Catchment Processing), se debe tener claro el punto de desagüe o de descarga de la cuenca que deseamos delimitar.

La **Figura 5** muestra la delimitación espacial de las siete (07) microcuencas (Jailpasca, Jispicahua, Chaviña, Huamanloma, Cuchuhuasi, Parapacancha y Auropata) presentes en el área de estudio.

3.1.2 Climatología

3.1.2.1 Precipitación (P)

La información de precipitación se basa en los datos históricos de tres (03) estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio (Lucanas, Puquio y Coracora) todas operadas por el SENAMHI (**Tabla 7**). Sin embargo, para mejorar el análisis hidrológico a lo largo de las siete (07) microcuencas, se generaron 22 estaciones meteorológicas virtuales (**Tabla 8 y Figura 5 A**) con data histórica diaria de precipitación

provenientes de la misión “The Tropical Rainfall Measuring Mission” - TRMM (NASA, 2024) y validadas con la información generada por las estaciones meteorológicas operadas por SENAMHI (Ver **Tabla 7** y **Figura 5 B**).

Tabla 7

Estaciones Meteorológicas Operadas por SENAMHI

Estación	Coordenadas UTM WGS84 18S		Cota (msnm)	Región	Provincia	Distrito	Periodo
	Este (m)	Norte (m)					
Lucanas	584001	8383558	3354	Ayacucho	Lucanas	Lucanas	1964 - 2017
Puquio	593492	8374755	3168	Ayacucho	Lucanas	Puquio	1964 - 2015
Coracora	631219	8339990	3156	Ayacucho	Parinacochas	Coracora	1964 - 2017

Fuente: SENAMHI (2024)

Tabla 8

Estaciones Virtuales TRMM

Estación	Coordenadas UTM WGS84 18S		Cota (msnm)	Región	Provincia	Distrito	Periodo
	Este (m)	Norte (m)					
EV1	614658	8340413	4254	Ayacucho	Lucanas	San Marcos	1998 - 2017
EV2	613314	8340519	4249	Ayacucho	Lucanas	San Marcos	1998 - 2017
EV3	614211	8341511	4186	Ayacucho	Lucanas	San Marcos	1998 - 2017
EV4	612394	8341519	4184	Ayacucho	Lucanas	San Marcos	1998 - 2017
EV5	616176	8343039	4177	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	1998 - 2017
EV6	615846	8341503	4165	Ayacucho	Lucanas	San Marcos	1998 - 2017
EV7	614286	8343612	4164	Ayacucho	Lucanas	San Marcos	1998 - 2017
EV8	615406	8344005	4159	Ayacucho	Lucanas	San Marcos	1998 - 2017
EV9	617799	8342898	4154	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	1998 - 2017
EV10	617513	8343795	4107	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	1998 - 2017
EV11	614991	8344792	4089	Ayacucho	Lucanas	San Marcos	1998 - 2017
EV12	616691	8345016	4073	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	1998 - 2017
EV13	614588	8345978	4038	Ayacucho	Lucanas	San Marcos	1998 - 2017
EV14	617780	8345664	4030	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	1998 - 2017
EV15	613474	8346968	4022	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	1998 - 2017
EV16	617282	8347149	4007	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	1998 - 2017
EV17	616197	8347353	3966	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	1998 - 2017

Estación	Coordenadas UTM WGS84		Cota (msnm)	Región	Provincia	Distrito	Periodo
	18S						
	Este (m)	Norte (m)					
EV18	617415	8347944	3963	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	1998 - 2017
EV19	617032	8348831	3931	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	1998 - 2017
EV20	615296	8347888	3860	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	1998 - 2017
EV21	614798	8349395	3770	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	1998 - 2017
EV22	613517	8349180	3720	Ayacucho	Lucanas	Chaviña	1998 - 2017

Fuente: Elaboración propia 2024

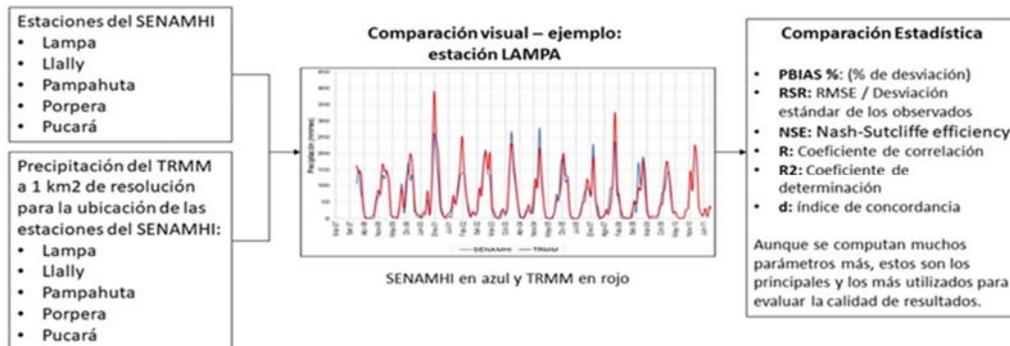
3.1.2.1.1 Validación de Precipitación Satelital TRMM

La información Satelital Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) cuenta con registros diarios de precipitación. Esta misión de predicción de lluvias tropicales realizada por la NASA y la Agencia de Exploración Espacial Japonesa (JAXA) fue diseñada para monitorear y estudiar precipitaciones tropicales y subtropicales con suministros de información diaria cada 25 km. Para nuestro objetivo se obtuvo información de precipitación diaria desde el 01 enero 1998 al 31 de diciembre 2017 (HydroTerra, 2019).

Con la finalidad de validar la información de precipitación TRMM, se generó estaciones virtuales en las mismas localizaciones de las estaciones del SENAMHI (Puquio y Coracora) con los siguientes nombres: estación TRMM Puquio y TRMM Coracora. Este proceso de validación estuvo validado por diferentes métodos de comparación estadísticas (PBIAS%: Porcentaje de desviación, RSR: RMSE / Desviación estándar de los observados, NSE: Nash-Sutcliffe efficiency, R: Coeficiente de correlación, R2: Coeficiente de Determinación d: Índice de concordancia) que permiten estimar la precisión de los modelos simulados (**Gráfico 3**).

Gráfico 3

Esquema de Validación de la Precipitación TRMM cada 1km2

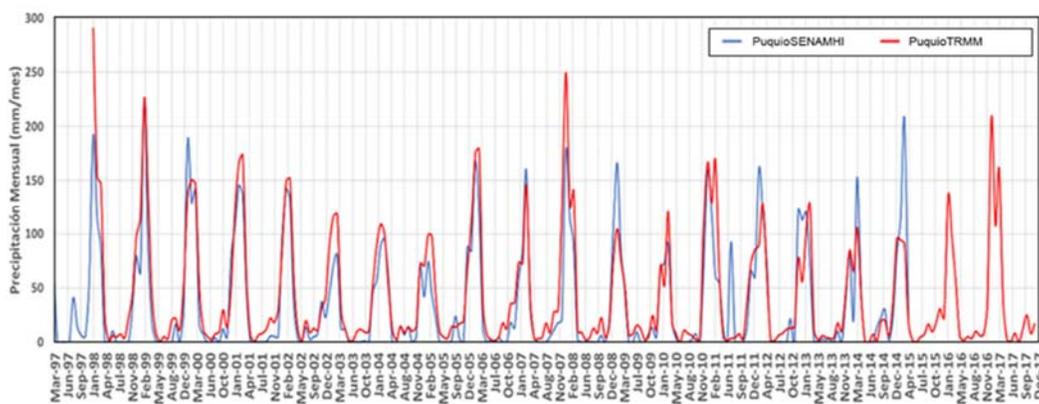


Fuente: Elaborado por HydroTerra (2019)

El **Gráfico 4** y **Gráfico 5** muestran el contraste de las precipitaciones promedios mensuales de las estaciones meteorológicas (Puquio SENAMHI y TRMM, y Coracora SENAMHI y TRMM) más cercanas a la Unidad Minera Apumayo para el periodo 1998-2017, permitiendo validar el comportamiento de la data Satelital TRMM y aquella suministrada por el SENAMHI.

Gráfico 4

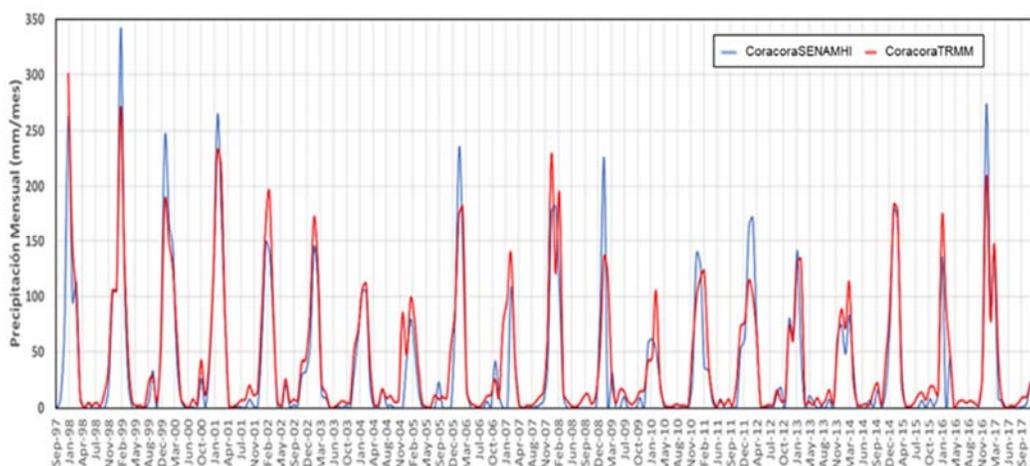
Precipitación Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM Puquio Periodo 1998 a 2017



Fuente: Elaborado por HydroTerra (2019)

Gráfico 5

Precipitación Mensual de las Estaciones SENAMHI y TRMM Coracora Periodo 1998 a 2017



Fuente: Elaborado por HydroTerra (2019)

En la **Tabla 9** y **Gráfico 6** se muestra las precipitaciones promedias mensuales entre 1998 y 2017 para las 22 estaciones virtuales. En el **Gráfico 6** se ha incluido las precipitaciones mensuales de las estaciones meteorológicas del SENAMHI (Lucanas, Puquio y Coracora) para facilitar la comparación con las 22 estaciones virtuales, donde, se observa que, los rangos de precipitación están dentro de los mismos límites. Asimismo, del **Gráfico 6** se desprende que el periodo de lluvias o húmedo abarcaría los meses de octubre a abril, mientras que el periodo de estiaje o seco abarcaría los meses de mayo a setiembre, donde los meses de abril y setiembre podrían ser considerados como transición de época húmeda a seca y viceversa.

Tabla 9

Precipitaciones Promedio Mensual (mm) entre 1998 a 2017

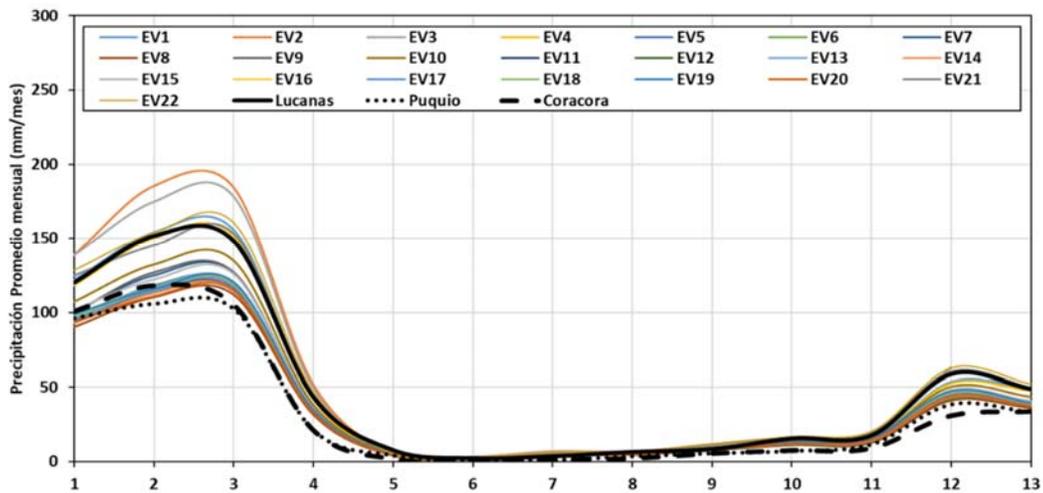
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
EV1	94.6	118.3	119.1	33.6	4.2	2.2	4.5	4.7	8.0	11.6	13.2	43.0	457.1
EV2	93.4	110.8	114.4	32.8	4.2	2.3	4.4	4.8	8.5	12.1	14.4	44.0	446.1
EV3	93.2	113.3	115.8	32.7	4.1	2.1	4.4	4.7	8.0	11.5	13.5	42.9	446.2
EV4	89.9	110.1	111.9	31.5	3.9	2.1	4.2	4.5	7.6	11.0	12.8	40.9	430.5
EV5	100.0	127.1	127.4	36.3	4.5	2.5	4.9	5.0	8.7	12.4	14.1	46.3	489.4
EV6	98.8	115.6	120.4	34.9	4.5	2.5	4.7	5.2	9.3	13.1	15.8	47.3	472.1

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
EV7	95.8	114.4	117.8	33.9	4.4	2.4	4.6	5.0	8.9	12.6	15.0	45.7	460.5
EV8	118.2	150.1	151.7	42.1	4.9	2.5	5.5	5.7	9.2	13.6	15.3	52.4	571.3
EV9	95.6	116.5	119.1	33.7	4.4	2.3	4.6	4.9	8.5	12.2	14.3	44.8	460.8
EV10	96.5	115.0	118.6	34.2	4.5	2.5	4.6	5.1	9.1	12.8	15.3	46.3	464.5
EV11	97.1	115.3	119.1	34.5	4.5	2.5	4.7	5.1	9.1	12.8	15.4	46.4	466.4
EV12	101.8	122.1	126.0	35.9	4.5	2.4	4.8	5.2	9.0	12.8	15.3	47.8	487.7
EV13	100.5	124.9	126.9	35.5	4.3	2.3	4.8	4.9	8.3	12.0	13.7	45.4	483.6
EV14	107.1	132.2	135.0	38.1	4.9	2.7	5.2	5.5	9.6	13.6	15.7	50.1	519.5
EV15	97.4	116.8	120.3	34.1	4.3	2.3	4.6	5.0	8.5	12.2	14.4	45.3	465.2
EV16	138.9	185.5	184.7	52.0	5.9	3.2	6.9	6.9	11.1	16.1	17.9	63.2	692.2
EV17	125.0	145.4	153.6	44.2	5.7	3.1	5.9	6.6	11.8	16.5	20.0	60.4	598.2
EV18	138.7	174.8	178.5	49.3	6.0	3.1	6.7	6.8	11.3	16.4	18.4	62.7	672.6
EV19	128.8	153.9	160.7	46.3	5.8	3.2	6.2	6.9	12.1	16.9	20.5	62.9	624.1
EV20	121.8	153.8	155.8	43.3	5.1	2.6	5.7	5.7	9.5	13.9	15.4	53.5	586.3
EV21	95.4	117.6	119.0	33.4	4.0	2.1	4.4	4.5	7.6	11.1	12.5	41.8	453.4
EV22	92.6	112.8	115.0	32.9	4.3	2.3	4.5	4.8	8.4	11.9	13.9	43.4	446.7

Fuente: Elaborado por HydroTerra (2019)

Gráfico 6

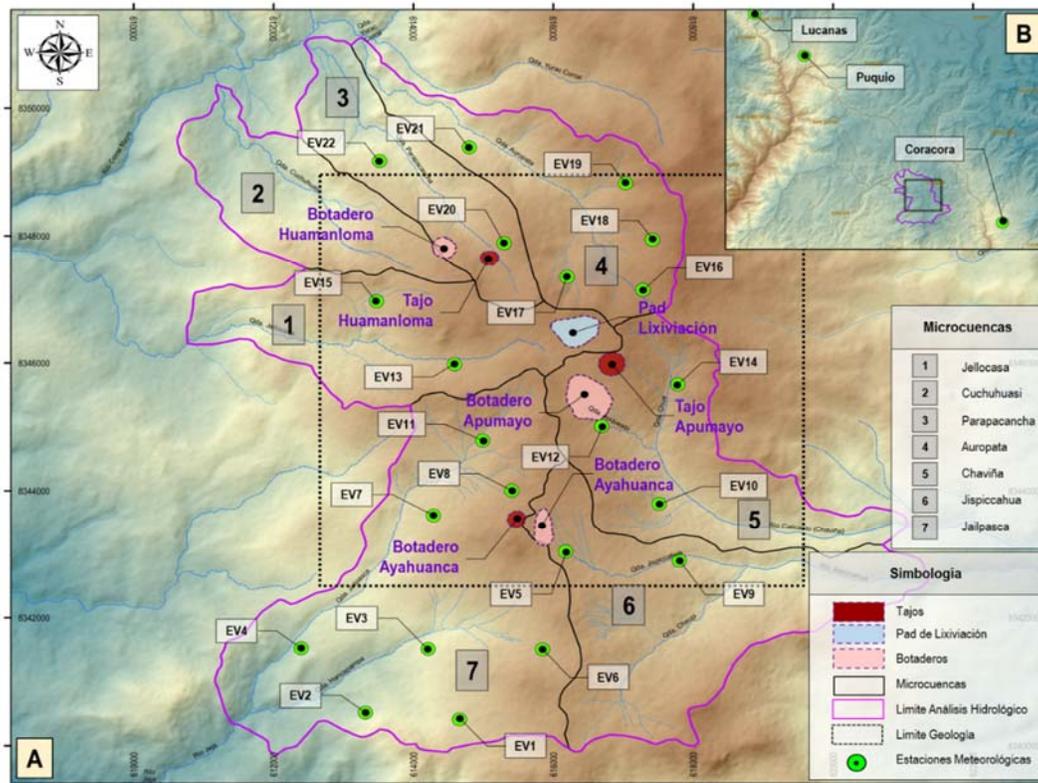
Precipitación Promedio Mensual Multianual (mm) Estaciones Virtuales (1998 – 2017) y SENAMHI (1964 – 2017)



Fuente: Elaborado por HydroTerra (2019)

Figura 5

Mapa Estaciones Meteorológicas Virtuales y SENAMHI



Fuente: Elaboración propia 2024

3.1.2.1.2 Precipitación Media Anual – Método de Isoyetas

La precipitación media de las siete (07) microcuencas ha sido obtenida por el método de las isoyetas tomando como base las 22 estaciones meteorológicas virtuales generadas, así como, la ecuación de precipitación versus altitud (Batemán, 2007).

3.1.2.2 Temperatura (T)

La información de la temperatura se basa los datos de temperatura registrados por la estación meteorológica de Coracora (HydroTerra, 2019). La **Tabla 10** muestra una temperatura promedio mensual varía entre los 9.1 y 15.4°C, mientras que la temperatura media anual oscila los 12.2 °C (HGS, 2015).

Tabla 10*Temperatura Promedio mensual 1964 a 2014 – Estación Coracora*

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
Media	11.9	12.2	12.3	12.7	11.6	10.8	10.8	11.5	12.6	13.2	13.4	13.6	12.2
Máxima	12.3	12.6	12.7	13.1	12.0	11.2	11.2	11.9	13.0	13.6	13.8	14.0	12.6
Mínima	1.4	12.5	12.6	13.0	11.9	11.1	11.1	11.8	12.9	13.5	13.7	13.9	12.5

Fuente: Elaborado por HydroTerra (2019)

3.1.2.3 Evapotranspiración (ETR)

La información de la evapotranspiración se basa en el balance presentado por HydroTerra (2019), donde, se analizaron las siete (07) microcuencas (Auropata, Cuchuhuasi, Chaviña, Jailpasca, Huamanloma, Jispicahua y Parapacancha). La **Tabla 11**, en forma resumida, muestra valores de evapotranspiración mensual entre unos 11.3 mm para el mes de julio y 57.3 mm para el mes marzo. Mientras que la evapotranspiración anual asciende a unos 307 mm/año. Esto indicaría que casi el 50% a 60% de la precipitación total anual es afectado por la evapotranspiración.

Tabla 11*Evapotranspiración Total Mensual y Total Anual*

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Media	40.9	47.3	57.3	41.5	20.34	12.5	11.3	11.7	13.5	15	13.7	22.4	307.3

Fuente: HydroTerra (2019)

3.1.3 Régimen de Caudales

Las descargas de los ríos provenientes de su escurrimiento natural son originadas principalmente por las precipitaciones que ocurren en las partes altas de las microcuencas. Estas aguas que discurren en la microcuenca van y forman los ríos en la parte baja, las cuales, en muchos de los casos son controladas y monitoreados por estaciones hidrométricas y/o de aforo. Sin embargo, cerca de la Unidad Minera Apumayo no existen estaciones hidrométricas, por lo tanto, fue necesario generar información teórica en base

a ciertas variables como la precipitación y temperatura evaluada en los apartados previos de climatología.

3.1.3.1 Generación de Caudales Mensuales – Método Lutz Scholz

3.1.3.1.1 Cálculo y Calibración de Caudales Mensuales por Microcuenca

La estimación de caudales mensuales para las siete (07) microcuencas ha sido obtenida por el método Lutz Scholz (Scholz, 1980). Además, el modelo se desarrolla partiendo de la estimación de algunos parámetros de ingreso asumidos en los apartados y algunos estudios previos, como, HGS (2015) para los coeficientes y valores de las contribuciones de la retención y gasto de abastecimiento (b_i , G_i , a_i y A_i) para las siete (07) microcuencas en estudio.

3.1.3.1.2 Cálculo del Caudal Base – Método Eckhardt

Las técnicas de separación de caudales usan series temporales de registros de caudales con el fin de discretizar las aportaciones del sistema en forma de caudal base, donde, los métodos más comunes de separación de caudales suelen ser de tipo gráfico; es decir, a partir de información de caudales registrados. Sin embargo, Eckhardt (2004), planteo un método con un sentido más físico para la obtención del caudal base; que depende estrictamente de las estimaciones de caudales mensuales.

3.2 Geología

3.2.1 Unidades Estratigráficas

Para la identificación de unidades litoestratigráficas presentes en el área de estudio, se realizó la revisión y recopilación de información geológica histórica planteada por Walsh (2010), HGS (2015), INGEMMET (2017), HydroTerra (2019), así como, información actual proporcionada por Apumayo (2019) referente a los modelos geológicos y alteración locales de tres (03) sectores (Huamanloma, Apumayo y

Ayahuanca). Esta información permitió la delimitación preliminar base de unidades litoestratigráficas y estructural en planta. Posteriormente, las visitas de campo programadas en noviembre y diciembre de 2018, así como, marzo y abril de 2019 permitieron mejorar y validar la distribución geológica horizontal en el área es estudio; permitiendo identificar un basamento volcánico agrupado en dos grupos (Barroso y Tacaza), con la presencia parcial de Depósitos Fluvio – Aluviales asociados a las quebradas. Finalmente, se generó una base de datos de 20 sondajes diamantinos distribuidos en los alrededores de los componentes mineros (tajo, botaderos y pad de lixiviación) que sirvieron como distribución vertical de las unidades litoestratigráficas en el área de estudio.

3.2.1.1 Grupo Tacaza (PN-t)

Se extiende en toda el área de estudio a manera de basamento e infrayaciendo al Grupo Barroso. Litológicamente, en el para de estudio, está compuesto por flujos andesíticos verdosos, areniscas y limolitas gris violáceas con aglomerados (INGEMMET , 2017). El espesor puede alcanzar los 1200 m, donde, el máximo espesor fue mapeado hacia la parte central (ceranos al Pad de Lixiviación, Tajo y Botadero Apumayo); seguido por el sector NE, y finalmente, por el sector SO del área de estudio.

3.2.1.2 Grupo Barroso (Qp-b-and)

Aflora en toda el área de estudio suprayaciendo al Grupo Tacaza. Litológicamente, este compuesto por lavas andesíticas (INGEMMET , 2017). El espesor puede alcanzar los 200 m, donde, los máximos espesores fueron mapeados hacia los extremos NE y SO; mientras, que hacia la parte central el espesor disminuye (ceranos al Pad de Lixiviación, Tajo y Botadero Apumayo).

3.2.1.3 Depósitos Fluvio-Aluviales (Q-fl/al)

Estos depósitos afloran, delimitados, principalmente a los cauces de quebradas y ríos. Litológicamente están compuestos por bloques, gravas, arenas y limos no consolidados (HydroTerra, 2019). El espesor, generalmente, no supera los pocos metros de espesor, debido, a que muchos están vinculados a la parte inicial del proceso de formación (quebradas Auropata, Parapacancha, Cuchuhuasi, Jellocasa, Jailpasca, Auqueato, Chua, Jispicahua y Chaupi; así como, ríos Calicanto y Jispicahua).

3.2.1.4 Depósitos Antrópicos (Q-an)

Los depósitos antrópicos yacen, generalmente, en las partes altas de las microcuencas. Litológicamente, comprenden a los materiales que conforman el desmonte de mina y el pad de lixiviación (HydroTerra, 2019). Los cuales se describen a continuación.

- Depósitos Antrópicos 1 (Q-an1), compuesto por cantos y bloques con grava y escasos finos; estériles (sin mineralización). Conforman los botaderos de desmonte Huamanloma, Apumayo y Ayahuanca.
- Depósitos Antrópicos 2 (Q-an2), compuestos por cantos y bloques con grava y escasos fino; proveniente de los cuerpos mineralizados con contenido de oro y plata, para el posterior proceso de lixiviación con cianuro.

3.2.2 Geología Estructural

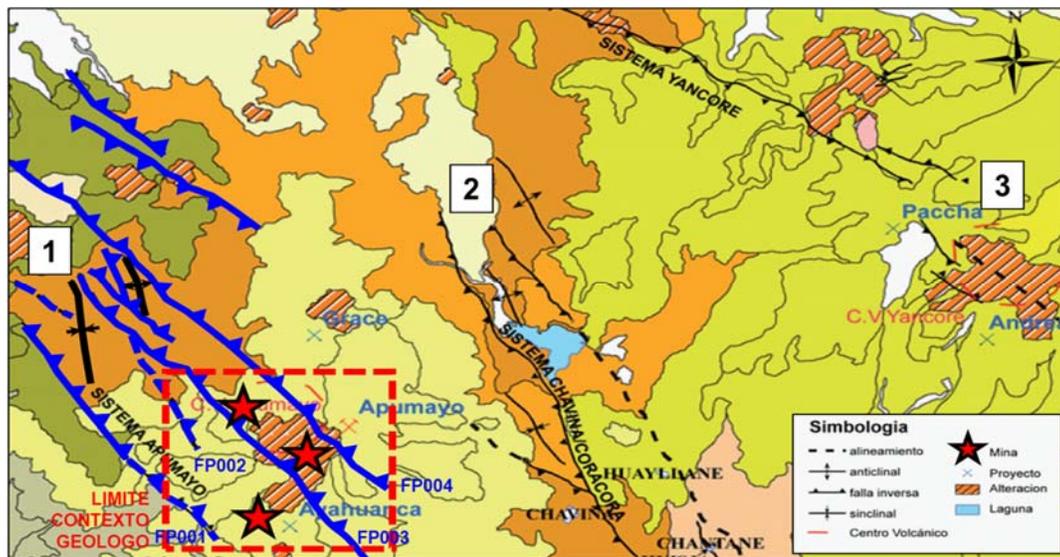
Regionalmente, como parte de los controles estructurales relacionados a la ocurrencia de depósitos minerales; se han reconocido tres (03) sistemas de fallas (Apumayo, Chaviña-Coracora y Yancore) de longitudes kilométricas y rumbo NO, donde, la cinemática general obedece a movimientos sinextrales inversos (Chacón, Cerpa,

Martínez, Coba, & Ayala, 2014). Estas fallas regionales habrían funcionado desde el Eoceno, debido a que controlan la sedimentación de formaciones al NO del área de estudio; posteriormente habrían controlado el emplazamiento de los centros volcánicos Apumayo y Yancore; así como, la ocurrencia de depósitos minerales. Localmente, como parte del Sistema de Fallas Apumayo, se han identificado cuatro (04) fallas principales (FP001, FP002, FP003 y FP004) de rumbo NO y buzamientos al NE.

La **Figura 6** muestra los controles estructurales principales mapeados por Chacón (2014) en el Sistema de Fallas Apumayo. Esto denotaría que, el área de estudio (polígono cuadrado de color rojo y líneas entrecortadas) estaría gobernado por cuatro (04) fallas principales de naturaleza sinextral inverso con buzamientos hacia el NE.

Figura 6

Controles Estructurales Regionales Presentes en el Área de Estudio



Fuente: Modificado de Chacón (2014)

Adicionalmente, APUMAYO proporcionó información estructural de 22 fallas locales, del entorno del yacimiento minero. Estas fallas son consideradas como fallas secundarias para este estudio, donde, los rumbos preferenciales presentan direcciones hacia el NO, N y NE; y buzamientos variables. La **Figura 16** muestra la distribución

espacial en planta de las fallas secundarias, que, en términos generales estarían limitadas por las fallas principales.

3.2.3 Tipo de Yacimiento y Alteraciones

APUMAYO consta de tres (03) cuerpos mineralizados denominados “Apumayo, Huamanloma y Ayahuanca”. Estos cuerpos mineralizados presentan contenido de oro y plata, asociados a depósitos de naturaleza epitermal tipo ácido con alteraciones típicas de alta sulfuración (AS) como “Sílica, Argílica Avanzada y Propilitica” emplazadas en rocas de composición andesíticas (Apumayo, 2019).

3.2.4 Construcción del Modelo Geológico 3D

El bloque tridimensional fue construido en el Software Leapfrog Works Versión 2023.1 con base en la información mostrada en los apartados previos. Para este fin se emplearon como base la geología en planta (Ver **Figura 16**) y siete (07) secciones geológicas (Ver **Figura 17**), así como, la recopilación e integración de 20 sondajes diamantinos distribuidos en los alrededores de los componentes mineros (tajo, botaderos y pad de lixiviación). La base topográfica empleada corresponde al año 2011 con un detalle de 1m, y fue considerada como pre-minado pues no se observaron excavaciones y/o movimientos de tierra considerables.

El objetivo principal de este modelo geológico 3D es utilizarlo como referencia para evaluar la malla estructurada 3D referente al modelo hidrogeológico numérico que fue creado en el Software Feflow 8.1. Posteriormente, se evaluarán las propiedades hidráulicas, en estado estacionario y transitoria, a ser calibradas.

3.3 Ensayos Hidráulicos

Las campañas de perforación y supervisión hidrogeológica, en campo, para la obtención de parámetros hidrogeológicos (conductividad hidráulica, transmisividad y

coeficiente de almacenamiento) fueron realizados en campo durante los años 2010, 2018 y 2019. En total, hasta 2019, fueron ejecutados 118 ensayos hidráulicos para la obtención de la conductividad hidráulica (K), donde: 99 corresponden a ensayos tipo Lefranc y 19 a ensayos tipo Lugeon desarrollados durante las perforaciones diamantinas. Por otro lado, hacia 2010, fueron desarrolladas cuatro (04) ensayos de bombeo de bajo caudal para la obtención parámetros de transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S) posterior a las perforaciones, en otras palabras, en piezómetros de tipo Casagrande o Tubo Abierto habilitados y operativos.

3.3.1 Parámetros Hidráulicos

3.3.1.1 Conductividad Hidráulica (K)

Se pudo evaluar alrededor de 118 ensayos durante el desarrollo de las perforaciones diamantinas, donde 19 corresponden a ensayos tipo Lugeon y 99 a tipo Lefranc. Los intervalos (bulbos) de ensayos evaluados oscilan entre 0.4 m y 11.4 m (típicos de acuerdo) (Fuertes, 2014), distribuidos en profundidades que van desde los 3.65 m a 189 m desde el collar de perforación. La **Figura 7** muestra la distribución espacial de los sondajes diamantinos donde se realizaron los ensayos de tipo Lugeon y Lefranc durante la perforación.

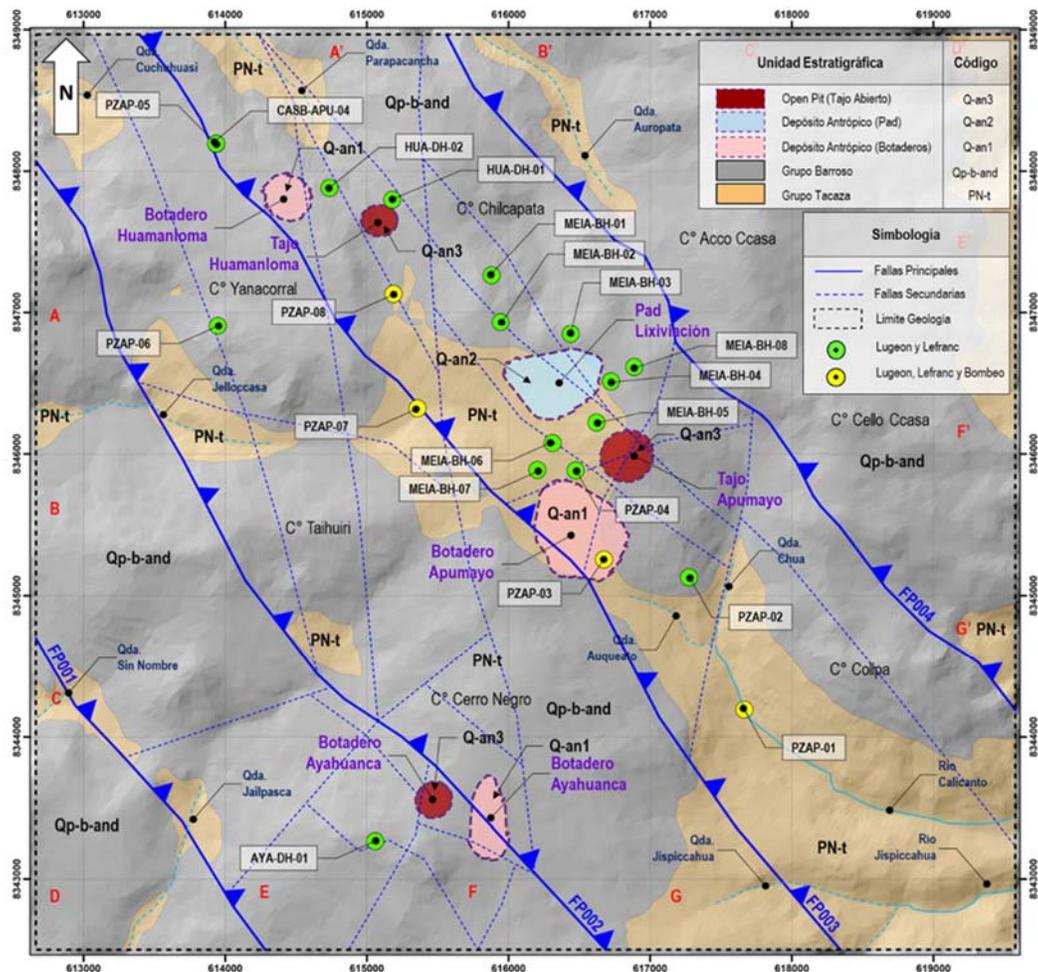
Por otro lado, para analizar la distribución de la permeabilidad en profundidad se empleó al diagrama de “Caja o Bigotes” tomando en consideración la profundidad media de los 118 ensayos. El 25% (Q1) de los datos fueron evaluados desde los 4 m (mínimo no atípico) hasta los 20 m de profundidad, el 50% (Q2) fueron evaluados desde los 20 m hasta los 40 m de profundidad y el 75% (Q3) de los datos fueron evaluados desde los 40 m hasta los 70 m de profundidad; con un valor máximo no atípico de hasta los 130 m y valores atípicos hasta los 200 m.

3.3.1.2 Transmisividad (T) y Coeficiente de Almacenamiento (S)

La información histórica de pruebas de bombeo muestra el desarrollo de cuatro (04) ensayos de bombeo a caudal constante (Walsh, 2010) en piezómetros de tipo Casagrande o Tubo Abierto habilitados y operativos. Estos ensayos fueron ejecutados en periodos cortos de 40 a 110 minutos con caudales que no superan los 0.1 L/s. De acuerdo con el modelo geológico 3D y la ubicación del tramo ranurado estas pruebas estarían evaluando en su totalidad las secuencias volcánicas del Grupo Tacaza, con una depresión máxima del nivel de agua subterránea hasta los 35 m (primeros metros meteorizados y fracturados). La **Figura 7** muestra la distribución espacial piezómetros de tipo Casagrande o Tubo Abierto, donde se realizaron los ensayos de bombeo.

Figura 7

Distribución Sondajes con Ensayos Hidráulicos Durante y Posterior a la Perforación



Fuente: Elaboración Propia 2024

3.4 Hidroquímica

Para el entendimiento hidroquímico del agua subterránea en los entornos de la APUMAYO, se realizó el monitoreo y recolección de muestras de agua subterránea (piezómetros y manantiales) entre los meses de noviembre y diciembre 2018; así como, el análisis data hidroquímica histórica presentada en estudios anteriores como Walsh (2010). Es importante mencionar que, las muestras recolectadas, en noviembre y diciembre 2018, fueron analizadas en un laboratorio debidamente acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

3.4.1 Parámetros Hidroquímicos

Para el análisis de los parámetros hidroquímicos, se recolectaron ocho (08) piezómetros y un (01) manantial, y se analizaron los principales iones constituyentes de agua subterránea: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{1+} , K^{1+} , HCO_3^{-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y Cl^{-} . Adicionalmente a estos parámetros, se monitoreó las propiedades fisicoquímicas en campo del agua subterránea como: el pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (TDS) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$). La **Tabla 12** muestra los principales parámetros analizados para determinar la composición iónica del agua subterránea según Zekâi Şen (2015).

Tabla 12

Principales Iones del Agua Subterránea

Iones	Parámetro	Peso Atómico	Carga Iónica	Peso Equivalente
Cationes	Calcio Disuelto	40.1	+2	20
	Magnesio Disuelto	24.3	+2	12.2
	Sodio Disuelto	23	+1	23
	Potasio Disuelto	39.1	+1	39.1
Aniones	Carbonato Disuelto	60	-2	30
	Bicarbonato Disuelto	61	-1	61
	Sulfato Disuelto	96.1	-2	48
	Cloruro Disuelto	35.5	-1	35.5

Fuente: Zekâi Şen (2015)

Los materiales utilizados para el monitoreo y muestreo del agua subterránea, considerando las características de los piezómetros, fueron los siguientes:

- Multiparámetro Marca Hanna HI 98194.
- Bailer Cuerpo $\frac{3}{4}$ " x 3 pies (19 mm x 91.5 cm) para contener 200 mL.
- Manguera Watterra $\frac{3}{4}$ " x 50 m.
- Trípode y Cable acerado de 250 m (Sistema de Recolección Manual).

- Equipo Watterra (Sistema de Recolección Manual).
- Jarra transparente graduada de 1 Litro.
- Soluciones calibradoras de pH (4.01, 7.01 y 10.01)
- Soluciones calibradoras de conductividad eléctrica (12.88 mS/cm y 1413 μ S/c)
- Filtro Hydrophilic PVDF 0.45 μ m.
- Jeringas de 50 mL.
- Frascos vacíos de recolección de muestras agua.
- Preservantes de muestra de agua.
- Cooler y Icepack para mantener la temperatura entre 0 °C a 6 °C.
- EEP asociado al monitoreo y muestreo de agua subterránea.

Para una representación adecuada y más real de los entornos de la APUMAYO, las muestras de agua subterránea fueron enviadas el mismo día de recolección para evitar el vencimiento y/o perecimiento de algún parámetro por el tiempo de preservación.

3.4.2 Estaciones de Muestreo y Monitoreo

Para la caracterización hidroquímica, se realizó el muestreo de nueve (09) estaciones de muestreo hidroquímico y una (01) muestra duplicada como control de calidad. Las muestras corresponden a ocho (08) piezómetros y un (01) manantial; tomando en consideración la distribución espacial de los piezómetros y manantiales. Estas muestras fueron recolectadas durante los días 09 al 10 de diciembre 2018. La **Figura 8** muestra la ubicación y distribución de estas estaciones de muestreo dentro del área en estudio.

En la **Tabla 13** se presenta la relación de estaciones de muestreo hidroquímico consideradas para el análisis (piezómetros y manantiales). Mientras que la Foto 1 muestra

en resumen trabajo parcial de muestreo de agua subterránea, donde, la **Foto 1 A** representa la medición de niveles de agua subterránea para la decisión del tipo de purgado. Por otro lado, **Foto 1 B** representa el purgado con Bailer, y finalmente, la **Foto 1 C** representa el proceso final de recolección de agua subterránea.

Tabla 13

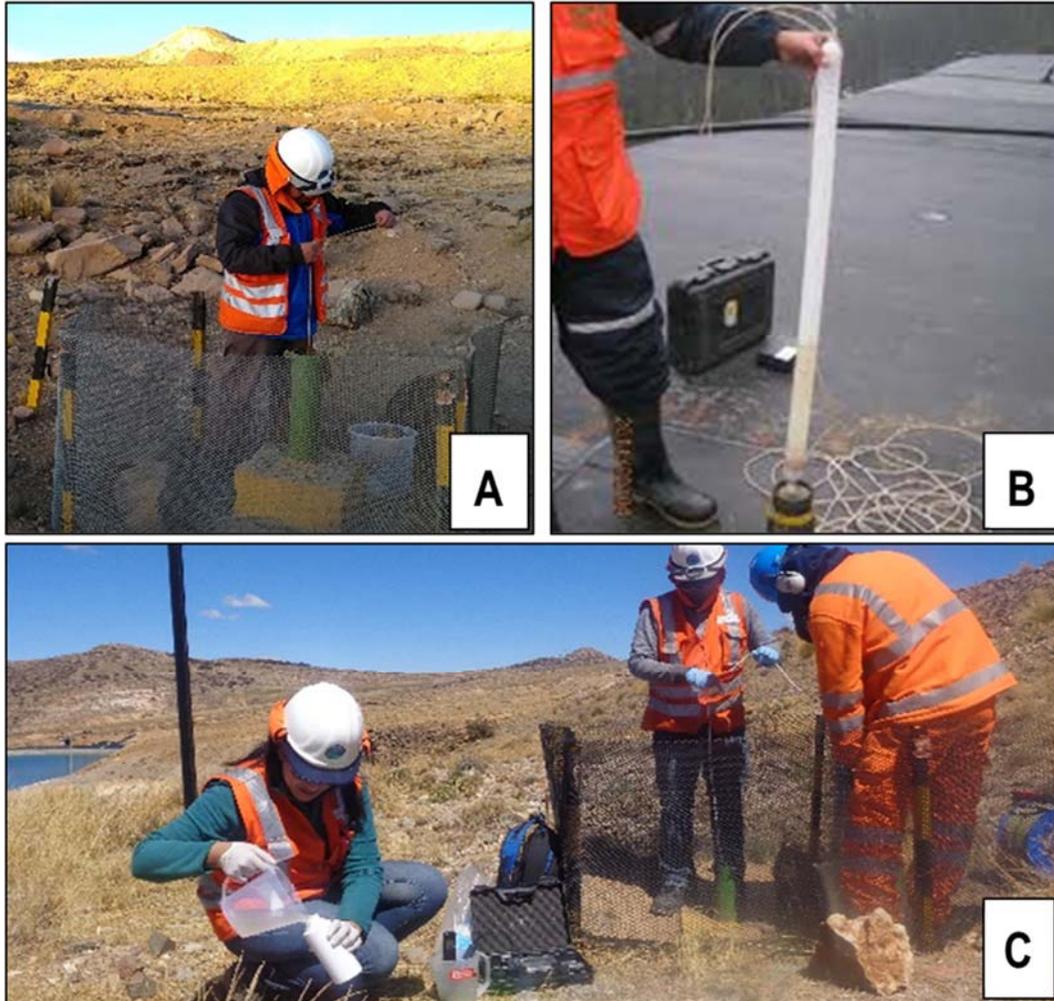
Estaciones de Muestreo Hidroquímico – Agua Subterránea

Microcuenca	Tipo de Fuente	Código	Cota	DRP
Jellocasa	Piezómetro	PZ-PAD-01	4187	GW-DP-01.
Jellocasa	Piezómetro	PZ-PAD-02	4221	–
Jellocasa	Piezómetro	PZ-PAD-03	4164	–
Río Calicanto	Piezómetro	PZAP-03	4186	–
Jellocasa	Piezómetro	CASB-APU-02	4142	–
Río Calicanto	Piezómetro	PZAP-09	4155	–
Jispicahua	Piezómetro	AYA-SUB-05	4114	–
Parapacancha	Piezómetro	CASB-APU-03	4176	–
Río Calicanto	Manantial	GW-MA-01	4134	–

Fuente: Elaboración propia 2024

Foto 1

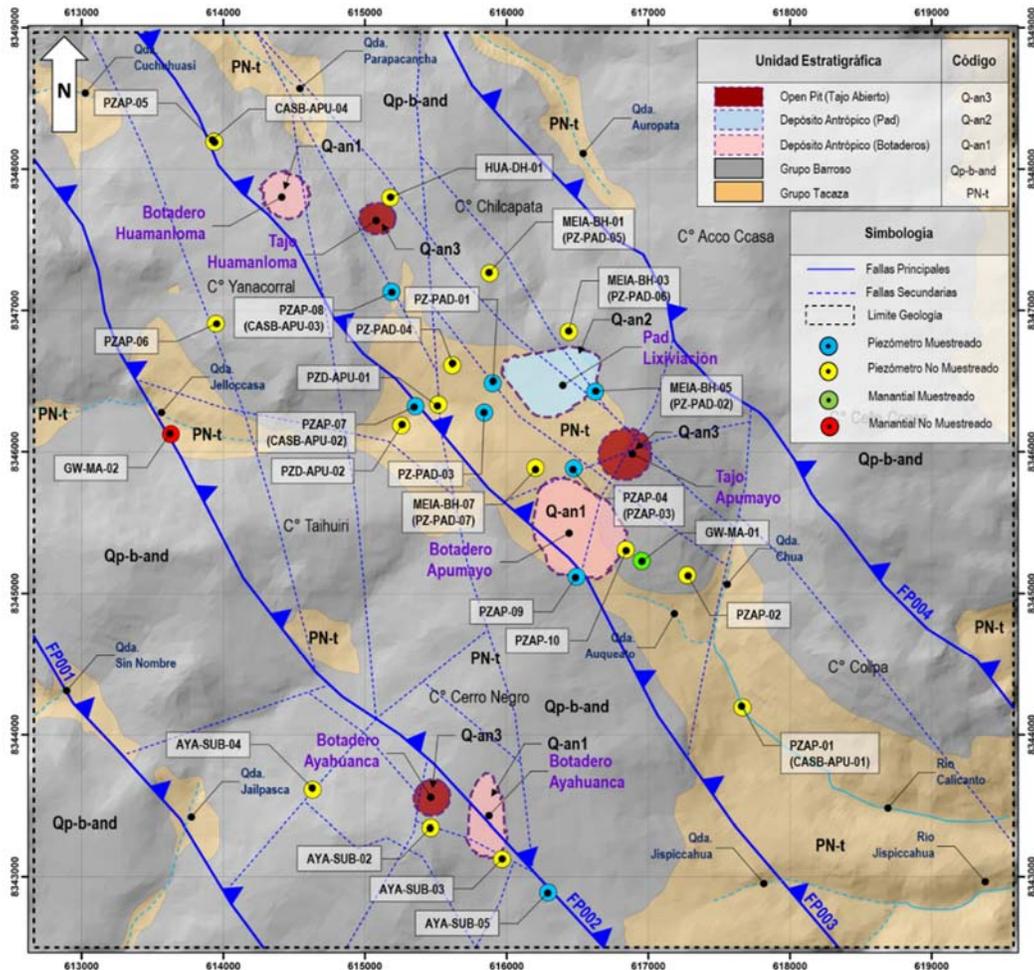
Proceso de Recolección de Muestras de Agua Subterránea



Fuente: Elaboración propia 2024

Figura 8

Estaciones de Muestreo



Fuente: Elaboración Propia 2024

3.4.3 Control de Calidad

Como parte de la evaluación del aseguramiento de calidad de datos reportados por el laboratorio, se realizó el análisis del balance iónico (IBE) y evaluación de consistencia de datos de la muestra duplicada mediante la diferencia porcentual relativa (DPR). Los resultados se detallan a continuación:

En general, el balance iónico (IBE), de cinco (05) estaciones, registraron valores inferiores al 2.3 % para conductividades inferiores a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, considerados aceptables

de acuerdo con los rangos mencionados por Zekâi Şen (2015) y Custodio y Llamas (1983). Además, dos (02) estaciones registraron valores cercanos al 10%, superando el rango de 5% propuesto por Zekâi Şen (2015), pero no el 10% propuesto por Custodio y Llamas (1983) para conductividades inferiores a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que serán tomados como referenciales para este estudio. Finalmente, dos (02) estaciones registraron valores superiores a los criterios propuestos tanto por Zekâi Şen (2015) y Custodio y Llamas (1983) que no serán usados en este estudio. La **Tabla 16** resumen los resultados del balance iónico.

Para la evaluación de diferencia porcentual relativa (DPR), el resultado de la estación PZ-PAD-01, fue consistente con su correspondiente duplicado (GW-DP-01), con valores inferiores al 17.7 %, respecto a un DPR de 25% considerado para muestras duplicadas (Mitchell, 2006). Sin embargo, los bicarbonatos presentaron un DPR muy cercano al 25%, por lo que los resultados serán tomados con precaución en las interpretaciones.

Tabla 14

Resultados de Análisis Metales Disueltos Laboratorio en mg/L (ICP – MS)

Iones	Parámetro	Unidad	PZ-PAD-01	PZ-PAD-02	PZ-PAD-03	PZAP-03	CASB-APU-02	PZAP-09	AYA-SUB-05	CASB-APU-03	GW-MA-01
Cationes	Ca ²⁺	mg/L	13.2	32.9	27.2	9.6	10.1	38.5	232.0	30.6	13.4
	Mg ²⁺	mg/L	3.9	12.9	4.5	2.3	2.3	4.2	0.003	5.6	1.5
	Na ¹⁺	mg/L	7.9	6.2	7.5	22.2	4.7	9.4	12.9	25.6	4.7
	K ¹⁺	mg/L	3.1	1.2	3.0	1.5	0.8	2.2	9.1	3.7	1.3
Aniones	HCO ₃ ¹⁻	mg/L	14.0	61.0	24.0	64.0	2.0	77.0	13.0	77.0	10.0
	CO ₃ ²⁻	mg/L	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	272.0	1.0	1.0
	Cl ¹⁻	mg/L	2.4	5.8	2.3	1.0	3.3	3.2	15.3	2.4	2.9
	SO ₄ ²⁻	mg/L	50.7	22.5	84.8	13.8	52.3	61.0	9.3	81.3	37.6

Fuente: Elaboración propia 2024

Tabla 15*Resultados de Análisis Metales Disueltos Laboratorio en meq/L (ICP – MS)*

Iones	Parámetro	Unidad	PZ-PAD-01	PZ-PAD-02	PZ-PAD-03	PZAP-03	CASB-APU-02	PZAP-09	AYA-SUB-05	CASB-APU-03	GW-MA-01
Cationes	Ca ²⁺	meq/L	0.7	1.6	1.4	0.5	0.5	1.9	11.6	1.5	0.7
	Mg ²⁺	meq/L	0.3	1.1	0.4	0.2	0.2	0.3	0.0002	0.5	0.1
	Na ¹⁺	meq/L	0.3	0.3	0.3	1.0	0.2	0.4	0.6	1.1	0.2
	K ¹⁺	meq/L	0.1	0.003	0.1	0.004	0.002	0.1	0.2	0.1	0.003
Aniones	HCO ₃ ¹⁻	meq/L	0.2	1.0	0.4	1.0	0.003	1.3	0.2	1.3	0.2
	CO ₃ ²⁻	meq/L	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	9.1	0.003	0.003
	Cl ¹⁻	meq/L	0.1	0.2	0.1	0.003	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1
	SO ₄ ²⁻	meq/L	1.1	0.5	1.8	0.3	1.1	1.3	0.2	1.7	0.8

Fuente: Elaboración propia 2024

Tabla 16*Resultados de Balance Iónico (IBE)*

Código	Conductividad (uS/cm)	Σ Cationes (meq/L)	Σ Aniones (meq/L)	IBE (%)	Aceptabilidad
PZ-PAD-01	158	1.4	1.4	-1.0	Admisible
PZ-PAD-02	335	3.0	1.7	-28.7	No Admisible
PZ-PAD-03	222	2.2	2.3	1.5	Admisible
PZAP-03	168	1.7	1.4	-9.7	Referencial
CASB-APU-02	153	1.0	1.2	9.8	Referencial
PZAP-09	287	2.8	2.7	-1.7	Admisible
AYA-SUB-05	2829	12.5	9.9	-11.5	No Admisible
CASB-APU-03	336	3.2	3.1	-2.3	Admisible
GW-MA-01	127	1.0	1.1	1.3	Admisible

Fuente: Elaboración propia 2024

Nota: las muestras denotadas como “Referencial” son consideradas como referenciales en este estudio, pues superan el límite de aceptabilidad propuesto por Zekâi Şen, (2015), pero no el de Custodio y Llamas (1983).

3.4.4 Parámetros Físicoquímicos de Campo

Como parte de la evaluación de los parámetros físicoquímicos en general se realizó el inventario de fuentes de agua (piezómetros y manantiales) en los entornos del proyecto Apumayo, donde, se identificaron 23 piezómetros tipo Casagrande y dos (02) manantiales.

La **Tabla 17** y **Tabla 18** resumen las propiedades físicoquímicas de los piezómetros y manantiales monitoreados en las dos (02) campañas desarrolladas en noviembre y diciembre 2018; y marzo y abril 2019. Mientras que la **Figura 8** muestra la ubicación espacial de los puntos de agua subterránea inventariados y monitoreados (piezómetros y manantiales).

Tabla 17

Monitoreo de Propiedades Físicoquímicas Piezómetros Tipo Casagrande

Microcuenca	Código	Noviembre y diciembre 2018				Marzo y abril 2019			
		pH	CE (uS/cm)	TDS (mg/L)	T (°C)	pH	CE (uS/cm)	TDS (mg/L)	T (°C)
Jellocasa	PZ-PAD-01	7.4	152	96	8.7	7.5	142	89	7.1
Jellocasa	PZ-PAD-02	7.3	364	229	10.7	7.1	595	375	9.1
Jellocasa	PZ-PAD-03	7.2	236	149	10.3	6.4	244	154	8.6
Rio Calicanto	PZAP-02	7.8	91	57	9.8	7.3	82	52	11.6
Rio Calicanto	PZAP-03	8.4	146	92	8.5	8.3	127	80	10.5
Rio Calicanto	PZAP-09	8.1	309	195	9.6	7.5	274	173	12.5
Rio Calicanto	PZAP-10	7.5	83	52	8.8	7.3	93	59	12
Rio Calicanto	CASB-APU-01	7.6	410	258	10.8	8	492	310	12.9
Parapacancha	CASB-APU-04	7.2	38	24	11.4	7.3	21	13	12.6
Jellocasa	PZAP-06	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco
Jellocasa	PZD-APU-01	-	-	-	-	-	-	-	-
Jellocasa	PZD-APU-02	-	-	-	-	-	-	-	-
Jellocasa	CASB-APU-02	5.2	186	117	10.5	5.1	167	105	9.1
Jispicahua	AYA-SUB-03	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco
Jailpasca	AYA-SUB-04	4.3	202	127	12.1	3.8	222	140	11.9
Jispicahua	AYA-SUB-05	12.7	2918	1838	10.1	12.3	2815	1773	10.6
Jispicahua	MEIA-BH-01	-	-	-	-	-	-	-	-

Microcuenca	Código	Noviembre y diciembre 2018				Marzo y abril 2019			
		pH	CE (uS/cm)	TDS (mg/L)	T (°C)	pH	CE (uS/cm)	TDS (mg/L)	T (°C)
Jellocasa	MEIA-BH-03	6	343	216	8.6	5.5	210	132	8.2
Rio Calicanto	MEIA-BH-07	6.6	532	335	11	6.9	502	316	12.5
Parapacancha	HUA-DH-01	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco
Jellocasa	PZ-PAD-04 (ITS-BH-03)	6.5	288	181	9.5	6.3	93	59	7.8
Jispicahua	AYA-SUB-02	–	–	–	–	–	–	–	–
Parapacancha	CASB-APU-03	8.2	336	212	10.8	8.1	375	236	10.3

Fuente: Elaboración propia 2024

Tabla 18

Monitoreo Propiedades Físicoquímicas Piezómetros

Microcuenca	Código	Noviembre y diciembre 2018				Marzo y abril 2019			
		pH	CE (uS/cm)	TDS (mg/L)	T (°C)	pH	CE (uS/cm)	TDS (mg/L)	T (°C)
Rio Calicanto	GW-MA-01	7.6	159	100	13.5	7.7	116	73	11.4
Jellocasa	GW-MA-02	4.1	502	316	10.3	3.9	458	289	12.9

Fuente: Elaboración propia 2024

La **Tabla 19** muestra los rangos de pH considerados para esta sección según Zekâi Şen (2015).

Tabla 19

Clasificación del Grado de Acidez

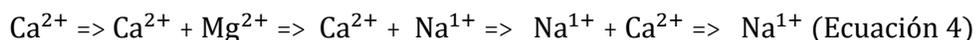
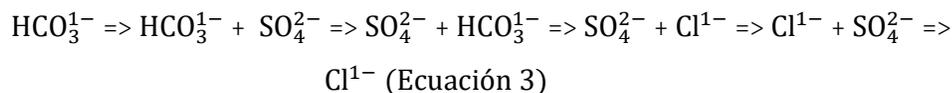
pH	Acidez Relativa
3 – 3.5	Muy Ácida (High Acid Water)
3.5 – 5.5	Ácida (Acid Water)
5.5 – 6.8	Ligeramente Ácida (Low Acid Water)
6.8 – 7.2	Neutra (Neutral Water)
7.2 – 8.5	Ligeramente Alcalina (Low Water)
> 8.5	Alcalina (Alkaline Water)

Fuente: Zekâi Şen (2015)

3.4.5 Composición Iónica del Agua Subterránea

La composición natural del agua subterránea es una combinación de las actividades atmosféricas, especialmente la precipitación, alteración de las rocas y suelos, reacciones químicas subsuperficiales una mezcla de diferentes fuentes de agua subterránea. El dióxido de carbono (CO₂) ayuda a incrementar la solubilidad de los minerales. El suministro de oxígeno de la atmósfera produce la oxidación de la materia orgánica en el suelo, y finalmente, el CO₂ es generado.

El ácido carbónico (H₂CO₃) es el agente ácido más importante producido en el suelo (Zekâi Şen, 2015). Después de la ocurrencia de la precipitación aguas arriba; la subsecuente infiltración de agua es rica en bicarbonatos (HCO₃¹⁻). Posteriormente, el agua tipo bicarbonatada se convierte en tipo sulfatada (SO₄²⁻) en el flujo medio, y finalmente, se convierte en tipo clorurada (Cl¹⁻) aguas abajo. La evolución química del agua subterránea desde aguas arriba hasta aguas abajo ocurre a lo largo de la siguiente modificación en cadena (Sánchez, 2014):



Esta secuencia se denomina generalmente “Secuencia de Chevotareb”. Sin embargo, esta es más definida para los aniones que para los cationes (Sánchez, 2014).

Por lo tanto, para la descripción de cada tipo de agua en la zona de estudio, se graficó la composición de los cationes mayoritarios totales (Ca²⁺, Mg²⁺, Na¹⁺ y K¹⁺) y los aniones mayoritarios disueltos (SO₄²⁻, Cl¹⁻ y HCO₃¹⁻). Esta clasificación hidroquímica del agua subterránea se realizó en base a las siete (07) muestras de agua subterránea recolectadas (05 admisibles y 02 referenciales) de acuerdo con el control de calidad. Esta clasificación iónica de las muestras recolectadas en diciembre 2018

corresponde a la época húmeda propiamente dicha. Los análisis de composición iónica se desarrollaron a través de un (01) gráficos descritos a continuación:

- Diagramas ternarios de Piper: Representa el porcentaje relativo a las concentraciones de los cationes y aniones expresados meq/L, permitiendo identificar el tipo de facie hidroquímica.

3.4.6 Procesos Hidroquímicos

En este apartado se analizan, gráficamente, los principales iones (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{1+} , HCO_3^{-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y Cl^{-}) expresados en meq/L (Ver Tabla 4) para entender preliminarmente los procesos hidroquímicos que, probablemente, gobiernen la evolución química de las aguas subterráneas en APUMAYO.

El Diagrama de Mifflin (Cantú, y otros, 2021) y discretiza las características del flujo local, intermedio y regional, tomando en consideración la sumatoria de dos (02) cationes (Na^{1+} y K^{1+}) y dos (02) aniones (Cl^{-} y SO_4^{2-}). Por otro lado, el Diagrama de Gibbs (Zhang, y otros, 2020) muestra la diferencia parcial que gobiernan los procesos hidroquímicos del agua subterránea en dominios de precipitación, alteración de la roca y evaporación, tomando en consideración las concentraciones de dos (02) aniones Cl^{-} y HCO_3^{-} con respecto a los Sólidos Totales Disueltos.

A continuación, se presentan las ecuaciones típicas representativas de las alteraciones de minerales primarios como la Albita, Anortita, Piroxeno, Anfibolita, Calcita, Dolomita, Botita, y Feldespato Potásico que interactúan con el agua para liberar algunos cationes principales. La **Tabla 20** muestra las principales ratios y ecuaciones consideradas para el análisis de los posibles procesos que probablemente gobiernen la evolución del carácter químico de las aguas subterráneas (Walraevens, Bakundukize, Enock, & Van, 2018).

Tabla 20*Ratio de Iones y Reacciones de Alteración de Minerales en el Agua Subterránea*

Ecuación	Ratio
$2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (Albita) + $9\text{H}_2\text{O}$ + $2\text{H}_2\text{CO}_3$ \Leftrightarrow $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (Kaolinita) + 2Na^{1+} + 2HCO_3^{1-} + $4\text{H}_4\text{SiO}_4$	$\text{Na}^{1+}:\text{HCO}_3^{1-} = 1:1$
$2\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (Anortita) + 4CO_2 + $6\text{H}_2\text{O}$ \Leftrightarrow $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (Kaolinita) + 2Ca^{2+} + 4HCO_3^{1-}	$\text{Ca}^{2+}:\text{HCO}_3^{1-} = 1:1$
$\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ (Piroxeno) + 4CO_2 + $6\text{H}_2\text{O}$ \Leftrightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4HCO_3^{1-} + $2\text{H}_4\text{SiO}_4$	$\text{Mg}^{2+}:\text{HCO}_3^{1-} = 1:2$
$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ (Anfibolita) + 14CO_2 + $22\text{H}_2\text{O}$ \Leftrightarrow 2Ca^{2+} + 5Mg^{2+} + 14HCO_3^{1-} + $8\text{H}_4\text{SiO}_4$	$\text{Ca}^{2+}:\text{HCO}_3^{1-} = 2:7$ $\text{Mg}^{2+}:\text{HCO}_3^{1-} = 5:7$
$2\text{K}(\text{Mg}_2\text{Fe})(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ (Biotita) + $5\text{H}_2\text{CO}_3$ + $7\text{H}_2\text{O}$ \Leftrightarrow $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (Kaolinita) + 2K^{1+} + 4Mg^{2+} + $2\text{Fe}(\text{OH})_3$ + $4\text{H}_4\text{SiO}_4$ + 5HCO_3^{1-}	$\text{Mg}^{2+}:\text{HCO}_3^{1-} = 8:5$ $\text{K}^{1+}:\text{HCO}_3^{1-} = 2:5$
$2\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ (Feldespatos Potásico) + $9\text{H}_2\text{CO}_3$ + $2\text{H}_2\text{CO}_3$ \Leftrightarrow $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (Kaolinita) + 2K^{1+} + 2HCO_3^{1-} + $4\text{H}_4\text{SiO}_4$	$\text{K}^{1+}:\text{HCO}_3^{1-} = 1:1$

Fuente: Walraevens (2018)

3.5 Monitoreo de Niveles Piezométricos

Históricamente, entre los años 2010 y 2019, APUMAYO ha realizado la instalación de una serie de piezómetros con el objetivo de monitorear los niveles del agua subterránea. Para la actualización e identificación de puntos de observación del agua subterráneas, se plantearon dos (02) campañas de campo inventario de fuentes de agua, noviembre a diciembre de 2018 y marzo a abril 2019, que nos permitan tener la información más actualizada de la cantidad de piezómetros operativos con registro de niveles de agua subterránea para corroborar la información disponible proporcionada por APUMAYO.

Los materiales utilizados para el monitoreo de niveles de agua subterránea fueron los siguientes:

- Sonda de Nivel de Agua o Medidor de Nivel de Agua Solinst Modelo 101 con una capacidad de inmersión de 300 m con sensores visuales y sonoros.
- Medidor de Profundidad o Pozómetro con longitud de inmersión de 300 m de cable acerado y plastificado.
- Flexómetro de 5 a 10 m.
- Pizarra Acrílica.
- Libreta o Tableta de Campo.
- Cámara Fotográfica.
- EEP asociado al monitoreo y muestreo de agua subterránea.

La información más actual (abril 2019) muestra la existencia de 23 piezómetros tipo “Tubo Abierto” en los alrededores de los Tajos, Botaderos, Pad de Lixiviación y algunas quebradas.

3.5.1 Puntos de observación

Los programas de campo desarrollados en noviembre y diciembre 2018, así como, marzo y abril 2019 permitieron identificar la existencia de 23 piezómetros, todos de tipo “Tubo Abierto” o “Casagrande” (Ver **Tabla 21**). Las profundidades de instalación oscilan entre los 20 hasta los 200 m y diámetros de PVC que varían entre 1.5” a 2”. La data histórica monitoreada por APUMAYO comienza aproximadamente en enero 2014 hasta diciembre 2019.

La **Tabla 21** muestra el resumen de los 23 piezómetros identificados como operativos hasta abril de 2019, donde, 14 cuentan con registros históricos para el periodo 2014 y 2019; seis (06) cuentan con lecturas puntuales para 2018 y 2019, y finalmente, tres (03) no presentaron columna de agua desde su habilitación. La **Figura 9** muestra la distribución espacial de los 23 piezómetros con datos histórica (continua, puntual y secos).

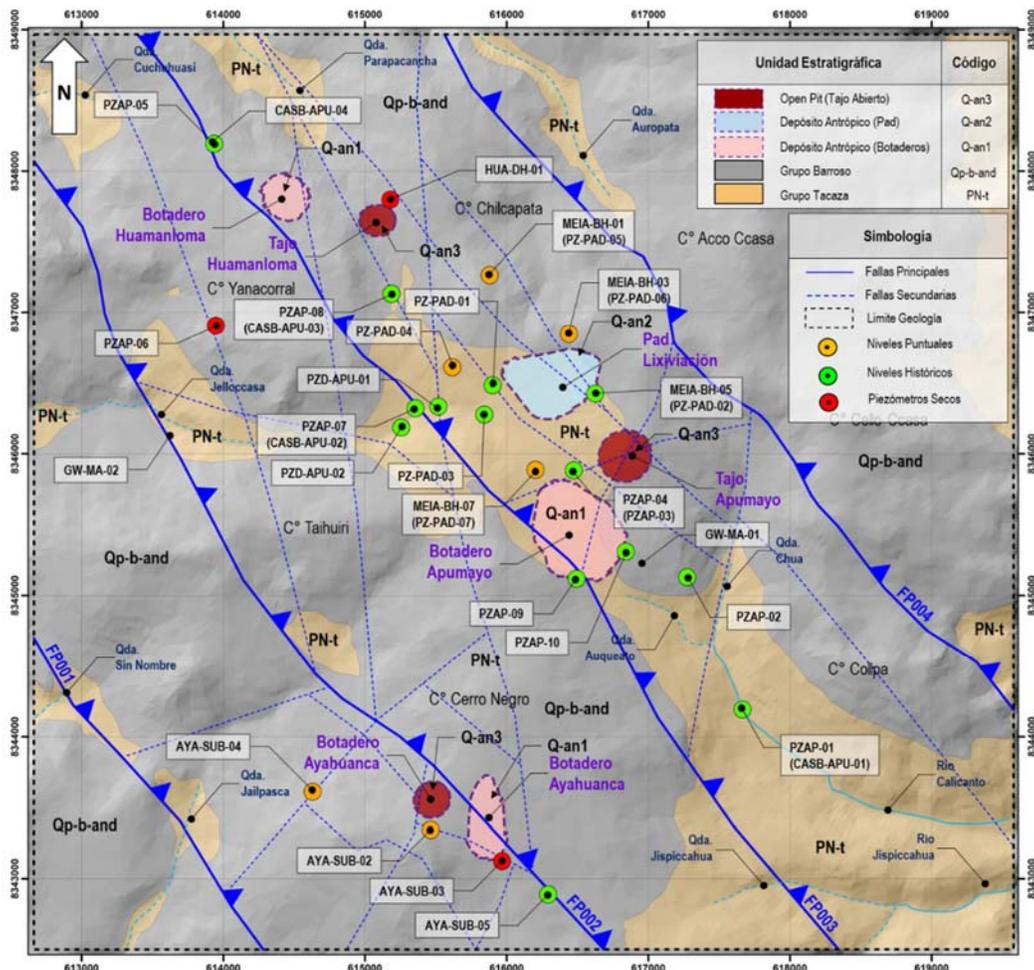
Tabla 21*Monitoreo de Niveles de Agua Subterránea 2018 y 2019*

Microcuenca	Código	Profundidad (m)	Noviembre y diciembre 2018		Marzo y abril 2019	
			N.A. (m)	Cota N.A. (msnm)	N.A. (m)	Cota N.A. (msnm)
Jellocasa	PZ-PAD-01	50	14.0	4164.6	12.9	4165.7
Jellocasa	PZ-PAD-02	40	12.1	4204.0	5.2	4210.9
Jellocasa	PZ-PAD-03	50	12.4	4149.5	11.8	4150.1
Rio Calicanto	PZAP-02	124	19.9	4089.2	19.1	4090.0
Rio Calicanto	PZAP-04 (PZAP-03)	150	28.2	4151.8	27.9	4152.1
Rio Calicanto	PZAP-09	50	10.0	4133.0	8.8	4134.2
Rio Calicanto	PZAP-10	50	40.4	4094.0	39.2	4095.2
Rio Calicanto	CASB-APU-01 (PZAP-01)	60	4.8	3944.5	1.5	3947.8
Parapacancha	CASB-APU-04 (PZAP-05)	80.5	40.9	3974.4	34.4	3980.9
Jellocasa	PZAP-06	60	Seco	Seco	Seco	Seco
Jellocasa	PZD-APU-01	20	6.2	4134.0	5.1	4135.1
Jellocasa	PZD-APU-02	20	12.7	4107.1	12.5	4107.3
Jellocasa	CASB-APU-02 (PZAP-07)	50	8.8	4121.2	4.3	4125.7
Jispicahua	AYA-SUB-03	60	Seco	Seco	Seco	Seco
Jailpasca	AYA-SUB-04	200	157.9	3884.5	157.8	3884.6
Jispicahua	AYA-SUB-05	60	20.2	4082.4	23.2	4079.4
Jispicahua	MEIA-BH-01 (PZ-PAD-05)	40	39.8	4160.3	31.9	4168.2
Jellocasa	MEIA-BH-03 (PZ-PAD-06)	40	24.4	4218.1	12.9	4229.5
Rio Calicanto	MEIA-BH-07 (PZ-PAD-07)	40	2.3	4178.9	1.3	4179.8
Parapacancha	HUA-DH-01	100	Seco	Seco	Seco	Seco
Jellocasa	PZ-PAD-04 (ITS-BH-03)	40	19.9	4161.4	15.0	4166.3
Jispicahua	AYA-SUB-02	200	186.1	3995.5	185.6	3996.1
Parapacancha	CASB-APU-03 (PZAP-08)	150	6.7	4154.5	3.6	4157.6

Fuente: Elaboración Propia 2024

Figura 9

Estaciones de Monitoreo de Niveles de Agua Subterránea



Fuente: Elaboración Propia 2024

3.6 Modelo Hidrogeológico Numérico

Para la construcción de este modelo numérico se seleccionó el código FEFLOW versión 8.1. FEFLOW (Sistema de Flujo Subterráneo de Elementos Finitos) es un programa informático para simular el flujo de agua subterránea, la transferencia de masa y la transferencia de calor en medios porosos y fracturados. Este programa utiliza el análisis de elementos finitos para resolver la ecuación del flujo de agua subterránea para

condiciones saturadas (Darcy) y no saturadas (Richard), así como, el transporte de masa y calor (Wikipedia, 2024).

FEFLOW proporciona herramientas de modelación que permiten cambiar las propiedades hidráulicas de las diferentes unidades hidrogeológicas en el tiempo, así como, activar o desactivar dinámicamente diferentes condiciones de borde. Esto resulta particularmente útil al momento de representar la evolución temporal de los depósitos de desmonte y excavación de tajos. Además, de utilizar elementos finitos triangulares, FEFLOW permite una representación más precisa de la geometría de los componentes mineros y contactos en superficie de las unidades hidrogeológicas.

3.6.1 Construcción del Modelo

A continuación, se muestra la construcción del modelo, el cual ha sido elaborado como una simplificación de la información presentada como parte de la caracterización hidrogeológica conceptual y simulaciones de etapas de operación en los tajos y botaderos de Huamanloma, Apumayo y Ayahuanca, así como, el Pad de Lixiviación.

3.6.1.1 Definición de la Malla de Cálculo y Dominio del Modelo

3.6.1.1.1 Definición del Dominio

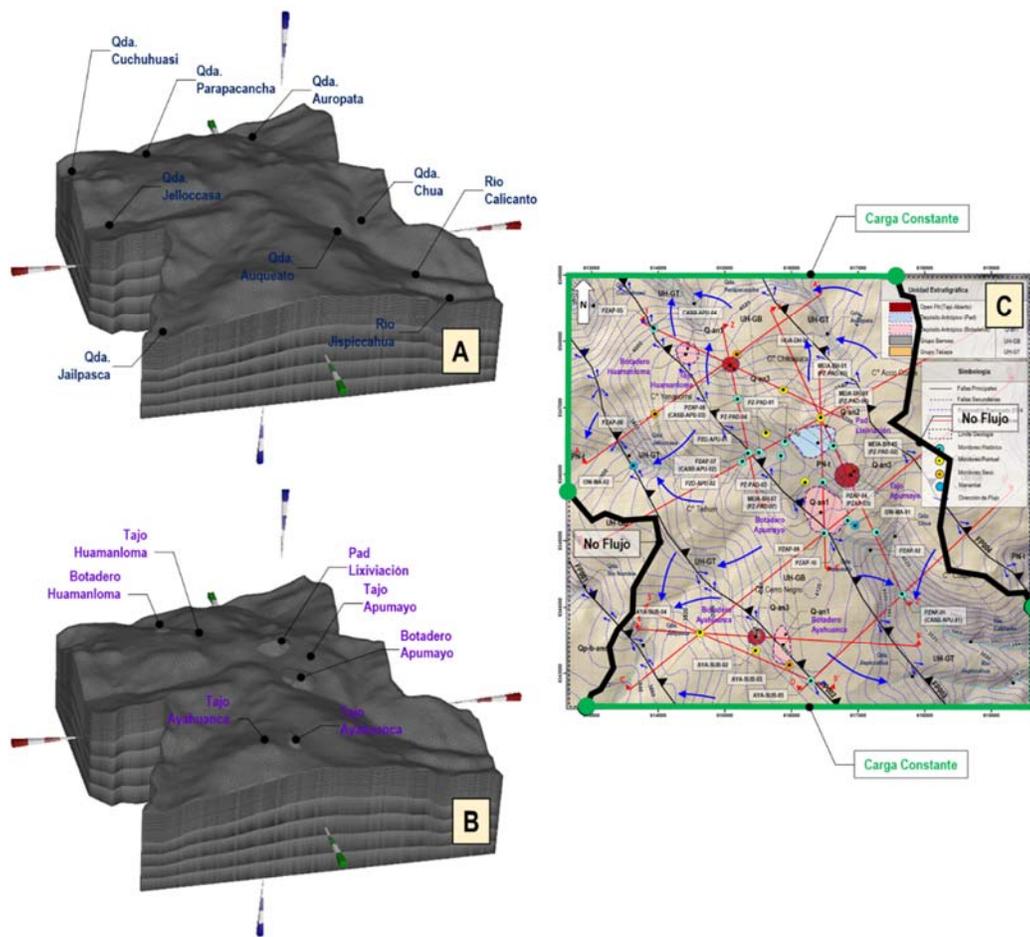
El dominio del modelo hidrogeológico numérico ha sido configurado con una extensión de aproximadamente 34.9 km² (Ver **Figura 10**) y consiste a la intersección del límite de mapeo geológico y la divisoria hidrológica de las siete (07) microcuencas. Esta zona incluye la totalidad de la zona estimada para el desarrollo de los componentes mineros (Tajos, Botaderos y Pad de Lixiviación). La extensión vertical fue considerada desde la superficie topográfica en condición inicial de preminado (2010 - 2014) hasta la topografía operacional de los componentes mineros para el año 2019. La profundidad máxima alcanza los 1.3 km aproximadamente (elevación base del modelo fue fijada a los

3000 msnm). Por lo tanto, incluye la totalidad de profundización de los tajos Huamanloma, Apumayo y Ayahuanca con un buffer de 1 km, aproximadamente, por debajo de la profundidad máxima final de la proyección de los tajos abiertos.

La **Figura 10** muestra el dominio general del modelo hidrogeológico numérico. La **Figura 10 C** muestra la distribución horizontal delimitada al noroeste y sureste tomando en consideración el límite de la información geológica, que a su vez representan las condiciones de “Carga Constante o de 1er Orden” del modelo numérico; mientras que, al noreste y suroeste se encuentra limitado por las siete (07) divisorias hidrológicas de las microcuencas (Auropata, Chaviña, Cuchuhuasi, Jailpasca, Huamanloma, Jispicahua y Parapacancha), que a su vez representan las condiciones de “No Flujo”. Ambos límites obedecen el cruce de información hidrológica, geológica e hidrogeológica recopilada para el desarrollo de este informe. Por otro lado, la **Figura 10 A** y **B** representan las condiciones iniciales de preminado (A) y los componente desarrollados hasta el 2019 (B).

Figura 10

Dominio del Modelo Hidrogeológico Numérico Preminado 2014 y Operacional 2019



Fuente: Elaboración Propia 2024

3.6.1.1.2 Definición del Dominio

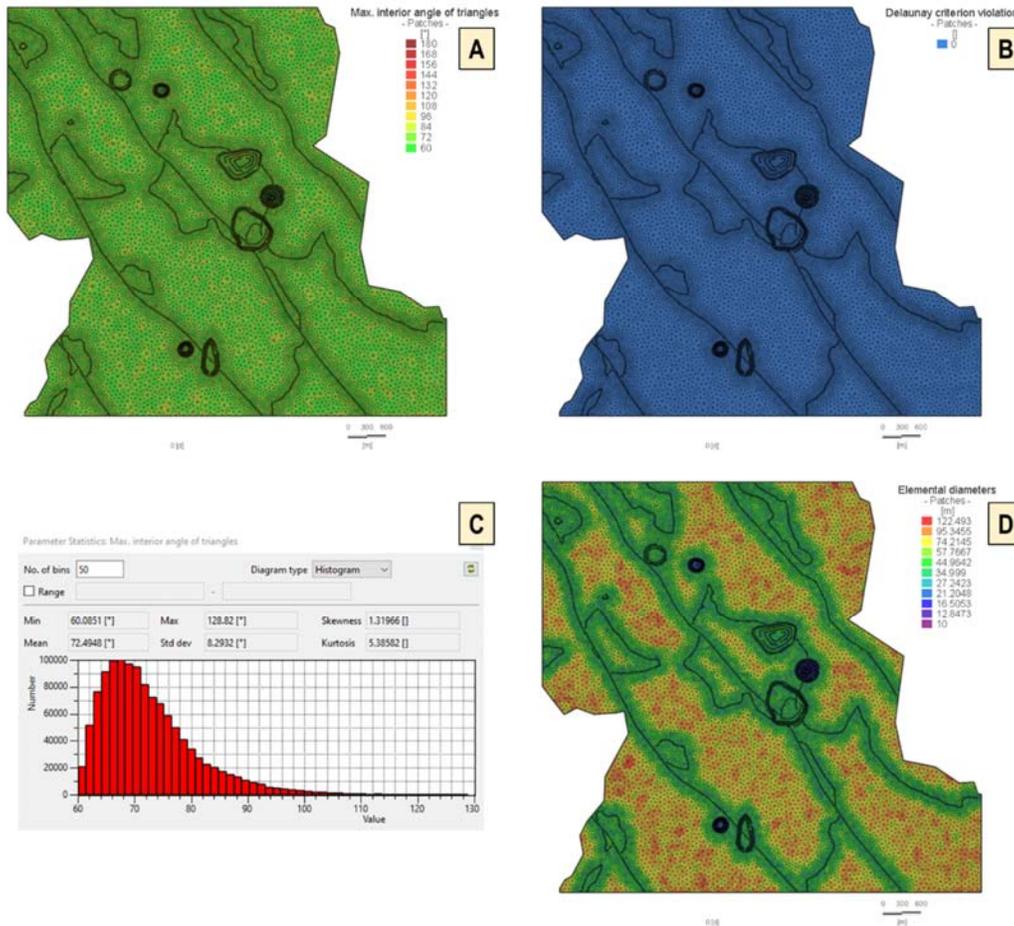
El modelo numérico fue construido en base a una malla estructurada, la cual permitió, de manera más eficiente y versátil, la representación de los tajos, los depósitos de desmonte y el pad de lixiviación. Una capa y/o layer del modelo cuenta con 41 745 elementos y 42 286 nodos, mientras que, la malla en su totalidad cuenta con 1 419 330 elementos y 740 005 nodos. El tamaño de los elementos varía desde los 10 m hasta los 120 m; donde, los elementos de menor tamaño se encuentran vinculados al desarrollo de los componentes mineros (tajos, botaderos y pad de lixiviación), límites de las unidades

litoestratigráficas y fallas principales (ver **Figura 11 D**). Cabe destacar que, el modelo incluye un total de 34 capas, dentro de las cuales seis (06) representan los componentes de ingeniería asociados a los botaderos y pad de lixiviación, mientras que, 28 capas permitieron definir las unidades litoestratigráficas e ingeniería asociada al desarrollo de excavación de los tajos abiertos.

La **Figura 11** muestra los criterios de calidad asumidos para la construcción de la malla estructurada. La **Figura 11 A** y **C** muestran la distribución de los ángulos interiores máximos con un valor mínimo y máximo entre 60° y 129° aproximadamente con una media de 72.5° (A); donde, los triángulos de ángulos obtusos fueron $0\% > 120^\circ$ y $4.2\% > 90^\circ$ (C). Por otro lado, la **Figura 11 B** muestra el incumplimiento del criterio de Delaunay, con un resultado de cero (0) incumplimientos. Finalmente, la **Figura 11 D** muestra el rango de los diámetros de los elementos los cuales varían entre 10 a 122 m, donde, se observa que el mayor detalle o menores tamaños se encuentran asociados a los componente mineros, límites de unidades estratigráficas y fallas principales.

Figura 11

Crterios de Calidad – Angulo Interior Máximo de Triángulos e Incumplimiento del Criterio de Delaunay



Fuente: Elaboración Propia 2024

3.6.1.1.3 Construcción del Modelo Hidrogeológico Numérico 3D

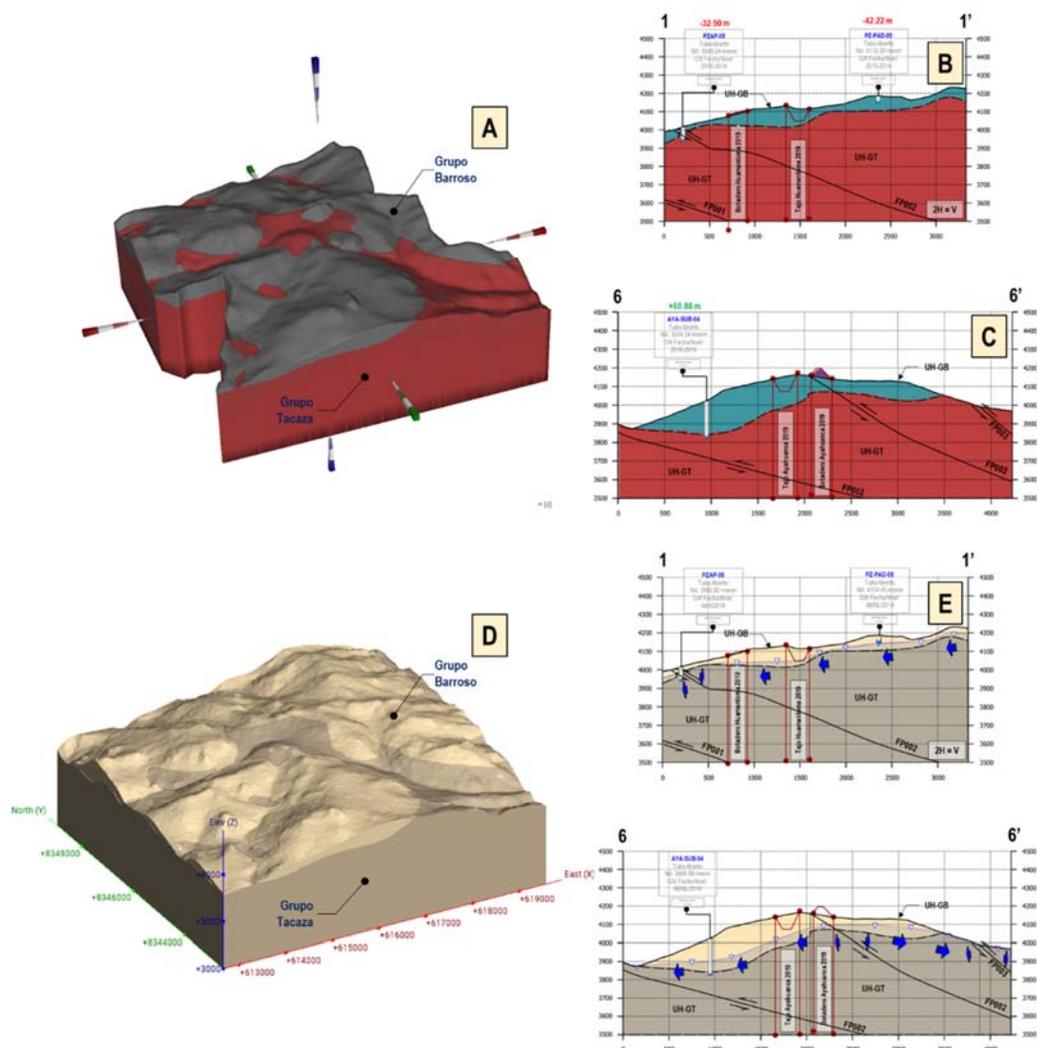
Para poder representar la geología de la zona de estudio, se generaron 28 capas que contienen las unidades litoestratigráficas equivalente a las unidades hidrogeológicas modeladas en el Software Leapfrog Works Versión 2023.1. Estas capas presentan un espesor constante de 10 m en las primeras 20 capas, seguidas de un espesor constante de 25 m hasta la capa 20, y finalmente, con un espesor variable equidistante hasta la capa 28, donde, la base del modelo está representada por la cota 3000 msnm. El menor espesor en las primeras 20 capas obedece las fases de excavación de los tajos; que posteriormente

fueron agrupados por años operativos entre el 2014 al 2019 (Fase 1, Fase 2, Fase 3, Fase 4 y Fase 5). Posteriormente, una vez alcanzada las profundidades finales del tajo, se agregaron capas con mayor espesor tomando en consideración la proyección vertical de las unidades litoestratigráficas.

La **Figura 12** muestra vistas comparativas entre el bloque tridimensional FEFLOW tomando en consideración la evaluación del modelo geológico 3D. La **Figura 12 D, E y F** muestra el modelo geológico elaborado en Leapfrog Works y dos (02) secciones hidrogeológicas locales (sección 1 y 6) que muestran la distribución vertical entre el Grupo Barroso y Grupo Tacaza. Mientras que, la **Figura 12 A, B y C** muestra los resultados de la evaluación geológica 3D de la malla estructurada 3D elaborada en FEFLOW donde se puede apreciar las congruencias horizontales y verticales del Grupo Barroso y Grupo Tacaza para la asignación de los diferentes parámetros hidrogeológicos como conductividad, recarga, almacenamiento específico, condiciones de borde, activación de elementos y nodos, y finalmente, parámetros de solución del modelo en condiciones no saturadas del modelo empírico de “Van Genuchten Modificado”.

Figura 12

Vistas Comparativas del Modelo Geológico 3D (Leapfrog) y Numérico 3D (FEFLOW)



Fuente: Elaboración Propia 2024

3.6.1.1.4 Condiciones de Borde

3.6.1.1.4.1 No Flujo

Se asumió que los bordes noreste y suroeste, así como, la base de modelo hidrogeológico numérico actúe como bordes de no flujo. Estos bordes obedecen a los límites hidrológicos (divortium acuarium) de las microcuencas Chaviña y Auropata al noreste, y Jellocasa y Jailpasca al suroeste, donde, se consideró conceptualmente que no

existiría transferencias laterales subterráneas entre microcuencas (Ver **Figura 13 B** – Líneas de color negro y **Figura 13 B**).

3.6.1.1.4.2 Carga Constante

Se asumió cargas constantes en los bordes noroeste y sureste. Estos bordes contienen la información de elevación del nivel de agua que conceptualmente fue elaborado para representar las condiciones previas a las operaciones mineras como botaderos, tajos y pad de lixiviación descritos en el apartado de piezometría y dirección de flujo correspondiente al modelo hidrogeológico conceptual (Ver **Figura 11** – Líneas de color verde y **Figura 13 B**).

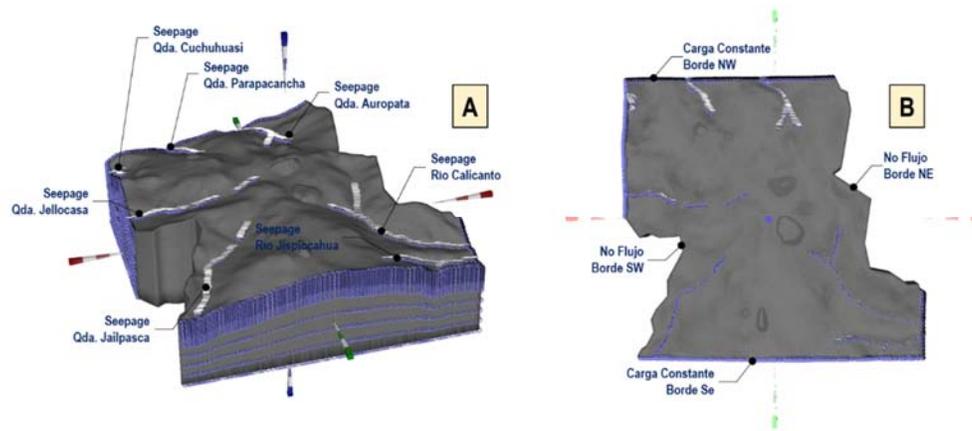
3.6.1.1.4.3 Nodos del Tipo Seepage (Drenaje Libre)

Este tipo de condición fue asignado a los ríos y quebradas, a fin de representar las descargas de flujos subterráneo representado por el flujo base (Ver **Figura 13 A**). Esta condición servirá como puntos de calibración para los cálculos de caudal base obtenidos mediante el “Método de Eckhardt” desarrollados en el cálculo de caudal base (Ver apartado de hidrología).

La **Figura 13** muestra las condiciones de borde aplicadas a los bordes de modelo, así como, ríos y quebradas. La **Figura 13 A** muestra los nodos de tipo Seepage (drenaje libre) asignadas a los ríos y quebradas a fin de representar la descarga del flujo base. Por otro lado, la **Figura 13 B** muestra las cargas constante asignadas a los borde de modelo de acuerdo con los niveles estimados en el mapa hidrogeológico conceptual.

Figura 13

Condiciones de Borde del Modelo



Fuente: Elaboración Propia 2024

3.6.1.2 Representación de Componentes de Ingeniería

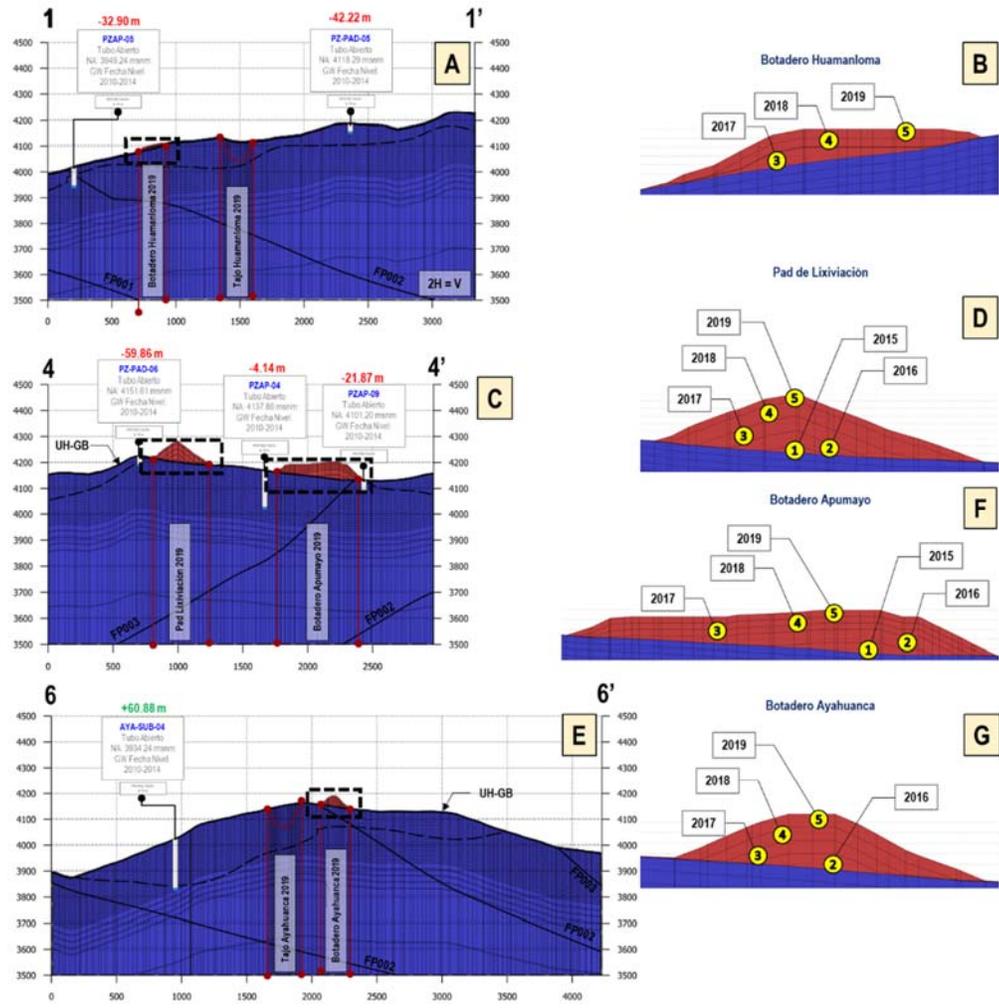
3.6.1.2.1 Botaderos y Pad de Lixiviación

El crecimiento de los botaderos y pad de lixiviación incluyó cinco (05) etapas de continuas desde el año 2014 al 2019. El desarrollo y crecimiento involucra la simplificación del “Tiempo de Vida de la Mina o LOM” proporcionada por APUMAYO; el cual integra consideraciones generales de depósitos de desmonte para los botaderos Huamanloma, Apumayo y Ayahuanca; así como, aquellos aspectos relacionados con el crecimiento del Pad de Lixiviación.

La **Figura 14** muestra el desarrollo de los tres (03) botaderos (Huamanloma, Apumayo y Ayahuanca) y el Pad de Lixiviación entre 2014 y 2019. La **Figura 14 A** y **B** muestran el desarrollo y activación del Botadero Huamanloma a partir de la Fase 3 (2017). Por otro lado, La **Figura 14 C** y **D** muestran el desarrollo y activación del Botadero Apumayo y Pad de Lixiviación desde la Fase 1 (2015), y finalmente, la **Figura 14 D** y **E** muestran el desarrollo y activación del Botadero Ayahuanca a partir de la Fase 2 (2016).

Figura 14

Estas de Crecimiento de Botaderos y Pad de Lixiviación 2014 al 2019



Fuente: Elaboración Propia 2024

3.6.2 Calibración en Régimen Estacionario Pre-Minado 2010 – 2014

A continuación, se presenta la metodología y los resultados obtenidos de la calibración en régimen estacionario; ejecutado con el objetivo de representar los niveles de agua subterránea y flujos superficiales representativos de la etapa previa a las operaciones mineras correspondientes al año 2014.

3.6.2.1 Metodología de la Calibración en Régimen Estacionario

La calibración en régimen estacionario fue realizada con la finalidad de representar el comportamiento del sistema de flujo subterráneo que fue estimado a partir de la caracterización hidrogeológica conceptual en condiciones previas a las operaciones mineras (ver apartado de modelo hidrogeológico conceptual). El comportamiento del sistema de flujo subterráneo esta descrito por la piezometría estimada y construida a partir de los datos más antiguos que se encontraron disponibles para los puntos de observación (piezómetros) y aquellas zonas donde no se observó actividades relacionadas a las operaciones mineras como tajos, botaderos y pad de lixiviación. Esta piezometría describe las estimaciones realizadas para las elevaciones del agua subterránea en cada zona, los gradientes hidráulicos y las direcciones principales de flujo.

3.6.2.1.1 Selección de Piezómetros para la Calibración en Régimen Estacionario

La selección de los piezómetros que fueron considerados como parte de la calibración en régimen estacionario (preminado) tiene asociada una varianza o incertidumbre que puede ser considerada de importancia, los cuales han sido calificados en función de un peso y/o ponderación. La **Tabla 22** muestra la evaluación de confiabilidad asignando ponderadore entre cero (0) y uno (1), basados en la representatividad, tiempo y calidad del monitoreo de niveles en cada puntos de observación (piezómetro); siendo cero (0) el valor ponderado más bajo y uno (1) el más alto. El peso de confiabilidad asignada se detalla a continuación:

- Nivel de confianza alto (0.8) con puntos de observación que registraron un monitoreo de niveles de agua subterránea mayores a un (1) año con columna de agua.

- Nivel de confianza (0.5) con puntos de observación que registraron un monitoreo de niveles de agua subterránea menores a un (1) año con posible columna de agua.
- Nivel de confianza medio (0.2) con puntos de observación que registrados como secos.

Estos ponderadores, para los 23 puntos de observación, fueron estimados a partir de la información histórica de niveles de agua subterránea desde los inicios de operación correspondientes al año 2014 (considerado preminado para fines de este estudio). Por otro lado, la distribución espacial de estos piezómetros puede ser observados en la **Figura 26**.

Tabla 22

Puntos de Observación Calibración Régimen Estacionario

Microcuenca	Código	Peso	Cota N.A. (msnm)	Nivel Confianza
Jellocasa	PZ-PAD-01	0.8	4155.13	Alto
Jellocasa	PZ-PAD-02	0.8	4200.85	Alto
Jellocasa	PZ-PAD-03	0.8	4194.25	Alto
Rio Calicanto	PZAP-02	0.8	4078.74	Alto
Rio Calicanto	PZAP-04 (PZAP-03)	0.8	4142.00	Alto
Rio Calicanto	PZAP-09	0.8	4123.07	Alto
Rio Calicanto	PZAP-10	0.8	4087.69	Alto
Rio Calicanto	CASB-APU-01 (PZAP-01)	0.8	3952.23	Alto
Parapacancha	CASB-APU-04 (PZAP-05)	0.8	3982.14	Alto
Jellocasa	PZAP-06	0.5	Húmedo	Bajo
Jellocasa	PZD-APU-01	0.8	4122.12	Alto
Jellocasa	PZD-APU-02	0.8	4098.57	Alto
Jellocasa	CASB-APU-02 (PZAP-07)	0.8	4113.47	Alto
Jispicahua	AYA-SUB-03	0.5	Húmedo	Bajo
Jailpasca	AYA-SUB-04	0.2	3864.37	Medio
Jispicahua	AYA-SUB-05	0.8	4070.30	Alto
Jispicahua	MEIA-BH-01 (PZ-PAD-05)	0.2	4160.50	Medio
Jellocasa	MEIA-BH-03 (PZ-PAD-06)	0.2	4211.42	Medio
Rio Calicanto	MEIA-BH-07 (PZ-PAD-07)	0.2	4165.59	Medio
Parapacancha	HUA-DH-01	0.5	Húmedo	Bajo

Microcuenca	Código	Peso	Cota N.A. (msnm)	Nivel Confianza
Jellocasa	PZ-PAD-04 (ITS-BH-03)	0.2	4153.89	Medio
Jispicahua	AYA-SUB-02	0.2	3981.89	Medio
Parapacancha	CASB-APU-03 (PZAP-08)	0.8	4148.81	Alto

Fuente: Elaboración Propia 2024

CAPITULO IV ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Características Fisiográficas

4.1.1 Área de drenaje (A)

La Microcuenca Jailpasca abarca el mayor porcentaje de área de drenaje con unos 18.6 km² (28%), mientras que, la Microcuenca Parapacancha abarca la menor área de drenaje con unos 5.6 km² (9%). La **Tabla 23** muestra en detalle las estimaciones de las áreas de drenaje para las siete (07) microcuencas identificadas en el área de estudio.

4.1.2 Perímetro (P)

La Microcuenca Jailpasca posee el mayor perímetro con unos 28.6 km, mientras que, la Microcuenca Cuchuhuasi posee el menor perímetro con unos 16.4 km. La **Tabla 23** muestra en detalle las estimaciones de los perímetros para las siete (07) microcuencas identificadas en el área de estudio.

4.1.3 Longitud (L)

La mayor longitud corresponde a la Microcuenca Jailpasca con unos 7.06 km, mientras que, el menor perímetro pertenece a la Microcuenca Cuchuhuasi con unos 4.88 km. La **Tabla 23** muestra en detalle las estimaciones de las longitudes para las siete (07) microcuencas identificadas en el área de estudio.

4.1.4 Coeficiente de compacidad (Kc)

El mayor índice de coeficiente de compacidad (Kc) corresponde a la Microcuenca Parapacancha con unos 2.16, mientras que, el menor índice de coeficiente de compacidad (Kc) corresponde a la Microcuenca Jailpasca con unos 1.86. La **Tabla 23** muestra en detalle las estimaciones de los coeficientes de compacidad (Kc) para las siete (07) microcuencas identificadas en el área de estudio. En general representan formas de oval oblonda a rectangular con tendencias a crecidas bajas.

4.1.5 Factor de Forma (Kf)

De acuerdo con los resultados obtenidos las siete (07) microcuencas son de forma alargada por tener factores de forma cercano a cero (0). La Microcuenca Jailpasca presenta el mayor factor de forma (Kf) con unos 0.37, mientras que, la Microcuenca Auropata presenta el menor factor de forma (Kf) con unos 0.14. La **Tabla 23** muestra en detalle las estimaciones de los factores de forma (Kf) para las siete (07) microcuencas identificadas en el área de estudio.

4.1.6 Pendiente Media (%)

La Microcuenca Cuchuhuasi presenta la mayor pendiente media con unos 12.4%, mientras que, la Microcuenca Parapacancha presenta la menor pendiente media con unos 9.4%. La **Tabla 23** muestra en detalle las estimaciones de la pendiente media para las siete (07) microcuencas identificadas en el área de estudio. En general, el tipo de relieve de las siete (07) microcuencas es medianamente accidentado a accidentado.

La **Tabla 23** resumen los parámetros geomorfológicos estimados para las siete (07) microcuencas. Por otro lado, la **Figura 5** muestra la distribución espacial de las siete (07) microcuencas.

Tabla 23

Resumen de Parámetros Geomorfológicos de las Microcuencas

Parámetros	Unidad	Microcuencas						
		Jailpasca	Jispicahua	Chaviña	Huamanloma	Cuchuhuasi	Parapacancha	Auropata
Área (A)	km ²	18.6	11.2	8.9	8.1	5.7	5.6	8.0
Longitud del cauce (L)	km	7.1	5.8	5.7	6.2	4.9	6.4	6.2
Perímetro (P)	km	28.6	25.7	21.4	20.1	16.4	18.2	20.9
Parámetros de Forma								
Factor Forma (Kf)	-	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2
Índice de Compacidad (Kc)	-	1.9	2.2	2.0	2.0	1.9	2.2	2.1

Parámetros	Unidad	Microcuencas						
		Jailpasca	Jispicahua	Chaviña	Huamanloma	Cuchuhuasi	Parapacancha	Auropata
Parámetros Relativos al Relieve								
Altitud mínima	m.s.n.m.	3520	3656	3683	3638	3593	3621	3648
Altitud máxima	m.s.n.m.	4208	4208	4257	4257	4198	4219	4306
Elevación Media Cuenca	m.s.n.m.	3921	4011	4061	4022	3850	3927	4083
Pendiente	%	9.7	9.5	10.2	10.0	12.4	9.4	10.6

Fuente: Elaboración propia 2024

4.2 Precipitación Media Anual y Mensual

La **Tabla 24** y **Gráfico 7** muestran los valores de precipitación total mensual y anual para las siete (07) microcuencas. Se observa que la precipitación total anual varía entre los 425.4 mm/año para al Microcuenca Cuchuhuasi y 570 mm/año para la Microcuenca Auropata. El **Gráfico 7** sugiere que la época húmeda se distribuye entre los meses lluviosos de octubre a marzo y los meses secos entre mayo a agosto; mientras que los meses de transición podrían ser abril y setiembre.

Tabla 24

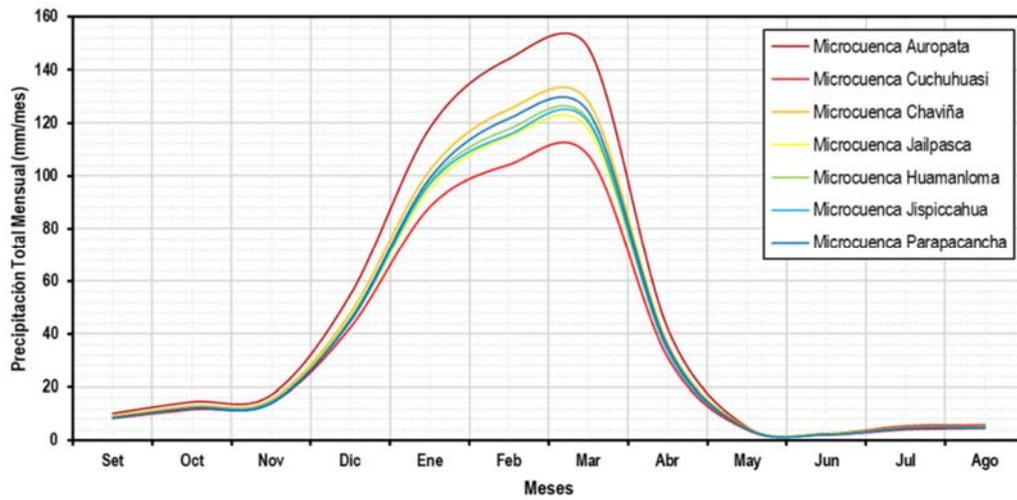
Precipitación Total Mensual y Anual en las Microcuencas – Método Isoyetas

Microcuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Auropata	118.2	144.3	148.3	42.1	5.2	2.8	5.6	6.0	10.4	14.7	17.3	55.1	570.0
Cuchuhuasi	88.3	104.3	107.7	31.2	4.2	2.3	4.3	4.8	8.5	11.9	14.3	42.7	424.5
Chaviña	102.2	125.3	128.0	36.3	4.7	2.5	4.9	5.3	9.2	13.0	15.3	48.1	494.8
Jailpasca	95.2	115.0	117.7	33.8	4.3	2.3	4.5	4.9	8.5	12.1	14.3	44.7	457.3
Huamanloma	98.1	117.8	121.3	34.7	4.4	2.4	4.7	5.1	8.8	12.5	14.8	46.4	471.0
Jispicahua	97.1	115.7	120.3	33.5	4.5	2.3	4.6	5.0	8.7	12.5	14.6	44.9	463.7
Parapacancha	99.3	121.8	124.3	35.2	4.4	2.3	4.7	5.0	8.6	12.3	14.1	45.4	477.4

Fuente: Elaboración propia 2024

Gráfico 7

Precipitación Mensual Total Microcuencas

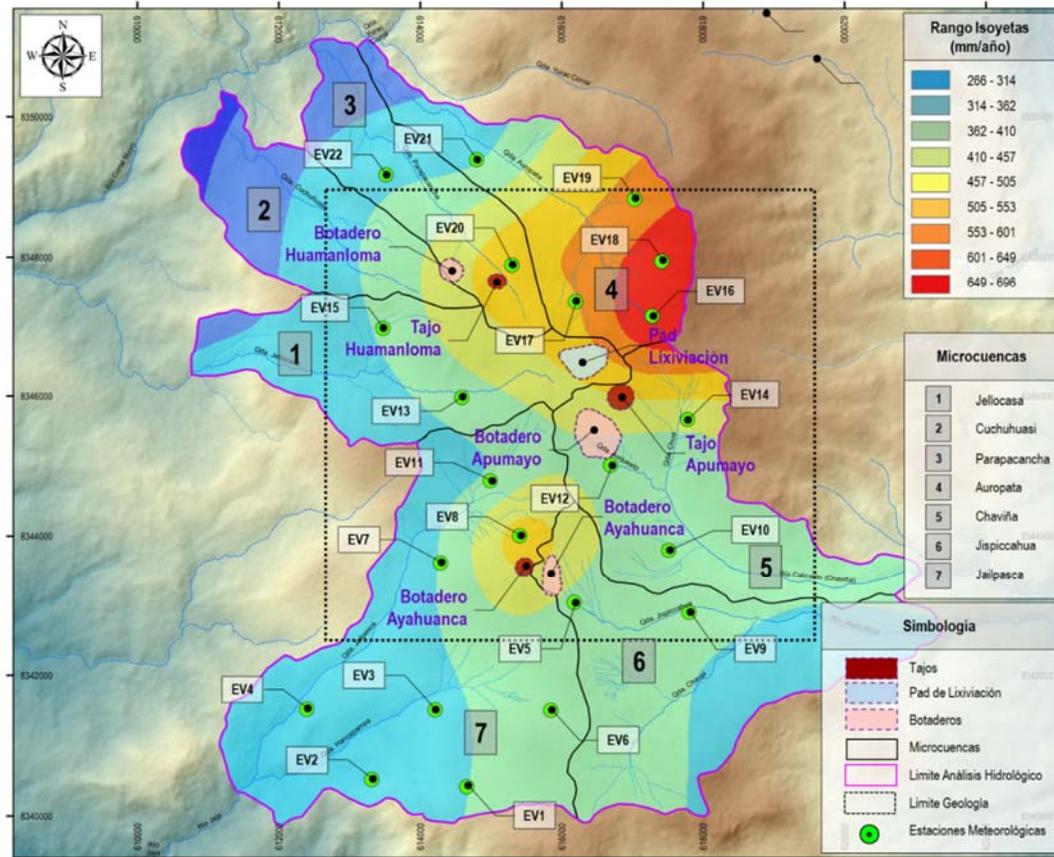


Fuente: Elaboración propia 2024

La **Figura 15** muestra la variación anual de la precipitación en el área de estudio mediante el uso de método de isoyetas. Los porcentajes mayores de precipitación se acumulan hacia la parte alta de las microcuencas (< 696 mm/año), mientras que, los menores se acumulan hacia la parte baja de las microcuencas (> 266 mm/año); lo que denota un control orográfico de la precipitación en la zona de estudio.

Figura 15

Mapa de Isoyetas – Precipitación Total Anual



Fuente: Elaboración propia 2024

4.3 Caudales Anuales y Mensuales Estimados

4.3.1 Caudales de Escorrentía por Microcuenca – Método Lutz Scholz

La **Tabla 25** resumen los caudales mensuales estimados y calibrados con mediciones de campo para la Microcuenca Auropata. Para un coeficiente de temperatura ($L = 696.6$) y déficit de escorrentía ($D = 455$) se obtuvo un coeficiente de escorrentía de 0.2 . Esto permitió estimar caudales que varían entre los 4.7 L/s (1.5 mm/mes) para el mes de agosto y 223.4 L/s (72.6 mm) para el mes de marzo. El **Gráfico 8** muestra los valores observados para los meses de febrero 2015 y noviembre 2014; estos muestran un ajuste aceptable para la estimación de los caudales teóricos para la Microcuenca Auropata.

Tabla 25*Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Auropata*

Mes	Precipitación Mensual (mm)					Contribución de la Retención				Caudales Mensuales			
						Gasto de Abastecimiento							
	Total	PE I	PE II	PE III	PE	bi	Gi (mm)	ai	Ai (mm)	Generados			Observados
										mm	m3/s	L/s	m3/s
Enero	118.2	14.9	36.4	58.0	44.7	-	-	0.4	8.0	36.7	0.113	113.1	-
Febrero	144.3	28.9	58.4	85.4	68.8	-	-	0.2	4.0	64.8	0.200	199.5	0.186 (2015)
Marzo	148.3	31.6	62.1	89.1	72.6	-	-	0.0	0.0	72.6	0.223	223.4	-
Abril	42.1	0.7	4.6	8.6	6.1	0.5	10.5	-	-	16.6	0.051	51.2	-
Mayo	5.2	0.0	0.6	1.3	0.9	0.2	5.0	-	-	5.9	0.018	18.1	-
Junio	2.8	0.0	0.3	0.7	0.5	0.1	2.4	-	-	2.9	0.009	8.9	-
Julio	5.6	0.0	0.7	1.4	1.0	0.1	1.1	-	-	2.1	0.006	6.3	-
Agosto	6.0	0.0	0.7	1.5	1.0	0.0	0.5	-	-	1.5	0.005	4.7	-
Setiembre	10.4	0.0	1.2	2.5	1.7	0.0	0.3	-	-	2.0	0.006	6.1	-
Octubre	14.7	0.0	1.6	3.3	2.3	0.0	0.2	-	-	2.5	0.008	7.6	-
Noviembre	17.3	0.0	1.9	3.8	2.6	-	-	0.1	1.0	1.6	0.005	5.0	0.012 (2014)
Diciembre	55.1	1.5	6.9	12.4	9.0	-	-	0.4	7.0	9.0	0.028	27.7	-
Total	570.0	77.6	175.4	268.0	211.2	0.9	20.0	1.0	20.0	218.1	0.672	671.6	-

Fuente: Elaboración Propia 2024

La **Tabla 26** resumen los caudales mensuales estimados y calibrados con mediciones de campo para la Microcuenca Chaviña. Para un coeficiente de temperatura ($L = 696.6$) y déficit de escorrentía ($D = 418$) se obtuvo un coeficiente de escorrentía de 0.2. Esto permitió estimar caudales que varían entre los 2.9 L/s (0.8 mm/mes) para el mes de noviembre y 186.6 L/s (53.2 mm/mes) para el mes de marzo. El **Gráfico 8** muestra los valores observados para los meses de febrero 2015 y noviembre 2014; estos muestran un ajuste aceptable para la estimación de los caudales teóricos para la Microcuenca Chaviña.

Tabla 26*Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Chaviña*

Mes	Precipitación Mensual (mm)					Contribución de la Retención				Caudales Mensuales			
						Gasto de Abastecimiento							
	Total	PE I	PE II	PE III	PE	bi	Gi (mm)	ai	Ai (mm)	Generados			Observados
										mm	m3/s	L/s	m3/s
Enero	102.2	9.4	25.6	42.0	31.7	-	-	0.4	12.0	19.7	0.069	69.2	-
Febrero	125.3	18.1	41.9	65.6	50.7	-	-	0.2	6.0	44.7	0.157	156.9	0.131 (2015)
Marzo	128.0	19.4	44.1	68.5	53.2	-	-	0.0	0.0	53.2	0.187	186.6	-
Abril	36.3	0.4	3.8	7.3	5.1	0.5	15.7	-	-	20.8	0.073	73.1	-
Mayo	4.7	0.0	0.6	1.2	0.8	0.2	7.5	-	-	8.3	0.029	29.1	-
Junio	2.5	0.0	0.3	0.6	0.4	0.1	3.6	-	-	4.0	0.014	14.1	-
Julio	4.9	0.0	0.6	1.2	0.8	0.1	1.7	-	-	2.5	0.009	8.9	-
Agosto	5.3	0.0	0.6	1.3	0.9	0.0	0.8	-	-	1.7	0.006	6.0	-
Setiembre	9.2	0.0	1.1	2.2	1.5	0.0	0.4	-	-	1.9	0.007	6.6	-
Octubre	13.0	0.0	1.4	3.0	2.0	0.0	0.3	-	-	2.3	0.008	8.1	-
Noviembre	15.3	0.0	1.7	3.4	2.3	-	-	0.1	1.5	0.8	0.003	2.9	0.002 (2014)
Diciembre	48.1	1.0	5.5	10.2	7.3	-	-	0.4	10.5	7.3	0.026	25.6	-
Total	494.8	48.3	127.2	206.6	156.7	0.9	30.0	1.0	30.0	167.3	0.587	587.3	-

Fuente: Elaboración Propia 2024

La **Tabla 27** resumen los caudales mensuales estimados y calibrados con mediciones de campo para la Microcuenca Cuchuhuasi. Para un coeficiente de temperatura ($L = 696.6$) y déficit de escorrentía ($D = 377$) se obtuvo un coeficiente de escorrentía de 0.1. Esto permitió estimar caudales que varían entre los 2.4 L/s (1.1 mm/mes) para el mes de noviembre y 74.9 L/s (35.3 mm/mes) para el mes de marzo. El **Gráfico 8** muestra los valores observados para los meses de febrero 2015 y noviembre 2014; estos muestran un ajuste aceptable para la estimación de los caudales teóricos para la Microcuenca Cuchuhuasi.

Tabla 27*Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Cuchuhuasi*

Mes	Precipitación Mensual (mm)					Contribución de la Retención				Caudales Mensuales			
						Gasto de Abastecimiento							
	Total	PE I	PE II	PE III	PE	bi	Gi (mm)	ai	Ai (mm)	Generados			Observados
										mm	m3/s	L/s	m3/s
Enero	88.3	5.9	18.1	30.3	22.3	-	-	0.4	8.0	14.3	0.030	30.3	-
Febrero	104.3	10.0	26.9	44.0	32.7	-	-	0.2	4.0	28.7	0.061	61.0	0.081 (2015)
Marzo	107.7	11.1	29.1	47.3	35.3	-	-	0.0	0.0	35.3	0.075	74.9	-
Abril	31.2	0.2	3.2	6.3	4.3	0.5	10.8	-	-	15.1	0.032	32.0	-
Mayo	4.2	0.0	0.5	1.1	0.7	0.2	5.0	-	-	5.7	0.012	12.1	-
Junio	2.3	0.0	0.3	0.6	0.4	0.1	2.3	-	-	2.7	0.006	5.7	-
Julio	4.3	0.0	0.5	1.1	0.7	0.0	1.1	-	-	1.8	0.004	3.9	-
Agosto	4.8	0.0	0.6	1.2	0.8	0.0	0.5	-	-	1.3	0.003	2.8	-
Setiembre	8.5	0.0	1.0	2.1	1.4	0.0	0.2	-	-	1.6	0.003	3.3	-
Octubre	11.9	0.0	1.3	2.8	1.8	0.0	0.1	-	-	1.9	0.004	4.1	-
Noviembre	14.3	0.0	1.6	3.2	2.1	-	-	0.1	1.0	1.1	0.002	2.4	0.001 (2014)
Diciembre	42.7	0.7	4.7	8.8	6.1	-	-	0.4	7.0	6.1	0.013	12.9	-
Total	424.5	27.9	87.8	148.6	108.6	0.9	20.0	1.0	20.0	115.6	0.245	245.4	-

Fuente: Elaboración Propia 2024

La **Tabla 28** resumen los caudales mensuales estimados y calibrados con mediciones de campo para la Microcuenca Jailpasca. Para un coeficiente de temperatura ($L = 696.6$) y déficit de escorrentía ($D = 396$) se obtuvo un coeficiente de escorrentía de 0.1. Esto permitió estimar caudales que varían entre los 8.3 L/s (1.2 mm/mes) para el mes de noviembre y 310.9 L/s (43.6 mm/mes) para el mes de marzo. El **Gráfico 8** muestra los valores observados para los meses de febrero 2014 y noviembre 2015; estos muestran un ajuste aceptable para la estimación de los caudales teóricos para la Microcuenca Jailpasca.

Tabla 28*Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Jailpasca*

Mes	Precipitación Mensual (mm)					Contribución de la Retención				Caudales Mensuales			
						Gasto de Abastecimiento							
	Total	PE I	PE II	PE III	PE	bi	Gi (mm)	ai	Ai (mm)	Generados			Observados
										mm	m3/s	L/s	m3/s
Enero	95.2	7.5	21.6	35.8	26.6	-	-	0.4	8.0	18.6	0.133	132.9	-
Febrero	115.0	13.7	34.1	54.6	41.3	-	-	0.2	4.0	37.3	0.266	266.1	0.215 (2014)
Marzo	117.7	14.7	36.0	57.5	43.6	-	-	0.0	0.0	43.6	0.311	310.8	-
Abril	33.8	0.3	3.5	6.8	4.7	0.6	7.6	-	-	12.3	0.088	87.6	-
Mayo	4.3	0.0	0.5	1.1	0.7	0.4	4.8	-	-	5.5	0.039	39.4	-
Junio	2.3	0.0	0.3	0.6	0.4	0.3	3.1	-	-	3.5	0.025	24.9	-
Julio	4.5	0.0	0.5	1.1	0.8	0.2	2.0	-	-	2.8	0.020	19.7	-
Agosto	4.9	0.0	0.6	1.2	0.8	0.1	1.2	-	-	2.0	0.014	14.4	-
Setiembre	8.5	0.0	1.0	2.1	1.4	0.1	0.8	-	-	2.2	0.015	15.5	-
Octubre	12.1	0.0	1.4	2.8	1.9	0.0	0.5	-	-	2.4	0.017	16.9	-
Noviembre	14.3	0.0	1.6	3.2	2.2	-	-	0.1	1.0	1.2	0.008	8.3	0.025 (2015)
Diciembre	44.7	0.8	5.0	9.3	6.5	-	-	0.4	7.0	6.5	0.046	46.4	-
Total	457.3	37.0	106.1	176.2	130.7	1.7	20.0	1.0	20.0	137.7	0.983	982.9	0.240

Fuente: Elaboración Propia 2024

La **Tabla 29** resumen los caudales mensuales estimados y calibrados con mediciones de campo para la Microcuenca Huamanloma. Para un coeficiente de temperatura ($L = 696.6$) y déficit de escorrentía ($D = 404$) se obtuvo un coeficiente de escorrentía de 0.1. Esto permitió estimar caudales que varían entre los 4.4 L/s (1.3 mm/mes) para el mes de noviembre y 165 L/s (47 mm/mes) para el mes de marzo.

Tabla 29*Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Huamanloma*

Mes	Precipitación Mensual (mm)					Contribución de la Retención				Caudales Mensuales			
						Gasto de Abastecimiento							
	Total	PE I	PE II	PE III	PE	bi	Gi (mm)	ai	Ai (mm)	Generados			Observados
										mm	m3/s	L/s	m3/s
Enero	98.1	8.2	23.2	38.3	28.8	-	-	0.4	8.0	20.8	0.073	72.9	-
Febrero	117.8	14.8	36.1	57.6	44.0	-	-	0.2	4.0	40.0	0.140	140.3	-
Marzo	121.3	16.3	38.7	61.3	47.0	-	-	0.0	0.0	47.0	0.165	165.0	-
Abril	34.7	0.4	3.6	7.0	4.9	0.5	7.6	-	-	12.5	0.044	43.7	-
Mayo	4.4	0.0	0.5	1.1	0.7	0.2	4.8	-	-	5.5	0.019	19.5	-
Junio	2.4	0.0	0.3	0.6	0.4	0.1	3.1	-	-	3.5	0.012	12.3	-
Julio	4.7	0.0	0.6	1.2	0.8	0.1	2.0	-	-	2.8	0.010	9.8	-
Agosto	5.1	0.0	0.6	1.3	0.9	0.0	1.2	-	-	2.1	0.007	7.2	-
Setiembre	8.8	0.0	1.0	2.1	1.4	0.0	0.8	-	-	2.2	0.008	7.8	-
Octubre	12.5	0.0	1.4	2.9	1.9	0.0	0.5	-	-	2.4	0.009	8.6	-
Noviembre	14.8	0.0	1.6	3.3	2.3	-	-	0.1	1.0	1.3	0.004	4.4	-
Diciembre	46.4	0.9	5.3	9.7	6.9	-	-	0.4	7.0	6.9	0.024	24.2	-
Total	471.0	40.5	113.0	186.4	139.9	0.9	20.0	1.0	20.0	146.9	0.516	515.7	-

Fuente: Elaboración Propia 2024

La **Tabla 30** resumen los caudales mensuales estimados y calibrados con mediciones de campo para la Microcuenca Auropata. Para un coeficiente de temperatura ($L = 696.6$) y déficit de escorrentía ($D = 400$) se obtuvo un coeficiente de escorrentía de 0.1. Esto permitió estimar caudales que varían entre los 3 L/s (0.7 mm/mes) para el mes de noviembre y 196.3 L/s (45.8 mm/mes) para el mes de marzo. El **Gráfico 8** muestra los valores observados para los meses de febrero 2015 y diciembre 2014; estos muestran un ajuste aceptable para la estimación de los caudales teóricos para la Microcuenca Jailpasca.

Tabla 30*Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Jispicahua*

Mes	Precipitación Mensual (mm)					Contribución de la Retención				Caudales Mensuales			
						Gasto de Abastecimiento							
	Total	PE I	PE II	PE III	PE	bi	Gi (mm)	ai	Ai (mm)	Generados			Observados
										mm	m3/s	L/s	m3/s
Enero	97.1	8.0	22.7	37.4	27.9	-	-	0.4	12.0	15.9	0.068	68.1	-
Febrero	115.7	13.9	34.6	55.4	41.9	-	-	0.116	6.0	35.9	0.154	153.9	0.116 (2015)
Marzo	120.3	15.8	38.0	60.2	45.8	-	-	-	0.0	45.8	0.196	196.3	-
Abril	33.5	0.3	3.5	6.8	4.6	0.5	15.5	-	-	20.1	0.086	86.3	-
Mayo	4.5	0.0	0.5	1.1	0.8	0.2	7.5	-	-	8.3	0.035	35.4	-
Junio	2.3	0.0	0.3	0.6	0.4	0.1	3.7	-	-	4.1	0.018	17.5	-
Julio	4.6	0.0	0.6	1.2	0.8	0.1	1.8	-	-	2.6	0.011	11.0	-
Agosto	5.0	0.0	0.6	1.3	0.8	0.0	0.9	-	-	1.7	0.007	7.4	-
Setiembre	8.7	0.0	1.0	2.1	1.4	0.0	0.4	-	-	1.8	0.008	7.7	-
Octubre	12.5	0.0	1.4	2.9	1.9	0.0	0.2	-	-	2.1	0.009	9.1	-
Noviembre	14.6	0.0	1.6	3.3	2.2	-	-	0.1	1.5	0.7	0.003	3.0	-
Diciembre	44.9	0.8	5.0	9.3	6.5	-	-	0.052	10.5	6.5	0.028	27.8	0.052 (2014)
Total	463.7	38.9	109.7	181.5	135.1	0.9	30.0	0.168	30.0	145.6	0.624	623.5	-

Fuente: Elaboración Propia 2024

La **Tabla 31** resumen los caudales mensuales estimados y calibrados con mediciones de campo para la Microcuenca Auropata. Para un coeficiente de temperatura ($L = 696.6$) y déficit de escorrentía ($D = 408$) se obtuvo un coeficiente de escorrentía de 0.2. Esto permitió estimar caudales que varían entre los 2.3 L/s (1.1 mm/mes) para el mes de noviembre y 102.5 L/s (49.2 mm/mes) para el mes de marzo. El **Gráfico 8** muestra los valores observados para los meses de febrero 2015 y noviembre 2015; estos muestran un ajuste aceptable para la estimación de los caudales teóricos para la Microcuenca Jailpasca.

Tabla 31*Caudal Medio Mensual y Anual - Microcuenca Parapacancha*

Mes	Precipitación Mensual (mm)					Contribución de la Retención				Caudales Mensuales			
						Gasto de Abastecimiento							
	Total	PE I	PE II	PE III	PE	bi	Gi (mm)	ai	Ai (mm)	Generados			Observados
										mm	m3/s	L/s	m3/s
Enero	11.9	8.5	23.9	39.4	29.3	-	-	0.4	8.0	21.3	0.044	44.3	-
Febrero	12.2	16.5	39.1	61.8	47.0	-	-	0.2	4.0	43.0	0.090	89.6	0.101 (2015)
Marzo	12.3	17.6	41.1	64.5	49.2	-	-	0.0	0.0	49.2	0.102	102.5	-
Abril	12.7	0.4	3.7	7.1	4.9	0.5	10.8	-	-	15.7	0.033	32.6	-
Mayo	11.6	0.0	0.5	1.1	0.7	0.2	5.0	-	-	5.7	0.012	11.9	-
Junio	10.8	0.0	0.3	0.6	0.4	0.1	2.3	-	-	2.7	0.006	5.6	-
Julio	10.8	0.0	0.6	1.2	0.8	0.0	1.1	-	-	1.9	0.004	3.9	-
Agosto	11.5	0.0	0.6	1.3	0.8	0.0	0.5	-	-	1.3	0.003	2.8	-
Setiembre	12.6	0.0	1.0	2.1	1.4	0.0	0.2	-	-	1.6	0.003	3.3	-
Octubre	13.2	0.0	1.4	2.8	1.9	0.0	0.1	-	-	2.0	0.004	4.1	-
Noviembre	13.4	0.0	1.6	3.2	2.1	-	-	0.1	1.0	1.1	0.002	2.3	0.008 (2014)
Diciembre	13.6	0.9	5.1	9.5	6.6	-	-	0.4	7.0	6.6	0.014	13.8	-
Total	146.6	43.9	118.8	194.5	145.1	0.9	20.0	1.0	20.0	152.1	0.317	316.8	-

Fuente: Elaboración Propia 2024

4.3.2 Caudal Base por Microcuenca – Método Eckhardt

La **Tabla 32** muestra las estimaciones de caudal base para la Microcuenca Auropata, donde, el máximo valor es de 105.8 L/s (34.4 mm/mes) para el mes de marzo y el mínimo es de 2.3 L/s (0.6 mm/mes) para el mes de agosto. El caudal base acumulativo anual asciende a los 321 L/s (104.4 mm/año).

Tabla 32*Estimaciones de Caudales Base Mensual y Anual – Microcuenca Auropata*

Microcuenca	Caudal Mensual	Coficiente de Recesión	Máximo Índice de Caudal	bt	Eckhardt Flujo Base Estimado		
	L/s	α	BFI _{max}		L/s*0.5	m3/s	mm
Enero	113.1	0.95	0.5	103.6	51.8	0.052	16.9
Febrero	199.5	0.95	0.5	185.9	93.0	0.093	30.2
Marzo	223.4	0.95	0.5	211.6	105.8	0.106	34.4
Abril	51.2	0.95	0.5	59.2	29.6	0.030	9.7
Mayo	18.1	0.95	0.5	19.1	9.6	0.010	3.2
Junio	8.9	0.95	0.5	8.9	4.5	0.004	1.3
Julio	6.3	0.95	0.5	6.1	3.1	0.003	1.0
Agosto	4.7	0.95	0.5	4.5	2.3	0.002	0.6
Septiembre	6.1	0.95	0.5	5.7	2.9	0.003	1.0
Octubre	7.6	0.95	0.5	7.2	3.6	0.004	1.3
Noviembre	5.0	0.95	0.5	4.8	2.4	0.002	0.6
Diciembre	27.7	0.95	0.5	25.3	12.7	0.013	4.2
Total	671.6	-	-	642.0	321.0	0.321	104.4

Fuente: Elaboración Propia 2024

La **Tabla 33** muestra las estimaciones de caudal base para la Microcuenca Chaviña, donde, el máximo valor es de 88.2 L/s (25.1 mm/mes) para el mes de marzo y el mínimo es de 1.5 L/s (0.6 mm/mes) para el mes de noviembre. El caudal base acumulativo anual asciende a los 279.7 L/s (80 mm/año).

Tabla 33*Estimaciones de Caudales Base Mensual y Anual – Microcuenca Chaviña*

Microcuenca	Caudal Mensual	Coficiente de Recesión	Máximo Índice de Caudal	bt	Eckhardt Flujo Base Estimado		
	L/s	α	BFI _{max}		L/s*0.5	m3/s	mm
Enero	69.2	0.95	0.5	64	31.9	0.032	9.1
Febrero	156.9	0.95	0.5	145	72.6	0.073	20.8
Marzo	186.6	0.95	0.5	176	88.2	0.088	25.1
Abril	73.1	0.95	0.5	75	37.5	0.038	10.8

Microcuenca	Caudal Mensual	Coeficiente de Recesión α	Máximo Índice de Caudal	bt	Eckhardt Flujo Base Estimado		
	L/s		BFImax		L/s*0.5	m3/s	mm
Mayo	29.1	0.95	0.5	30	14.9	0.015	4.3
Junio	14.1	0.95	0.5	14	7.1	0.007	2.0
Julio	8.9	0.95	0.5	9	4.4	0.004	1.1
Agosto	6.0	0.95	0.5	6	2.9	0.003	0.9
Septiembre	6.6	0.95	0.5	6	3.1	0.003	0.9
Octubre	8.1	0.95	0.5	8	3.8	0.004	1.1
Noviembre	2.9	0.95	0.5	3	1.5	0.002	0.6
Diciembre	25.6	0.95	0.5	23	11.7	0.012	3.4
Total	587.3	-	-	559	279.7	0.280	80.0

Fuente: Elaboración Propia 2024

La **Tabla 34** muestra las estimaciones de caudal base para la Microcuenca Cuchuhuasi, donde, el máximo valor es de 35.3 L/s (16.5 mm/mes) para el mes de marzo y el mínimo es de 1.2 L/s (0.5 mm/mes) para el mes de noviembre. El caudal base acumulativo anual asciende a los 117 L/s (54.7 mm/año).

Tabla 34

Estimaciones de Caudales Base (m3/s) – Microcuenca Cuchuhuasi

Microcuenca	Caudal Mensual	Coeficiente de Recesión α	Máximo Índice de Caudal	bt	Eckhardt Flujo Base Estimado		
	L/s		BFImax		L/s*0.5	m3/s	mm
Enero	30.3	0.95	0.5	28	14.0	0.014	6.6
Febrero	61.0	0.95	0.5	57	28.3	0.028	13.2
Marzo	74.9	0.95	0.5	71	35.3	0.035	16.5
Abril	32.0	0.95	0.5	33	16.4	0.016	7.5
Mayo	12.1	0.95	0.5	13	6.3	0.006	2.8
Junio	5.7	0.95	0.5	6	2.9	0.003	1.4
Julio	3.9	0.95	0.5	4	1.9	0.002	0.9
Agosto	2.8	0.95	0.5	3	1.3	0.001	0.5
Septiembre	3.3	0.95	0.5	3	1.6	0.002	0.9
Octubre	4.1	0.95	0.5	4	1.9	0.002	0.9

Microcuencia	Caudal Mensual	Coeficiente de Recesión α	Máximo Índice de Caudal	bt	Eckhardt Flujo Base Estimado		
	L/s		BFImax		L/s*0.5	m3/s	mm
Noviembre	2.4	0.95	0.5	2	1.2	0.001	0.5
Diciembre	12.9	0.95	0.5	12	5.9	0.006	2.8
Total	245.4	-	-	234	117.0	0.117	54.7

Fuente: Elaboración Propia 2024

La **Tabla 35** muestra las estimaciones de caudal base para la Microcuencia Jailpasca, donde, el máximo valor es de 147 L/s (20.6 mm/mes) para el mes de marzo y el mínimo es de 4.1 L/s (0.6 mm/mes) para el mes de noviembre. El caudal base acumulativo anual asciende a los 469.3 L/s (65.6 mm/año).

Tabla 35

Estimaciones de Caudales Base Mensual y Anual – Microcuencia Jailpasca

Microcuencia	Caudal Mensual	Coeficiente de Recesión α	Máximo Índice de Caudal	bt	Eckhardt Flujo Base Estimado		
	L/s		BFImax		L/s*0.5	m3/s	mm
Enero	132.9	0.95	0.5	122	61.2	0.061	8.5
Febrero	266.1	0.95	0.5	247	123.6	0.124	17.4
Marzo	310.8	0.95	0.5	294	147.0	0.147	20.6
Abril	87.6	0.95	0.5	96	48.2	0.048	6.7
Mayo	39.4	0.95	0.5	40	20.0	0.020	2.8
Junio	24.9	0.95	0.5	24	12.2	0.012	1.7
Julio	19.7	0.95	0.5	19	9.5	0.009	1.3
Agosto	14.4	0.95	0.5	14	7.0	0.007	1.0
Septiembre	15.5	0.95	0.5	15	7.3	0.007	1.0
Octubre	16.9	0.95	0.5	16	8.0	0.008	1.1
Noviembre	8.3	0.95	0.5	8	4.1	0.004	0.6
Diciembre	46.4	0.95	0.5	42	21.2	0.021	2.9
Total	982.9	-	-	939	469.3	0.469	65.6

Fuente: Elaboración Propia 2024

La **Tabla 36** muestra las estimaciones de caudal base para la Microcuenca Huamanloma, donde, el máximo valor es de 78 L/s (22.2 mm/mes) para el mes de marzo y el mínimo es de 2.2 L/s (0.6 mm/mes) para el mes de noviembre. El caudal base acumulativo anual asciende a los 246.3 L/s (70.4 mm/año).

Tabla 36

Estimaciones de Caudales Base (m3/s) – Microcuenca Huamanloma

Microcuenca	Caudal Mensual	Coefficiente de Recesión	Máximo Índice de Caudal	bt	Eckhardt Flujo Base Estimado		
	L/s	α	BFImax		L/s*0.5	m3/s	mm
Enero	72.9	0.95	0.5	67	33.5	0.034	9.7
Febrero	140.3	0.95	0.5	130	65.2	0.065	18.5
Marzo	165.0	0.95	0.5	156	78.0	0.078	22.2
Abril	43.7	0.95	0.5	49	24.4	0.024	6.8
Mayo	19.5	0.95	0.5	20	9.9	0.010	2.8
Junio	12.3	0.95	0.5	12	6.0	0.006	1.7
Julio	9.8	0.95	0.5	9	4.7	0.005	1.4
Agosto	7.2	0.95	0.5	7	3.5	0.004	1.1
Septiembre	7.8	0.95	0.5	7	3.7	0.004	1.1
Octubre	8.6	0.95	0.5	8	4.1	0.004	1.1
Noviembre	4.4	0.95	0.5	4	2.2	0.002	0.6
Diciembre	24.2	0.95	0.5	22	11.1	0.011	3.1
Total	515.7	-	-	493	246.3	0.246	70.4

Fuente: Elaboración Propia 2024

La **Tabla 37** muestra las estimaciones de caudal base para la Microcuenca Jispicahua, donde, el máximo valor es de 92.5 L/s (21.5 mm/mes) para el mes de marzo y el mínimo es de 1.6 L/s (0.5 mm/mes) para el mes de noviembre. El caudal base acumulativo anual asciende a los 297.3 L/s (69.4 mm/año).

Tabla 37*Estimaciones de Caudales Base Mensual y Anual – Microcuenca Jispicahua*

Microcuenca	Caudal Mensual	Coefficiente de Recesión	Máximo Índice de Caudal	bt	Eckhardt Flujo Base Estimado		
	L/s	α	BFI _{max}		L/s*0.5	m3/s	mm
Enero	68.1	0.95	0.5	63	31.5	0.031	7.2
Febrero	153.9	0.95	0.5	142	71.2	0.071	16.6
Marzo	196.3	0.95	0.5	185	92.5	0.092	21.5
Abril	86.3	0.95	0.5	88	43.9	0.044	10.3
Mayo	35.4	0.95	0.5	36	18.2	0.018	4.2
Junio	17.5	0.95	0.5	18	8.8	0.009	2.1
Julio	11.0	0.95	0.5	11	5.4	0.005	1.2
Agosto	7.4	0.95	0.5	7	3.6	0.004	0.9
Septiembre	7.7	0.95	0.5	7	3.7	0.004	0.9
Octubre	9.1	0.95	0.5	9	4.3	0.004	0.9
Noviembre	3.0	0.95	0.5	3	1.6	0.002	0.5
Diciembre	27.8	0.95	0.5	25	12.7	0.013	3.0
Total	623.5	-	-	595	297.3	0.297	69.4

Fuente: Elaboración Propia 2024

La **Tabla 38** muestra las estimaciones de caudal base para la Microcuenca Parapacancha, donde, el máximo valor es de 48.5 L/s (23 mm/mes) para el mes de marzo y el mínimo es de 1.2 L/s (0.5 mm/mes) para el mes de noviembre. El caudal base acumulativo anual asciende a los 151.3 L/s (72.5 mm/año).

Tabla 38*Estimaciones de Caudales Base (m3/s) – Microcuenca Parapacancha*

Microcuenca	Caudal Mensual	Coefficiente de Recesión	Máximo Índice de Caudal	bt	Eckhardt Flujo Base Estimado		
	L/s	α	BFI _{max}		L/s*0.5	m3/s	mm
Enero	44.3	0.95	0.5	41	20.4	0.020	9.6
Febrero	89.6	0.95	0.5	83	41.6	0.042	20.2
Marzo	102.5	0.95	0.5	97	48.5	0.048	23.0
Abril	32.6	0.95	0.5	35	17.5	0.018	8.6

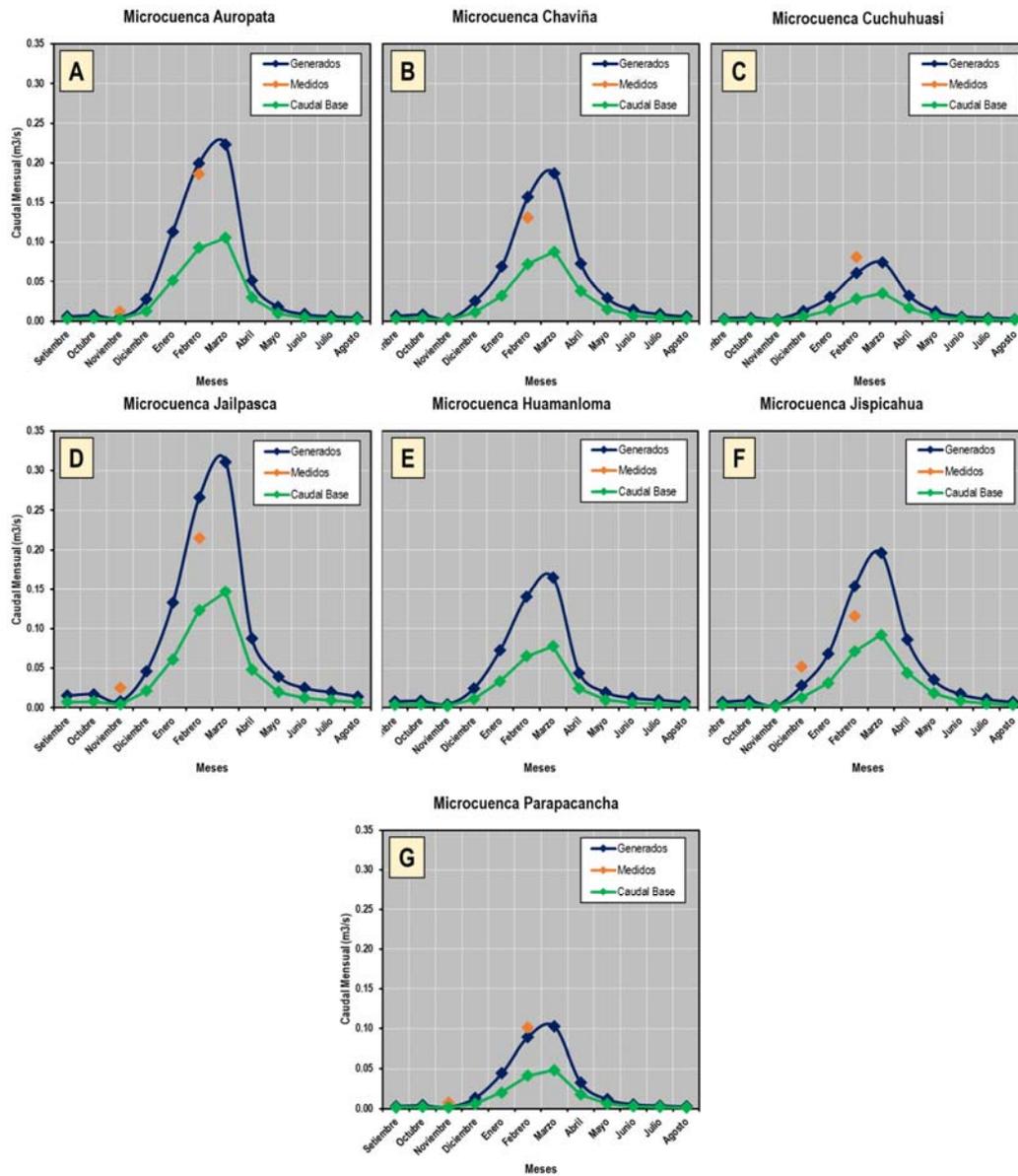
Microcuenca	Caudal Mensual	Coefficiente de Recesión	Máximo Índice de Caudal	bt	Eckhardt Flujo Base Estimado		
	L/s	α	BFImax		L/s*0.5	m3/s	mm
Mayo	11.9	0.95	0.5	13	6.3	0.006	2.9
Junio	5.6	0.95	0.5	6	2.8	0.003	1.4
Julio	3.9	0.95	0.5	4	1.9	0.002	1.0
Agosto	2.8	0.95	0.5	3	1.3	0.001	0.5
Septiembre	3.3	0.95	0.5	3	1.6	0.002	1.0
Octubre	4.1	0.95	0.5	4	2.0	0.002	1.0
Noviembre	2.3	0.95	0.5	2	1.2	0.001	0.5
Diciembre	13.8	0.95	0.5	13	6.3	0.006	2.9
Total	316.8	-	-	303	151.3	0.151	72.5

Fuente: Elaboración Propia 2024

El **Gráfico 8** muestra los valores de caudales de escorrentía y base estimados para las siete (07) microcuencas con el Método de Lutz Scholz (1980) y Eckhardt (2004). El **Gráfico 8 A, B, C, D, E, E y G** (líneas azules) muestran las estimaciones de escorrentía superficial que fueron calibradas, en cierto modo, por lecturas de monitoreo puntuales (puntos naranjas) desarrollados por HGS (2015) entre los años 2014 y 2015; a excepción de la Microcuenca Huamanloma. Estas estimaciones de escorrentía oscilan entre el 30 a 40% de la precipitación total anual para cada microcuenca. Lo cual es congruente con el porcentaje de evapotranspiración reporta por Hydroterra (2019) entre 50 a 60% de la precipitación. Por otro lado, Los **Gráfico 8 A, B, C, D, E, E y G** (líneas grises) muestran las estimaciones de caudal base y representan entre el 10 al 20% de la precipitación anual; lo cual es congruente con tasas de recarga en los andes peruanos.

Gráfico 8

Caudales de Escorrentía - Bases Mensuales y Anuales Estimados vs Caudales Observados



Fuente: Elaboración Propia 2024

4.4 Geología y Geología Estructural

Apumayo se ubica cerca de una cadena de conos volcánicos; por lo tanto, toda el área de estudio está influenciada por la actividad volcánica Cenozoica. Las secuencias

volcánicas pertenecen al Grupo Tacaza del Oligoceno y Grupo Barroso del Plioceno. Posteriormente, cubiertos por depósitos cuaternarios y antrópicos.

Hacia el 2019, el yacimiento minero APUMAYO contaba con tres (03) tajos abiertos, con la explotación de cuerpos mineralizados con contenido de oro y plata, asociados a depósitos de naturaleza epitermal tipo ácido con alteraciones típicas de Alta Sulfuración (Sílica, Argílica Avanzada y Propilítica) emplazadas en rocas de composición andesíticas.

La **Tabla 39** resume las principales unidades litológicas (volcánicas y depósitos cuaternarios) presentes en el área de estudio. Mientras que la **Figura 16** muestra la distribución espacial en planta de las secuencias volcánicas y depósitos recientes.

Tabla 39

Unidades Litológicas Presentes en el Área de Estudio

Era	Periodo	Época	Unidad Estratigráfica	Código
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	 Depósito Antrópico (Tajos)	Q-an3
			 Depósito Antrópico (Pad)	Q-an2
			 Depósito Antrópico (Botaderos)	Q-an1
			 Cuaternario Fluvio – Aluvial	Q-fl/al
	Neógeno	Plioceno	 Grupo Barroso	Qp-b-and
		Mioceno	 Grupo Tacaza	PN-t

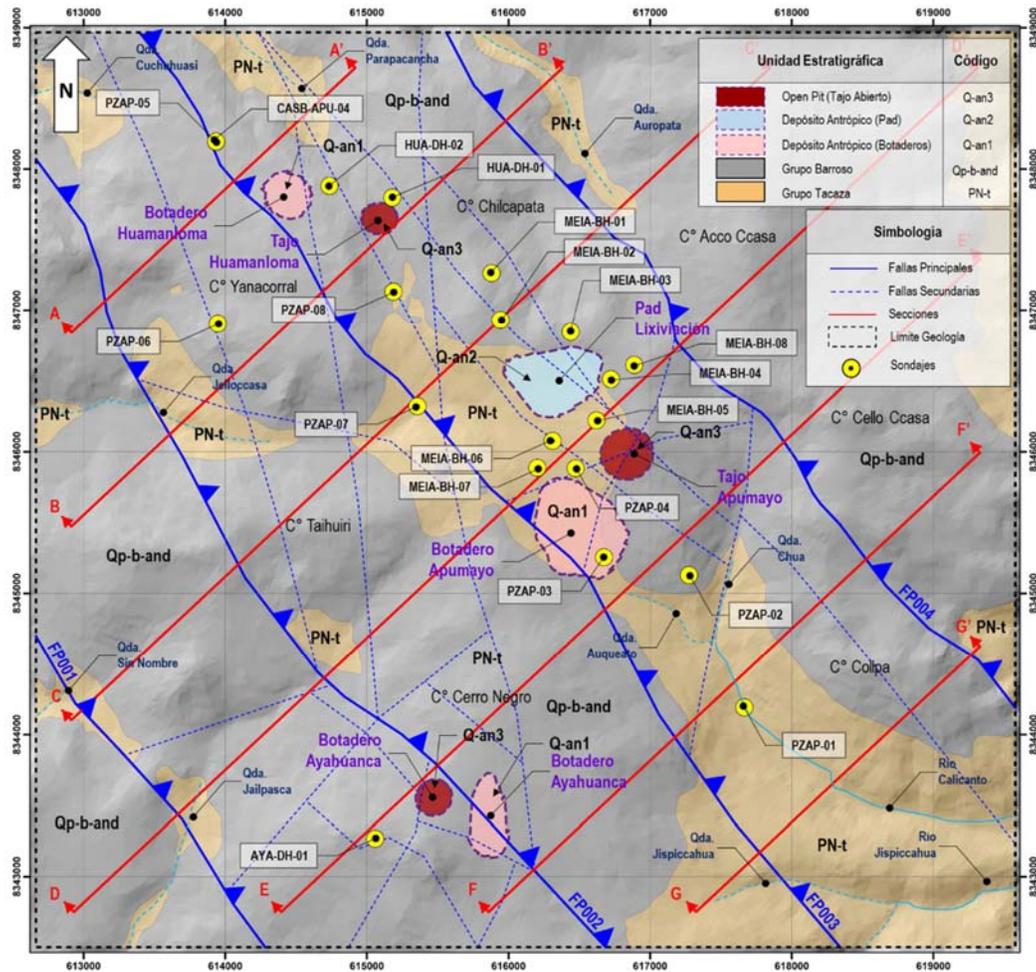
Fuente: Elaboración Propia

La **Figura 16** muestra la geología en planta. Los dos (02) unidades litológicas principales corresponden a secuencias volcánicas del Grupo Tacaza hacia la base y Barroso hacia el tope. Estos grupos se encuentra afectados por cuatro (04) fallas principales (FP001, FP002, FP003 y FP004) de carácter inverso de SO a NE con buzamientos entre los 10 – 15° (FP001), 10 – 30° (FP002), 20 – 45° (FP003) y 20 – 50° (FP004), todos hacia el NE. En parte sur se ubican las operaciones de Ayahuanca,

mientras que, hacia la parte central Apumayo, y finalmente, al norte Huamanloma. Por otro lado, la **Figura 17** muestra las siete (07) secciones geológicas de NO a SE. El basamento lo conforma el Grupo Tacaza, mientras que, suprayaciendo se encuentra el Grupo Barroso. El contacto entre los grupos Tacaza y Barroso presentan buzamientos entre los 0 a 25°; pues generalmente, el Grupo Barroso se depositó siguiendo, posiblemente, paleo superficies heredadas por el Grupo Tacaza y posteriormente erosionadas. Sin embargo, la formación de plegamientos y movimientos de carácter inverso podrían incrementar la disposición de la pseudoestratificación de los grupos antes mencionado. Adicional a esto, se observó que las fallas FP003 y FP004 presentan una tendencia similar y por los buzamientos que varían desde 20° a 50° forman parte del sistema principal de fallas Apumayo, mientras que las fallas FP001 y FP002 debido al buzamiento que varían desde 10° a 20° podrían formar parte del mismo sistema de fallas mediante un comportamiento de planar escalonada, sin embargo se requerirían estudios más detallados en este aspecto puesto que posiblemente formen parte de otro sistema de fallas.

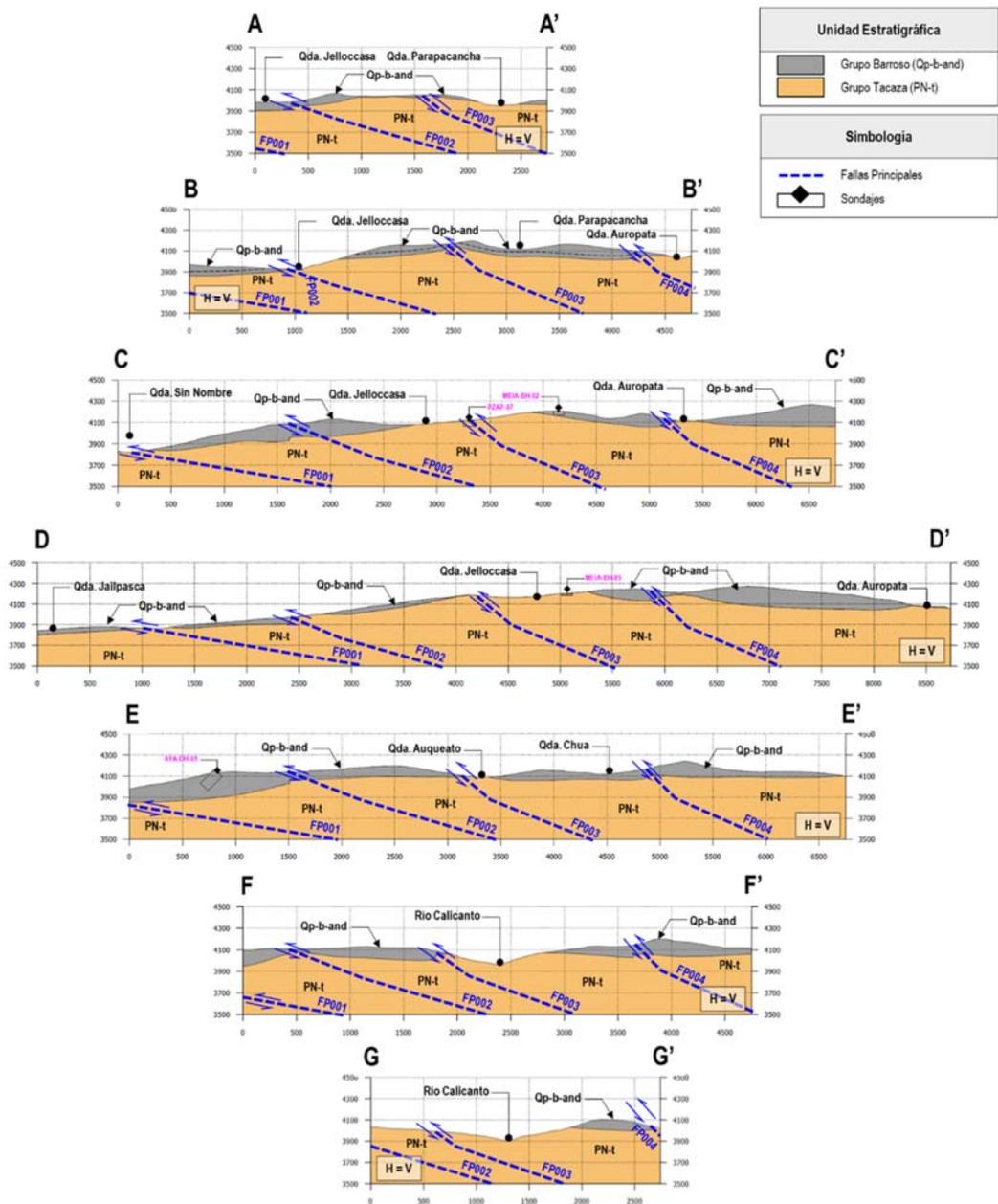
Figura 16

Mapa Geológico Integrado



Fuente: Elaboración Propia 2024

Figura 17
Secciones Geológicas



Fuente: Elaboración propia 2024

4.4.1 Configuración Estructural Base (Preliminar)

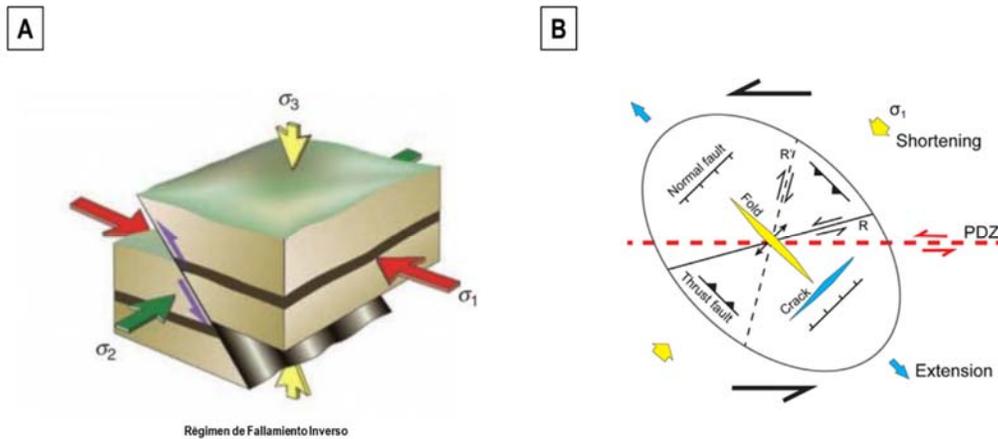
De acuerdo con la clasificación de los esfuerzos tectónicos de Anderson (Fossen, 2010), podríamos considerar que, el área de estudio se encontraría asociado a una zona de acortamiento de dirección NE – SO y una zona de extensión NO – SE (Ver **Figura 18**

A). Por otro lado, tomando en consideración las Estructuras Típicas de Riedel (Ren, 2021), el área de estudio se encontraría asociado a una zona de plegamiento y fallas inversas de rumbo NO – SE con fracturas y fallas normales de rumbo NE – SO (Ver **Figura 18 B**). Finalmente, la visita de campo desarrollada el año 2019 mostró que las fallas de tendencia NO – SE actuarían como barreras para el flujo de agua subterránea, mientras que, las fallas de tendencia NE – SO actuarían como conductivas y asociadas a las filtraciones de ingreso hacia la pared norte del Tajo Apumayo.

Por lo tanto, preliminarmente, para el desarrollo de esta tesis de investigación se plantea que las fallas principales de tendencia NO – SE (FP001, FP002, FP003 y FP004) actuarían como barreras hidráulicas, mientras que, las fallas secundarias de tendencia NE – SO actuarían como conductivas para el flujo de filtraciones de agua subterránea. Este mismo concepto, será integrado al modelo hidrogeológico conceptual y numérico.

Figura 18

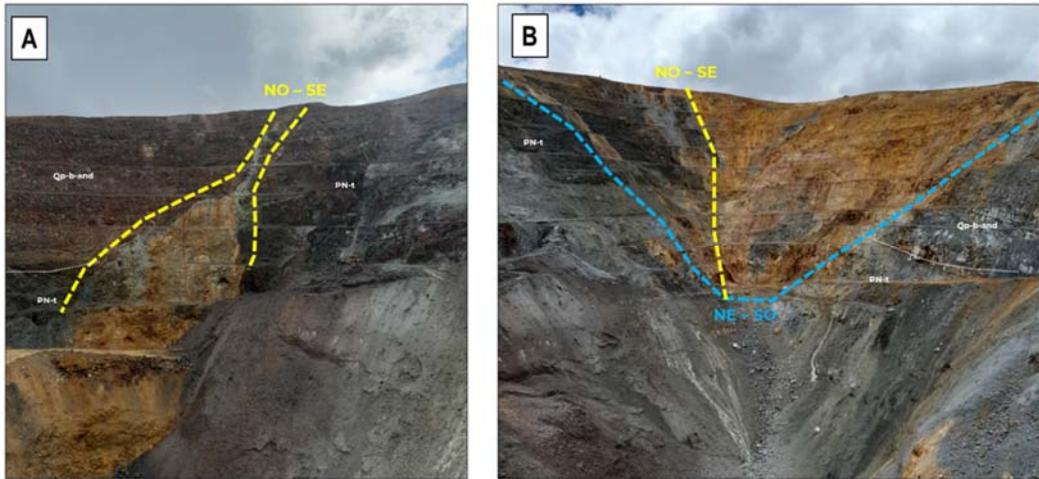
régimen de Fallamiento Inverso y Estructuras Típicas de Riedel



Fuente: Fossen (2010) y Ren (2021)

Foto 2

Mapeo Estructural Pared Norte y Oeste del Tajo Apumayo (2019)



Fuente: Elaboración propia 2024

4.4.2 Modelo Geológico 3D

El bloque tridimensional fue construido en el Software Leapfrog Works Versión 2023.1 con base en la información mostrada en los apartados previos. Para este fin se emplearon como base la geología en planta (Ver **Figura 16**) y siete (07) secciones geológicas (Ver **Figura 17**), así como, la recopilación e integración de 20 sondajes diamantinos distribuidos en los alrededores de los componentes mineros (tajo, botaderos y pad de lixiviación). La base topográfica empleada corresponde al año 2011 con un detalle de 1m, y fue considerada como pre-minado pues no se observó excavaciones y/o movimientos de tierra considerables.

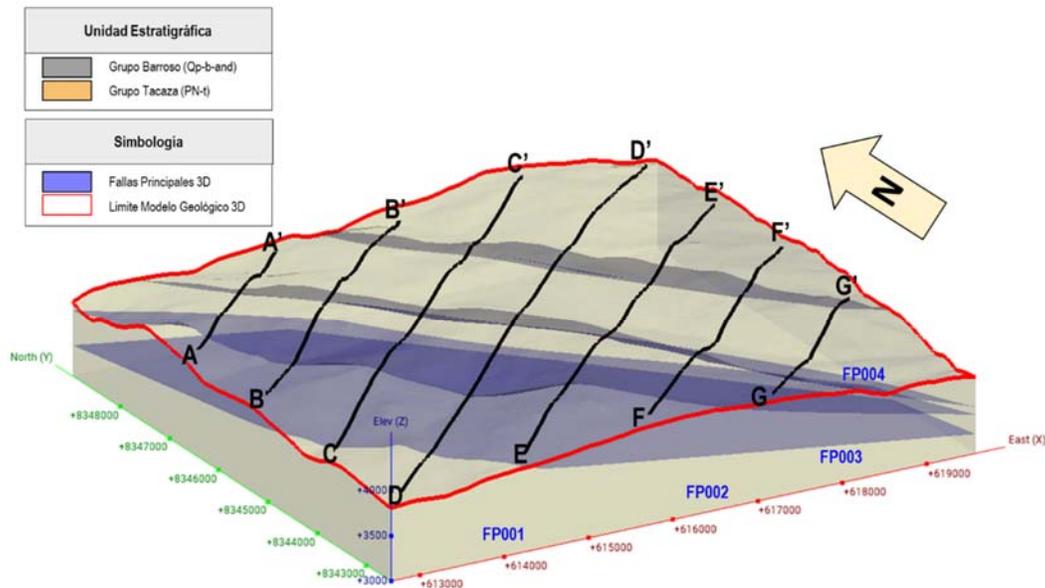
Este bloque consta de dos (02) capas sub-paralelas, cada una de las cuales corresponde en rigor a una unidad estratigráfica correspondiente a los grupos Tacaza (PN-t) y Barroso (Qp-b-and). Además, comprende cuatro (04) fallas principales (FP001, FP002, FP003, FP004 y FP005) que dividen el modelo en cinco (05) bloques que cortan ambos grupos.

El objetivo principal de este modelo geológico 3D es utilizarlo como referencia para evaluar la malla estructurada 3D referente al modelo hidrogeológico numérico que fue creado en el Software Feflow 8.1. Posteriormente, se evaluarán las propiedades hidráulicas, en estado estacionario y transitoria, a ser calibradas.

La **Figura 19** muestra el bloque tridimensional con las siete (07) secciones geológicas interpretativas de apoyo para la construcción de las capas y unidades litológicas, así como, las cuatro (04) fallas geológicas principales que dividen el área de estudio en cinco (05) bloques. Finalmente, el **Figura 20** muestra el bloque geológico tridimensional final base para la evaluación de condiciones hidrogeológicas de pre-minado.

Figura 19

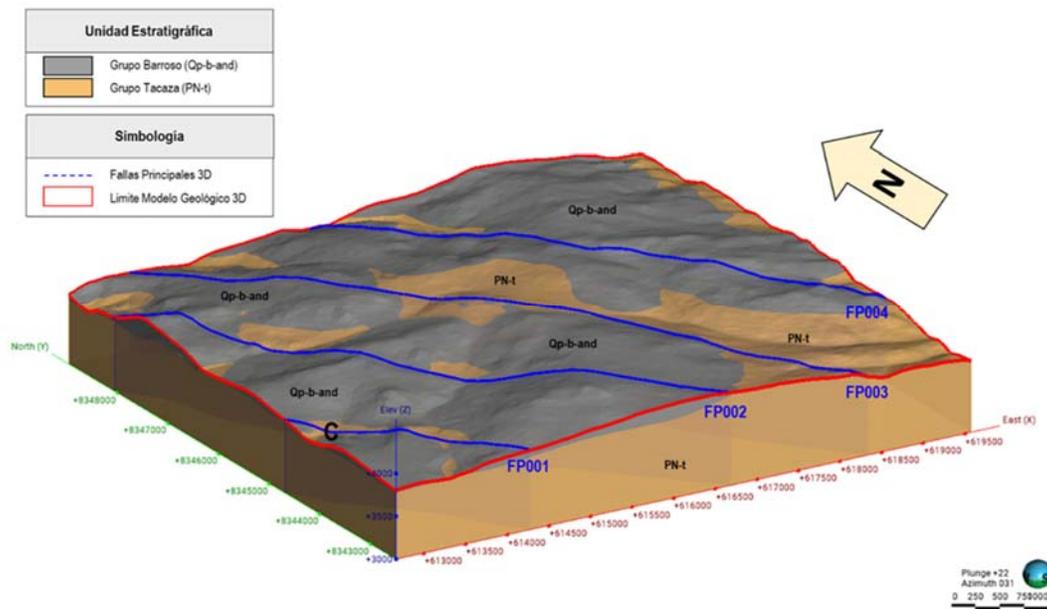
Vista Secciones Geológicas Interpretativas y Fallas Principales



Fuente: Elaboración propia 2024

Figura 20

Vista del Modelo Geológico 3D Final



Fuente: Elaboración propia 2024

4.5 Conductividad Hidráulica (K)

Se aprecia que la conductividad hidráulica más probable (50% de probabilidad) del macizo rocoso es 3.3×10^{-6} m/s (poco permeable, ver **Tabla 40**), oscilando entre 1.2×10^{-10} m/s (mínimo impermeable) y 1.1×10^{-3} m/s (máximo permeable). El Grupo Barroso presenta conductividades probables de 5×10^{-6} m/s superiores a las del Grupo Tacaza con conductividades probables de 2.8×10^{-6} m/s.

La **Tabla 40** resume los valores de conductividad hidráulica recopilados de los grupos Tacaza y Barroso evaluados de acuerdo con al modelo Geológico 3D, donde la conductividad hidráulica probable, para ambos grupos, oscilan en rangos 1×10^{-7} a 1×10^{-4} m/s lo que denotaría el medio hidrogeológico como poco permeable.

Tabla 40*Valores Conductividad Hidráulica de Acuerdo con el Modelo Geológico 3D*

Litología Modelo Geológico 3D	Valores k (m/s)						
	Número	Mínimo	Q25%	Q50%	MG	Q75%	Máximo
Grupo Barroso	44	5.2e-09	4.6e-07	5.0e-06	2.9e-06	1.9e-05	1.2e-04
Grupo Tacaza	74	1.2e-10	1.1e-06	2.8e-06	2.0e-06	8.3e-06	1.1e-03
Total	118	1.2e-10	9.8e-07	3.3e-06	2.3e-06	9.8e-06	1.1e-03

Fuente: Elaboración Propia 2024

De la **Tabla 41** y **Gráfico 9** se evidencia un descenso general de la conductividad hidráulica, considerando la media geométrica, con respecto a la profundidad media del ensayo, donde hasta los 70 m los valores más probables de permeabilidad oscilan entre 1.00E-06 a 1.00E-05 m/s, mientras que, hasta los 130 m los valores oscilan entre 1.00E-07 a 1.00E-06 m/s; y finalmente, pasando a ordenes entre 1.00E-08 a 1.00E-07 m/s. El **Gráfico 9 C** muestra la existencia de factores de descenso (anisotropía) de la conductividad hidráulica con respecto a la profundidad media del orden de 1 ($K_x = K_y = K_z$) hasta los 70 m, 0.1 entre 70 hasta 130 m ($K_x = K_y = 10K_z$) y 0.01 entre 130 hasta 200 m ($K_x = K_y = 100K_z$). Por lo tanto, es probable que, a profundidades mayores a los 200 m la permeabilidad siga disminuyendo, pasando gradualmente de baja permeabilidad a impermeable. El **Gráfico 9 A** muestra la variabilidad vertical del Grupo Barroso y obedece el gradiente general evidenciado en el **Gráfico 9 C**, mientras que, **Gráfico 9 B** muestra la variabilidad vertical del Grupo Tacaza obedece el gradiente general evidenciado en el **Gráfico 9 C**. Sin embargo, es probable que a partir de los 70 m en adelante esta unidad litológica se comporte como una unidad impermeable. Por otro lado, el **Gráfico 9 D** muestra que el Grupo Barroso presenta valores de permeabilidad ligeramente superior a la del Grupo Tacaza.

Tabla 41

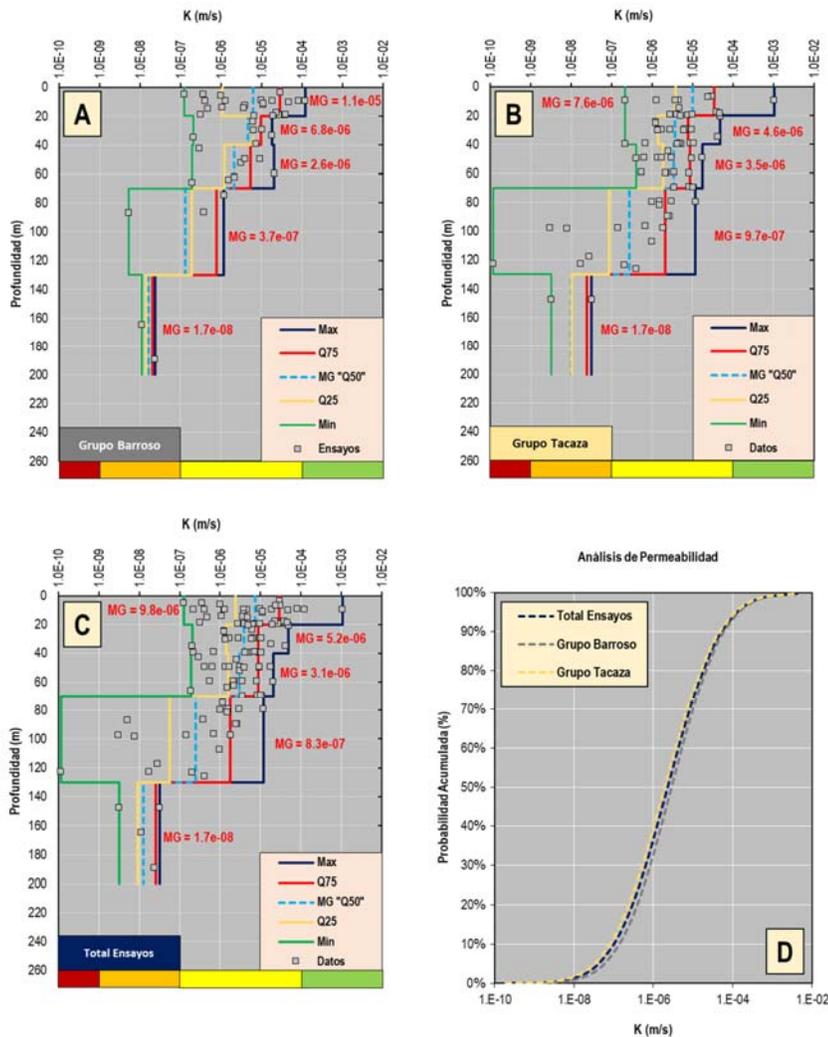
Valores Conductividad Hidráulica de Acuerdo con la Profundidad Evaluada

Prof. (m)	Valores Q25 k (m/s)			Valores Q50 k (m/s)			Valores Q75 k (m/s)		
	Total	Grupo Barroso	Grupo Tacaza	Total	Grupo Barroso	Grupo Tacaza	Total	Grupo Barroso	Grupo Tacaza
20	2.4e-06	1.6e-06	3.9e-06	9.8e-06	1.1e-05	7.5e-06	2.9e-05	2.9e-05	3.5e-05
40	1.4e-06	6.2e-06	1.4e-06	5.2e-06	6.8e-06	4.6e-06	8.9e-06	9.6e-06	7.7e-06
70	1.6e-06	1.2e-06	1.9e-06	3.1e-06	2.6e-06	3.5e-06	8.8e-06	5.3e-06	8.8e-06
130	5.7e-08	1.9e-07	8.6e-08	8.3e-07	3.7e-07	9.7e-07	1.8e-06	7.8e-07	2.1e-06
200	9.0e-08	1.4e-08	1.0e-08	1.7e-08	1.7e-08	1.7e-08	2.6e-08	2.0e-08	2.5e-08

Fuente: Elaboración Propia 2024

Gráfico 9

Distribución Probabilística y Vertical de la Conductividad Hidráulica



Fuente: Elaboración Propia 2024

4.6 Transmisividad (T) y Coeficiente de Almacenamiento (S)

La **Tabla 42** resume las características consideradas para el desarrollo de las pruebas de bombeo, así como, las estimaciones de permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento con el Método de Cooper & Jacobs (IGME, 1984), donde, los valores de conductividad hidráulica oscilan entre los $6.3e-08$ y $3.9e-07$, lo que, denotaría baja permeabilidad a poco permeables; ligeramente inferiores a los rangos de conductividad hidráulica estimados durante la perforación. Esto refuerza la hipótesis concerniente al comportamiento de baja permeabilidad a impermeable de las secuencias del Grupo Tacaza. Por otro lado, congruente a las denotaciones de baja permeabilidad a poco permeables, se presenta un potencial insignificante, para la obtención de recursos hídrico del Grupo Tacaza, con valores de transmisividad inferiores a $5 \text{ m}^2/\text{d}$ ($0.19 - 3.7 \text{ m}^2/\text{d}$), y finalmente, las estimaciones de coeficiente de almacenamiento nos indican que el medio hidrogeológico fracturado presenta condiciones libres. La **Figura 7** muestra la distribución espacial de los sondajes con información de parámetros hidrogeológicos (durante y posterior a las perforaciones).

Tabla 42

Valores de Parámetros hidráulicos Durante la Prueba de Bombeo

Código	Diseño del Piezómetro			Parámetros Hidráulicos (Theis y Jacobs)			
	Profundidad (m)	Tramo Ranurado (m)	Litología Modelo	Caudal (L/s)	K (m/s)	T (m ² /d)	S
PZAP-01	60	12.2 - 56.8	PN-t	0.05	$1.0e-07$	0.38	$1.5e-01$
PZAP-03	50	9.9 - 44.6	PN-t	0.06	$6.3e-08$	0.19	$9.5e-01$
PZAP-07	50	9.9 - 44.6	PN-t	0.07	$7.2e-08$	0.22	$2.3e-01$
PZAP-08	150	15.9 - 125.1	PN-t	0.07	$3.9e-07$	3.69	$3.7e-03$

Fuente: Elaboración Propia 2024

4.7 Parámetros Físicoquímicos del Agua Subterránea

4.7.1 Microcuenca Jailpasca

A continuación, se describen las propiedades físicoquímicas basadas en los registros de campo de un (01) piezómetro (AYA-SUB-04):

- pH: La información recolectada denota un pH ácido (3.8 y 4.3 unidades de pH).
- Conductividad Eléctrica (CE): La información recolectada muestra que las estaciones presentan aguas ligeramente mineralizadas con CE entre 202 a 222 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y TDS entre 127 y 140 mg/L.
- Temperatura: La información recolectada muestra rangos de temperatura entre 11.90 a 12.1 °C.

En general, no se aprecian variaciones notables entre la época húmeda y época de transición hacia la seca. Sin embargo, la información recolectada en este piezómetro presenta valores de pH ácido, mientras que, la conductividad eléctrica y temperatura no presentan valores anómalos.

4.7.2 Microcuenca Huamanloma

A continuación, se describen las propiedades físicoquímicas basadas en los registros de campo de seis (06) piezómetros (PZ-PAD-01, PZ-PAD-02, PZ-PAD-03, CASB-APU-02, MEIA-BH-03 y PZ-PAD-04 (ITS-BH-03)) y un (01) manantial (GW-MA-02):

- pH: La información recolectada denota un pH ácido a ligeramente alcalino (4.1 a 7.4 unidades de pH) en la época húmeda, y también, un pH ácido a ligeramente alcalino (3.9 a 7.5 unidades de pH) para la época de transición a la época seca.

- Conductividad Eléctrica (CE): La información recolectada muestra que las estaciones presentan aguas ligeramente mineralizadas a mineralizadas con CE entre 152 a 502 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y TDS entre 96 a 306 mg/L en la época húmeda y entre 93 a 595 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y TDS entre 59 a 375 mg/L en la época de transición.
- Temperatura: La información recolectada muestra rangos de temperatura entre 8.6 a 10.7 $^{\circ}\text{C}$ para la época húmeda y entre 7.1 a 12.9 $^{\circ}\text{C}$ para la época de transición.

En general, no se aprecian variaciones notables entre la época húmeda y época de transición. Sin embargo, la información recolectada en piezómetro CASB-APU-02 y el manantial GW-MA-02 presentan valores de Ph ácidos en ambas épocas. Por otro lado, la conductividad eléctrica presenta valores ligeramente mineralizados, se asume propios del medio hidrogeológico. Finalmente, temperatura no presentan valores anómalos.

4.7.3 Microcuenca Jispicahua

A continuación, se describen las propiedades fisicoquímicas basadas en los registros de campo de un (01) piezómetro (AYA-SUB-05):

- pH: La información recolectada denota un pH alcalino (12.3 y 12.7 unidades de pH).
- Conductividad Eléctrica (CE): La información recolectada muestra que las estaciones presentan aguas mineralizadas con CE entre 2815 a 2918 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y TDS entre 1773 y 1838 mg/L.
- Temperatura: La información recolectada muestra rangos de temperatura entre 10.1 a 10.6 $^{\circ}\text{C}$.

En general, se observan valores anómalos de pH, CE y TDS tanto para la época húmeda y época de transición. Se asume que, este influenciado posiblemente por presencia de agua estancada, falta de desarrollo del piezómetro o influencias externas no propias del medio hidrogeológico. Esta anomalía se respalda por la inaceptabilidad de los resultados de laboratorio; por lo tanto, no se utilizarán en las interpretaciones para este estudio. Finalmente, temperatura no presentan valores anómalos.

4.7.4 Microcuenca Parapacancha

A continuación, se describen las propiedades fisicoquímicas basadas en los registros de campo de dos (02) piezómetros (CASB-APU-04 y CASB-APU-03):

- pH: La información recolectada denota un pH neutro a ligeramente alcalino (7.2 a 8.2 unidades de pH) en la época de transición, y también, un pH neutro a ligeramente alcalino (7.3 a 8.1 unidades de pH) para la época de transición.
- Conductividad Eléctrica (CE): La información recolectada muestra que las estaciones presentan aguas ligeramente mineralizadas con CE entre 38 y 336 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y TDS entre 24 y 212 mg/L y en la época húmeda y entre 21 a 375 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y TDS entre 13 y 236 mg/L en la época de transición.
- Temperatura: La información recolectada muestra rangos de temperatura entre 10.8 y 11.4 °C para la época húmeda y entre 10.3 a 12.6 °C para la época de transición.

En general, no se aprecian variaciones notables entre la época húmeda y época de transición. El pH, la conductividad eléctrica y la temperatura no presentan valores anómalos.

4.7.5 Microcuenca Chaviña

A continuación, se describen las propiedades fisicoquímicas basadas en los registros de campo de seis (06) piezómetros (PZAP-02, PZAP-03, PZAP-09, PZAP-10, CASB-APU-01 y MEIA-BH-07) y un (01) manantial (GW-MA-01):

- pH: La información recolectada denota un pH neutro a ligeramente alcalino (7.2 a 8.2 unidades de pH) en la época de transición, y también, un pH neutro a ligeramente alcalino (7.3 a 8.1 unidades de pH) para la época de transición.
- Conductividad Eléctrica (CE): La información recolectada muestra que las estaciones presentan aguas ligeramente mineralizadas con CE entre 38 a 336 S/cm en la época húmeda y entre 21 a 375 μ S/cm en la época de transición.
- Temperatura: La información recolectada muestra rangos de temperatura entre 10.8 y 10.1 °C para la época húmeda y entre 10.3 a 12.6 °C para la época de transición.

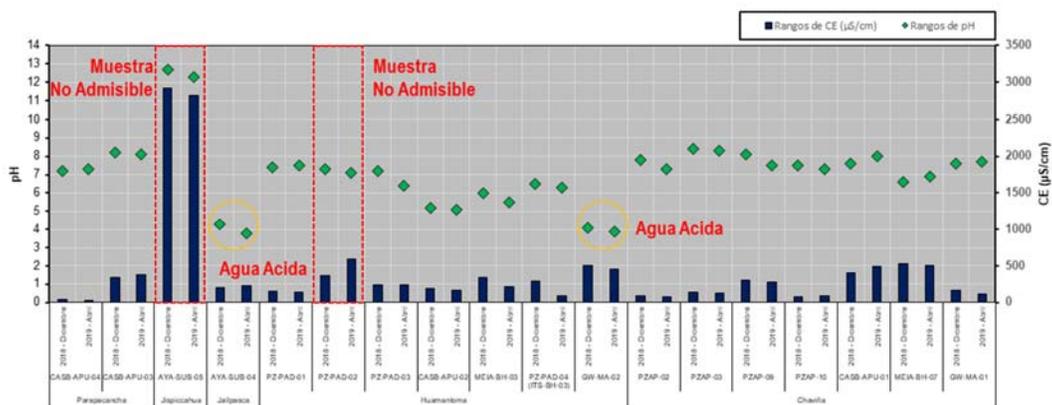
En general, no se aprecian variaciones notables entre la época húmeda y época de transición. Sin embargo, la información recolectada en ciertos piezómetros presentas valores de pH ligeramente alcalino a alcalino (PZAP-03 y PZAP-09) y manantial (GW-MA-01). Por otro lado, la conductividad eléctrica presenta valores ligeramente elevados, pero se asume propios del medio hidrogeológico. Finalmente, temperatura no presentan valores anómalos.

El **Gráfico 10** y **Gráfico 11** muestran las variaciones temporales entre noviembre y diciembre 2018, y marzo y abril 2019 de las propiedades fisicoquímicas (pH, Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales Disueltos y Temperatura) de acuerdo con su

entorno más básico (microcuencas). La mayoría de las estaciones de monitoreo no muestran valores anómalos. Sin embargo, el piezómetro (AYA-SUB-04) y manantial (GW-MA-02) presentaron valores ácidos de pH en ambos época de monitoreo, lo que podría denotar un carácter ácido para estas aguas subterráneas. Por otro lado, el piezómetro (AYA-SUB-05) presenta valores muy anómalos para este medio hidrogeológico pH alcalino y conductividades eléctricas sobre los 2800 uS/cm que no son propios del medio, esto denotaría influencia externa antrópica hacia este piezómetro. Además, esto se respalda con la inaceptabilidad de los resultados del laboratorio, por lo tanto, no hay un equilibrio con el medio hidrogeológico (Ver **Gráfico 10** y **Gráfico 11**). En general, no se recomiendan procesos de remediación aplicables al medio hidrogeológico para el año 2019. Sin embargo, se desconoce la fuente y/o origen de conductividad eléctrica y pH anómalo en el piezómetro (AYA-SUB-05) para la toma de decisiones de tratamiento y/o remediación concerniente.

Gráfico 10

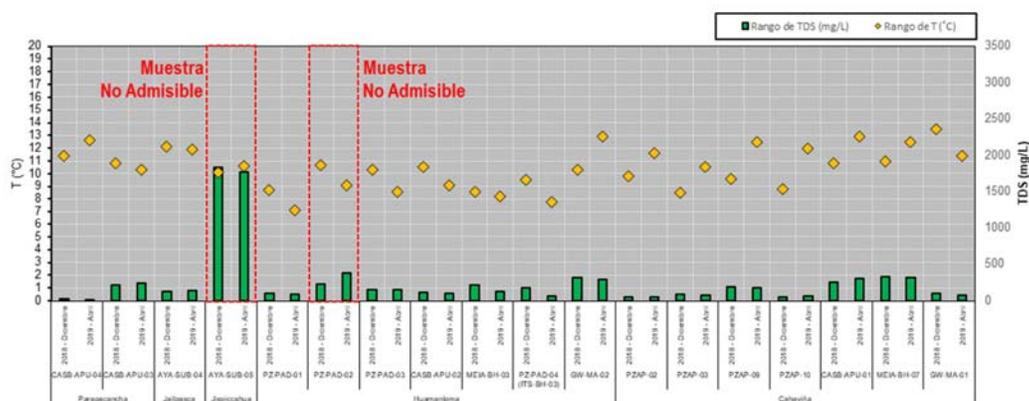
Variación del pH y CE Época Húmeda (noviembre – diciembre 2018) y Época de Transición (marzo – abril 2019)



Fuente: Elaboración propia 2024

Gráfico 11

Variación del TDS y Temperatura Época Húmeda (noviembre – diciembre 2018) y Época de Transición (marzo – abril 2019)



Fuente: Elaboración propia 2024

4.8 Composición Iónica del Agua Subterránea

La **Tabla 43** resume las facies de agua subterránea presentes en el entorno de APUMAYO, donde, se aprecia que todos los piezómetros muestran una composición iónica “Sulfatada – Cálctica” para Grupo Tacaza con excepción del piezómetro (PZAP-09) que presenta una facie “Bicarbonatada Sódica”; mientras que, el manantial muestra una composición iónica “Sulfatada – Cálctica” para el Grupo Barroso. De acuerdo con la ubicación geográfica de la zona de estudio, se esperaría una composición química general “Bicarbonatada – Cálctica” según Sánchez (2014). Esto denotaría que el agua subterránea se ve influenciada por cationes Na^{+} vinculados probablemente a las zonas de alteración vinculadas al yacimiento y aniones SO_4^{2-} por la cercanía a los cuerpos mineralizados con presencia de sulfuros. Esta hipótesis preliminar será detallada en el siguiente apartado de procesos hidroquímicos.

Tabla 43*Facies de Agua Subterránea*

Código	Facie General	Microcuenca	Microcuenca / Ubicación	Litología Modelo 3D
PZ-PAD-01	Ca-Na-Mg-SO4	Huamanloma	Aguas Abajo Pad Lixiviación	PN-t
PZ-PAD-03	Ca-SO4	Huamanloma	Aguas Abajo Pad Lixiviación	PN-t
PZAP-04 (PZAP-03)	Na-Ca-HCO3	Chaviña	Aguas Arriba Botadero Apumayo	PN-t
CASB-APU-02 (PZAP-07)	Ca-SO4	Huamanloma	Aguas Abajo Pad Lixiviación	PN-t
PZAP-09	Ca-SO4-HCO3	Chaviña	Aguas Abajo Botadero Apumayo	PN-t
CASB-APU-03 (PZAP-08)	Ca-Na-SO4-HCO3	Parapacancha	Aguas Arriba Tajo Huamanloma	PN-t
GW-MA-01	Ca-SO4	Chaviña	Aguas Abajo Tajo Apumayo	Qp-b-and

Fuente: Elaboración propia 2024

A continuación, se describen las principales características y facies hidroquímicas del agua subterránea presente en el área de estudio:

- Microcuenca Huamanloma: aguas debajo del Pad de Lixiviación evidencia una composición iónica “Sulfatada Cálcida” pero con presencia de Iones disueltos como Na^{1+} y Mg^{2+} . El piezómetro (PZ-PAD-01) es el más próximo al Pad (< de 10 m) y denota el tipo de facie “Ca-Na-Mg-SO4” mientras que los piezómetros (PZ-PAD-03 y CASB-APU-02) denotan facies Ca-SO4.
- Microcuenca Parapacancha: aguas arriba del Tajo Huamanloma evidencia una composición iónica tipo “Sulfatada Cálcida” con presencia de iones disueltos como Na^{1+} y HCO_3^{1-} . Este piezómetro denota un tipo de agua “Ca-Na-SO4-HCO3”.
- Microcuenca Rio Calicanto: aguas arriba del Botadero Apumayo evidencia una composición iónica tipo “Bicarbonatada Sódica” con

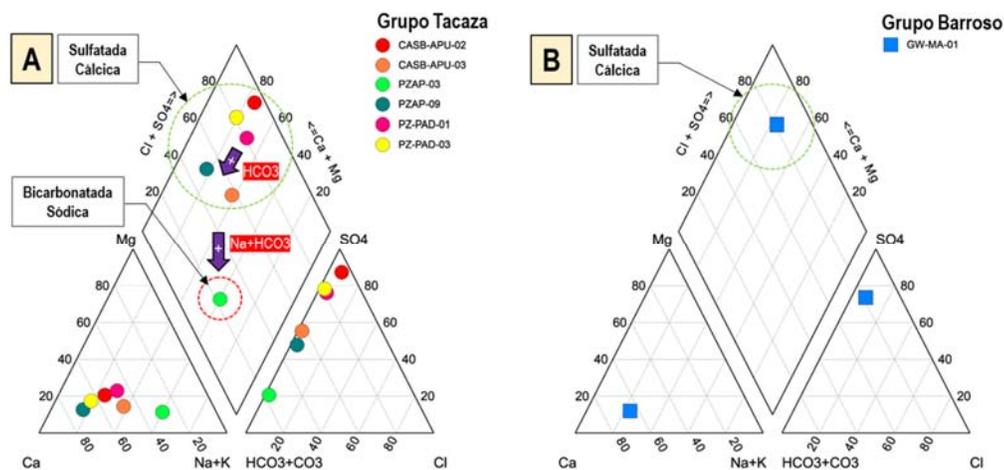
presencia de iones como Ca^{2+} ; mientras que, aguas abajo del Botadero y Tajo Apumayo evidencia una composición iónica tipo “Sulfatada Cálctica” acompañada por la presencia del Ion HCO_3^- . El piezómetro PZAP-04 (PZAP-03) denota un tipo de agua Na-Ca- HCO_3 , mientras que, el piezómetro (PZAP-09) y manantial (GW-MA) denotan facies del tipo Ca- SO_4 - HCO_3 y Ca- SO_4 .

Es importante aclarar que las concentraciones de los iones Sulfato (SO_4^{2-}) y Sodio (Na^+) no superan las concentraciones de 1.8 mg/L y 1.1 mg/L en comparación con las concentraciones típicas en el agua subterránea de 10 – 100 mg/L (Cecamin, 2020; tomado de Edmunds & Smedley, 1995). Por lo tanto, se consideran naturales del medio natural, pero probablemente, influenciadas por los cuerpos mineralizados y alteraciones hidrotermales asociadas.

El **Gráfico 12** muestra los diagramas de Piper para las muestras de agua subterránea recolectadas en diciembre 2018. El **Gráfico 12 A**, asociada al Grupo Tacaza, muestra la predominancia de la facie “Sulfatada Cálctica” en casi todos los piezómetros, a excepción del piezómetro (PZAP-09) que presentó una facie “Bicarbonatada Sódica”. Por otro lado, El **Gráfico 12 B**, asociada al Grupo Barroso, muestra una facie “Sulfatada Cálctica”, no concluyente por la escasez de puntos adicionales asociados el Grupo Barroso.

Gráfico 12

Diagrama Piper Piezómetros y Manantial – Época Húmeda (diciembre 2018)



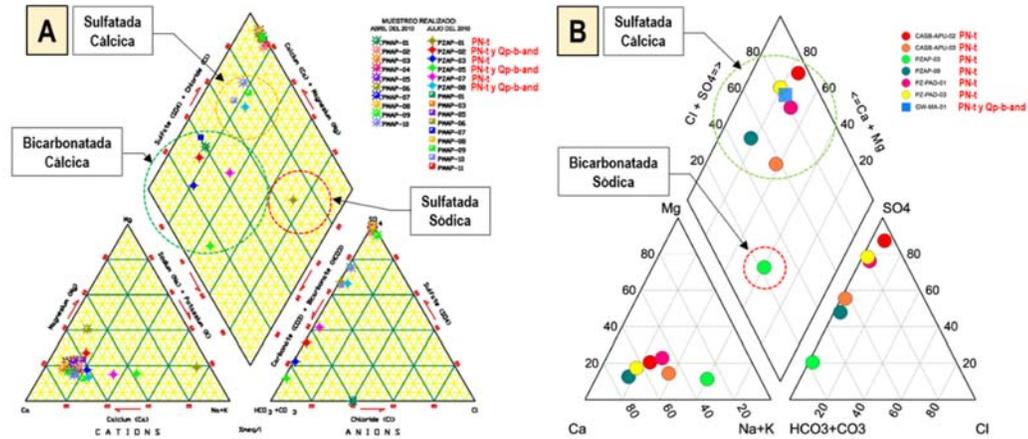
Fuente: Elaboración propia 2024

Por otro lado, el **Gráfico 13 A** muestra que los datos históricos denotan que la composición iónica del agua subterránea presentó una facie “Bicarbonatada Cálcida” en su mayoría, así como, facies “Sulfatada Cálcida” y “Sulfatada Sódica” en menor proporción para la época seca correspondiente a junio 2010 (Walsh, 2010). Mientras que el **Gráfico 13 B** muestra que el agua subterránea presenta facies “Sulfatada Cálcida” en su mayoría, así como, facies “Bicarbonatadas Sódicas” en menor proporción para la época húmeda correspondiente a diciembre 2018. Se detectaron que tres (03) estaciones fueron monitoreadas el 2010 y 2018, donde, el piezómetro (PZAP-03), en época seca presenta una facie “Bicarbonatada Cálcida” mientras que en la época húmeda presenta una facie “Bicarbonatada Sódica”, el piezómetro PZAP-07 (CASB-APU-02) en época seca presenta una facie “Bicarbonatada Cálcida” mientras que en la época húmeda presenta una facie “Sulfatada Cálcida” y, por último, el piezómetro PZAP-08 (CASB-APU-08) en época seca y húmeda presentan una facie “Bicarbonatada Cálcida”. Esto denotaría que, probablemente la facie característica de los grupos Barros y Tacaza son del tipo “Bicarbonatada Cálcida” y “Sulfatada Cálcida” en ambientes volcánicos andesíticos con

concentraciones bajas ($< 1.9 \text{ mg/L}$) de los iones principales (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , HCO_3^{-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y Cl^{-}).

Gráfico 13

Diagrama Piper Piezómetros y Manantial: Época Seca (julio 2010) y Época Húmeda (diciembre 2018)



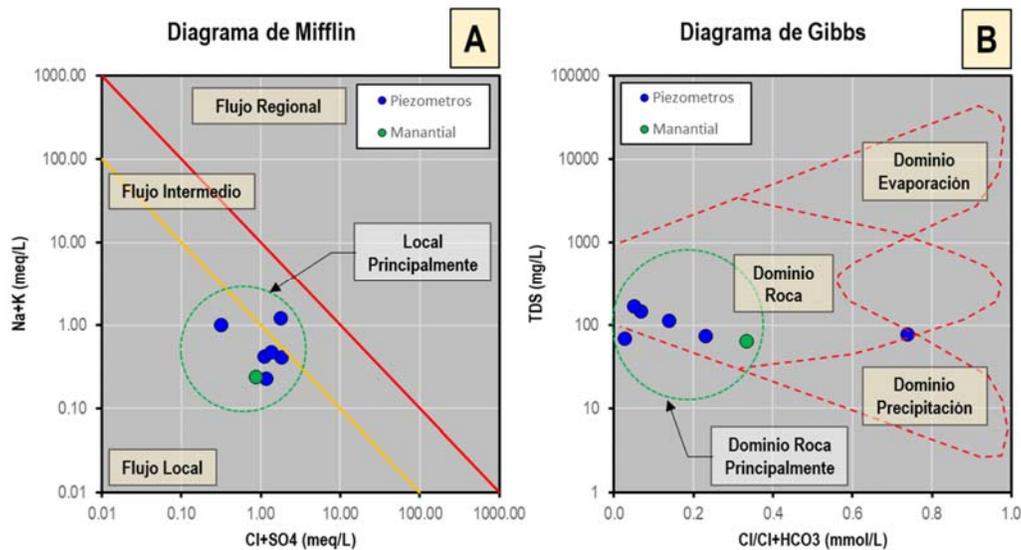
Fuente: Walsh (2010) y Elaboración Propia 2024

4.9 Procesos Hidroquímicos del Agua Subterránea

El **Gráfico 14 A** muestra el Diagrama de Mifflin (Cantú, y otros, 2021), donde, se puede observar que la mayoría las fuentes de agua subterráneas se caracterizan como flujos subterráneos locales dentro del sistema hidrogeológico. Por otro lado, el **Gráfico 14 B** muestra el Diagrama de Gibbs (Zhang, y otros, 2020), donde, se observa que las aguas subterráneas heredan o son influenciadas principalmente por procesos de alteración de la roca presente en el área de estudio y algo de procesos de precipitación.

Gráfico 14

Gráfico Mifflin (Flujo Asociado) y Gibbs del Agua Subterránea (Proceso Asociado)



Fuente: Elaboración Propia 2024

Por lo tanto, se asume que el flujo principal es local y la presencia de iones obedece principalmente a procesos de alteración de la roca (alteración ácida de los minerales aluminosilicatos primarios a arcillas y óxidos), así como, a la presencia de cuerpos mineralizados y alteraciones asociadas. De acuerdo con este contexto se observa que los feldspatos son los principales minerales de aluminosilicatos encontrados en las rocas que contienen silicatos como los granitos, otros minerales como los piroxenos, anfíboles y biotitas pueden estar igualmente presentes en el caso de las andesitas y/dioritas.

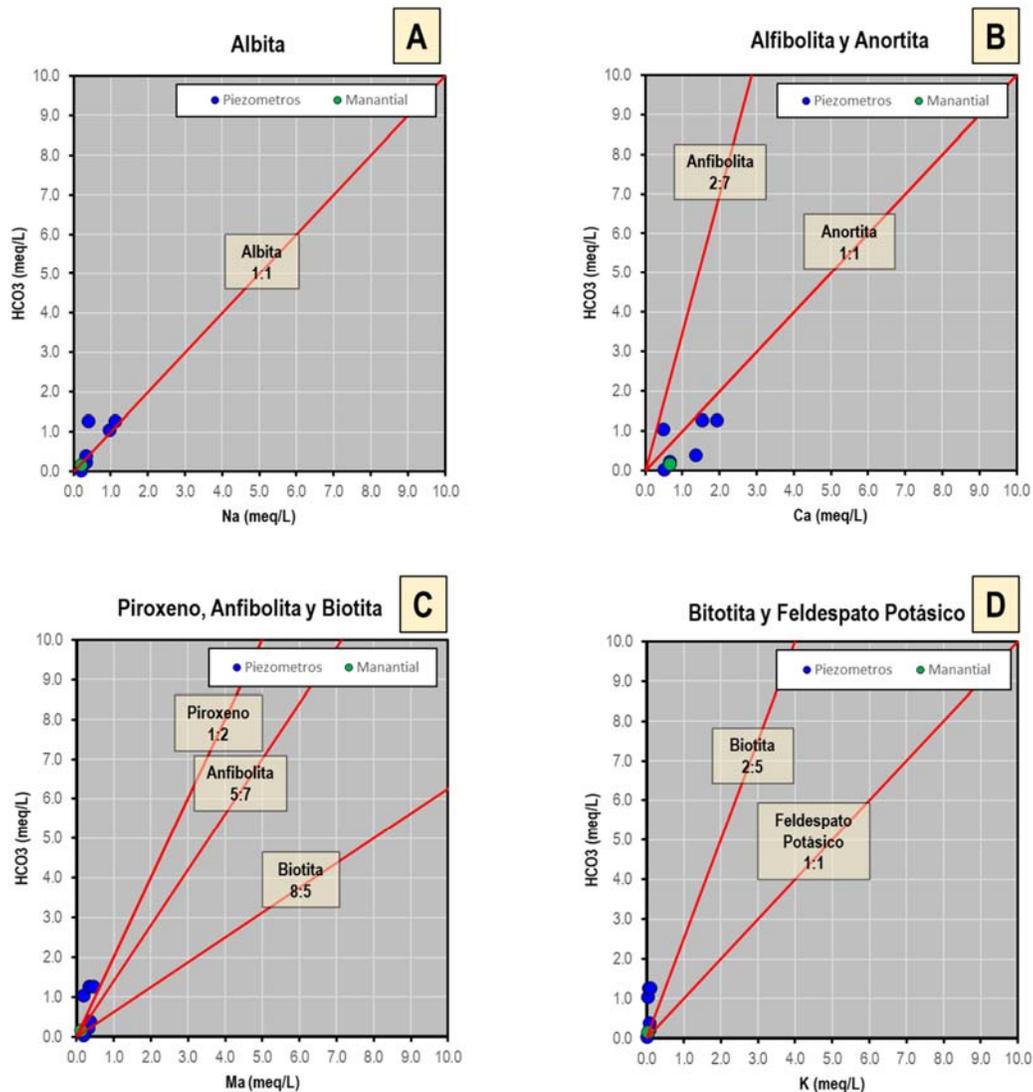
El Gráfico 15 muestra los diagramas bivariados del anión principal HCO_3^- en comparación con cuatro (04) cationes principales (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) y anión (SO_4^{2-}), tomando en consideración las ratios de las ecuaciones presentadas en la Tabla 10. El **Gráfico 16 A** muestra que las concentraciones del ion Na^+ son originadas por la alteración de la Albita (presente en las plagioclasas) a Kaolinita, presente en las

plagioclasas. Mientras que, el **Gráfico 16 D** muestra que el ion K^{1+} se formaría por la alteración de la Biotita a Kaolinita más no por la alteración del Feldespato Potásico; esto es congruente por la presencia de roca composición andesíticas. **Gráfico 16 B** muestra que el ion Ca^{2+} estaría vinculado a la alteración de la Anortita e Kaolinita y parcialmente de la Anfibolita. Finalmente, el **Gráfico 16 B** muestra que el Mg^{2+} estaría vinculado a la alteración los Piroxenos y Biotita y parcialmente vinculado a las Anfibolitas.

Esto denotaría que las características hidroquímicas del agua estarían asociados a la alteración de secuencias volcánicas presencia de anfíboles, piroxenos, biotitas y plagioclasas con porcentajes de Anortita y Albita en su composición; lo cual es congruente con los flujos y lavas andesíticos descritas en el apartado de geología (INGEMMET , 2017).

Gráfico 16

Diagramas Bivariados del HCO_3^- (meq/L) vs otros parámetros hidrogeoquímicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+)



Fuente: Elaboración Propia 2024

4.10 Hidrogramas Históricos de Niveles de Agua Subterránea

A continuación, se realiza un análisis de los hidrogramas históricos de los 23 piezómetros, todos de tipo “Tubo Abierto” o “Casagrande”, considerando la distribución espacial al Pad de Lixiviación Diques; y Tajos y Botaderos Huamanloma, Apumayo y Ayahuanca.

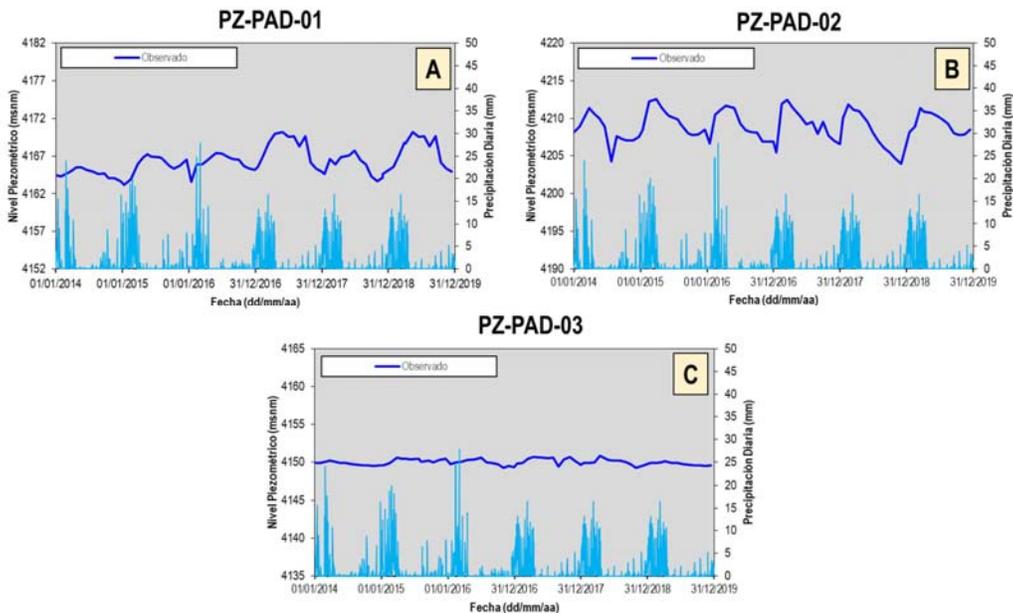
4.10.1 Zona Pad de Lixiviación

Los tres (03) piezómetros PZ-PAD-01, PZ-PAD-02 y PZ-PAD-03 registraron niveles históricos entre 2 a 15 m por debajo de la superficie. Las cotas piezométricas oscilan entre 4163 y 4213 msnm; de manera individual el PZ-PAD-01 oscilan entre 4163 a 4170 msnm (Ver **Gráfico 17 A**), el PZ-PAD-02 varía entre 4204 a 4213 msnm (Ver **Gráfico 17 B**), y finalmente, el PZ-PAD-03 cambia entre 4149 a 4151 msnm (Ver **Gráfico 17 C**). Los gráficos no se presentan grandes oscilaciones en las cotas piezométricas (generalmente inferiores a 9 m). Por otra parte, se puede observar que el nivel del agua subterránea se comporta de acuerdo con recarga, subiendo conforme se incrementa la precipitación.

Por último, tenemos información de cuatro (04) piezómetros PZ-PAD-04, PZ-PAD-05, PZ-PAD-06 y PZ-PAD-07 limitada a dos (02) campañas 2018 y 2019 y niveles entre 1.3 a 39.8 m. Las cotas piezométricas oscilan entre 4160 y 4230 msnm; de manera individual el PZ-PAD-04 oscilan entre 4161 a 4166 msnm, el PZ-PAD-05 varía entre 4160 a 4168 msnm, el PZ-PAD-06 varía entre 4218 a 4230 msnm, y finalmente, el PZ-PAD-07 cambia entre 4179 a 4180 msnm. No se observan grandes oscilaciones en las cotas piezométricas (generalmente inferiores a 12 m).

Gráfico 17

Hidrogramas Pad de Lixiviación vs Precipitación Diaria



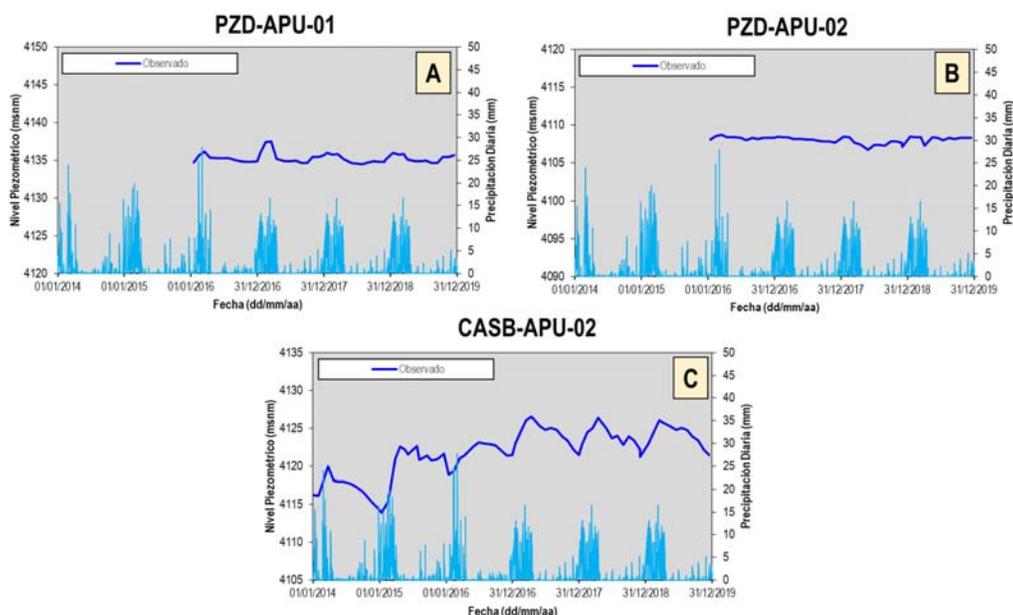
Fuente: Elaboración Propia 2024

4.10.2 Zona Diques

Los tres (03) piezómetros PZD-APU-01, PZD-APU-02 y CASB-APU-02 presentaron niveles históricos entre 3 a 16 m por debajo de la superficie. Las cotas piezométricas oscilan entre 4107 y 4137 msnm, de manera individual el PZD-APU-01 oscilan entre 4134 a 4137 msnm (Ver **Gráfico 18 A**), el PZD-APU-02 varía entre 4107 a 4109 msnm (Ver **Gráfico 18 B**), y finalmente, el CASB-APU-02 cambia entre 4114 a 4127 msnm (Ver **Gráfico 18 C**). Los gráficos no se presentan grandes oscilaciones en las cotas piezométricas (generalmente inferiores a 4 m, a diferencia del CASB-APU-02 con 13 m). Las variaciones de nivel de agua muestran un comportamiento ligeramente anómalo, parcialmente vinculados a la recarga, posiblemente influenciados por las características de cada Dique (diseño, barreras, etc.). Sin embargo, este análisis no detallará este comportamiento por data complementaria de diseños y/o asbult de estos diques.

Gráfico 18

Hidrogramas Diques vs Precipitación Diaria



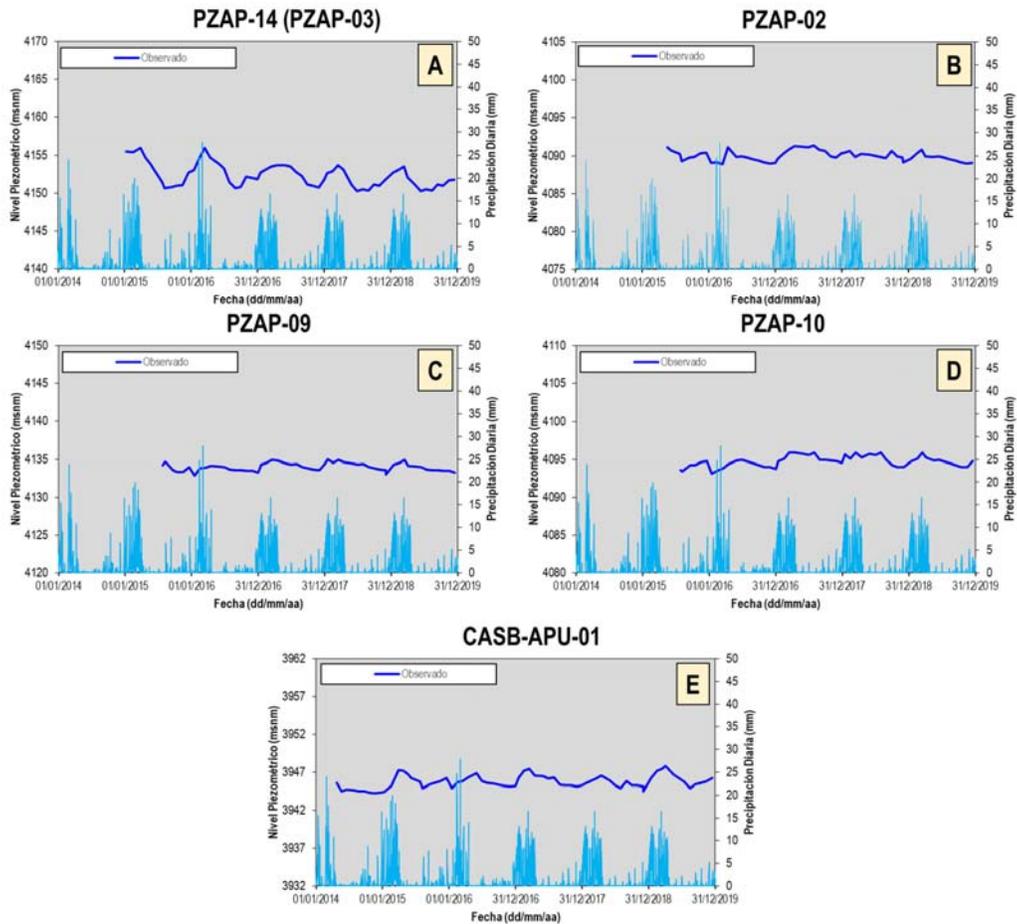
Fuente: Elaboración Propia 2024

4.10.3 Zona Tajo y Botadero Apumayo

Los cinco (05) piezómetros PZAP-04 (PZAP-03), PZAP-02, PZAP-09, PZAP-10 y CASB-APU-01 registraron niveles históricos entre 2 a 43 m por debajo de la superficie. Las cotas piezométricas oscilan entre 3944 y 4156 msnm; de manera individual el PZAP-04 oscilan entre 4147 a 4156 msnm (Ver **Gráfico 19 A**), el PZAP-02 varía entre 4089 a 4091 msnm (Ver **Gráfico 3 B**), el PZAP-09 varía entre 4132 a 4133 msnm (Ver **Gráfico 19 C**), el PZAP-10 varía entre 4092 a 4096 msnm (Ver **Gráfico 19 D**), y finalmente, el CASB-APU-01 cambia entre 3944 a 3948 msnm (Ver **Gráfico 19 E**). Los gráficos no se presentan grandes oscilaciones en las cotas piezométricas (generalmente inferiores a 9 m). Se puede observar que el nivel del agua subterránea se comporta de acuerdo la recarga, subiendo conforme se incrementa la precipitación.

Gráfico 19

Hidrogramas Tajo y Botadero Apumayo vs Precipitación Diaria



Fuente: Elaboración Propia 2024

4.10.4 Zona Tajo y Botadero Ayahuanca

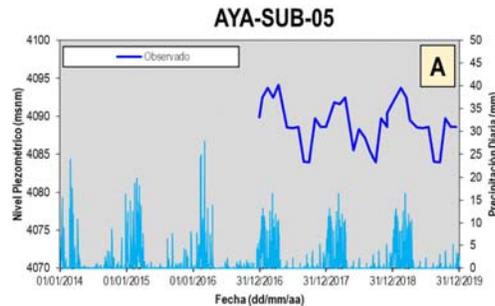
El piezómetro AY-SUB-05 registró niveles históricos entre 9 a 23 m por debajo de la superficie. Las cotas piezométricas oscilan entre 4079 a 4094 msnm (Ver **Gráfico 20 A**). Los gráficos no se presentan grandes oscilaciones en las cotas piezométricas (generalmente inferiores a 15 m). Se puede observar que el nivel del agua subterránea se comporta de acuerdo la recarga, subiendo conforme se incrementa la precipitación.

Por último, tenemos información de dos (02) piezómetros AYA-SUB-04 y AYA-SUB-02 limitadas a dos (02) campañas 2018 y 2019 y niveles entre 157.9 a 186.1 m. Las

cotas piezométricas oscilan entre 3885 y 3996 msnm; de manera individual el AYA-SUB-04 ronda por los 3885 msnm y el AYA-SUB-04 ronda los 3996 msnm. No se observan oscilaciones significativas en las cotas piezométricas.

Gráfico 20

Hidrogramas Tajo y Botadero Ayahuanca vs Precipitación Diaria



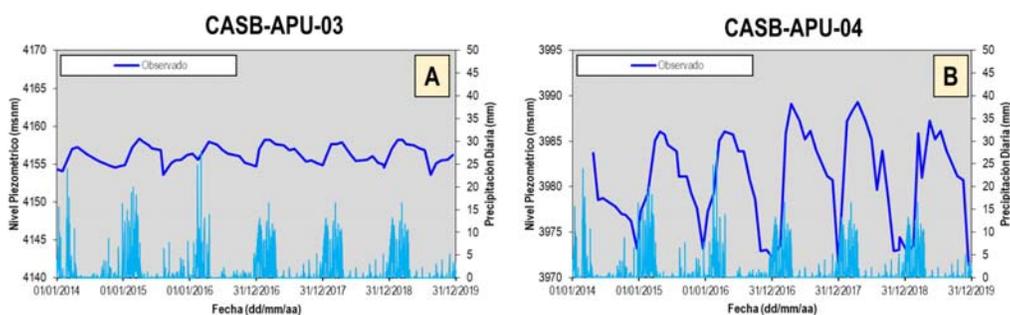
Fuente: Elaboración Propia 2024

4.10.5 Zona Tajo y Botadero Huamanloma

Los dos (02) piezómetros CASB-APU-03 (PZAP-08) y CASB-APU-04 (PZAP-05) registraron niveles históricos entre 3 y 48 m por debajo de la superficie. Las cotas piezométricas oscilan entre 3969 a 4158 msnm, de manera individual el CASB-APU-03 oscilan entre 4154 a 4158 msnm (Ver **Gráfico 21 A**) y el CASB-APU-04 cambia entre 3969 a 3989 msnm (Ver **Gráfico 21 B**). Los gráficos no se presentan grandes oscilaciones en las cotas piezométricas (generalmente inferiores a 5 m, a diferencia del CASB-APU-04 con 22 m). Se puede observar que el nivel del agua subterránea se comporta de acuerdo la recarga, subiendo conforme se incrementa la precipitación.

Gráfico 21

Hidrogramas Tajo y Botadero Huamanloma vs Precipitación Diaria



Fuente: Elaboración Propia 2024

En general, en los entornos del Tajo y Botadero Apumayo, así como, el Pad de Lixiviación se observaron niveles de agua subterránea superficiales (nivel de agua < 40 m). Desde un punto de vista geológico, en este sector, se tiene una mayor presencia de afloramientos del Grupo Tacaza con espesores máximos, mientras que, el Grupo Barroso se restringe a finos afloramientos. Por otro lado, los entornos de los tajos y botaderos Huamanloma y Ayahuanca se observaron y/o infirieron niveles de agua subterránea profundos (nivel de agua < 180 m y en algunos casos secos). Desde un punto de vista geológico, en estos sectores se tiene una mayor presencia de afloramientos del Grupo Barroso con mayores espesores (de hasta < 200 m).

Finalmente, esto denotaría que los niveles de agua subterránea dentro de las secuencias volcánicas del Grupo Tacaza son casi cercanos a la superficie; mientras que, los niveles de agua subterránea dentro de las secuencias volcánicas del Grupo Barroso son más profundos. Esto sugiere que las características hidráulicas del Grupo Tacaza son inferiores a las del Grupo Barroso; respaldado por el análisis de permeabilidades, donde, el Grupo Barroso presenta conductividades probables superiores a las del Grupo Tacaza (Ver apartado de Hidráulica Subterránea).

4.11 Modelo Hidrogeológico Conceptual

4.11.1 Balance del Acuífero

El balance constituye la evaluación cuantitativa, espacial y temporal, de los flujos de agua subterránea entrantes y salientes de un sistema llamado volumen de control. Este se fundamenta en la aplicación del principio de conservación masa, también conocido como ecuación de continuidad.

$$\sum \text{Entradas} - \sum \text{Salidas} = \Delta S \quad (\text{Ecuación 35})$$

El desarrollo del balance hídrico para el área de estudio; se sustenta en un sistema en equilibrio, es decir la variación de almacenamiento del medio hidrogeológico para cada ciclo hidrológico es despreciable a condiciones naturales a largo plazo. Por lo tanto, el sistema hidrogeológico permite que los ingresos sean igual a las salidas según la ecuación de continuidad. Para el presente estudio, el volumen de control está determinado por cada una de las siete (07) microcuencas superficiales: Jailpasca, Jispicahua, Chaviña, Huamanloma, Cuchuhuasi, Parapacancha y Auropata.

El balance del acuífero (volumen de control) depende del balance de suelos en superficie, debido a que este permite estimar el valor de la recarga (principal parámetro de entrada), que es una fracción del agua que se infiltra potencialmente a través del suelo, y percola a través de la zona no saturadas, hasta llegar a la zona saturada. La siguiente ecuación simplifica los probables componentes a los cuales está sometido el proceso de recarga que ingresa al sistema hidrogeológico:

$$\text{Recarga (\% Precipitación)} = \text{Descarga} + \text{Extracción} \quad (\text{Ecuación 36})$$

Donde:

Descarga: suma de caudales base estimados y manantiales para cada microcuenca.

Extracción: extracción de agua subterránea por bombeo. APUMAYO indicó que no se extrae agua de ninguno de los tajos abiertos puesto que su presencia es mínima a nula. Por lo tanto, este factor de extracción es igual a cero (0).

4.11.1.1 Entradas al Sistema Acuífero

Dentro de los términos naturales que interactúan, en el sistema ya establecido, se define la recarga potencial al acuífero como el proceso natural por el cual se produce el ingreso de agua al acuífero, en este caso, considerada como única fuente la precipitación.

4.11.1.1.1 Recarga del Acuífero

La recarga del acuífero se llevará a cabo sólo si la cantidad de agua que se infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y satisfacer la evapotranspiración de las plantas; además, de recargar el sistema hidrogeológico. Para nuestro objetivo, se asume que, la recarga potencial es equivalente al caudal base estimado por el Método de Eckhardt (2004) tomando en consideración los supuestos de la ecuación de continuidad y microcuencas como volúmenes de control.

La **Tabla 44** resume los valores de caudal base estimados para las siete (07) microcuencas. Los valores de recarga estimados oscilan entre 54.7 mm/año a 104.4 mm/año; esto representan el 13 a 18% de la precipitación media anual que cae sobre el área de estudio. La **Figura 21** muestra una recarga estimada de 80mm/año para el Grupo Barro con 80 mm/año y 70 mm/año para el Grupo Tacaza. Sin embargo, de acuerdo con las necesidades de calibración del modelo hidrogeológico numérico estos valores asignados pueden ser ajustados tomando en consideración los rangos de recarga media anual mínimos y máximos.

Tabla 44

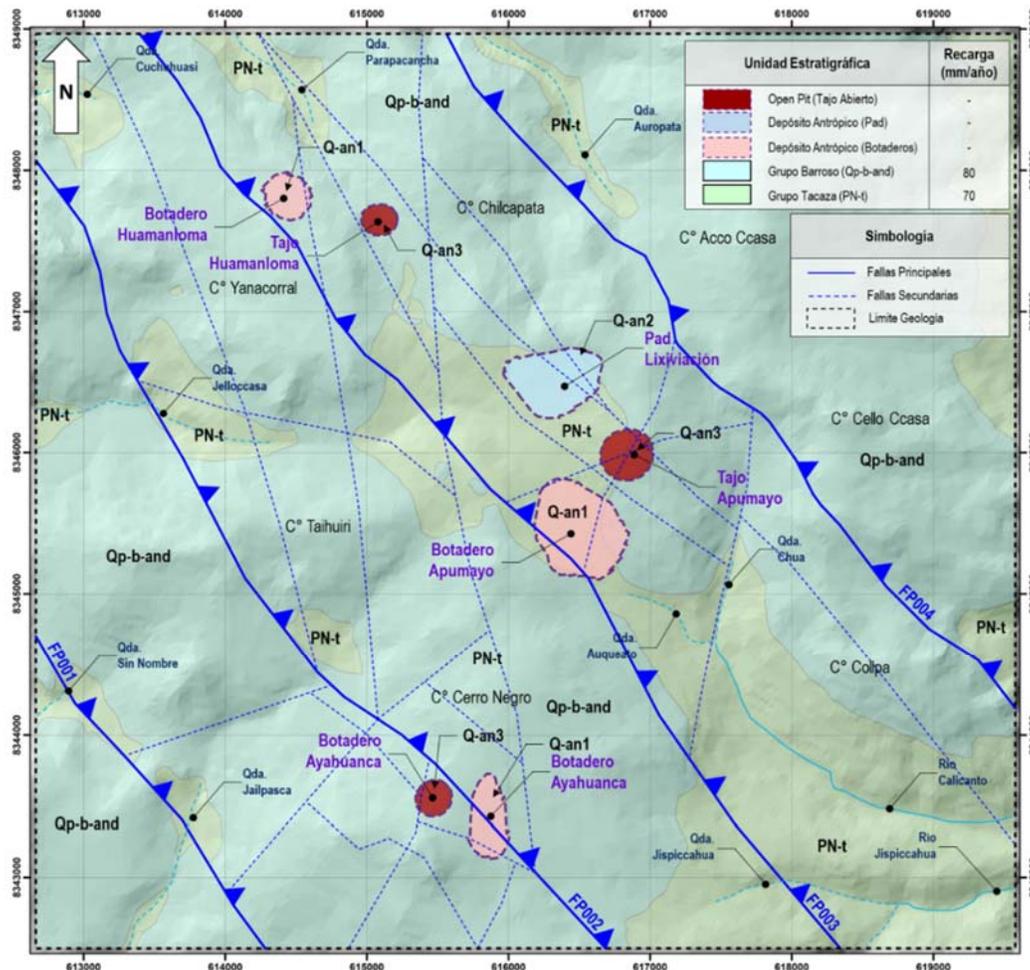
Valores de Recarga Estimados

Microcuenca	Precipitación Media Anual		Recarga Media Anual		
	(mm/año)	L/s	(mm/año)	L/s	Porcentaje
Auropata	570.0	1754.9	104.4	321.0	18%
Chaviña	494.8	1737.1	80.0	279.7	16%
Cuchuhuasi	424.5	900.8	54.7	117.0	13%
Jailpasca	457.3	3263.9	65.6	469.3	14%
Huamanloma	471.0	1653.6	70.4	246.3	15%
Jispicahua	463.7	1985.8	69.4	297.3	15%
Parapacancha	477.4	994.6	72.5	151.3	15%

Fuente: Elaboración Propia 2024

Figura 21

Recarga Potencial Estimada



Fuente: Elaboración Propia 2024

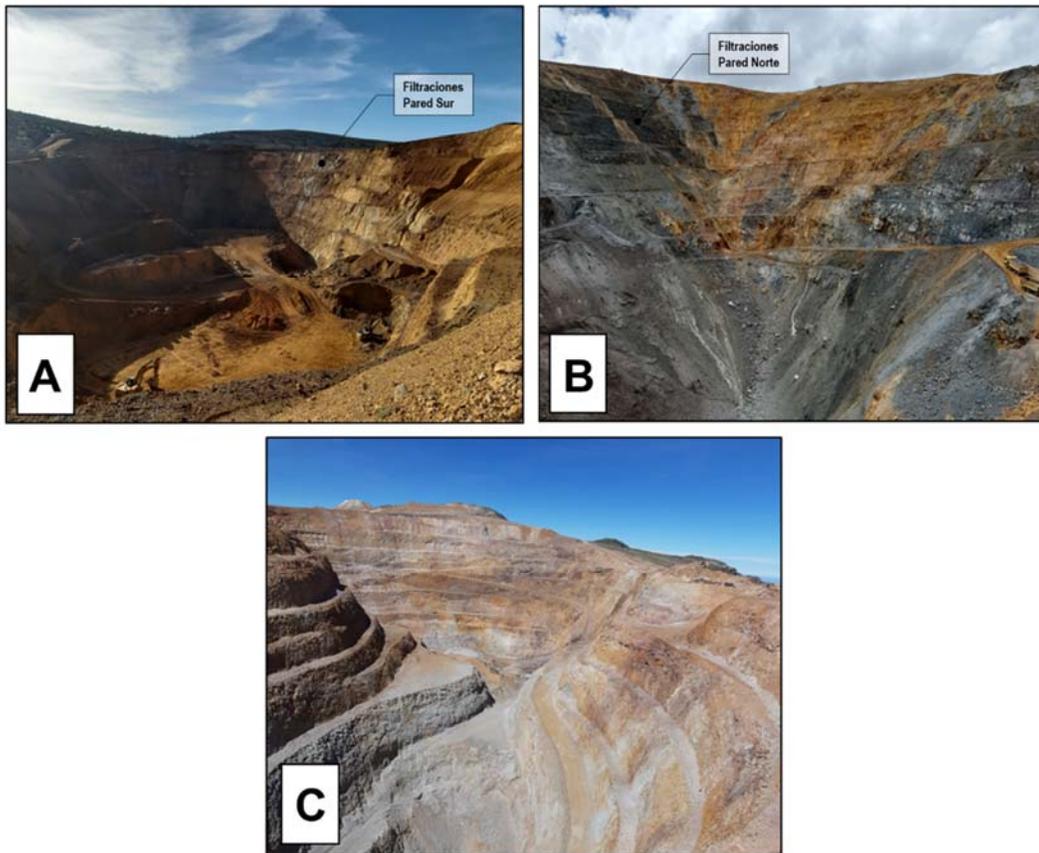
4.11.1.2 Salida del Sistema Acuífero

4.11.1.2.1 Extracción de los Tajos

En APUMAYO no se evidenció extracción a través de sistema de bombeo activo de los tajos Apumayo, Huamanloma y Ayahuanca; por lo tanto, esta variable no es considerada dentro de balance del acuífero. Sin embargo, la visita de campo desarrollada en noviembre y diciembre 2018, y marzo y abril 2019 mostró pequeñas filtraciones de agua (drenaje pasivo) con órdenes de 2 a 3 L/s hacia la pared norte del Tajo Apumayo **(B)** entre los contactos del Grupo Barroso y Tacaza. Mientras que el Tajo Huamanloma presentó filtraciones y humedad hacia la pared sur del tajo **(Foto 3 A)**. Finalmente, se evidenció el Tajo Ayahuanca totalmente seco **(Foto 3 C)**.

Foto 3

Estado Tajos Año 2019



Fuente: Elaboración Propia 2024

4.11.1.2.2 Descargas hacia la Microcuencas

Se parte del concepto que el caudal base constituye la fracción de alimentación proveniente del aporte subterráneo que reciben los cuerpos de agua superficial (quebrada o río). Por lo tanto, la configuración general conceptual asumida para las quebradas y ríos es de carácter ganador; debido a que incide de manera positiva al curso de flujo de agua superficial. La **Tabla 45** resume el caudal base estimado por el Método de Eckhardt (2004) y de acuerdo con las consideraciones teóricas son equivalentes al porcentaje de recarga en cada microcuenca.

Tabla 45*Valores de Caudal Base Estimados*

Microcuenca	Precipitación Media Anual		Caudal Base Medio Anual		
	(mm/año)	L/s	(mm/año)	L/s	Porcentaje
Auropata	570.0	1754.9	104.4	321.0	18%
Chaviña	494.8	1737.1	80.0	279.7	16%
Cuchuhuasi	424.5	900.8	54.7	117.0	13%
Jailpasca	457.3	3263.9	65.6	469.3	14%
Huamanloma	471.0	1653.6	70.4	246.3	15%
Jispicahua	463.7	1985.8	69.4	297.3	15%
Parapacancha	477.4	994.6	72.5	151.3	15%

Fuente: Elaboración Propia 2024

4.11.2 Unidades Hidrogeológicas

Considerando las unidades geológicas, se han definido dos (02) unidades hidrogeológicas correspondientes al Grupo Barroso y Grupo Tacaza. En términos generales, el Grupo Barroso presenta conductividades probables de $5e-6$ m/s superiores a las del Grupo Barroso de $2.8e-6$ m/s. Estos valores oscilan en rangos entre $1.0e-7$ a $1.0e-4$ m/s lo cual denotaría un medio hidrogeológico “Poco Permeable”.

La **Tabla 46** muestra la variación vertical de la conductividad hidráulica vs la profundidad media de los ensayos hidráulicos asumidos para la representación conceptual y numérica, donde, hasta los hasta los 50 m los valores más probables de permeabilidad oscilan entre $2.9e-6$ y $4.5e-7$ m/s, hasta los 100 m los valores oscilan entre $2.9e-7$ y $1.0e-7$ m/s; hasta los 150 m los valores oscilan entre $2.9e-8$ y $1.0e-8$ m/s, mientras que, hasta los 250 m los valores oscilan entre $2.9e-9$ y $1.0e-9$ m/s y finalmente, pasando a ordenes entre $1.0e-1$ m/s a profundidades superiores a 250 m. Además, muestra la existencia de factores de anisotropía de la conductividad hidráulica con respecto a la profundidad en ordenes de 10 ($K_x = K_y = 10 * K_z$) hasta los 70 m, de 10 entre 50 hasta 150 m ($K_x = K_y = 10 * K_z$), de 10 entre 150 hasta 250 m ($K_x = K_y = 10 * K_z$), y finalmente, de 10 a

profundidades superiores a 250 m ($K_x = K_y = 10 \cdot K_z$). Por lo tanto, se asume que a profundidades superiores a los 250 m la permeabilidad siga disminuyendo, pasando gradualmente a rangos de baja permeabilidad a impermeable, lo cual respaldaría un medio hidrogeológico “Poco Permeable a Impermeable”.

Tabla 46

Características Unidades Hidrogeológicas

UH	Prof. (mbnt)	Conductividad			S _s	S _r	α (1/m)	n	m	δ	Ss (1/m)
		K _x (m/s)	K _y (m/s)	K _z (m/s)							
UH-GB (Grupo Barroso)	< 50	2.9e-6	2.9e-6	2.9e-7	1	0.23	2.5	1.5	0.33	1	1.0E-4
	< 100	2.9e-7	2.9e-7	2.9e-8	1	0.23	2.5	1.5	0.33	1	1.0E-4
	< 150	2.9e-8	2.9e-8	2.9e-9	1	0.23	2.5	1.5	0.33	1	1.0E-4
	< 250	2.9e-9	2.9e-9	2.9e-10	1	0.23	2.5	1.5	0.33	1	1.0E-4
UH-GT (Grupo Tacaza)	< 50	4.5e-7	4.5e-7	4.5e-7	1	0.33	2.5	1.3	0.23	1	1.0E-4
	< 100	1.0e-7	1.0e-7	1.0e-7	1	0.33	2.5	1.3	0.23	1	1.0E-4
	< 150	1.0e-8	1.0e-8	1.0e-8	1	0.33	2.5	1.3	0.23	1	1.0E-4
	< 250	1.0e-9	1.0e-9	1.0e-9	1	0.33	2.5	1.3	0.23	1	1.0E-4
	> 250	1.0e-10	1.0e-10	1.0e-10	1	0.33	2.5	1.3	0.23	1	1.0E-4

Fuente: Elaboración Propia 2024

4.11.2.1 UH-GB: Grupo Barroso

Esta unidad abarca una secuencia de lavas andesíticas. El espesor puede alcanzar los 200 m, donde los máximos espesores fueron mapeados hacia los extremos NE y SO; mientras, que el espesor disminuye hacia la parte central y más alta del área de estudio. Los ensayos hidráulicos muestran una permeabilidad probable general de 5.0e-6 m/s que denota una un medio hidrogeológico “Poco Permeable” según Custodio y Llamas (1996). Además, se identificaron factores de anisotropía con respecto a la profundidad en ordenes de 10 ($K_x = K_y = 10 \cdot K_z$) hasta los 50 m, de 10 entre los 50 a 100 m ($K_x = K_y = 10 \cdot K_z$), de 10 entre 100 hasta 150 m ($K_x = K_y = 10 \cdot K_z$) y de 10 entre 250 hasta 250 m ($K_x = K_y = 10 \cdot K_z$).

Por otro lado, para el Grupo Barroso se asumen valores de transmisividad ligeramente superior al Grupo Tacaza ($5 < T < 50 \text{ m}^2/\text{d}$) que mantienen una estimación conservadora con respecto a las pruebas de bombeo desarrolladas por Walsh (2010); esto denotaría un “Potencial Bajo” del medio hidrogeológico según Zekai Sen (2015). Finalmente, el valor de coeficiente de almacenamiento oscila entre los $3.0\text{e-}1$ y $1.0\text{e-}2$ (adimensional) conservadores a los estimados por Walsh (2010), sin embargo, podríamos considerar valores inferiores entre $1.0\text{e-}3$ y $1.0\text{e-}4$. Por lo tanto, esto denotaría un comportamiento hidrogeológico fracturado “Libre o Semiconfinado” o en otras palabras el agua proviene del vaciado de poros y descompresión del medio hidrogeológico según Sánchez (2014).

4.11.2.2 UH-GT: Grupo Tacaza

Esta unidad abarca una secuencia de flujos andesíticos verdosos, areniscas y limolitas gris violáceas con aglomerados. Es espesor puede alcanzar un máximo de 1200 m hacia la parte central y más alta del área de estudio. Los ensayos hidráulicos muestran una permeabilidad probable general de $2.8\text{e-}6 \text{ m/s}$ que denota un medio hidrogeológico “Poco Permeable” según Custodio y Llamas (1996). Además, se identificaron factores de anisotropía con respecto a la profundidad en ordenes de 10 ($K_x = K_y = 10 * K_z$) hasta los 50 m, de 10 entre los 50 a 100 m ($K_x = K_y = 10 * K_z$), de 10 entre 100 hasta 150 m ($K_x = K_y = 10 * K_z$), de 150 entre 250 hasta 250 m ($K_x = K_y = 10 * K_z$) y de 10 a profundidades superiores a 250 m ($K_x = K_y = 10 * K_z$).

Por otro lado, para el Grupo Tacaza se estimaron valores de transmisividad entre 0.2 a $3.7 \text{ m}^2/\text{d}$ (Walsh, 2010) que denotaría un “Potencial Insignificante” según Zekai Sen (2015). Finalmente, los rangos de coeficiente de almacenamiento estimados por Walsh (2010) oscilan entre $3.7\text{e-}3$ y $9.5\text{e-}01$ (adimensional), conservadores a los estimados por Walsh (2010), sin embargo, podríamos considerar valores inferiores entre

1.0e-3 y 1.0e-4. Por lo tanto, esto denotaría un comportamiento hidrogeológico fracturado “Libre o Semiconfinado” o en otras palabras el agua proviene del vaciado de poros y descompresión del medio hidrogeológico según Sánchez (2014).

Finalmente, la mayoría de los mapas hidrogeológicos presentan una clasificación cualitativa de la productividad potencial de los acuíferos, establecida por expertos en hidrogeología. La productividad potencial de los acuíferos generalmente se estima a partir de la litología y el tipo de flujo (p.ej., intergranular, fracturado o kárstico) y, a menudo, se clasifica según un esquema cualitativo simple (p.ej., bajo, moderado y alto). Existe un esquema de clasificación de referencia, ampliamente aplicado y bien conocido. Esta es la propuesta para la Leyenda Internacional para Mapas Hidrogeológicos desarrollada por grupos de trabajo AIH/IAHS/UNESCO (Unesco et al, 1970, Struckmeier et al, 1983) y publicado bajo el nombre “Hydrogeological Maps – A Guide and a Standard Legend” (Struckmeier y Margat 1995 tomado de Heckmann 2022).

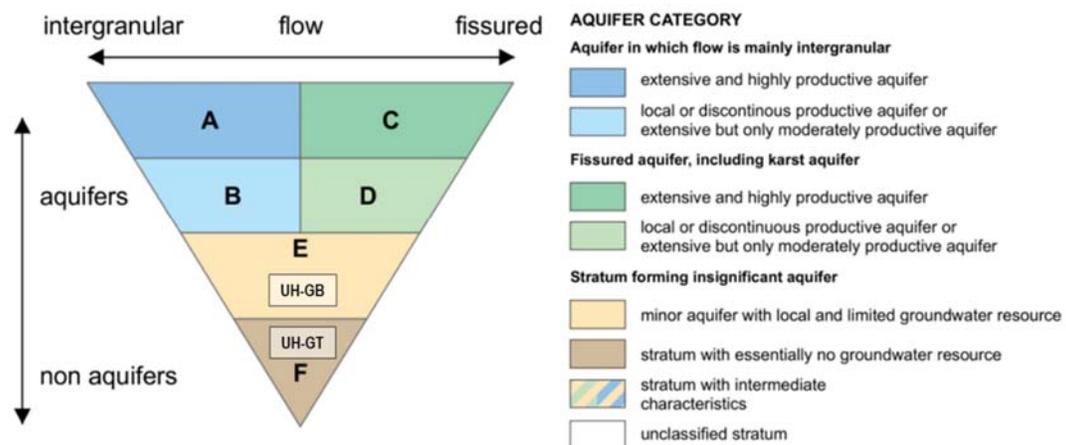
La **Figura 22** muestra el esquema de clasificación de acuíferos propuesto por Struckmeier y Margat (1995). Este esquema toma en consideración el flujo a través del medio granular y/o fisurado y el comportamiento de este medio como acuíferos y no acuíferos, donde, se aprecian seis (06) categorías desde la A hasta la F. La Categoría A indica acuíferos extensos y altamente productivos, y la Categoría B indica acuíferos locales o discontinuos productivos; ambos asociados a medios granulares. La Categoría C indica acuíferos extensos y altamente productivos; y la Categoría D indica acuíferos locales o discontinuos productivos; ambos asociados medios fisurados y kársticos. Finalmente, la Categoría E indica acuíferos menores con recursos de agua subterránea local y limitada, y la Categoría F indica la no presencia de recursos de agua subterránea.

Por lo tanto, teniendo en consideración los parámetros hidráulicos de “Conductividad Hidráulica y Transmisividad” se asumen los siguientes conceptos:

- La unidad hidrogeológica “UH-GB: Grupo Barroso” actuaría dentro de la “Categoría E” como acuífero menor con recursos de agua subterránea local y limitado para el área de estudio. Esto respaldado por los rangos de conductividades hidráulicas “Poco Permeables” según Custodio y Llamas (1996) y una transmisividad de “Potencial Bajo” según Zekai Sen (2015).
- La unidad hidrogeológica “UH-GT: Grupo Tacaza” actuaría dentro de la “Categoría F” con la no presencia de recursos de agua subterránea para el área de estudio. Esto respaldado por los rangos de conductividad hidráulica “Poco Permeables a Baja Permeabilidad” según Custodio y Llamas (1996) y una transmisividad de “Potencial Insignificante” según Zekai Sen (2015).

Figura 22

Esquema de Clasificación de Acuíferos – Struckmeier (1995)



Fuente: Extraído de Heckmann (2022)

4.11.3 Piezometría y Dirección de Flujo

Los escenarios previos del sistema hidrogeológico, a la operación minera, nos permiten valorar y/o estimar una línea base, tanto en calidad como cantidad, del medio subterráneo y compararlo con las interacciones producidas por la construcción de Tajos,

Botaderos, Pad de Lixiviación, etc. En este sentido, es necesario remontar en el tiempo y plasmar estas condiciones de pre-minado. Estos respaldos, al menos en hidrogeología, estarían centrados en el monitoreo de niveles y calidad de agua subterránea, por lo tanto, es pertinente aclarar que el tema de calidad de agua subterránea no forma parte de este estudio, esto debido a la escasez temporal y espacial de la información química del agua subterránea. Sin embargo, se presentan un análisis puntual entre 2018 y 2019 de las propiedades fisicoquímicas, así como, composición iónica y procesos asociados para 2019.

El apartado de “Monitoreo de Niveles Piezométricos” muestra la variación de niveles de agua subterránea de 23 piezómetros; donde, 14 cuentan con registros históricos para el periodo 2014 y 2019; seis (06) cuentan con lecturas puntuales entre 2018 y 2019, y finalmente, tres (03) no presentaron columna de agua desde su habilitación. En el Grupo Barroso (UH-GB) fueron habilitados cuatro (04) piezómetros con PZAP-06 y AYA-SUB-03 reportados secos y PZ-PAD-05 (MEIA-BH-01) y AYA-SUB-02 con lecturas puntuales. En el Grupo Tacaza (UH-GT) fueron habilitados 19 piezómetros con PZ-HUA-01 (HUA-DH-01) reportado como seco, AYA-SUB-04, PZ-PAD-06 (MEIA-BH-03), PZ-PAD-07 (MEIA-BH-07) y PZ-PAD-04 (ITS-BH-03) con lecturas puntuales y PZ-PAD-01, PZ-PAD-02, PZ-PAD-03, PZAP-02, PZAP-04 (PZAP-03), PZAP-09, PZAP-10, CASB-APU-01 (PZAP-01), CASB-APU-04 (PZAP-05), PZD-APU-01, PZD-APU-02, CASB-APU-02 (PZAP-07), AYA-SUB-05 y CASB-APU-03 (PZAP-08) con data histórica. En resumen, este apartado mostró que el nivel de agua subterránea se comporta de acuerdo con la recarga, subiendo conforme se incrementa la precipitación sin tendencias aparentes de descenso y/o ascenso. Por lo tanto, en cierta medida, reflejarían las condiciones previas a los procesos operativos mineros y podrían ser tomados como referencia base para los años entre el 2010 y 2014. Sin embargo, esta

afirmación podría ser mayor para aquellos piezómetros habilitados en el Grupo Tacaza, mientras que, para aquellos piezómetros habilitados en el Grupo Barroso esta afirmación podría ser menor o con incertidumbres.

Finalmente, partiendo de la afirmación expuesta previamente, se evidencia que, el flujo natural de agua subterránea, en condiciones de preminado entre el 2010 al 2014, obedece a la distribución espacial de las siete (07) microcuencas con las siguientes apreciaciones:

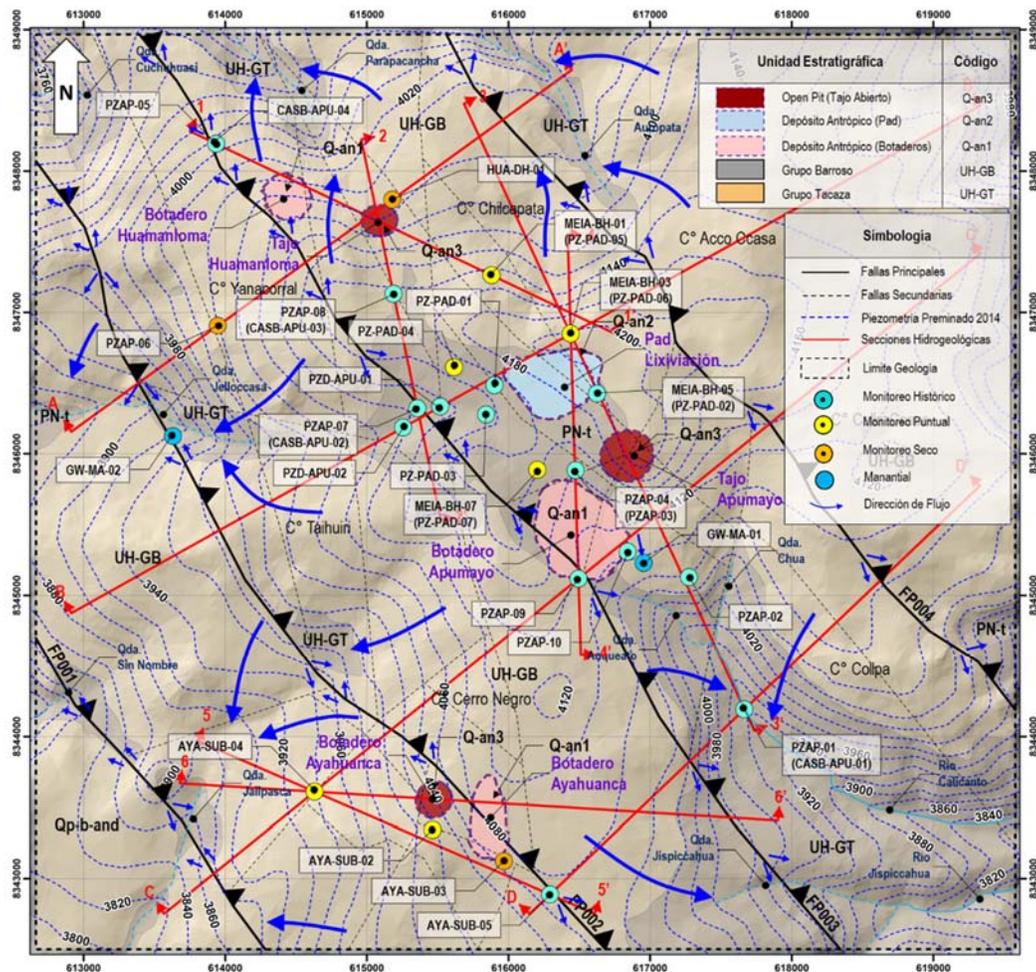
- Hacia la zona norte del área de estudio (microcuencas Auropata, Parapacancha y Cuchuhuasi) el agua subterránea fluye de SE a NW con cotas piezométricas que oscilan entre 4200 a 3760 msnm (Ver **Figura 23**). Las recargas se originarían en la parte alta de las microcuencas y descargarían hacia el fondo de valle y/o quebradas.
- En la zona oeste del área de estudio (Microcuenca Huamanloma) el agua subterránea fluye de E a W con cotas piezométricas que oscilan entre 4200 a 3860 msnm (Ver **Figura 23**). Las recargas se originarían en la parte alta de las microcuencas y descargarían hacia el fondo de valle y/o quebradas.
- En la zona suroeste del área de estudio (Microcuenca Jailpasca) el agua subterránea fluye de NE a SW con cotas piezométricas que oscilan entre 4200 a 3800 msnm (Ver **Figura 23**). Las recargas se originarían en la parte alta de las microcuencas y descargarían hacia el fondo de valle y/o quebradas.
- Hacia la zona sureste del área de estudio (microcuencas Jispicahua y Chaviña) el agua subterránea fluye de NW a SE con cotas piezométricas que oscilan entre 4200 a 3800 msnm (Ver **Figura 23**). Las recargas se

originarían en la parte alta de las microcuencas y descargarían hacia el fondo de valle y/o ríos.

La **Figura 23** muestra las posibles condiciones hidrogeológicas de pre-minado entre los años 2010 y 2014. En general, la recarga se produciría en la parte alta de las microcuencas, mientras, que las descargas estarías vinculadas al fondo de quebradas y/o ríos. Litológicamente, los niveles de agua subterránea para el Grupo Barroso (UH-GB) serían en cierto modo profundos, mientras que, para el Grupo Tacaza (UH-GT) serían superficiales (Ver **Figura 24** y **Figura 25**). Esto en cierto modo indicaría que las descargas y/o manantiales (GW-MA-01 y GW-MA-02) estarían asociados al contacto próximos entre el Grupo Barroso y Tacaza. Esto asociado directamente con la deformación tectónica de la zona de estudio, donde, los movimientos inversos de las fallas inversas con buzamientos al NE facilitaron el levantamiento y/o afloramiento del Grupo Tacaza (Baja Permeabilidad) sobre el Grupo Barroso (Poco Permeable). Esto se puede evidenciar en la parte central del área de estudio, donde se observan niveles superficiales correspondientes al Grupo Tacaza y profundos donde el Grupo Barroso, conservó, en gran medida, su espesor.

Figura 23

Mapa Hidrogeológico



Fuente: Elaboración Propia 2024

La **Figura 24** (secciones regionales) presentan las condiciones hidrogeológicas en sección preminado 2010 y 2014, donde, se observa un fuerte control litológico sobre los niveles de agua subterránea presente en los grupos Barroso y Tacaza. La **Figura 24 – Sección A** muestra niveles profundos en el Grupo Barroso (UH-GB). Esta afirmación se respalda con los monitoreos puntuales de campo 2018 y 2019 de los piezómetros (PZAP-06 y HUA-DH-01) que reportaron estar secos y/o con presencia de humedad (sin columna de agua). La **Figura 24 – Sección B** muestra niveles superficiales en el Grupo Tacaza (UH-CT). Esta afirmación se respalda con los monitoreos históricos y puntuales de los

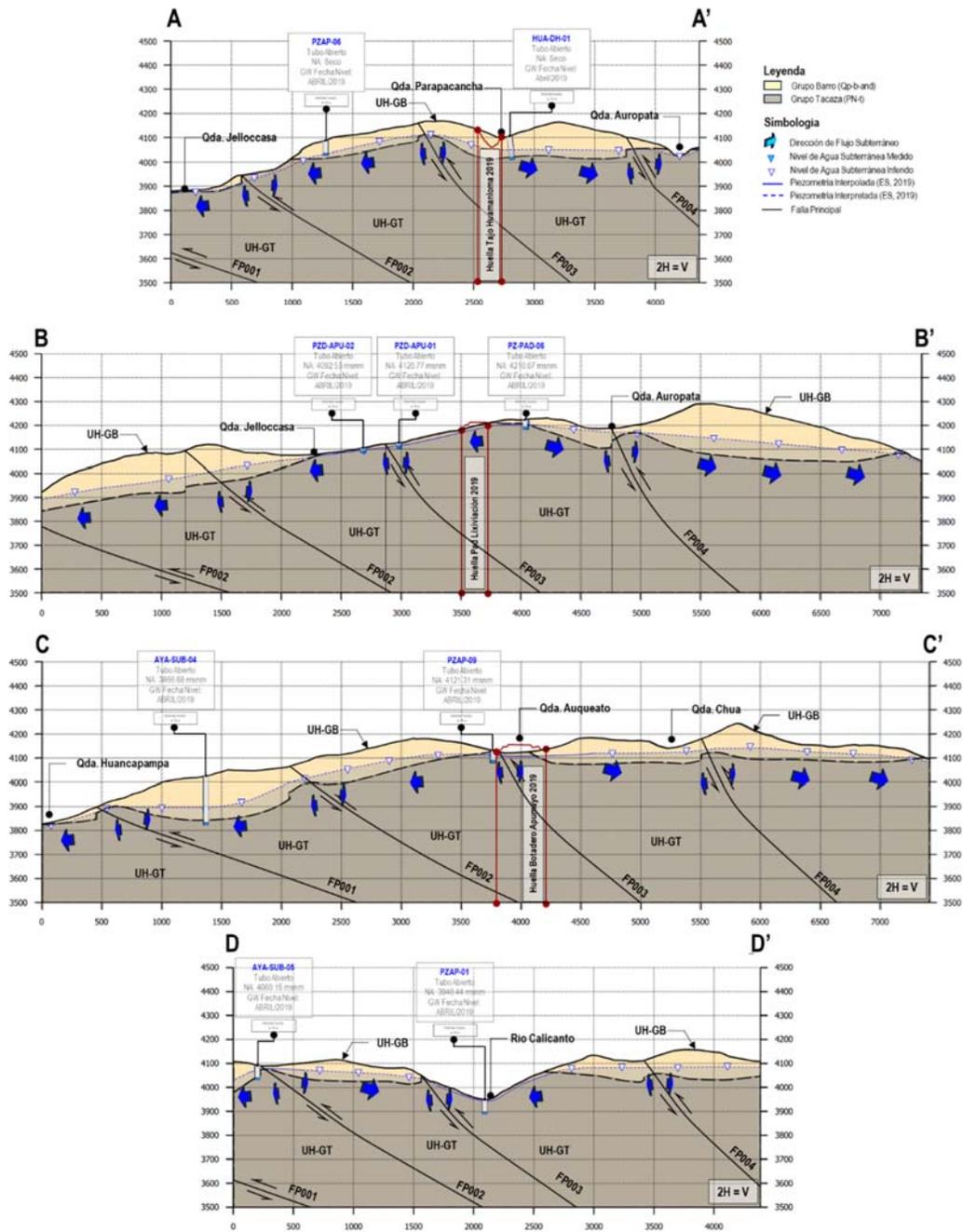
piezómetros (PZD-APU-01, PZD-APU-02 y PZ-PAS-06) que reportaron niveles cercanos a la superficie de terreno entre 2014 y 2019. La **Figura 24 – Sección C** muestra niveles profundos para el Grupo Barros (UH-GB) y niveles superficiales en el Grupo Tacaza (UH-CT). Esta afirmación se respalda con los monitoreos históricos y puntuales de los piezómetros (PZAP-09 y AYA-SUB-04); donde, el primero reportó niveles cercanos a la superficie de terreno (2014 y 2019) y en el segundo reportó niveles profundos entre 2018 y 2019. La **Figura 24 – Sección D** muestra niveles profundos para el Grupo Barros (UH-GB) y niveles superficiales en el Grupo Tacaza (UH-CT). Esta afirmación se respalda con los monitoreos históricos de los piezómetros (PZAP-01 y AYA-SUB-05) que reportaron niveles cercanos a la superficie de terreno entre 2014 y 2019.

La **Figura 25** (secciones locales) presentan las condiciones hidrogeológicas en sección preminado 2010 y 2014, donde, se observa el Pad de Lixiviación y Botaderos fueron asentados sobre secuencias de Grupo Barroso (UH-GB) con niveles de agua subterránea profundos y secuencias de Grupo Tacaza (UH-GB) con niveles de agua cercanos a la superficie. Por otro lado, los tajos Ayahuanca y Huamanloma estarían secos y/o con presencia de humedad hacia sus bases respectivas; mientras que, el Tajo Apumayo presentaría interacción con el agua subterránea presente en el Grupo Tacaza (UH-GB) que de acuerdo con las estimaciones previas actuarían dentro de la “Categoría F” con la no presencia de recursos de agua subterránea para el área de estudio. La **Figura 25 – Sección 1 y 2** muestran que tanto el Botadero y Tajo Huamanloma se encuentran asentados dentro de las secuencias del Grupo Barroso (UH-GB); en el caso de “Botadero” no se apreciarían interacciones con el agua subterránea, mientras que, el “Tajo” presentaría interacción con el agua subterránea en sus etapas finales de operación. La **Figura 5 – Sección 3 y 4** muestra que el Pad de Lixiviación, Botadero y Tajo Apumayo

se encuentran asentados dentro de las secuencias del Grupo Tacaza (UH-GT); en el caso del “Pad y Botadero” no se apreciarían interacciones con el agua subterránea, mientras que, el “Tajo” presentaría interacción con el agua subterránea casi en todas sus etapas de operación. Esto evidenciado en las visitas técnicas de campo desarrolladas en noviembre y diciembre 2018, y marzo y abril 2019 que mostraron pequeñas filtraciones de agua (drenaje pasivo) con órdenes de 2 a 3 L/s. La **Figura 25 – Sección 5 y 6** muestra que el Botadero y Tajo Ayahuanca se encuentran asentados dentro de las secuencias del Grupo Barroso (UH-GB); en el caso del “Botadero y Tajo” no presentarían interacción con el agua subterránea hasta sus etapas finales de operación.

Figura 24

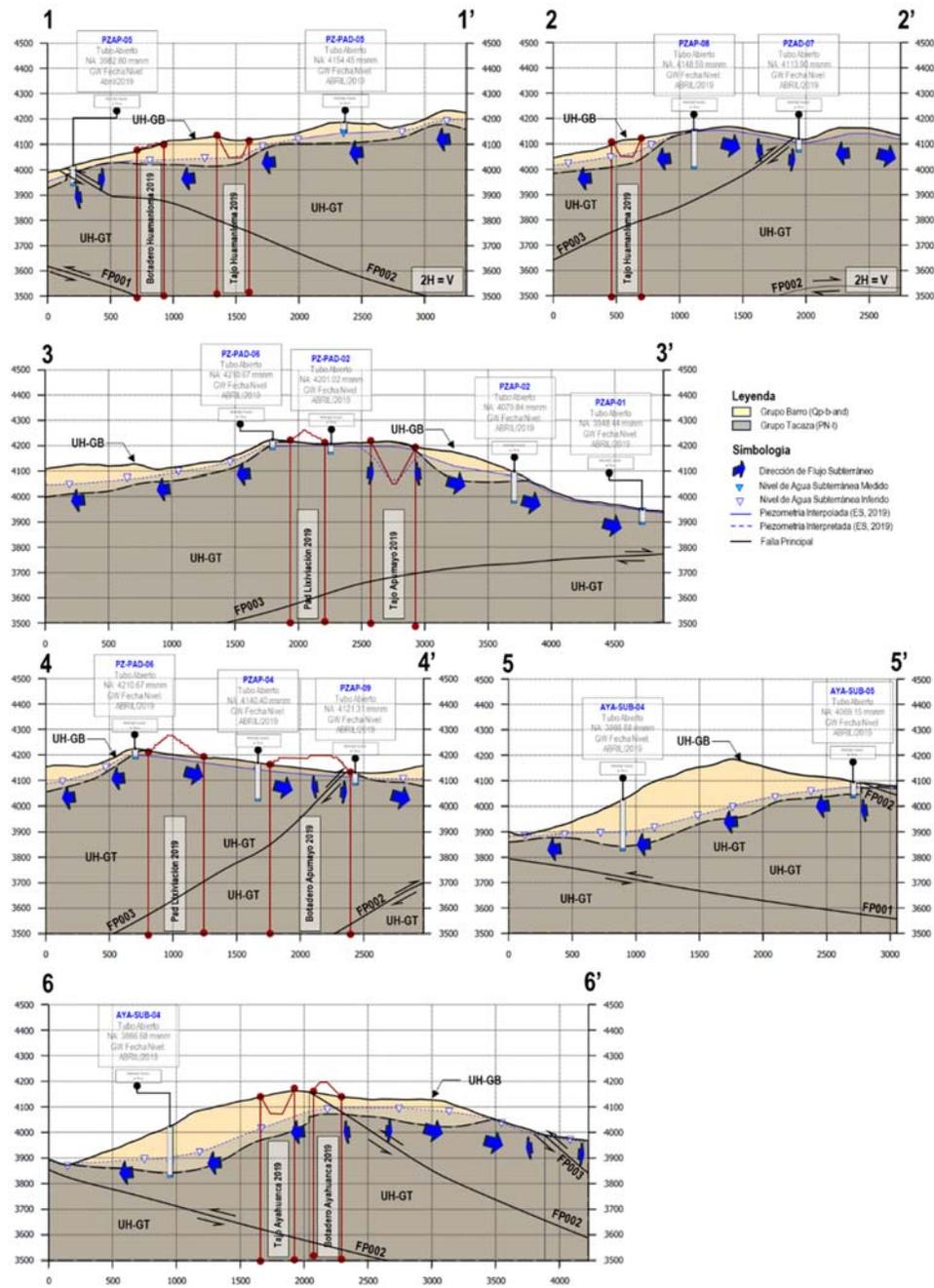
Sección Hidrogeológica Regionales



Fuente: Elaboración Propia 2024

Figura 25

Sección Hidrogeológica Locales



Fuente: Elaboración Propia 2024

4.11.4 Descripción del Modelo Hidrogeológico Conceptual

El área de estudio está dominada por dos (02) secuencias volcánicas de composición andesítica (grupos Barroso y Tacaza). El contacto entre los grupos Barroso y Tacaza presentan buzamiento entre 0 a 25°; pues generalmente, el Grupo Barroso (UH-GB) se ha depositado siguiendo, posiblemente, paleo-superficies heredadas por el Grupo Tacaza (UH-GT). Además, se encuentran afectados por cuatro (04) fallas principales (FP001, FP002, FP003 y FP004) de carácter inverso de dirección SW a NE con buzamientos promedio de 80° hacia el NE. El Grupo Barroso puede alcanzar hasta los 200 m de espesor, donde los máximos espesores fueron mapeados hacia los extremos NE y SW, mientras que, hacia la parte central el espesor disminuye; mientras que, el Grupo Tacaza puede alcanzar los 1200 m de espesor, donde, el máximo espesor fue mapeado hacia la parte central del área de estudio, seguido por el sector NE, y finalmente, SO.

La Unidad Minera “APUMAYO” consta de tres (03) cuerpos mineralizados denominados “Apumayo, Huamanloma y Ayahuanca”. Estos cuerpos presentan contenido de oro y plata, asociados a depósitos de naturaleza epitermal de tipo ácido con alteraciones típicas de alta sulfuración (AS) como “Sílica, Argílica Avanzada y Propilítica” emplazado en rocas de composición andesítica.

El flujo de agua subterránea en el Grupo Barroso (UH-GB), considerado dominado por fracturas, se mueve de SE a NW, E a W, NE a SW y NW a SE influenciado por la delimitación hidrológica de cada microcuenca. Las recargas se originarían en la parte alta y descargarían hacia el fondo de quebradas y/o ríos. Sin embargo, los datos piezométricos expuestos indican niveles profundos en comparación con el Grupo Tacaza, en otras palabras, con mayor zona no saturada. Finalmente, albergaría aguas jóvenes “Locales” de acuerdo con el Diagrama de Mifflin según Cantú (2021) y, estaría asociado a procesos de alteración de la rocas encajonante andesita compuesta por Albita, Anortita,

Piroxenos, Anfíbolita y Biotita que denota facies de agua Bicarbonatada Cálcida y Sulfatadas Cálcida, donde, el anión sulfato (SO_4^{2-}) estaría asociado a la presencia de sulfuros (tema no abordado a detalle en esta investigación) y el catión calcio (Ca^{2+}) estaría asociado a las plagioclasas con mayor porcentaje de Anortita y en menor proporción Anfíbolita.

El flujo de agua subterránea en el Grupo Tacaza (UH-GT), considerado dominado por fracturas, se mueve de SE a NW, E a W, NE a SW y NW a SE influenciado por la delimitación hidrológica de cada microcuenca. Las recargas se originarían en la parte alta y descargarían hacia el fondo de quebradas y/o ríos. Sin embargo, los datos piezométricos expuestos indican niveles cercanos a la superficie en comparación con el Grupo Barroso, en otras palabras, con menor zona no saturada. Finalmente, albergaría aguas jóvenes “Locales” de acuerdo con el Diagrama de Mifflin según Cantú (2021) y asociados a procesos de alteración de la roca encajonante andesita compuesta por Albita, Anortita, Piroxenos, Anfíbolita y Biotita, que denota facies de agua Bicarbonatada Cálcida, Bicarbonatada Sódica y Sulfatadas Cálcida, donde, el anión sulfato (SO_4^{2-}) estaría asociado a sulfuros (tema no abordado a detalle en esta investigación) y el catión calcio (Ca^{2+}) estaría asociado a la alteración de plagioclasas con mayor porcentaje de Anortita y en menor proporción Anfíbolita y el catión Na^{1+} estaría asociado a la alteración de las Biotitas.

En resumen, el agua subterránea fluye de SE a NW, E a W, NE a SW y NW a SE influenciado por la delimitación hidrológica de cada microcuenca; donde las recargas se originarían en la parte alta y descargarían hacia el fondo de quebradas y/o ríos. Las características químicas denotan aguas jóvenes y/o locales de composición Iónica Bicarbonatada Cálcida, Bicarbonatada Sódica y Sulfatadas Cálcida asociados a procesos de alteración de las rocas volcánicas de composición andesítica, donde, los iones Sulfato

(SO₄²⁻) y Sodio (Na¹⁺) no superan las concentraciones de 1.8 mg/L y 1.1 mg/L; en comparación con las concentraciones típicas en el agua subterránea de 10 – 100 mg/L (Cecamin, 2020).

4.12 Resultados de la Calibración en Régimen Estacionario 2014

4.12.1 Estadísticas de Calibración

Para el modelo en régimen estacionario o condiciones iniciales, la calibración fue realizada hasta obtener una diferencia razonable entre los niveles observados de los puntos de observación (piezómetros) y los niveles de agua simulados. El ajuste de la calibración se obtiene mediante parámetros estadísticos como la “Raíz del Error Cuadrático Medio Normalizado o NRMS por sus cifras en inglés”. No existe un estándar universal único de criterio de aceptación del “Buen Ajuste” de una calibración. Spitz y Moreno (1996) han sugerido que el objetivo de la calibración de un modelo consiste en obtener una desviación estándar, de la diferencia residual restante, entre las elevaciones de agua subterránea observada y simulada sea menor al 10% del rango observado. Esto también, está sujeto al peso o nivel de confianza de una serie de evaluaciones cuantitativas y cualitativas. Por lo tanto, se considera una calibración como aceptable cuando el valor de NRMS sea menor al 10%. Este error mide la dispersión entre los niveles simulados y observados con relación a la carga máxima observada y se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\text{NRMS} = \frac{\sqrt{\frac{\sum(h_0 - h_s)^2}{n}}}{\max(h_0) - \min(h_0)} \quad (\text{Ecuación 37})$$

Donde:

h_0 : es el nivel observado.

h_s : es el nivel simulado

n: es el número de datos.

En este caso, dada la cantidad y varianza de los datos de nivel de agua subterránea disponible para los 23 puntos de observación (piezómetros) considerados como representativos para el periodo de preminado (Ver **Tabla 47**), se realizó una evaluación detallada del grado de confiabilidad de los piezómetros usado como parte de la calibración estacionaria; donde, el NRMS obtenido guarda una relación directa con estos supuestos. Por otro lado, otro aspecto fundamental, de aceptación del modelo, es el error de cierre del balance hídrico que representa la diferencia porcentual entre las entradas y salidas del modelo; esto da cuenta del funcionamiento numérico que sustenta el modelo. El error de cierre para la calibración en régimen estacionario se evalúa al final de la simulación, mientras que, para el modelo predictivo se evalúa al final de cada periodo o stress period. En este sentido, el error de balance debe ser inferior al 0.5% para ser considerado como aceptable (Reilly y Arlen, 2004).

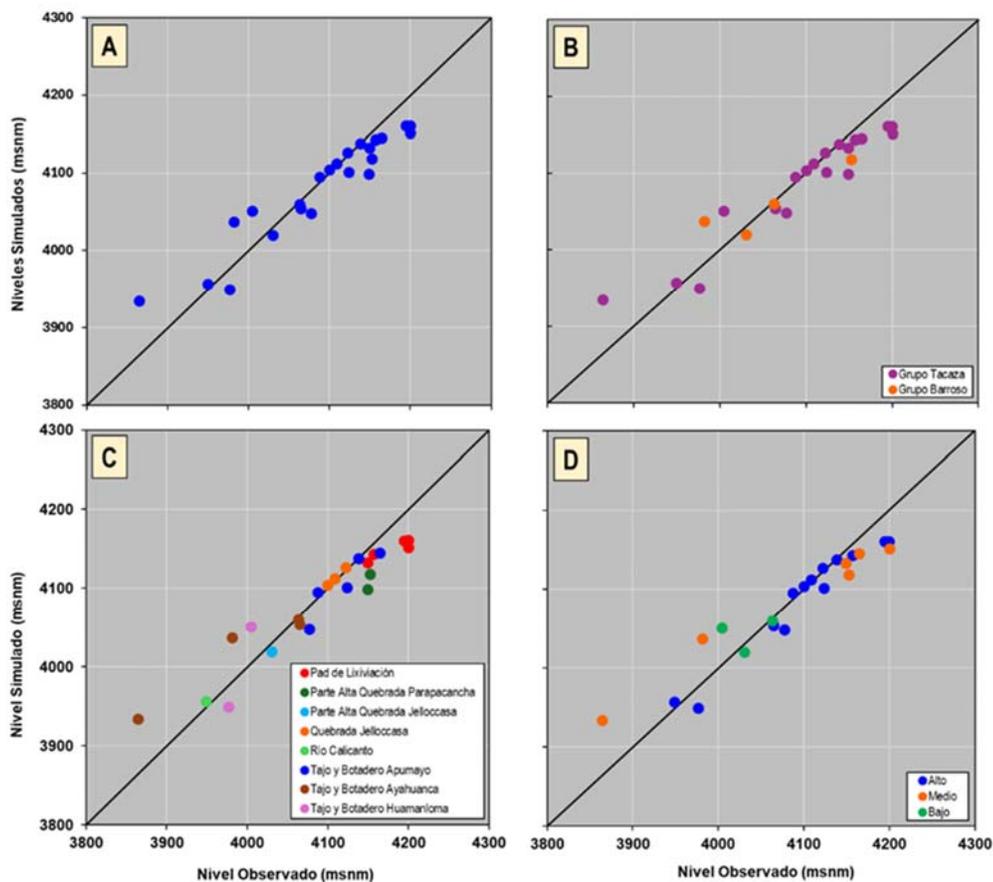
La calibración presentada en régimen estacionario fue estimada mediante ajustes iterativos de dos (02) parámetros (conductividad hidráulica y recarga definida por unidad hidrogeológica). Por naturaleza de las ecuaciones de flujo, la calibración en régimen estacionario no es única, pudiendo utilizarse diferentes combinaciones de conductividades y recarga. Sin embargo, los parámetros se calibran de acuerdo con los rangos definidos en el modelo conceptual, en busca de la mejor combinación que sea consistente.

El **Gráfico 22** muestra los resultados obtenidos en la calibración de régimen estacionario. De acuerdo con el **Gráfico 22 A** se tiene ajuste aceptable general de todos los puntos de observación (piezómetros). Por otro lado, el **Gráfico 22 B** muestra una segregación de litologías monitoreadas para los grupos Barroso y Tacaza, mientras que, el **Gráfico 22 C** muestra una distribución por sector, donde, se aprecia que los

piezómetros ubicados cerca los tajos y botaderos (Huamanloma y Ayahuanca) presentan un sobreestimaciones de niveles de agua subterránea; y finalmente, el **Gráfico 22 D** muestra el ajuste el ajuste de acuerdo a la ponderación de los puntos de observación, observándose que los denotados como alto se ajustan bastante a los valores medidos, seguidos de los denotados como medios y bajos.

Gráfico 22

Resultados Calibración Estacionaria en Condiciones de Pre-Minado 2014



Fuente: Elaboración Propia 2024

En resumen, las estadísticas de calibración muestran en la **Tabla 47**. De acuerdo con estos resultados estadísticos, el modelo resultó con un NRMS de 9.2% considerado como valor aceptable, con una varianza residual de 97 m en el sector aguas abajo de Tajo

Ayahuanca, mientras que, el residual mínimo fue de 50 m en el sector aguas arriba del Tajo Huamanloma. Finalmente, la **Tabla 48** muestra el detalles de los residuales obtenidos para los valores de carga medidos en campo versus los valores simulados en la calibración estacionaria al 2014.

Tabla 47

Parámetros Estadísticos de Calibración Pre-Minado 2014

Parámetros Estadísticos	Resultados
Residual Máxima (m)	70
Residual Mínima (m)	-50
Media Residual (m)	-6.7
Media Residual Absoluta	24.2
Número de Puntos	23
RMS (m)	31
NRMS (%)	9.2

Fuente: Elaboración Propia 2024

Tabla 48

Diferencias de Niveles Medidos vs Niveles Simulados Calibración Estacionaria

Parámetros Estadísticos	Resultados
Residual Máxima (m)	70
Residual Mínima (m)	-50
Media Residual (m)	-6.7
Media Residual Absoluta	24.2
Número de Puntos	23
RMS (m)	31
NRMS (%)	9.2

Fuente: Elaboración Propia 2024

Por último, el modelo de balance de agua muestra un error del 0.002% el cual es considerado aceptable. La **Tabla 49** muestra el resumen de balance hídrico obtenido para la calibración estacionaria Pre-Minado 2014, donde, las entradas son representadas principalmente por la precipitación y parcialmente la condición de borde de carga constante asignada con un valor de 102.440 L/s. Por otro lado, las salidas están

representadas por los ríos y quebradas, así como, parcialmente la condición de borde de carga constante asignada con un valor de 102.434 L/s. Finalmente, se observa que la principal fuente de recarga o entrada es la precipitación con 85.5 L/s, mientras que el Río Calicanto y la Quebrada Jailpasca son las quebradas son los mayores drenes naturales del sistema hidrogeológico con 19.2 y 15.2 L/s.

Tabla 49

Balance Hídrico Calibración Estacionaria Pre-Minado 2014

Balance	Entradas (L/s)	Salidas (L/s)
Recarga	85.5	-
Carga Constante	16.9	36.2
Río Calicanto	-	19.2
Quebrada Jispicahua	-	8.0
Quebrada Auropata	-	8.0
Quebrada Parapacancha	-	4.5
Quebrada Cuchuhuasi	-	3.0
Quebrada Jellocasa	-	8.4
Quebrada Jailpasca	-	15.2
Total	102.440	102.435
Error de Balance de Agua (%)	0.002	

Fuente: Elaboración Propia 2024

4.12.2 Valores de Conductividad Hidráulica y Recarga Calibrada

Para el proceso de calibración de la conductividad hidráulica, las unidades hidrogeológicas Tacaza y Barroso, fueron divididas por divididas y agrupadas verticalmente en intervalos mostrados en la **Tabla 50**; esto con la finalidad de evaluar el gradiente vertical y la anisotropía. Por consiguiente, el basamento rocoso fue considerado anisótropo ($K_{xx} = K_{yy} = 10 * K_{zz}$) y con un gradiente vertical con disminución de la conductividad hidráulica a profundidad. Por otro lado, se agregó una zona que simula la presencia de depósitos cuaternarios en el entorno de los nodos tipo Seepage (drenaje libre) de los ríos y quebradas con un comportamiento isotrópico ($K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$).

Tabla 50*Conductividades Hidráulicas Calibradas Pre-Minado 2014*

UH	Profundidad (m)	Layer	Anisotropía ($K_{xx} = K_{yy} = n \cdot K_{zz}$)	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)
Barroso	0 – 50	7 – 11	10	2.9e-6	2.9e-6	2.9e-7
	50 – 100	12 – 16	10	2.9e-7	2.9e-7	2.9e-8
	100 – 150	17 – 21	10	2.9e-8	2.9e-8	2.9e-9
	150 – 250	17 – 28	10	2.9e-9	2.9e-9	2.9e-10
Tacaza	0 – 50	7 – 11	10	4.5e-7	4.5e-7	4.5e-8
	50 – 100	12 – 16	10	1.0e-7	1.0e-7	1.0e-8
	100 – 150	17 – 21	10	1.0e-8	1.0e-8	1.0e-9
	150 – 250	17 – 28	10	1.0e-9	1.0e-9	1.0e-10
	> 250	29 – 34	10	1.0e-10	1.0e-10	1.0e-11
Cuaternario	0 – 20	1 – 2	1	2.9e-6	2.9e-6	2.9e-6

Fuente: Elaboración Propia 2024

Por otro lado, para el proceso de calibración de la recarga se asignaron valores que oscilan entre 12.3 y 18.8% de la precipitación total anual (PTA = 425.4 a 570 mm/año) obtenida en para las siete (08) microcuencas (Ver **Tabla 51**). Para el caso de la UH Barroso (UH-GB) se asignaron valores de 80 mm/año que representa un ingreso de 66.2 L/s de agua al sistema, mientras que, para la UH Tacaza (UH-GT) se asignaron valores de 70 mm/año que representa un ingreso de 21.6 L/s de agua al sistema.

Tabla 51*Recarga Calibradas Pre-Minado 2014*

Unidad Hidrogeológica	Rango Precipitación Total Anual (mm/año)	Recarga Simulada (mm/año)	Porcentaje Recarga Simulada (%)	Recarga Simulada (L/s)
Barroso	425.4 – 570.0	80	14.0 – 18.8	66.2
Tacaza	425.4 – 570.0	70	12.3 – 16.5	21.6

Fuente: Elaboración Propia 2024

4.12.3 Consideraciones Conductividad Hidráulica y Balance del Acuífero

4.12.3.1 Unidades Hidrogeológicas

Se determinaron dos (02) unidades hidrogeológicas. La primera correspondiente al Grupo Barroso (UH-GB) y la segunda al Grupo Tacaza (UH-GT). El Grupo Barroso presenta valores de conductividad hidráulica ligeramente superiores al Grupo Tacaza, donde, ambos rangos oscilan entre los $1e-7$ y $1e-4$ m/s. En términos generales, esto denotaría medios hidrogeológicos fracturados “Poco Permeables”. Sin embargo, a mayor profundidad, podrían adquirir un comportamiento de medios hidrogeológicos fracturados de “Baja Permeabilidad” con rangos entre $1e-9$ y $1e-7$ m/s. Por otra parte, los ensayos de bombeo desarrollados en el Grupo Tacaza indicaron rangos de permeabilidades entre $6.3e-8$ y $3.9e-7$ m/s, lo que denotaría un medio hidrogeológico fracturado de “Baja Permeabilidad”. Conceptualmente, este análisis indicaría que el Grupo Barroso se comportaría como un medio “Poco Permeable” y el Grupo Tacaza como un medio de “Baja Permeabilidad” con gradientes que muestran medios de “Baja Permeabilidad a Impermeables”.

El **Gráfico 23** muestra la distribución vertical de la conductividad hidráulica conceptual versus ingresada al modelo numérico con las siguientes apreciaciones:

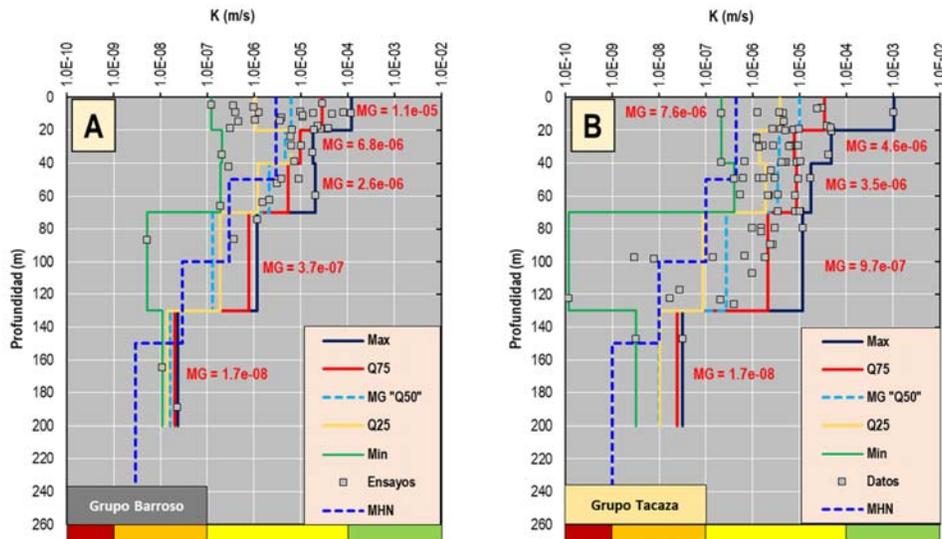
- El **Gráfico 23 A** (izquierda – línea azul) muestra la distribución vertical de los ensayos desarrollados en el Grupo Barroso, donde, se puede observar que, los rangos asignados al modelo numérico comienzan desde un medio fracturado “Poco Permeable” o sea rangos entre $1e-7$ y $1e-4$ m/s pasando gradualmente, con la profundidad, a un medio fracturado de “Baja Permeabilidad” con rangos $1e-9$ y $1e-7$ m/s. Estas denotaciones muestran un ajuste razonable entre los valores de conductividad hidráulica medidos en campo en comparación con los asignados al modelo hidrogeológico

numérico. Por lo tanto, aceptables para los análisis numéricos transitorios y predictivos.

- El **Gráfico 23 B** (derecha – línea azul) muestra la distribución vertical de los ensayos desarrollados en el Grupo Tacaza, donde, se puede observar que, los rangos asignados al modelo numérico comienzan desde un medio fracturado “Poco Permeable” o sea rangos entre $1e-7$ y $1e-4$ m/s pasando gradualmente, con la profundidad, a un medio fracturado de “Baja Permeabilidad” con rangos $1e-9$ y $1e-7$ m/s, y finalmente, a un medio fracturado impermeable; es preciso aclarar que las línea asignada al modelo hidrogeológico numérico se ajusta mejor con los valores de conductividad hidráulica obtenidos en los ensayos de bombeo. Estas denotaciones muestran un ajuste razonable entre los valores de conductividad hidráulica medidos en campo en comparación con los asignados al modelo hidrogeológico numérico. Por lo tanto, aceptables para los análisis numéricos transitorios y predictivos.

Gráfico 23

Distribución Vertical de la Conductividad Hidráulica Conceptual vs Simulada



Fuente: Elaboración Propia (2024)

Las pruebas de bombeo en piezómetros, a bajo caudal, indicaron rangos de transmisividad inferiores a $5 \text{ m}^2/\text{d}$ para el Grupo Tacaza. Esto denotaría un "Potencial Insignificante" como acuífero para el Grupo Tacaza. Por otro lado, para el Grupo Barroso no se pudieron obtener valores referenciales de campo, pero tomando en consideración el grado permeabilidad y visitas de campo entre 2018 y 2019, se pueden estimar valores de transmisividad entre 5 y $50 \text{ m}^2/\text{d}$ que denotarían un "Potencial Bajo", ligeramente superior al estimado para el Grupo Tacaza. Esta última afirmación, es netamente especulativa y experiencia por lo que se recomienda el desarrollo de ensayos de bombeo y/o airlift en piezómetros habilitados dentro de la secuencia del Grupo Barroso. Por lo tanto, estos valores de transmisividad se consideran aceptables para los grupos Barroso y Tacaza, pero con cierta incertidumbre para el Grupo Barroso.

Adicionalmente, las pruebas de bombeo sirvieron para la estimación de los valores de coeficiente de almacenamiento (S) para el Grupo Tacaza, donde se observaron rangos entre $3.7\text{e-}3$ y $9.5\text{e-}1$ que denotarían un acuífero libre. Por lo tanto, considerando que el Grupo Barroso se comporta como un medio impermeable a partir de los 150 m se pueden estimar valores de almacenamiento específico entre $2.5\text{e-}6$ y $6.3\text{e-}3$ (1/m). Para el caso del Grupo Barroso no se pudieron obtener valores referenciales de campo, pero tomando en consideración las estimaciones del Grupo Tacaza, se pueden estimar rangos entre $1.5\text{e-}5$ y $3.8\text{e-}3$ (1/m) tomando en consideración que el Grupo Barroso tiende a comportarse como un medio hidrogeológico impermeable a partir de los 250 m de profundidad. Por otro lado, para el modelo hidrogeológico conceptual se asignaron valores de coeficiente de almacenamiento en torno de los $1\text{e-}4$ (1/m), coherentes con las estimaciones conceptuales y pruebas de bombeo desarrolladas el 2010. Por lo tanto, estos valores de

almacenamiento específico se consideran aceptables para el desarrollo de esta investigación, pero con cierta incertidumbre para el Grupo Barroso.

Finalmente, tomando en consideración el esquema de clasificación de acuíferos propuesto por Struckmeier y Margat (1995), se reafirma que el Grupo Barroso actuaría dentro de la “Categoría E” como acuífero menor con recursos de agua subterránea local y limitado para el área de estudio, mientras que, el Grupo Tacaza actuaría dentro de la “Categoría F” con la no presencia de recursos de agua subterránea para el área de estudio.

4.12.3.2 Balance del Acuífero

Para términos prácticos, conceptualmente, se sustentó un sistema en equilibrio, es decir que, la variación del almacenamiento del medio hidrogeológico para cada ciclo hidrológico es despreciable a condiciones naturales a largo plazo. Por lo tanto, el sistema hidrogeológico permite que los ingresos sean iguales que las salidas tomando como referencia un volumen de control representado por las siete (07) microcuencas.

La recarga conceptual al sistema hidrogeológico fue estimada entre los 13 a 18 % de la precipitación total anual (424.5 – 570 mm/año) que cae sobre el área de estudio, considerando el área total para las siete (07) microcuencas. Es así como para el Grupo Barroso (UH-GB) se estimó unos 80 mm/año (14 – 19% de la PTA) y para el Grupo Tacaza (UH-GT) se estimó unos 70 mm/año (12 – 16% de la PTA); considerados congruentes para este tipo de medios hidrogeológicos, donde, las tasas de recarga pueden oscilar entre los 10 y 20% de la precipitación total anual. Por consiguiente, conceptualmente, los caudales de descarga base anuales oscilarían entre los 117.0 L/s para la Microcuenca Cuchuhuasi hasta los 469.3 L/s para la Microcuenca Jailpasca (Ver **Tabla 52** – Método de Eckhardt). Sin embargo, numéricamente, los caudales de descarga anuales son relativamente inferiores entre los 29.4 L/s para la Microcuenca Cuchuhuasi hasta 203.4 L/s para la Microcuenca Chaviña (Ver **Tabla 52** – Modelo Numérico). Estas

diferencias notorias obedecen principalmente al área evaluada como se detalla a continuación:

- El área de estudio para el desarrollo del modelo numérico es relativamente inferior al área que se tomó en consideración para las estimaciones del caudal base con el Método de Eckhardt. Esto se puede evidenciar con la reducción de las dimensiones de cada microcuenca involucrada, donde se aprecia áreas evaluadas residuales entre el 29 % para la Microcuenca Jispicahua hasta los 60 % para la Microcuenca Auropata, salvo la microcuenca Chaviña que mantiene el 93% de área evaluada; lo que se ve reflejado en los ingresos de agua al sistema hidrogeológico.
- El Método de Eckhardt depende únicamente de parámetros matemáticos, que aporta un sentido físico al análisis del cálculo de caudal base. Sin embargo, las condiciones geológicas e hidrogeológicas complejas del basamento rocoso no pueden ser representados en su totalidad por este método. Por lo tanto, pueden existir diferencias entre los valores teóricos conceptuales (que dependen en su mayoría de la precipitación) y aquellos simulados que toman en consideración los parámetros hidráulicos del medio hidrogeológico.

Tabla 52

Valores de Caudal Base Acumulados Anuales Conceptuales vs Simulados

Microcuenca	Caudal Base – Método de Eckhardt			Caudal Base Modelo Numérico		
	Área (km ²)	L/s	Porcentaje	Área (km ²)	L/s	Porcentaje
Auropata	8.0	321.0	18%	4.8	69.7	4%
Chaviña	8.9	279.7	16%	8.3	203.4	12%
Cuchuhuasi	5.7	117.0	13%	2.1	29.4	3%
Jailpasca	18.6	469.3	14%	7.3	132.7	4%
Huamanloma	8.1	246.3	15%	6.3	73.9	4%

Microcuenca	Caudal Base – Método de Eckhardt			Caudal Base Modelo Numérico		
	Área (km2)	L/s	Porcentaje	Área (km2)	L/s	Porcentaje
Jispicahua	11.2	297.3	15%	3.3	95.2	5%
Parapacancha	5.6	151.3	15%	2.8	43.74	4%

Fuente: Elaboración Propia 2024

A continuación, se comparan los caudales base estimadas mensualmente para las siete (07) microcuencas versus los valores obtenidos en la simulación numérica:

- Para la Microcuenca Chaviña los caudales base conceptuales probables oscilan entre los 11 L/s, mientras que, los caudales base simulados probables oscilan entre los 17 L/s. Este valor es considerado, ligeramente, sobreestimado puesto que casi no existe reducción en el área evaluada, sin embargo, puede obedecer a un control litológico, puesto que las laderas y el basamento rocoso descansan enteramente sobre Grupo Tacaza (UH-GT). Esto, probablemente, debería ser ajustado un poco más en el modelo numérico, pero para fines de esta investigación son considerados aceptables, pero no congruentes.
- Para la Microcuenca Jispicahua los caudales base conceptuales probables oscilan entre los 12 L/s, mientras que, los caudales base simulados probables oscilan entre los 8 L/s. Este valor es considerado congruentes y aceptable para fines de esta investigación, debido a que se presenta una reducción en el área de investigación.
- Para la Microcuenca Auropata los caudales base conceptuales probables oscilan entre los 10 L/s, mientras que, los caudales base simulados probables oscilan entre los 6 L/s. Este valor es considerado congruentes y aceptable para fines de esta investigación, debido a que se presenta una reducción en el área de investigación.
- Para la Microcuenca Parapacancha los caudales base conceptuales probables oscilan entre los 6 L/s, mientras que, los caudales base simulados probables oscilan entre los 4 L/s. Este valor es considerado congruentes y aceptable para

finés de esta investigación, debido a que se presenta una reducción en el área de investigación.

- Para la Microcuenca Cuchuhuasi los caudales base conceptuales probables oscilan entre los 5 L/s, mientras que, los caudales base simulados probables oscilan entre los 3 L/s. Este valor es considerado congruentes y aceptable para fines de esta investigación, debido a que se presenta una reducción en el área de investigación.
- Para la Microcuenca Huamanloma los caudales base conceptuales probables oscilan entre los 10 L/s, mientras que, los caudales base simulados probables oscilan entre los 6 L/s. Este valor es considerado congruentes y aceptable para fines de esta investigación, debido a que se presenta una reducción en el área de investigación.
- Para la Microcuenca Jailpasca los caudales base conceptuales probables oscilan entre los 20 L/s, mientras que, los caudales base simulados probables oscilan entre los 11 L/s. Este valor es considerado congruentes y aceptable para fines de esta investigación, debido a que se presenta una reducción en el área de investigación.

Por otro lado, se comparan las estimaciones mensuales para los (siete (07)) componentes evaluados versus los valores obtenidos en la simulación numérica:

- Para el caso del Botadero Huamanloma, no se evidencian filtraciones significativas a través del desmonte. Por otro lado, en el Tajo Huamanloma se estimaron caudales probables del orden de 0.78 L/s a partir de la Fase 3 (año 2017). Esto se reflejó y evidencio en las visitas de campo del 2019, donde, se evidenciaron filtraciones y humedad en las paredes del tajo no significativas. Este valor es considerado congruente con las apreciaciones del modelo conceptual.

- Para el caso del Botadero Apumayo, se evidencian filtraciones de orden de 1 L/s a través del desmonte. Por otro lado, en el Tajo Apumayo se estimaron caudales probables del orden de 1 L/s a partir de la Fase 1 (año 2015). Esto se reflejó y evidenció en las visitas de campo del año 2019 donde, se evidenciaron filtraciones de agua (drenaje pasivo) con ordenes de 2 a 3 L/s hacia la pared norte del tajo. Este valor es considerado congruente con las apreciaciones del modelo conceptual.
- Para el caso del Botadero y Tajo Ayahuanca no se evidencian filtraciones de ningún tipo. Esto se reflejó y evidenció en las visitas de campo del año 2019. Conceptualmente, el nivel de agua está por debajo de Tajo Ayahuanca lo cual es congruente con las estimaciones del modelo numérico que no muestra interacción del tajo con el agua subterránea.
- Para el caso del Pad de Lixiviación no se evidenciaron filtraciones que sobrepasen la impermeabilización. Este dato es muy importante, debido a que, APUMAYO usa el cianuro para obtener los concentrados de oro y plata.

Finalmente, todo este análisis muestra que los caudales base y filtraciones estimados conceptualmente son estimados y representados adecuadamente por el modelo hidrogeológico numérico. Por lo tanto, el modelo numérico representa fidedignamente lo expuesto en el modelo hidrogeológico conceptual, que finalmente, puede ser usado para estimaciones a largo plazo (cierre).

4.12.4 Nivel de Agua Simulados en Régimen Estacionario Pre-Minado 2014

Los resultados del modelo calibrado para las condiciones de “Pre-Minado 2014” representan razonablemente los niveles de agua subterránea, en condiciones de flujo y gradientes estimados en la caracterización hidrogeológica conceptual.

La **Figura 26** muestra el flujo de agua subterránea simulado para el estado estacionario “Pre – Minado 2014” mostrando cierta similitud con el flujo de propuesto en el modelo hidrogeológico conceptual. En otras palabras, el agua subterránea fluye de SE A NW, E a W, NE a SW y NW a SE influenciado por la delimitación hidrológicas de las siete (07) microcuencas, donde las recargas se originarían en la parte alta y descargarían hacia el fondo de las quebradas y/o ríos.

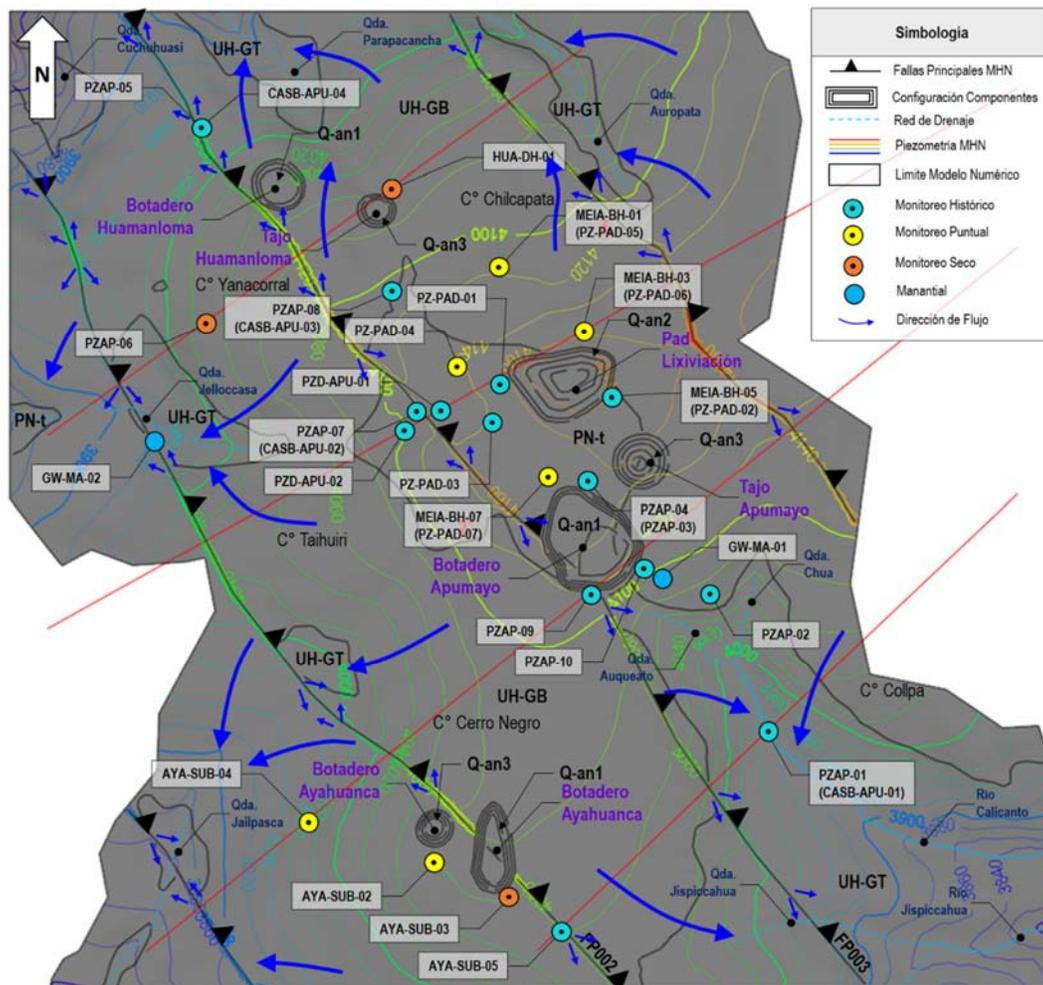
Por otro lado, la **Figura 27** muestra las secciones hidrogeológicas regionales evaluadas en el modelo numérico en estado estacionario (Pre-Mina 2014), donde, se observa el control litológico sobre los niveles de agua subterránea presentes en las unidades hidrogeológicas del Grupo Barroso (UH-GB) y Grupo Tacaza (UH-GT). La **Figura 27 – Sección A** muestra los niveles profundos en la UH-GB, además, respalda, en cierto modo, los monitoreos puntuales de los piezómetros (PZAP-06 y HUA-DH-01) que fueron reportados como secos y con presencia de humedad. La **Figura 27 – Sección B** muestra niveles superficiales en la UH-GT, que, en cierto modo, respalda los monitoreos históricos y puntuales de los piezómetros (PZD-APU-01, PZD-APU-02 y PZ-PAS-06) superficiales. La **Figura 27 – Sección C** muestra niveles profundos para la UH-GB y niveles superficiales en la UH-GT, que respalda el monitoreo histórico y puntual de los piezómetros (PZAP-09 y AYA-SUB-04), el primero superficiales y el segundo profundo. Finalmente, la **Figura 27 – Sección D** muestra niveles profundos para la UH-GB y niveles superficiales en la UH-GT, que respalda el monitoreo histórico y puntual de los piezómetros (PZAP-01 y AYA-SUB-05) cercanos a la superficie.

Finalmente, la **Figura 28** muestra las secciones hidrogeológicas locales evaluadas en el modelo numérico en estado estacionario (Pre-Mina 2014). La **Figura 28 A – Sección 1 y 2** indica que el “Botadero Huamanloma” no mostrarían interacciones con el agua subterránea, mientras que el “Tajo Huamanloma” presentaría cierta interacción con el

agua subterránea en sus etapas finales de operación. La **Figura 28 A – Sección 3 y 4** indica que el “Pad de Lixiviación y Botadero Apumayo” no mostrarían interacciones con el agua subterránea, mientras que, el “Tajo Apumayo” mostraría interacción con en las etapas medias y finales de operación. Finalmente, la **Figura 28 A – Sección 5 y 6** indica que el Botadero y Tajo Ayahuanca no presentaría interacción con el agua subterránea hasta las etapas finales de operación.

Figura 26

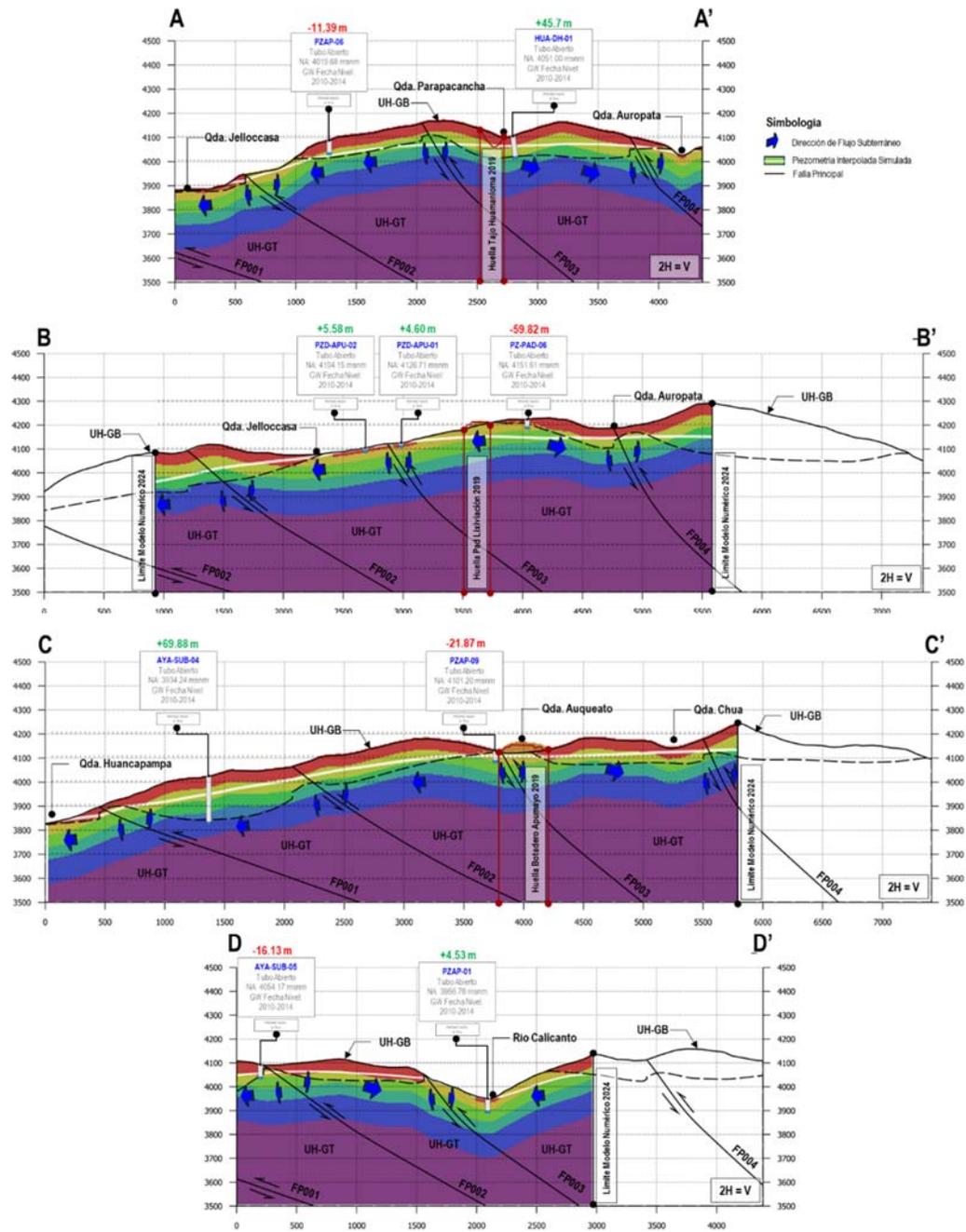
Piezometría Modelada (Free Surface) Calibración Estacionaria



Fuente: Elaboración Propia 2024

Figura 27

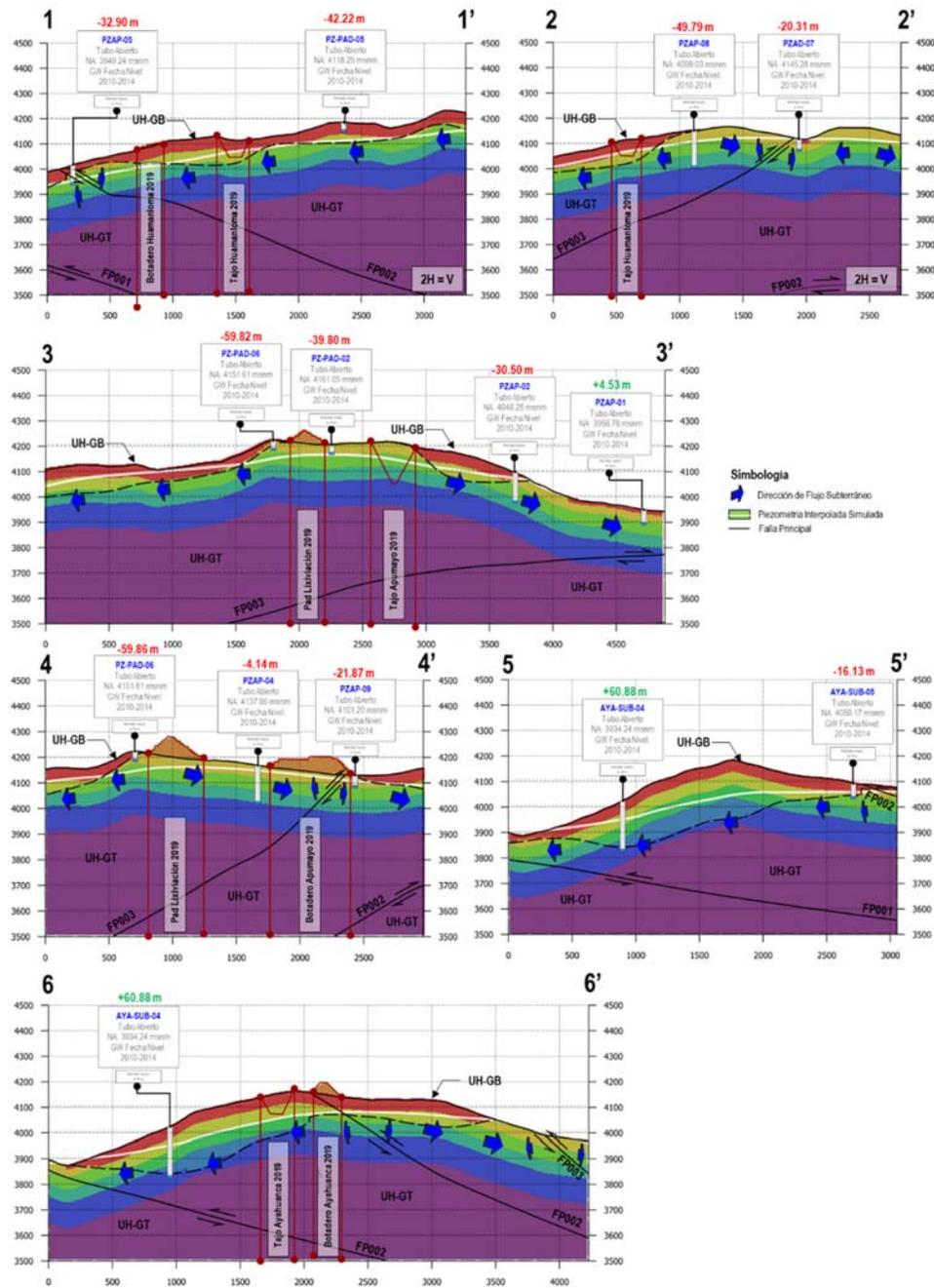
Secciones Hidrogeológicas Regionales Calibración Estacionaria 2014



Fuente: Elaboración Propia 2024

Figura 28

Secciones Hidrogeológicas Locales Calibración Estacionaria 2014



Fuente: Elaboración Propia 2024

4.13 Resultados Calibración en Régimen Transitorio Operativo 2014 – 2019

A continuación, se presentan los resultados de la calibración transitoria ejecutada para el periodo histórico entre el 2014 al 2019 de las operaciones mineras vinculadas a los Tajos y Botaderos (Huamanloma, Apumayo y Ayahuanca) y Pad de Lixiviación. Para considerar esta calibración valida, se ha tomado en cuenta los siguientes datos:

- Datos de niveles de agua históricos observados en 14 piezómetros entre el 2014 al 2019, así como, datos puntuales observados en la campaña de campo 2018 y 2019, y finalmente, como referencia datos de tres (03) piezómetros reportados como secos.
- Estimaciones de Caudal Base Mensual (Flujo Base Mensual) para las siete (07) microcuencas (Jailpasca, Jispicahua, Chaviña, Huamanloma, Cuchuhuasi, Parapacancha y Auropata) a través del Método de Eckhardt.

4.13.1 Estadísticas de Calibración Transitoria 2014 – 2019

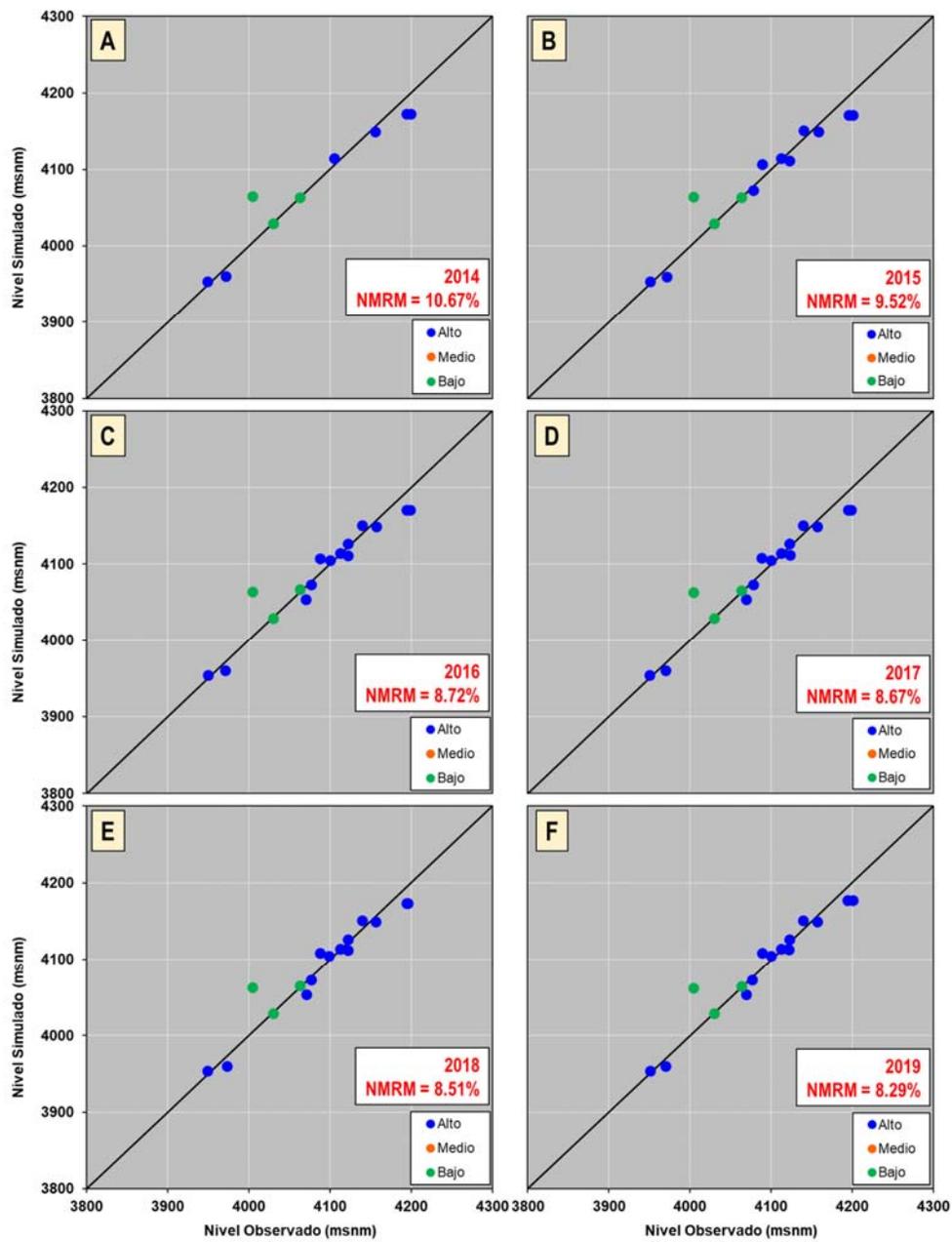
El error medio cuadrático (NMRS) fue calculado en diferentes intervalos de tiempo dentro de la calibración transitoria, considerando los periodos donde se tuviera una mejor distribución de los puntos de monitoreo en la zona de estudio. Para este análisis se seleccionaron los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019 correspondiente al mes de diciembre.

El **Gráfico 24** muestra los resultados de la calibración transitoria entre los años 2014 al 2019 correspondientes al mes de diciembre de cada año. Se aprecia que, los puntos de observación denotados como de alta importancia muestran una muy buena correlación, seguido por los puntos denotados como de baja importancia, por el estado reportado como secos y con presencia de humedad. Estos resultados muestran valores de NMRS entre 8.29% (2019) y 10.67 % (2014) que son considerados aceptables para este

estudio. Por otro lado, la **Tabla 53** muestra el resumen del balance hídrico obtenido para la calibración transitoria de minado al 2019, donde, las entradas son representadas tanto por la precipitación y el almacenamiento dentro de acuífero, y parcialmente por la condición de borde de carga constante asignada con un valor de 109.8 L/s. Por otro lado, las salidas están representadas por los ríos y quebradas, así como, parcialmente por la condición de borde de carga constante asignada con un valor de 117.4 L/s, donde, los tajos extraen agua en el orden de 1.9 L/s que podría ser considerado como drenaje pasivo que ingresa hacia los tajos, principalmente al Tajo Apumayo.

Gráfico 24

Resultados Calibración Transitoria 2014 – 2019



Fuente: Elaboración Propia 2024

Tabla 53*Balance Hídrico Calibración Transitoria 2019*

Balance	Entradas (L/s)	Salidas (L/s)
Recarga	64.1	-
Almacenamiento	27.6	29.4
Carga Constante	18.1	33.9
Río Calicanto	-	16.9
Quebrada Jispicahua	-	7.9
Quebrada Auropata	-	5.9
Quebrada Parapacancha	-	3.7
Quebrada Cuchuhuasi	-	2.5
Quebrada Jellocasa	-	6.2
Quebrada Jailpasca	-	11.0
Botaderos y Pad de Lixiviación	-	0.0
Tajos	-	1.9
Total	109.8	117.4
Error de Balance de Agua (%)	3	

Fuente: Elaboración Propia 2024

4.13.2 Niveles de agua y Caudales Estimados Calibración Transitoria 2014 – 2019

Los resultados del modelo calibrado para condiciones operacionales a diciembre 2019 representan razonablemente los niveles de agua subterránea medidos en campo a diciembre 2019.

La **Figura 29** muestra el flujo de agua subterránea simulado para las condiciones operacionales a diciembre 2019 mostrando cierta similitud con el flujo propuesto en las condiciones hidrogeológicas conceptuales, salvo la interacción de los tajos Huamanloma y Apumayo, donde se observa flujos subterráneos hacia los tajos abiertos. En términos generales, el agua subterránea fluye de SE A NW, E a W, NE a SW y NW a SE influenciado por la delimitación hidrológicas de las siete (07) microcuencas, donde las recargas se originarían en la parte alta y descargarían hacia el fondo de las quebradas y/o

ríos. Sin embargo, hacia el desarrollo de las Fases 1 y 3 se aprecian interacciones entre el nivel freático y las operaciones de excavación de los tajos abiertos.

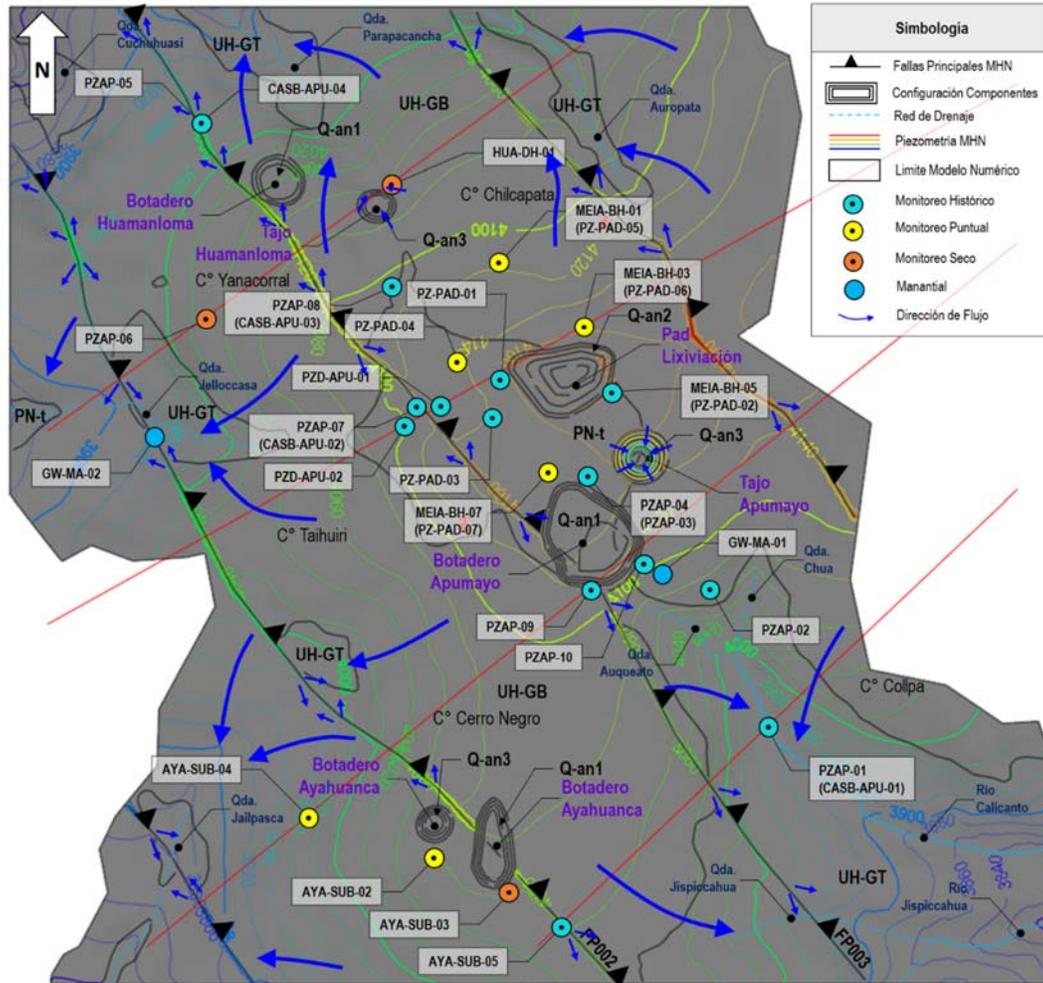
Por otro lado, la **Figura 30** muestra las secciones hidrogeológicas regionales evaluadas en el modelo numérico en estado transitorio a diciembre 2019, donde, se observa, también, el control litológico sobre los niveles de agua subterránea presentes en las unidades hidrogeológicas del Grupo Barroso (UH-GB) y Grupo Tacaza (UH-GT). La **Figura 30** – Sección A muestra los niveles profundos en la UH-GB, además, respalda, en cierto modo, los monitoreos puntuales de los piezómetros (PZAP-06 y HUA-DH-01) que fueron reportados como secos y con presencia de humedad. La **Figura 30** – Sección B muestra niveles superficiales en la UH-GT, que, en cierto modo, respalda los monitoreos históricos y puntuales de los piezómetros (PZD-APU-01 y PZD-APU-02) superficiales. La **Figura 30** – Sección C muestra niveles profundos para la UH-GB y niveles superficiales en la UH-GT, que respalda el monitoreo histórico y puntual de los piezómetros (PZAP-09), superficial. Finalmente, la **Figura 30** – Sección D muestra niveles profundos para la UH-GB y niveles superficiales en la UH-GT, que respalda el monitoreo histórico y puntual de los piezómetros (PZAP-01 y AYA-SUB-05) cercanos a la superficie.

Finalmente, la **Figura 31** muestra las secciones hidrogeológicas locales evaluadas en el modelo numérico en estado transitorio a diciembre 2019. La **Figura 31 A** – Sección 1 y 2 indica que el “Botadero Huamanloma” no mostró interacciones con el agua subterránea, mientras que el “Tajo Huamanloma” presentó cierta interacción con el agua subterránea hacia la Fase 3 de operación (año 2017). La **Figura 31 A** – Sección 3 y 4 indica que el “Pad de Lixiviación y Botadero Apumayo” no mostraron interacciones con el agua subterránea, mientras que, el “Tajo Apumayo” mostró interacción con el agua subterránea hacia la Fase 1 de operación (año 2015). Finalmente, la **Figura 31 A** –

Sección 5 y 6 indica que el Botadero y Tajo Ayahuanca no presentaron interacción con el agua subterránea hasta la Fase 5 (año 2019).

Figura 29

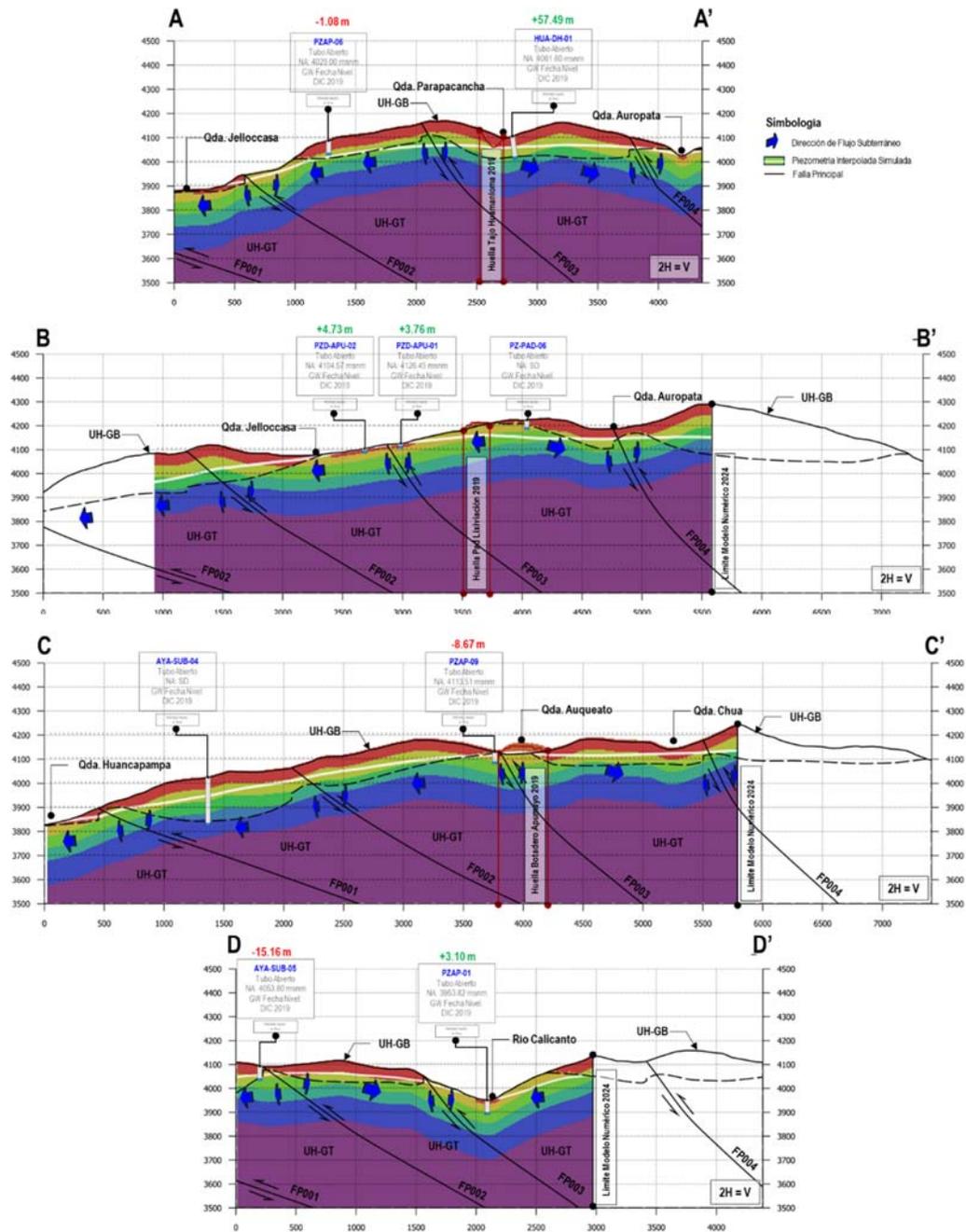
Piezometría Modelada (Free Surface) Calibración Transitoria Año 2019



Fuente: Elaboración Propia 2024

Figura 30

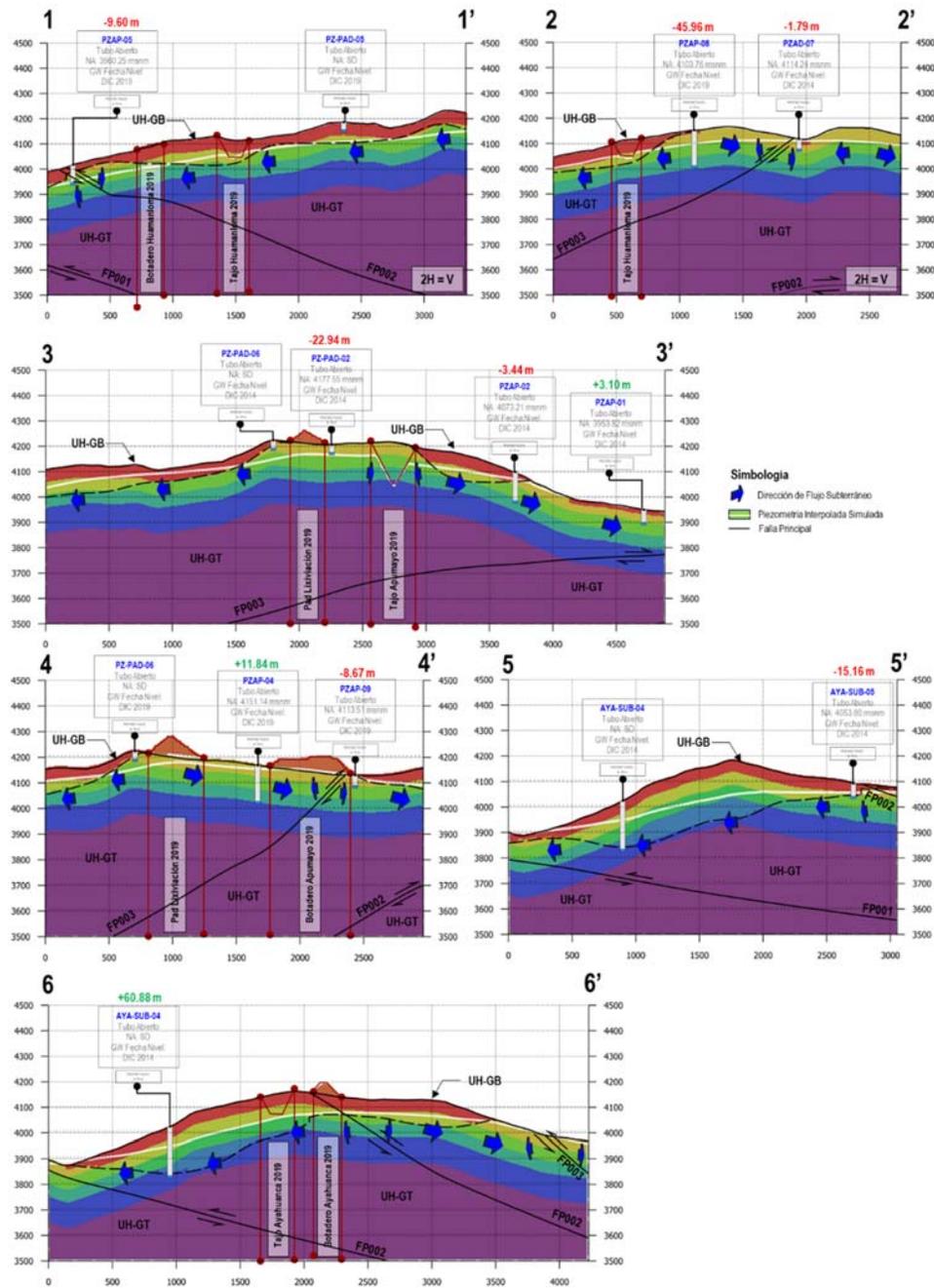
Secciones Hidrogeológicas Regionales Calibración Estacionaria 2014



Fuente: Elaboración Propia 2024

Figura 31

Secciones Hidrogeológicas Locales Calibración Estacionaria 2014



Fuente: Elaboración Propia 2024

Por otro lado, en relación con el flujo base para las sientes (microcuencas) y filtraciones asociadas a los componentes mineros se realizó la configuración mensual para

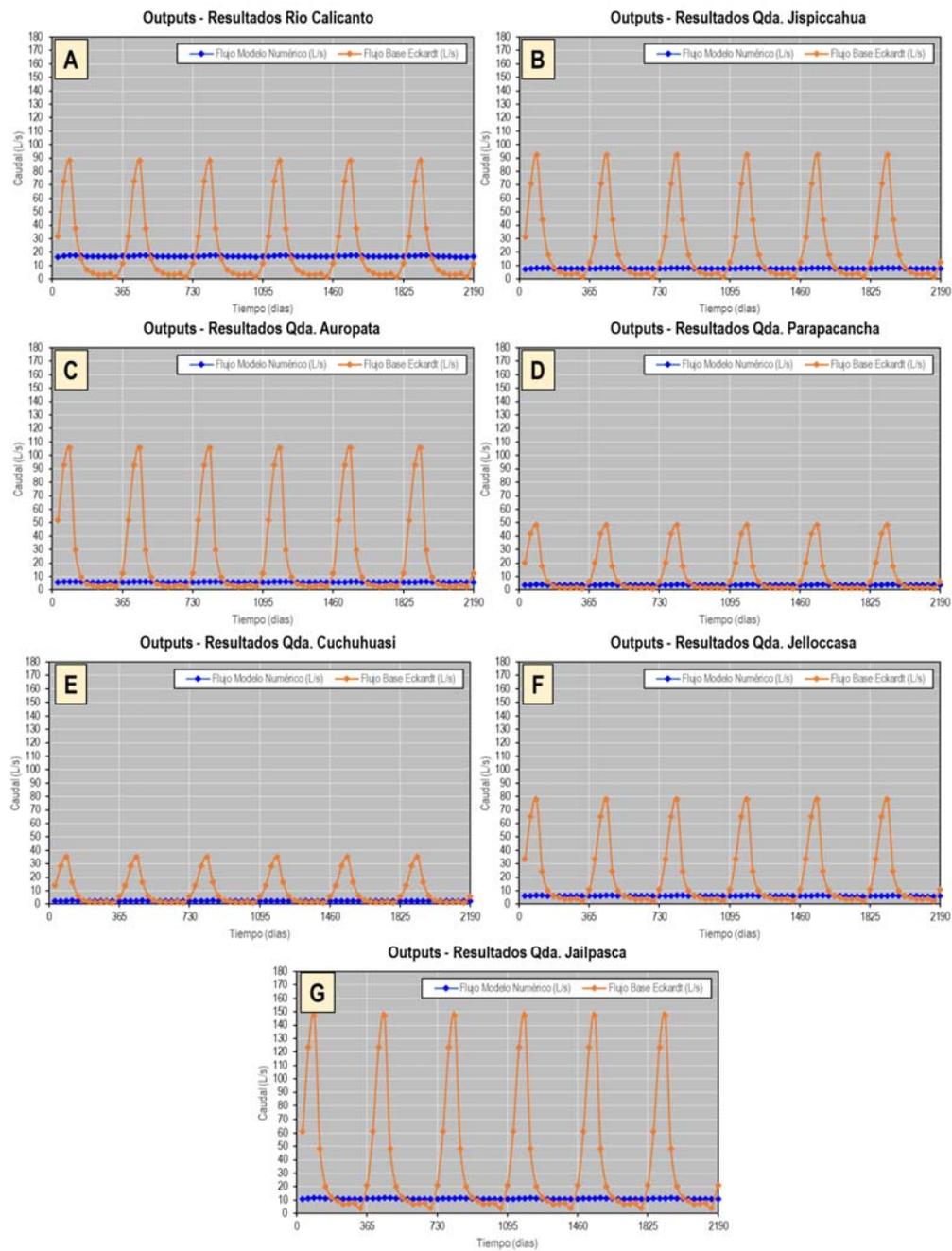
la generación de resultados del modelo numérico entre enero del 2014 (tiempo 0) hasta diciembre del 2019 (tiempo 2190).

El **Gráfico 25** (A, B, C, D, E, F y G) muestra las estimaciones realizadas para las siete (07) microcuencas. En general, de acuerdo con los resultados, el caudal base de las microcuencas oscila entre los 2.5 y 16.9 L/s, donde, la mayor estimación fue desarrollada para el Río Calicanto, mientras que, al menos estimación fue desarrollada para la Quebrada Cuchuhuasi.

El **Gráfico 26** muestra las estimaciones realizadas para los siete (07) componentes mineros. El **Gráfico 26** (A y B) muestran los flujos asociados al Tajo y Botadero Huamanloma, donde, no se apreciaron la presencia filtraciones asociadas con el Botadero Huamanloma. Sin embargo, en el Tajo Huamanloma se estimaron filtraciones mínimas en torno a los 0.58 L/s en promedio a partir de la Fase 3 (año 2017). El **Gráfico 26** (C y D) muestran los flujos asociados al Tajo y Botadero Apumayo, donde, se apreciaron presencia de filtraciones asociadas al Botadero Apumayo en torno a los 3 L/s en promedio a partir de la Fase 1 (año 2015). Por otro lado, en el Tajo Apumayo se estimaron filtraciones mínimas en torno de los 1 L/s en promedio a partir de la Fase 1 (año 2015). **Gráfico 26** (E y F) muestra los flujos asociados al Tajo y Botadero Ayahuanca, donde, no se apreciaron filtraciones asociadas al Botadero y Tajo hasta la Fase 5 (año 2019). Finalmente, la **Gráfico 26** G muestra los flujos asociados con el Pad de Lixiviación, donde, no se apreciaron filtraciones que podrían interactuar con el medio hidrogeológico. Esto último, es de suma importancia, puesto que el tratamiento para la obtención de concentrados de oro y plata conllevan tratamiento con cianuro, que podría generar impactos significativos al agua subterránea y entornos aguas debajo de la mina (pobladores y animales). Sin embargo, este tema no es tocado a fondo en el desarrollo de esta investigación.

Gráfico 25

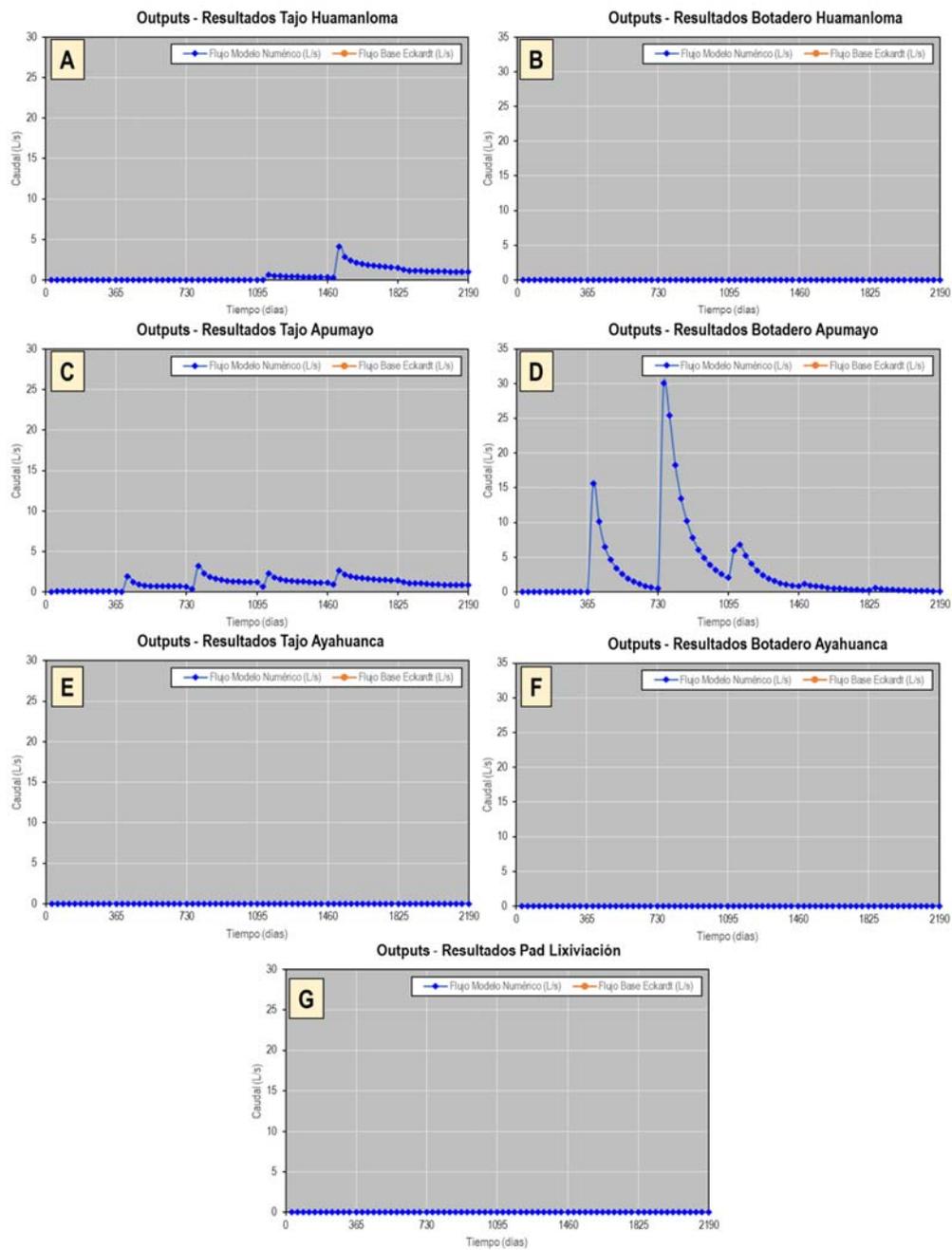
Caudales Estimados en Microcuencas Calibración Transitoria 2014 – 2019



Fuente: Elaboración Propia 2024

Gráfico 26

Caudales Estimado de Componentes Calibración Transitoria 2014 – 2019



Fuente: Elaboración Propia 2024

4.13.3 Consideraciones Piezometría Campo, Régimen Estacionario y Transitorio

4.13.3.1 Piezometría y Dirección de Flujo

El patrón de flujo está dominado por dos (02) secuencias volcánicas de composición andesítica (grupos Barroso y Tacaza). En la primera unidad hidrogeológica (Grupo Barroso), considerado dominado por fracturas, el agua subterránea se mueve de SE a NW, E a W, NE a SW y NW a SE influenciado por la delimitación hidrológica de cada microcuenca. Las recargas se originarían en la parte alta y descargarían hacia el fondo de quebradas y/o ríos. Sin embargo, los datos piezométricos expuestos indican niveles profundos en comparación con el Grupo Tacaza, en otras palabras, con mayor zona no saturada. En la segunda unidad hidrogeológica (Grupo Tacaza), también, dominado por fracturas, el agua subterránea se mueve de SE a NW, E a W, NE a SW y NW a SE influenciado por la delimitación hidrológica de cada microcuenca. Las recargas se originarían en la parte alta y descargarían hacia el fondo de quebradas y/o ríos. Sin embargo, los datos piezométricos expuestos indican niveles cercanos a la superficie en comparación con el Grupo Barroso, en otras palabras, con menor zona no saturada.

La **Tabla 1** muestra los resultados medidos en campo, aquellos obtenidos en el régimen estacionario y régimen transitorio. Para el caso del régimen estacionario el modelo fue calibrado con un NRMS de 9.2% y un Error de Balance de Agua del 0.002%, considerado como valor aceptable para las condiciones iniciales de Pre-Minado, mientras que, el régimen transitorio a diciembre 2019 fue calibrado con un NRMS de 8.3% y un Error de Balance de Agua del 3%, considerado, también aceptable para las condiciones operacionales a diciembre 2019. Sin embargo, se observa una sobreestimación de la cota de agua subterránea en los piezómetros la zona de Ayahuanca y Huamanloma (AYA-SUB-04, AYA-SUB-02 y HUA-DH-01), puesto que estos piezómetros presentaron niveles más profundos que los simulados, mientras que, algunos piezómetros cercanos a

la zona de Pad de Lixiviación (PZ-PAD-02, PZ-PAD-03, CASB-APU-04 (PZAP-05), MEIA-BH-01 (PZ-PAD-05), MEIA-BH-03 (PZ-PAD-06), CASB-APU-03 (PZAP-08) presentaron cierta subestimación de la cota de agua subterránea. Esto puede obedecer, en cierta medida a las permeabilidad y recarga de ingreso asignada al modelo numérico, además, de la incertidumbre asociada con las secuencias volcánicas de los Grupos Barroso y Tacaza, puesto que no se conoce detalladamente las unidades que conforman cada grupo, y finalmente, podría existir una variable asociada a las fallas principales y secundarias, pero esta evaluación hidrogeológica no llega a ese detalle local. Sin embargo, pese a estos grados de incertidumbre, los resultados del modelo numérico estacionarios (2014) y transitorios (2014 – 2015) son considerados aceptables dentro los estándares solicitados para el desarrollo de las simulaciones numéricas y corrobora el gran medida los supuestos considerados en el modelo hidrogeológico conceptual.

Tabla 54

Puntos de Observación Medidos en Campo vs Simulados (Régimen Estacionario y Transitorio)

Código	Cota Campo 2019 (msnm)	Cota Régimen Estacionario 2014 (msnm)	Diferencia (m)	Cota Régimen Estacionario 2019 (msnm)	Diferencia (m)
PZ-PAD-01	4155.13	4139.09	-16.04	4149.41	-5.71
PZ-PAD-02	4200.85	4154.51	-46.34	4177.55	-23.30
PZ-PAD-03	4194.25	4153.49	-40.76	4177.55	-16.70
PZAP-02	4078.74	4059.15	-19.59	4073.21	-5.53
PZAP-04 (PZAP-03)	4142.00	4133.21	-8.78	4151.14	9.14
PZAP-09	4123.07	4102.50	-20.57	4113.51	-9.56
PZAP-10	4087.69	4097.90	10.21	4108.53	20.85
CASB-APU-01 (PZAP-01)	3952.23	3972.32	20.08	3953.82	1.59
CASB-APU-04 (PZAP-05)	3982.14	3947.39	-34.76	3960.25	-21.90
PZAP-06	Húmedo	4014.49	SD	4028.99	SD
PZD-APU-01	4122.12	4124.41	2.29	4126.45	4.34
PZD-APU-02	4098.57	4105.39	6.82	4104.57	5.99
CASB-APU-02 (PZAP-07)	4113.47	4111.44	-2.03	4114.24	0.77
AYA-SUB-03	Húmedo	3933.36	SD	4064.44	SD

Código	Cota Campo 2019 (msnm)	Cota Régimen Estacionario 2014 (msnm)	Diferencia (m)	Cota Régimen Estacionario 2019 (msnm)	Diferencia (m)
AYA-SUB-04	3864.37	3933.36	68.99	3963.55	99.19
AYA-SUB-05	4070.30	4054.40	-15.90	4053.80	-16.51
MEIA-BH-01 (PZ-PAD-05)	4160.50	4117.56	-42.94	4119.31	-41.19
MEIA-BH-03 (PZ-PAD-06)	4211.42	4148.13	-63.30	4157.13	-54.29
MEIA-BH-07 (PZ-PAD-07)	4165.59	4139.46	-26.12	4149.24	-16.34
HUA-DH-01	Húmedo	4050.63	SD	4061.79	SD
PZ-PAD-04 (ITS-BH-03)	4153.89	4129.28	-24.61	4137.04	-16.85
AYA-SUB-02	3981.89	4036.08	54.18	4058.02	76.14
CASB-APU-03 (PZAP-08)	4148.81	4096.76	-52.05	4103.76	-45.05

Fuente: Elaboración Propia 2024

CAPITULO V DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Estimaciones de la Precipitación Total Anual (PTA)

Los estudios previos desarrollado por Walsh (2010) y HGS (2015) muestran estimaciones de la precipitación total anual en el orden del 820.1 mm/años (1964 – 2009) a 877.6 mm/años (1964 – 2014) tomando en consideración la información de datos de precipitación de seis (06) estaciones meteorológicas (Coracora, Chaviña, Ceccaña, Cecchapampa, Paucacorral y Urayhuma) cercanas al área de estudio, todas operadas por el SENAMHI. En el caso de Walsh (2010) generó una estación virtual (Estación Meteorológica Apumayo), donde, se empleó una ecuación lineal que considera la altura media de la ubicación del proyecto para la obtención de la PTA, mientras que, HGS (2015) tomó como referencia los datos obtenidos y completados de la Estación Meteorológica de Ceccaña. Este análisis indica que no existen estaciones meteorológicas cercanas al área de investigación. La estación meteorológica consignada por HGS (2015) se ubica a casi 40 km del área de estudio, mientras que, la estación mar cercada, mencionada por Walsh (2010), se ubica a casi 18 km del área de estudio. Por lo tanto, existe la necesidad de generar información local y distribuida a lo largo del toda el área de estudio lado.

Es así como, Hydroterra (2019) generó 22 estaciones virtuales, mediante la generación de data histórica diaria de precipitación provenientes de la misión “The Tropical Rainfall Measuring Mission” - TRMM (NASA, 2024) y validadas con la información generada por las estaciones meteorológicas operadas por SENAMHI (Lucanas, Coracora y Puquio) estimo una PTA de 586.5 mm/año (1998 – 2017) con el Balance Hidrológico SWAP.

Nosotros, como parte de esta tesis de investigación usamos esta data de precipitación diaria (1998 – 2017) para la obtención de la precipitación mensual y anual

hasta el 2017 para las siete (07) microcuencas (Jailpasca, Jispicahua, Chaviña, Huamanloma, Cuchuhuasi, Parapacancha y Auropata) con valores que oscilan entre los 425.4 mm/año para al Microcuenca Cuchuhuasi y 570 mm/año para la Microcuenca Auropata, muy similares a los obtenidos por Hydroterra (2019). Por lo tanto, consideramos consistente las estimaciones de precipitación para el desarrollo de esta tesis de investigación. Sin embargo, consideramos que, en cierta medida, Walsh (2010) y HGS (2015) sobreestimaron ligeramente la precipitación total anual, según entendemos, por la disponibilidad de data para esos periodos. Esta sobreestimación directamente influyó en la estimación de recarga al sistema subterráneo del modelo hidrogeológico conceptual y numérico del año 2010 y 2015.

5.2 Estimaciones Teóricas del Caudal de Escorrentía y Caudal Base

Los estudios previos desarrollados por HGS (2015) muestran estimaciones de escorrentía anuales para las siete (07) microcuencas, a través de Método de Lutz Scholtz, con valores que ascienden a 1777.3 L/s para la Jailpasca, 1135.7 L/s para Jispicahua, 1170.1 L/s para Chaviña, 1160.5 L/s para Huamanloma, 422.5 L/s para Cuchuhuasi, 684.1 L/s para Parapacancha y 567.8 L/s para Auropata, así como, caudales base anuales, a través del Método de Eckhardt, que ascienden a 835.4 L/s para la Jailpasca, 533.9 L/s para Jispicahua, 549.4 L/s para Chaviña, 545.2 L/s para Huamanloma, 198.5 L/s para Cuchuhuasi, 321.2 L/s para Parapacancha y 267.2 L/s para Auropata.

Nosotros, como parte de esta tesis de investigación, asumimos ciertos parámetros establecidos por HGS (2015) para los coeficientes y valores de las contribuciones de la retención y gasto de abastecimiento (b_i , G_i , a_i y A_i) para las siete (07) microcuencas en estudio, esto con la finalidad de comparar los caudales de escorrentía y flujo base. El Método de Lutz Scholtz permitió estimar valores de 982.9 L/s para la Jailpasca, 623.5 L/s para Jispicahua, 587.3 L/s para Chaviña, 515.7 L/s para Huamanloma, 245.4 L/s para

Cuchuhuasi, 316.8 L/s para Parapacancha y 671.6 L/s para Auropata, así como, caudales base anuales, a través del Método de Eckhardt, que ascienden a 469.3 L/s para la Jailpasca, 297.3 L/s para Jispicahua, 279.7 L/s para Chaviña, 246.3 L/s para Huamanloma, 117 L/s para Cuchuhuasi, 151.3 L/s para Parapacancha y 321 L/s para Auropata. La estimaciones de caudal de escorrentía, por el Método de Lutz Scholtz, guardan mucha relación con las medidas puntuales desarrolladas por Apumayo para los años 2014 y 2015. Sin embargo, los caudales de escorrentía y base muestran estimaciones menores a los órdenes expuestos por HGS (2015) de casi un 50%, pese a conservar los coeficientes y valores de las contribuciones de la retención y gasto de abastecimiento (b_i , G_i , a_i y A_i). Esto debido nuevamente a la sobreestimaciones de los caudales mensuales y anuales por parte de HGS (2015). La **Tabla 55** resumen las estimaciones de caudal de escorrentía y caudal base desarrolladas por HSG (2015) y aquellas obtenidas como parte de esta tesis de investigación a través de los métodos de Scholz (1980) y Eckhardt (2004).

Tabla 55

Estimaciones de Caudal de Escorrentía y Caudal Base Históricos y Actual

Microcuenca	HGS (2015)		Cálculos Actuales (2024)	
	Caudal de Escorrentía (L/s) Método de Lutz Scholtz	Caudal Base (L/s) Método de Eckhardt	Caudal de Escorrentía (L/s) Método de Lutz Scholtz	Caudal Base (L/s) Método de Eckhardt
Jailpasca	1777.3	835.4	982.9	469.3
Jispicahua	1135.7	533.9	623.5	297.3
Chaviña	1170.1	549.4	587.3	279.7
Huamanloma	1160.5	545.2	515.7	246.3
Cuchuhuasi	422.5	198.5	245.4	117.0
Parapacancha	684.1	321.2	316.8	151.3
Auropata	567.8	267.2	671.6	321.0

Fuente: Elaboración Propia

5.3 Composición Iónica y Procesos Hidroquímicos del Agua Subterránea

Los estudios previos desarrollado por Walsh (2010) indican una facie “Bicarbonatada – Cálctica” para los piezómetros (PZAP-02, PZAP-03, PZAP-05 y PZAP-07), una facie “Sulfatada – Sódica” para el piezómetro (PZAP-01), y finalmente, una facie “Sulfatada – Cálctica” para el piezómetro (PZAP-08) para julio 2010, mientras que, HGS (2015) indica una facie “Bicarbonatada – Sódica” para el piezómetro (CASB-APU-01) para noviembre 2014, y finalmente, Hydroterra (2019) indica una facie “Sulfatada – Cálctica” para los piezómetros (PZ-PAD-01, PZ-PAD-03, CASB-APU-02, PZAP-09 y CASB-APU-03) y manantial (MA-AQ-01), facie “Bicarbonatada Cálctica – Sódica” para los piezómetros (PZ-PAD-02 y PZAP-03), y finalmente, facie “Carbonatada – Cálctica” para el piezómetro (AYA-SUB-05) diciembre 2018.

Nosotros, como parte de esta tesis de investigación, identificamos la presencia de una facie mayoritaria “Sulfatada – Cálctica” para los piezómetros (PZAP-07, PZAP-08, PZ-PAD-01, PZ-PAD-03, PZAP-09) y manantial (MA-AQ-01), seguida de una facie “Bicarbonatada – Sódica” para el piezómetro (PZAP-03). Los piezómetros (PZAP-07 y PZAP-08) mantienen facies mantienen facies “Bicarbonatadas – Cálcticas y “Sulfatada – Cálctica” para la época seca (2014) y húmeda (2018), mientras que, una facie “Bicarbonatada Cálctica – Sódica” para el piezómetro (PZAP-03) para la época seca (2014) y húmeda (2018). Los procesos indican que el flujo de agua subterránea es local y la presencia de iones obedece principalmente a procesos de alteración de la roca (alteración ácida de los minerales aluminosilicatos primarios a arcillas y óxidos), así como, a la presencia de cuerpos mineralizados y alteraciones asociadas. Sin embargo, la información histórica analizada no es continua y representativa para un año hidrológico completo para todas las estaciones de monitoreo hidroquímico; por lo que, existe incertidumbre con respecto a la composición química y procesos del agua subterránea en

el Área de Estudio. La **Tabla 56** muestra el resumen de las facies hidroquímicas planteadas por Walsh (2010), HGS (2015), Hydroterra 2018 y las consignas desarrolladas como parte de esta tesis de investigación.

Tabla 56

Facies d Agua Históricos y Actual

Estación	Walsh (2010) Junio 2010	HSG (2015) Noviembre 2014	Hydroterra (2019) Diciembre 2018	Facies Actuales Diciembre 2018
CASB-APU-01 (PZAP-01)	SO4 – Na	HCO3 – Na	–	–
PZAP-02	HCO3 – Ca	–	–	–
PZAP-03	HCO3 – Ca	–	HCO3 – Na	HCO3 – Na
PZAP-05	HCO3 – Ca	–	–	–
CASB-APU-02 (PZAP-07)	HCO3 – Ca	–	HCO3 – Ca	SO4 – Ca
CASB-APU-03 (PZAP-08)	SO4 – Ca	–	HCO3 – Ca	SO4 – Ca
PZ-PAD-01	–	–	HCO3 – Ca	SO4 – Ca
PZ-PAD-02	–	–	HCO3 – Na	Descartado
PZ-PAD-03	–	–	HCO3 – Ca	SO4 – Ca
PZAP-09	–	–	HCO3 – Ca	SO4 – Ca
MA-AQ-01	–	–	HCO3 – Ca	SO4 – Ca
AYA-SUB-05	–	–	CO3 – Ca	Descartado

Fuente: Elaboración Propia

5.4 Balance de Masa del Modelo Numérico en Régimen Estacionario

Los balances de masa del modelo hidrogeológico numérico, en régimen estacionario plantados por Walsh (2010), HGS (2015) y Atocsa (2017) simularon valores muy similares con una recarga total 367.5 L/s y una descarga 367.6 L/s. Por otro lado, Hydroterra (2019), simulo oscilan entre un ingreso de una recarga total 176.0 L/s y una descarga 176.5 L/s. Estas diferencias obedecen principalmente a las sobreestimaciones de precipitación total anual desarrolladas por Walsh (2010 y HGS (2015), que repercuten directamente en la tasa de recarga hacia el sistema hidrogeológico.

Atoccsa (2017) considero los mismos planteamientos que HGS (2015), por lo tanto, estas sobreestimaciones también están reflejadas dentro del balance de masa.

Por otro lado, nosotros como parte del desarrollo de esta tesis de investigación, para simplificar el proceso sustentamos que el sistema se encuentra en equilibrio, es decir la variación de almacenamiento del medio hidrogeológico para cada ciclo hidrológico es despreciable a condiciones naturales a largo plazo. Por lo tanto, el sistema hidrogeológico permite que los ingresos sean igual a las salidas según la ecuación de continuidad. En otras palabras, el caudal base estimado representaría directamente el porcentaje de infiltración de lluvia o recarga al sistema hidrogeológico. Es así como los valores de recarga estimados y simulados en el modelo hidrogeológico conceptual y numérico oscilan entre 70 a 80 mm/año que representa una tasa de recarga del 10 al 20% de la precipitación media anual (PTA) que cae sobre el área de estudio; lo que permitió simular un ingreso de una recarga total 102.4 L/s por infiltración de la precipitación y una descarga de 102 L/s hacia la quebradas y ríos.

Por otra parte, el modelo el régimen transitorio (2014 – 2019) permitió simular un ingreso de una recarga total 109.8 L/s por infiltración de la precipitación y una descarga de 117.4 L/s hacia la quebradas y ríos. Los caudales base mensuales (promedio), estimados con el método de Eckhardt, oscilan entre los 5 a 20 L/s, mientras que, los simulados oscilan entre los 3 a 17 L/s, estos rangos son aceptables de acuerdo con el área de modelación numérica, salvo las simulaciones de la Microcuenca Chaviña, donde, se sobreestimó el caudal simulado de 11 L/s a 17 L/s, cuando la consigna debería haber sido hacia la disminución. Por lo tanto, estas estimaciones son considerados aceptable y realistas, puesto que no se identificaron zonas que podrían incrementar sustancialmente las tasas de recarga.

5.5 Niveles Piezométricos Simulados en Régimen Estacionario

Los niveles de agua simulados por HGS (2015) en régimen estacionario se distribuye en cotas piezométricas del orden de 4000 msnm (hacia las partes altas de las microcuencas) a casi 3600 msnm (hacia las partes de descarga de las microcuencas), mientras que, los de Atoccsa (2017) oscilan entre cotas piezométricas del orden de 4200 msnm (hacia las partes altas de las microcuencas) a casi 3550 msnm (hacia las partes de descarga de las microcuencas). Finalmente, Hydroterra (2019) piezometría simulada en régimen estacionario se distribuye en cotas piezométricas del orden de 4260 msnm (hacia las partes altas de las microcuencas) a casi 3750 msnm (hacia las partes de descarga de las microcuencas). Esto pone en evidencia que HGS (2015) simula niveles freáticos muy por debajo de las condiciones naturales hacia las partes altas de las microcuencas, lo que indicaría un medio, al menos, en termino hidrogeológico más permeables que entren en balance con las tasas de recarga asignada en ese periodo.

Nosotros como parte del modelo hidrogeológico numérico simulamos cotas piezométricas entre los 4200 (hacia las partes altas de las microcuencas) a casi 3800 msnm (hacia las partes de descarga de las microcuencas) tanto para el régimen estacionario como transitorio. Esta estimaciones reflejan muy bien las condiciones hidrogeológicas presentes en el área de estudio y guardan mucha relación con las cotas piezométricas obtenidas por Atoccsa (2017) e Hydroterra (2019). Por lo tanto, la simulaciones numérica son considerada aceptables, tomando en consideración los balances de masa obtenidos, respaldados por valores estadísticos de NMRS entre 9.2% para el régimen estacionario y entre 8.29% (2019) y 10.67 % (2014) para el régimen transitorio.

CONCLUSIONES

1. La precipitación total anual (PTA) del área del modelo hidrogeológico conceptual varía entre los 425.4 mm/año para al Microcuenca Cuchuhuasi y 570 mm/año para la Microcuenca Auropata, donde la época húmeda se distribuye entre los meses lluviosos de octubre a marzo y los meses secos entre mayo a agosto, mientras que los meses de transición podrían ser abril y setiembre. La temperatura promedio mensual oscila entre los 9.1 a 15.4 °C, con una temperatura media anual alrededor de los 12.2 °C. La evapotranspiración mensual varía entre unos 11.3 mm para el mes de julio y 57.3 mm para el mes marzo, con una evapotranspiración anual que asciende a unos 307 mm/año. Esto indicaría que casi el 50% a 60% de la precipitación total anual es afectado por la evapotranspiración. Finalmente, a través del Método de Eckhardt se estimaron caudales bases anuales en el orden de 117 L/s para la Microcuenca Cuchuhuasi y 469.3 L/s para la Microcuenca Jailpasca, lo que representaría un ingreso de recarga al sistema en el orden del 13 al 18% de la precipitación total anual.
2. El área de estudio está dominada por dos (02) secuencias volcánicas de composición andesítica (grupos Barroso y Tacaza). El contacto entre los grupos Barroso y Tacaza presentan buzamiento entre 0 a 25°; pues generalmente, el Grupo Barroso (UH-GB) se ha depositado siguiendo, posiblemente, paleo-superficies heredadas por el Grupo Tacaza (UH-GT). Además, se encuentran afectados por cuatro (04) fallas principales (FP001, FP002, FP003 y FP004) de carácter inverso de dirección SW a NE entre los 10 – 15° (FP001), 10 – 30° (FP002), 20 – 45° (FP003) y 20 – 50° (FP004), todas hacia el NE. El Grupo Barroso puede alcanzar hasta los 200 m de espesor, donde los máximos espesores fueron mapeados hacia los extremos NE y SW, mientras que, hacia la parte central el espesor disminuye; mientras que, el Grupo Tacaza puede alcanzar los 1200 m de espesor, donde, el máximo espesor fue mapeado hacia la parte central del área de

estudio, seguido por el sector NE, y finalmente, SO. Las fallas FP003 y FP004 presentan una tendencia similar y por los buzamientos que varían desde 20° a 50° forman parte del sistema principal de fallas Apumayo, mientras que las fallas FP001 y FP002 debido al buzamiento que varían desde 10° a 20° podrían formar parte del mismo sistema de fallas mediante un comportamiento de planar escalonada.

3. Se determinaron dos (02) unidades hidrogeológicas. La primera correspondiente al Grupo Barroso (UH-GB) y la segunda al Grupo Tacaza (UH-GT). El Grupo Barroso presenta valores de conductividad hidráulica ligeramente superiores al Grupo Tacaza, donde, ambos rangos oscilan entre los $1e-7$ y $1e-4$ m/s. En términos generales, esto denotaría medios hidrogeológicos fracturados “Poco Permeables”. Sin embargo, a mayor profundidad, podrían adquirir un comportamiento de medios hidrogeológicos fracturados de “Baja Permeabilidad e Impermeabilidad” con rangos entre $1e-9$ y $1e-7$ m/s. Conceptualmente, esto indicaría que el Grupo Barroso se comportaría como un medio fracturado “Poco Permeable” y el Grupo Tacaza como un medio fracturado de “Baja Permeabilidad” con gradientes que muestran medios de “Baja Permeabilidad a Impermeables”. Finalmente, tomando en consideración el esquema de clasificación de acuíferos propuesto por Struckmeier y Margat (1995), se afirma que el Grupo Barroso actuaría dentro de la “Categoría E” como acuífero menor con recursos de agua subterránea local y limitado para el área de estudio, mientras que, el Grupo Tacaza actuaría dentro de la “Categoría F” con la no presencia de recursos de agua subterránea para el área de estudio.
4. El agua subterránea fluye de SE a NW, E a W, NE a SW y NW a SE influenciado por la delimitación hidrológica de cada microcuenca; donde las recargas se originarían en la parte alta y descargarían hacia el fondo de quebradas y/o ríos. Las características químicas denotan aguas jóvenes y/o locales de composición Iónica Bicarbonatada Cálcida,

Bicarbonatada Sódica y Sulfatadas Cálcica asociados a procesos de alteración de las rocas volcánicas de composición andesítica, donde, los iones Sulfato (SO_4^{2-}) y Sodio (Na^{1+}) no superan las concentraciones de 1.8 mg/L y 1.1 mg/L; en comparación con las concentraciones típicas en el agua subterránea de 10 – 100 mg/L (Cecamin, 2020).

5. El modelo numérico en régimen estacionario fue calibrado con un NRMS de 9.2% y un Error de Balance de Agua del 0.002%, considerado como valor aceptable para las condiciones iniciales de Pre-Minado, mientras que, el régimen transitorio a diciembre 2019 fue calibrado con un NRMS de 8.3% y un Error de Balance de Agua del 3%, considerado, también aceptable para las condiciones operacionales a diciembre 2019. Los caudales base mensuales (promedio), estimados con el método de Eckhardt, oscilan entre los 5 a 20 L/s, mientras que, los simulados oscilan entre los 3 a 17 L/s, estos rangos son aceptables de acuerdo con el área de modelación numérica, salvo las simulaciones de la Microcuenca Chaviña, donde, se sobreestimó el caudal simulado de 11 L/s a 17 L/s, cuando la consigna debería haber sido hacia la disminución. El modelo numérico no muestra la generación de filtraciones en el Pad de Lixiviación, Botadero Ayahuanca, Botadero Huamanloma y Tajo Ayahuanca desde las actividades de Pre-Minado hasta la fase operativa de diciembre 2019, lo cual es coherente con los reportes históricos de Apumayo y las observaciones realizadas en la visita de campo entre el 2018 y 2019. Sin embargo, se simuló flujos en el orden de 0.78 y 1 L/s hacia los tajos Huamanloma y Apumayo, durante la Fase 3 (2017) en adelante para el Tajo Huamanloma y la Fase 1 (2015) en adelante para el Tajo Apumayo, así como, filtraciones del orden de 1 L/s para el Botadero Apumayo. Estas estimaciones son congruentes, puesto que en las visitas de campo del 2018 y 2019 se evidenciaron filtraciones y humedad hacia las paredes del Tajo Huamanloma y filtraciones en el orden de 2 a 3 L/s en el Tajo Apumayo. Estos datos en

conjunto respaldan de manera adecuada el modelo hidrogeológico conceptual para el área de estudio.

RECOMENDACIONES

1. Actualizar el contexto hidrológico con data histórica de precipitación nueva, año 2018 en adelante, para la estimación futura de precipitaciones mensuales y anuales en el área de estudio. Esto también, repercute directamente en las estimaciones teóricas de caudales de escorrentía y caudal base de las siete (07) microcuencas.
2. Realizar el aforo de caudal de escorrentía mensual durante todo un ciclo hidrológico, en otras palabras, durante todo un año en la siete (07) microcuencas. Esto con la finalidad de corroborar las estimaciones tóricas desarrolladas con el Método de Lutz Scholtz y Eckhardt. Esto también, repercute directamente en la calibración de los resultados de caudal base del modelo hidrogeológico numérico.
3. Se requiere realizar estudios más detallados en el ámbito estructural para definir de manera más precisa el conjunto de fallas principales y sus conjugadas en relación a los diferentes buzamientos que estos presentan.
4. Realizar un monitoreo y muestreo hidroquímico continuo mensual o bien representativo de la época húmeda y seca, que permita realizar una adecuada interpretación de las facies y procesos hidroquímicos en el área de estudio. Esto también, podría ayudar con el análisis e identificación de posibles plumas que den soporte al desarrollo de un modelo hidrogeológico de transporte de contaminantes.
5. Utilizar el modelo hidrogeológico numérico como base para el análisis de sensibilidad, simulaciones futuras (año 2020 en adelante) y transporte de contaminantes para las etapas de cierre y post-cierre de la U.M. Apumayo considerando, al menos, un periodo de 30 años (años 2020 al 2050) que permitan comparar los resultados planteados y simulados por Atoccsa (2017).

6. Mantener la red de monitoreo de niveles de agua subterránea (piezómetros) actualizada y conservar su operatividad en etapas de cierre y post cierre que permitan dar sustentos a las simulaciones futuras (año 2020 en adelante).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Arévalo, V. (2008). *Geología del área Carrizal Bajo-Chacritas: Región de Atacama*. Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería. Subdirección Nacional de Geología.
- Batemán, A. (2007). *Hidrología básica y aplicada*. UPC .
- Borja Suárez, M. (2016). *Metodología de Investigación Científica para ingeniería Civil*. Chiclayo.
- Campubrí, A., & Albinson, T. (2006). Depósitos epitermales en México: Actualización de su conocimiento y reclasificación empirica . *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* , LVIII(1), 27-81.
- Cantú, F., Ventura, R., Heyer, L., Roquera, G., Guevara, O., & Nerl, E. (2021). Water-rock interactions in a karst aquifer located in southwestern tamaullipas, México. *Carbonates and Evaporation*, I(1), 36-59.
- Chacón, A., Cerpa, L., Martínez, J., Coba, L., & Ayala, L. (2014). *Controles litológico y estructurales de la ocurrencia de depósitos minerales relacionados a los centros volcánicos en el sector de Chaviña Ayacucho Sur del Perú* . Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, INGEMMET.
- Cortéz, J. (2018). Disponibilidad Hídrica de la microcuenca Toromacho, utilizando el modelo determinístico estocástico Lutz Scholz y el volumen transiest de la cuencia Tres Ríos. *Tesis de titulación*. Universidad Nacional de Cajamarca Facultad de Ingeniería, Cajamarca.
- Custodio, E., & LLamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega S.A.

- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Fuertes, W. (2014). Evaluación de la validez de los resultados de los ensayos Lugeon en un macizo rocoso fracturado, por medio de un enfoque tensional de la conductividad hidráulica. *Tesis de titulación*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- GEOTECHNO. (20 de julio de 2024). *GEOTECHNO*.
- Hamm, S., Kim, M., Cheong, J., Kim, J., Son, M., & Kim, T. (2007). Relationship between hydraulic conductivity and fracture properties estimated from packer test and borehole data in a fractured granite. *Engineering Geology*, *XCII(5)*, 73-87.
- HGS. (2015). *Estudio Hidrológico-hidrogeológico para la modificación del estudio de impacto ambiental del proyecto Apumayo*. Hydrogeological y Geotechnical Services Perú S.A. .
- Houlsby, A. (1976). Routine Interpretation of the Lugeon Water-Test. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, *IX(2)*, 303-313.
doi:<https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1976.009.04.03>
- HydroTerra. (2019). *Actualización del Estudio de Hidrogeología de la U.M. Apumayo*. HydroTerra SAC.
- IGME. (1984). *Pozos y acuíferos*. Instituto Geológico y Minero de España.
- INGEMMET . (2017). *Memoria descriptiva revisión y actualización del cuadrángulo de Apumayo* . Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Ministerio de Agricultura - Autoridad Nacional del Agua . (2012). *Delimitación y codificación de Unidades Hidrográficas del Perú* . Ministerio de Agricultura.

- NASA. (15 de agosto de 2024). *The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)*.
Obtenido de TRMM: <https://gpm.nasa.gov/missions/trmm>
- Ren, J. (2021). *Typical Riedel shear structures of the coseismic surface rupture zone*.
Beijing: Research Gate.
- Sánchez, J. (2014). *Medidas puntuales de permeabilidad ("slug tests")*. Departamento de
Geología de la Universidad de Salamanca .
- Sancho, J. (2022). Determinación de la disponibilidad hídrica superficial con fines
agrarios en la cuenca Huancané, departamento de Puno. *Tesis de titulación*.
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- SENAMHI. (20 de agosto de 2024). *Ministerio del Ambiente - SENAMHI* . Obtenido de
SENAMHI: <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=ayacucho&p=estaciones>
- Sholz, L. (1980). *Generación de caudales mensuales en la sierra de Perú*. Cusco: Plan
Meris.
- Stoffregen, R. (1987). Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at
Summiville. *Economic Geology*, *LXXXVI*(6), 1575-1591.
doi:<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.6.1575>
- Walraevens, K., Bakundukize, C., Enock, Y., & Van, M. (2018). Understanding the
hydrogeochemical evolution of groundwater in precambrian basement aquifers: a
case study of Bugeresha region in Burundi. *Journal of Geochemical Exploration*,
1(3), 1-47. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.01.003>
- Walsh. (2010). *Estudio hidrológico -hidrogeológico del proyecto Apumayo* . Walsh Perú
S.A.
- Zekai, S. (2015). *Practical and applied hydrogeology* . El Servier.

Zhang, B., Zhao, D., Zhou, P., Qu, S., Liao, F., & Wang, G. (2020). Hydrochemical Characteristics of Groundwater and Dominant Water-Rock Interactions in the Delingha Area, Qaidam Basin, Northwest China. *Water*, *LXXIII*(836), 1-16.

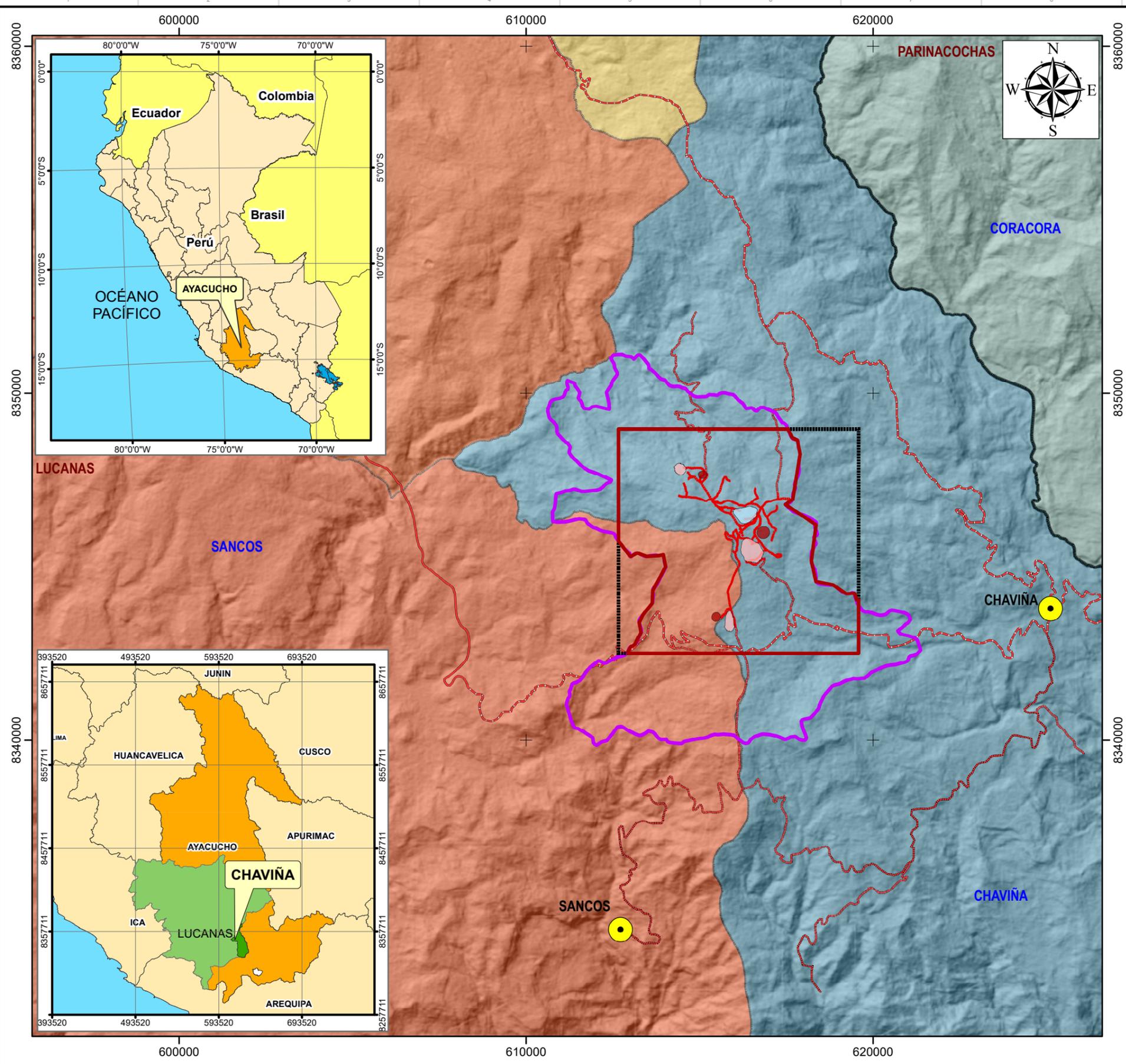
ANEXOS

MATRIZ DE CONSISTENCIA

TESISTAS: JUAN JOSÉ ZECENARRO CHOQUE, PERCY MEZA CABRERA

TITULO DE LA INVESTIGACION: “MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO DEL YACIMIENTO EPITERMAL DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO, PROVINCIA DE LUCANAS, REGION AYACUCHO - PERÚ, 2023”

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGIA
PG: ¿Cómo es el modelo hidrogeológico conceptual y numérico de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú?	OG: Definir el modelo hidrogeológico conceptual y numérico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú.	HG: El modelo hidrogeológico conceptual y numérico de la unidad minera Apumayo muestra la existencia de un sistema hidrogeológico complejo dominado por secuencias volcánicas del Grupo Tacaza y Grupo Barroso que interactúan con depósitos cuaternarios fluvio-glaciares en un entorno poco permeable y de baja permeabilidad.	<p>Variables independientes:</p> <p>Modelo hidrogeológico conceptual</p> <p>Variables dependientes:</p> <p>Modelo hidrogeológico numérico</p>	<p>Conceptual:</p> <p>Geología</p> <p>Hidrología</p> <p>Hidrogeología</p> <p>Hidroquímica</p> <p>Numéricos:</p> <p>Modelo geológico 3D</p> <p>Propiedades de los materiales</p> <p>Condiciones de contorno</p>	<p>Tipo de investigación:</p> <p>Aplicada</p> <p>Nivel de investigación:</p> <p>Descriptiva</p> <p>Diseño de investigación:</p> <p>No experimental</p> <p>Técnica de recolección de datos:</p> <p>Observación de campo, Ensayos in situ, Ensayos de laboratorio, Recolección de datos, Hoja de cálculo, datos pluviométricos, uso de softwares de hidrogeología y modelamiento geológico en 3D.</p>
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS			
PE1: ¿Cuáles son las condiciones hidrológicas como parte del proceso de recarga al sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú?	OE1: Determinar las condiciones hidrológicas como parte del proceso de recarga al sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú	<p>HE1: Las condiciones hidrológicas como parte del proceso de recarga al sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, son las adecuadas y están dominados por depósitos cuaternarios y rocas volcánicas fracturadas y alteradas del Grupo Barroso.</p> <p>HE2: Geológicamente, en el yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, dominan las secuencias volcánicas (en su mayoría andesitas y algo de dacitas). Estructuralmente el medio está controlado por sistemas de fallas NW, de carácter inverso sinextral.</p> <p>HE3: Hidrogeológicamente, en el yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, se muestra un contexto de permeabilidad variable, además de predominar los acuíferos libres.</p> <p>HE4: El comportamiento hidroquímico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, muestra facies hidroquímica y parámetros fisicoquímicos de pH, conductividad eléctrica y temperatura que denotan tendencias al equilibrio en el medio hidrogeológico.</p> <p>HE5: El modelo hidrogeológico conceptual sirve como base, en conjunto con la topografía 3D, modelo geológico 3D y propiedades de los materiales para generar el modelo hidrogeológico numérico de la unidad minera Apumayo. De esta manera el modelo hidrogeológico numérico valida de manera correcta el modelo hidrogeológico conceptual.</p>	<p>Unidad de análisis:</p> <p>Puntos de muestro</p> <p>Universo:</p> <p>Yacimiento minero de la unidad minera Apumayo.</p> <p>Población:</p> <p>Acuífero y macizos rocosos del yacimiento minero</p> <p>Muestra:</p> <p>Datos tomados a partir de manantiales, piezómetros y ensayos en sondajes en el yacimiento minero.</p>		
PE2: ¿Qué condiciones geológicas y estructurales están presentes en el sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú?	OE2: Identificar las condiciones geológicas y estructurales presentes en el sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú.				
PE3: ¿Cuáles son las condiciones hidrogeológicas presentes en el sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú?	OE3: Determinar las condiciones hidrogeológicas presentes en el sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú.				
PE4: ¿Cuáles son las condiciones hidroquímicas y parámetros físico químicos presentes en el sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú?	OE4: Identificar las condiciones hidroquímicas y parámetros físico químicos presentes en el sistema hidrogeológico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú.				
PE5: ¿Cómo se validan los resultados del modelo hidrogeológico conceptual del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú?	OE5: Validar los resultados del modelo hidrogeológico conceptual mediante un modelo hidrogeológico numérico del yacimiento epitermal de la unidad minera Apumayo, provincia de Lucanas, región Ayacucho, Perú.				



SIMBOLOGIA	
	CAPITAL DE DISTRITO
	CAMINO MINERO
	CARRETERA AFIRMADA
	CARRETERA SIN AFIRMAR
	TROCHA CARROSABLE
	LIMITE MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL
	LIMITE MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMERICO
	LIMITE ANÁLISIS HIDROLÓGICO
COMPONENTES MINEROS	
	HUELLA BOTADEROS 2019
	HUELLA PAD DE LIXIVIACION 2019
	HUELLA TAJOS 2019

NOTAS:

1. TOPOGRAFÍA EXTRAIDA DE LA CARTA NACIONAL.
2. EL PLANO SE ENCUENTRA GEOREFERENCIADO EN EL DATUM WGS-84, ZONA 19S.



REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	DIBUJADO	DISEÑADO	REVISADO	APROBADO
3	DIC. 2024	EMITIDO PARA REVISIÓN FINAL	JZC/PMC	JZC/PMC	JCR	JCR

UNIVERSIDAD:

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONI ABADEL CUSCO

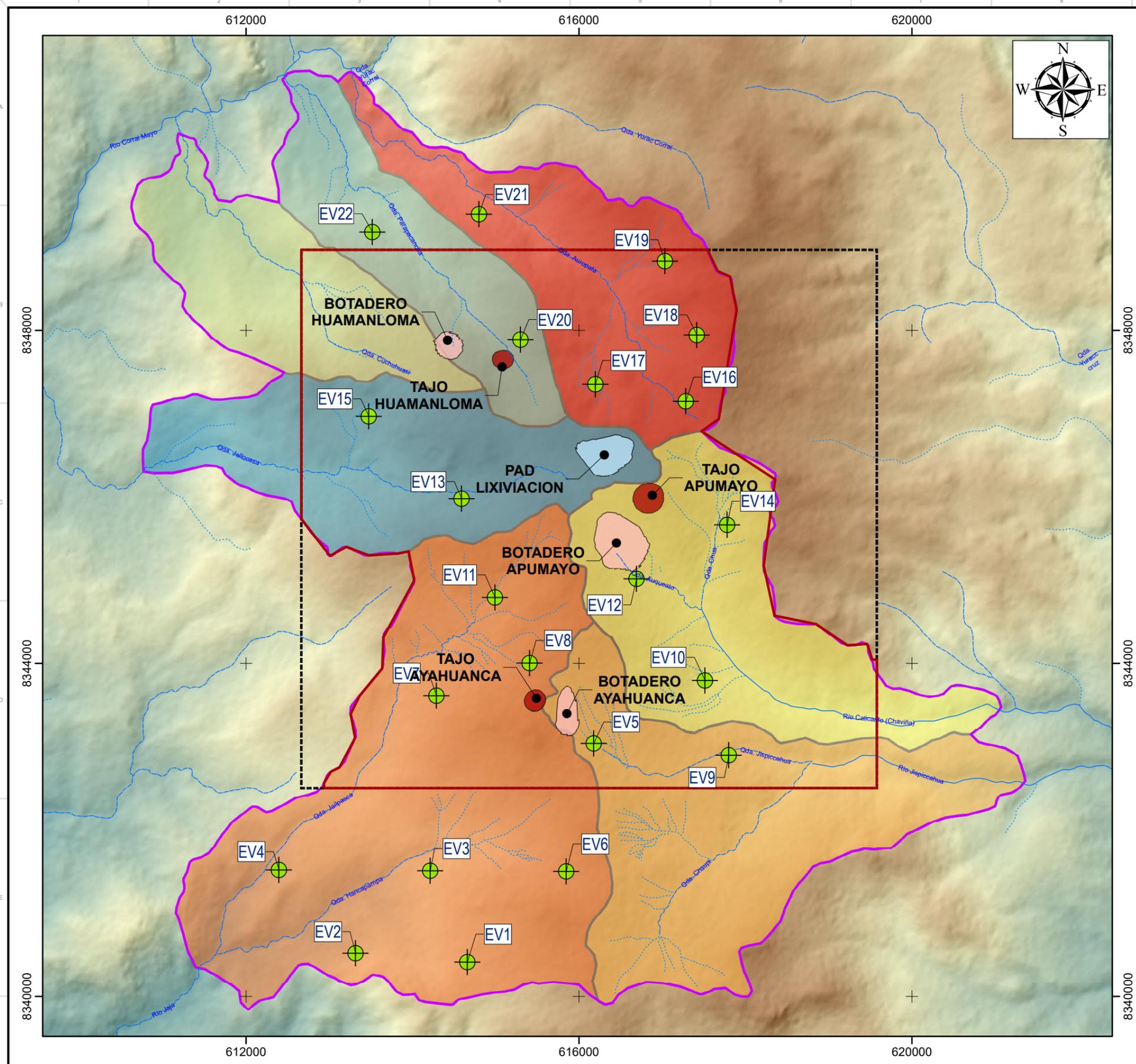
ESCUELA:

 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

PROYECTO:
 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO DEL YACIMIENTO EPITERMAL DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO, PROVINCIA DE LUCANAS, REGIÓN AYACUCHO - PERÚ 2023

PLANO:
 MAPA DE UBICACIÓN - PLANTA

ESCALA: INDICADA	N° PROYECTO: TERCER BORRADOR	PLANO N°: LAMINA-001	REVISIÓN: 3
---------------------	---------------------------------	-------------------------	----------------



LEYENDA

- MICROCUENCA AUROPATA
- MICROCUENCA CHAVIÑA
- MICROCUENCA CUCHUHUASI
- MICROCUENCA HUAMANLOMA
- MICROCUENCA JAILPASCA
- MICROCUENCA JISPICCAHUA
- MICROCUENCA PARAPACANCHA

SIMBOLOGÍA

- RIOS
- QUEBRADAS SECAS
- QUEBRADAS
- LIMITE MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL
- LIMITE MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMERICO
- ESTACION METEOROLOGICA VIRTUAL

COMPONENTES MINEROS

- HUELLA BOTADEROS 2019
- HUELLA PAD DE LIXIVIACION 2019
- HUELLA TAJOS 2019

NOTAS:

1. TOPOGRAFÍA EXTRAIDA DE LA CARTA NACIONAL.
2. EL PLANO SE ENCUENTRA GEOREFERENCIADO EN EL DATUM WGS-84, ZONA 19S.



REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	DIBUJADO	DISEÑADO	REVISADO	APROBADO
3	DIC. 2024	EMITIDO PARA REVISIÓN FINAL	JZC/PMC	JZC/PMC	JCR	JCR

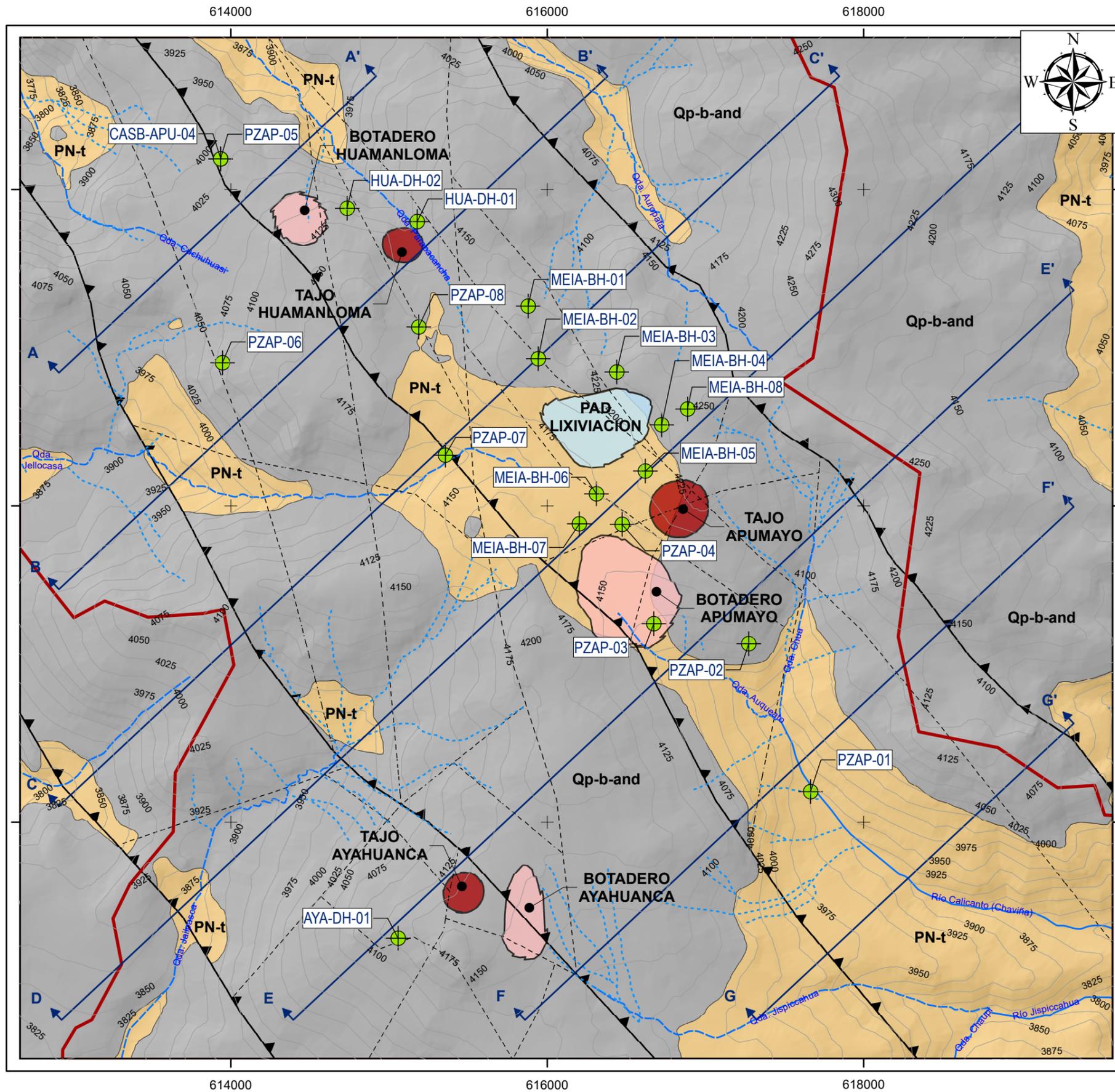
UNIVERSIDAD:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO

ESCUELA:

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

PROYECTO: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO DEL YACIMIENTO EPITERMAL DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO, PROVINCIA DE LUCANAS, REGIÓN AYACUCHO - PERÚ 2023			
PLANO: ESTACIONES METEOROLOGICAS VIRTUALES - PLANTA			
ESCALA: INDICADA	N° PROYECTO: TERCER BORRADOR	PLANO N°: LAMINA-002	REVISIÓN: 3



LEYENDA

Q-fl/al CUATERNARIO-----> DEPÓSITOS FLUVIOALUVIALES DE MÍNIMO ESPESOR

Qp-b-and GRUPO BARROSO-> LAVAS ANDESÍTICAS

PN-t GRUPO TACAZA-----> LAVAS ANDESÍTICAS, ARENISCAS Y LIMOLITAS

SIMBOLOGÍA

▲ FALLA PRINCIPAL

--- FALLA SECUNDARIA

— RIOS

--- QUEBRADAS SECAS

--- QUEBRADAS

--- CURVAS CADA 50 M

↑ SECCIONES GEOLOGICAS

— LIMITE INTEGRACIÓN GEOLOGICA

▭ LIMITE MODELO HIDROGEOLOGICO NUMERICO

● PERFORACIONES DIAMANTINAS

COMPONENTES MINEROS

▭ HUELLA BOTADEROS 2019

▭ HUELLA PAD DE LIXIVIACION 2019

▭ HUELLA TAJOS 2019

NOTAS:

1. TOPOGRAFÍA EXTRAIDA DE LA CARTA NACIONAL.

2. EL PLANO SE ENCUENTRA GEOREFERENCIADO EN EL DATUM WGS-84, ZONA 19S.



REVISIONES	FECHA	DESCRIPCIÓN	DIBUJADO	DISEÑADO	REVISADO	APROBADO
3	DIC. 2024	EMITIDO PARA REVISIÓN FINAL	JZC/PMC	JZC/PMC	JCR	JCR

UNIVERSIDAD:



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO

ESCUELA:

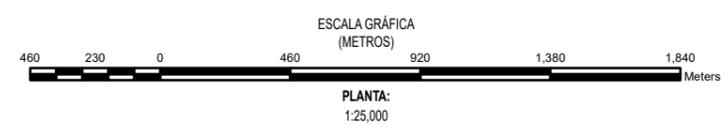
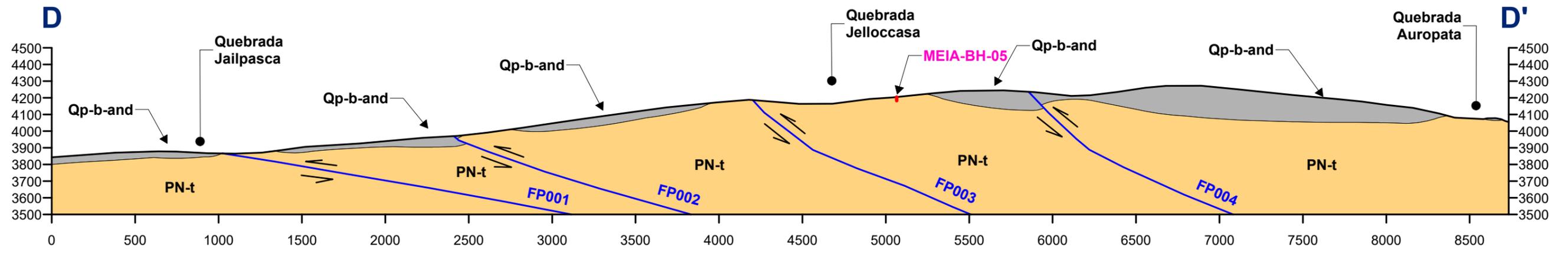
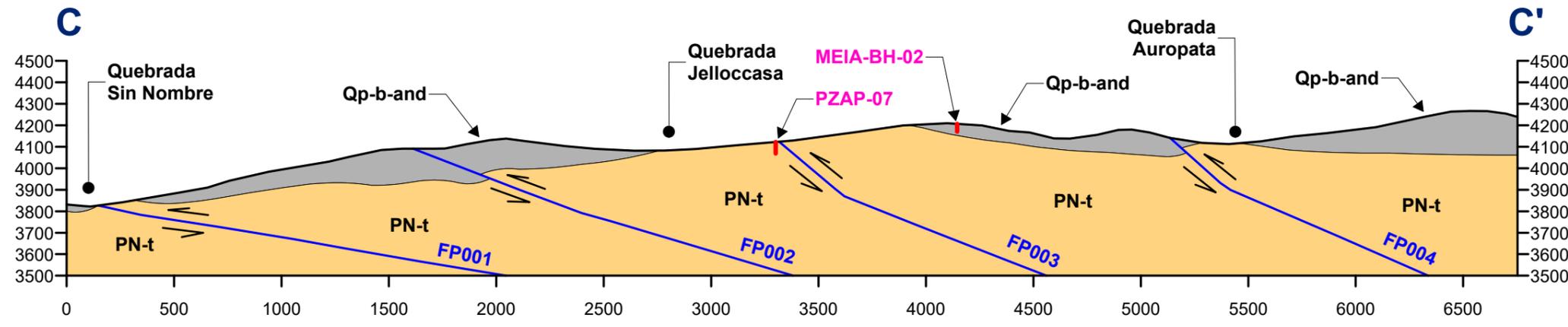
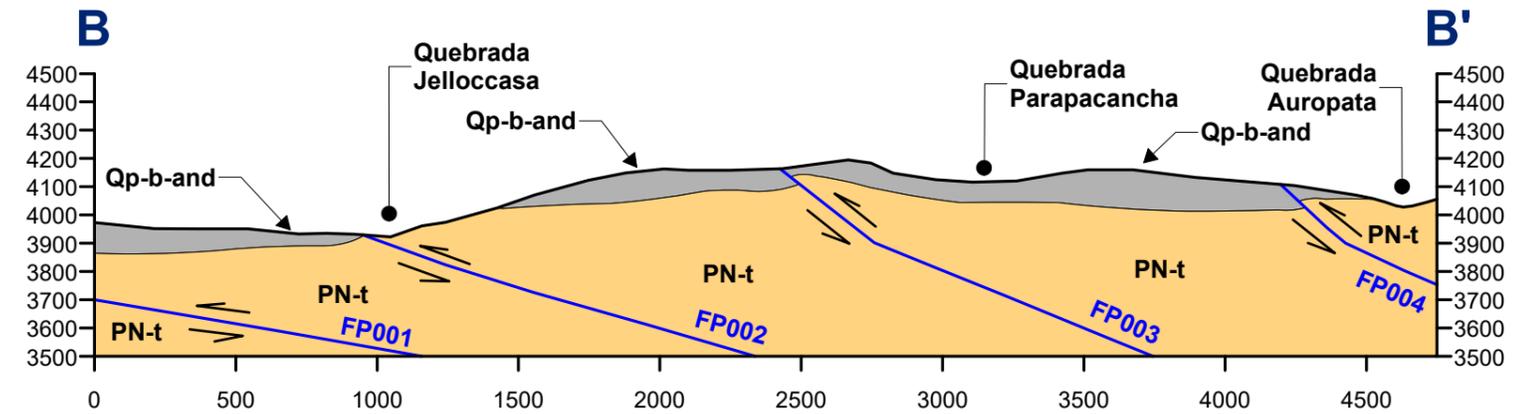
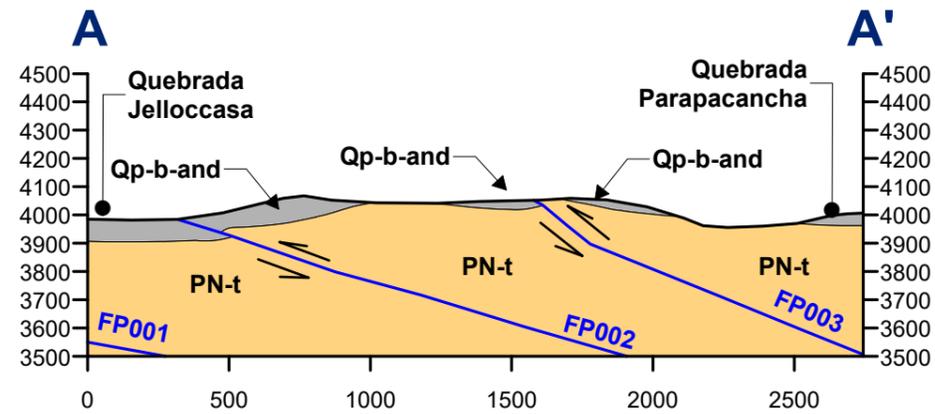


ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

PROYECTO:
MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL Y NUMERICO DEL YACIMIENTO EPITERMAL DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO, PROVINCIA DE LUCANAS, REGION AYACUCHO - PERU 2023

PLANO:
MAPA GEOLOGICO INTEGRADO

ESCALA: INDICADA	N° PROYECTO: TERCER BORRADOR	PLANO N°: LAMINA-003	REVISIÓN: 3
---------------------	---------------------------------	-------------------------	----------------



REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	DIBUJADO	DISEÑADO	REVISADO	APROBADO
3	DIC. 2024	EMITIDO PARA REVISIÓN FINAL	JZC/PMC	JZC/PMC	JCR	JCR

UNIVERSIDAD:

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO

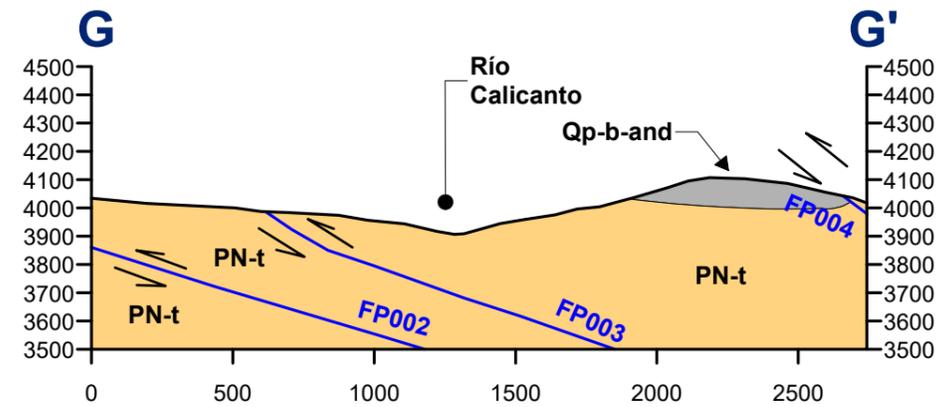
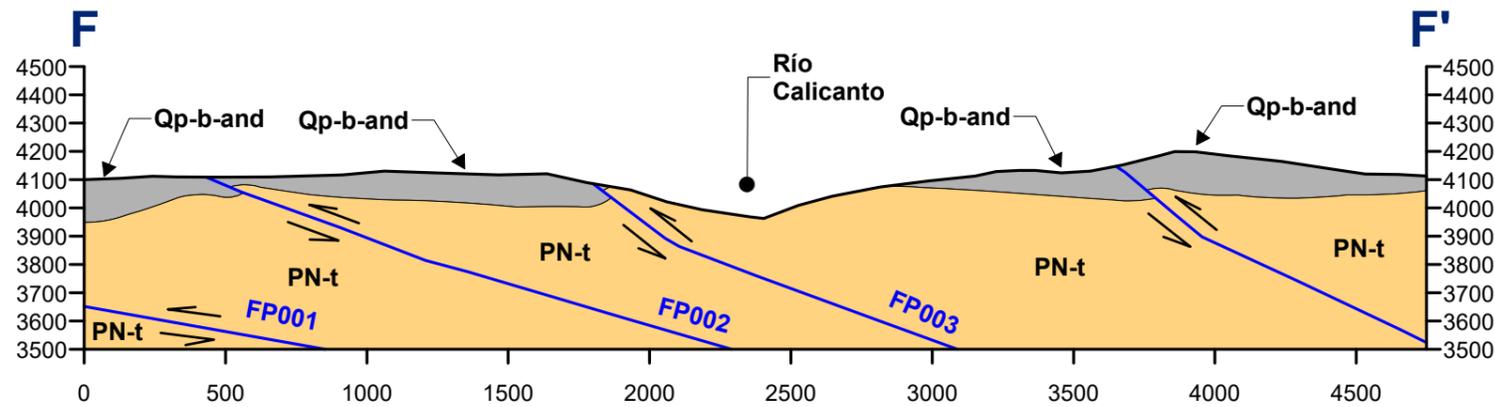
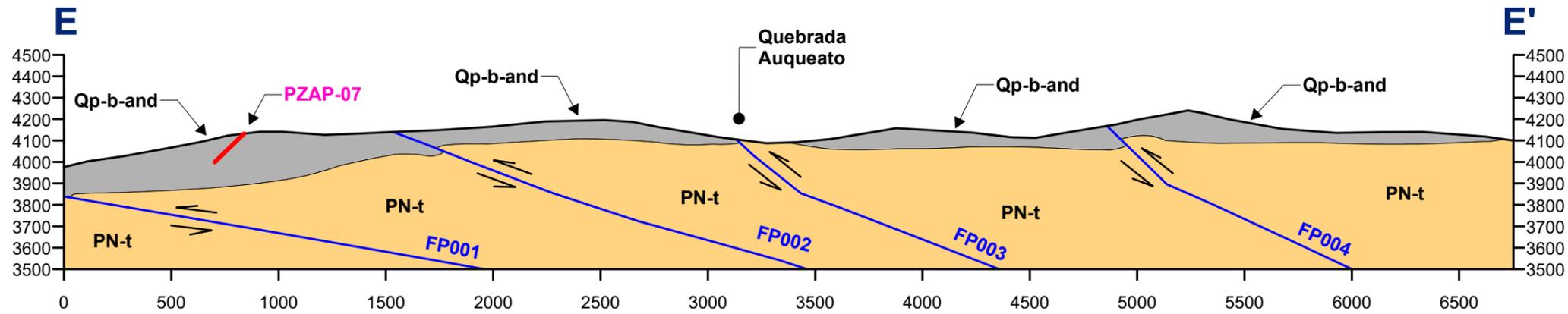
ESCUELA:

 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

PROYECTO:
 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO DEL YACIMIENTO EPITERMAL DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO, PROVINCIA DE LUCANAS, REGIÓN AYACUCHO - PERÚ 2023

PLANO:
 SECCIONES GEOLÓGICAS A-A', B-B, C-C' Y D-D'

ESCALA: INDICADA	N° PROYECTO: TERCER BORRADOR	PLANO N°: LAMINA-004	REVISIÓN: 3
---------------------	---------------------------------	-------------------------	----------------



REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	DIBUJADO	DISEÑADO	REVISADO	APROBADO
3	DIC. 2024	EMITIDO PARA REVISIÓN FINAL	JZC/PMC	JZC/PMC	JCR	JCR

UNIVERSIDAD:

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONI ABAD DEL CUSCO

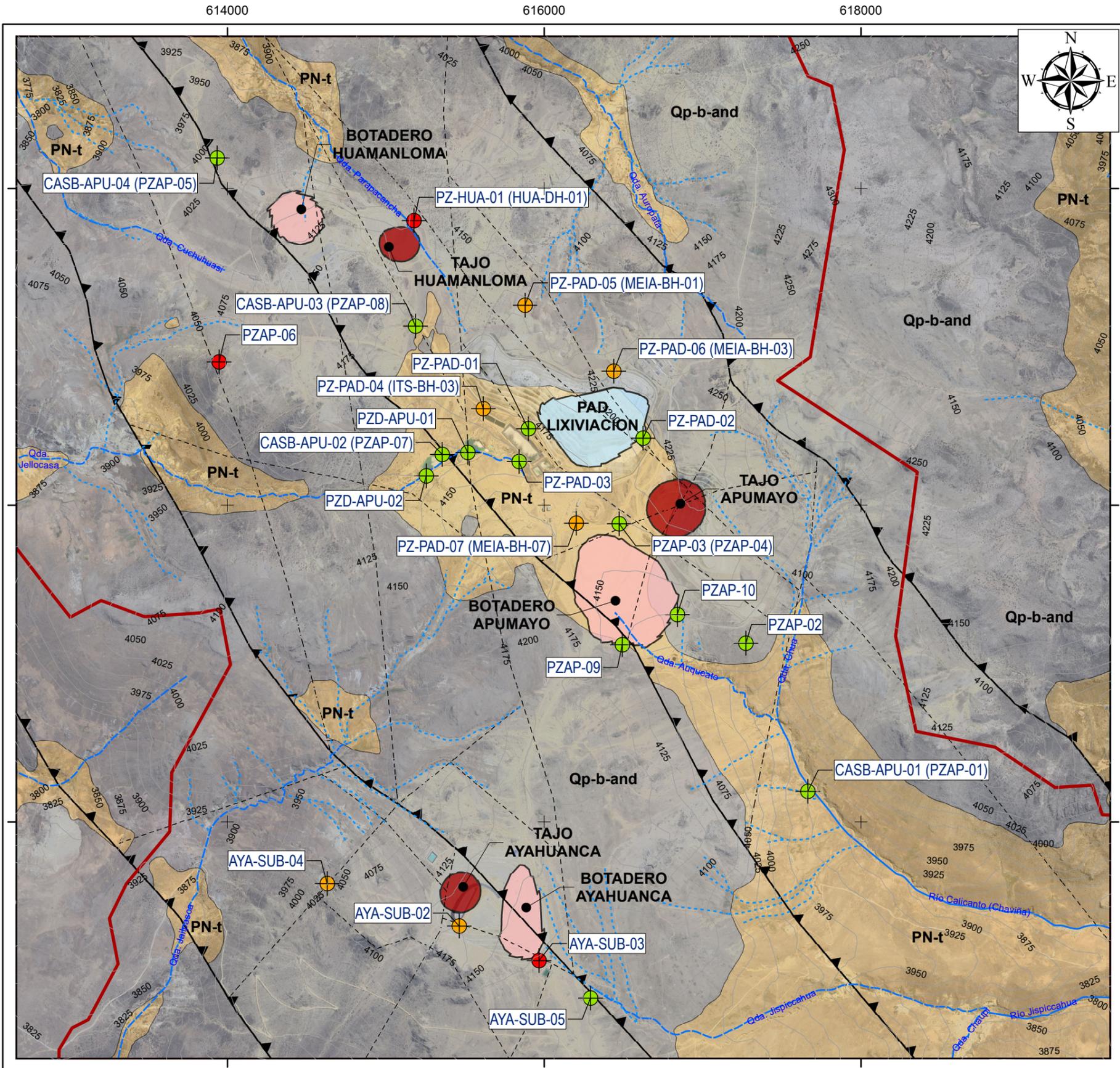
ESCUELA:

 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

PROYECTO:
 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO DEL YACIMIENTO EPITERMAL DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO, PROVINCIA DE LUCANAS, REGIÓN AYACUCHO - PERÚ 2023

PLANO:
 SECCIONES GEOLOGICAS E-E', F-F' Y G-G'

ESCALA: INDICADA N° PROYECTO: TERCER BORRADOR PLANO N°: LAMINA-005 REVISIÓN: 3



LEYENDA

- Q-fl/al CUATERNARIO-----> DEPÓSITOS FLUVIOALUVIALES
- Qp-b-and GRUPO BARROSO-> LAVAS ANDESÍTICAS
- PN-t GRUPO TACAZA-----> LAVAS ANDESITICAS, ARENISCAS Y LIMOLITAS

SIMBOLOGÍA

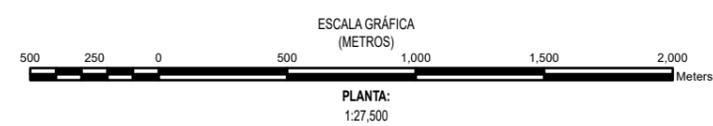
- FALLA PRINCIPAL
- FALLA SECUNDARIA
- RIOS
- QUEBRADAS SECAS
- QUEBRADAS
- CURVAS CADA 50 M
- LIMITE INTEGRACIÓN GEOLOGICA
- LIMITE MODELO HIDROGEOLOGICO NUMERICO
- PIEZOMETRO CON DATA HISTORICA 2014 - 2019
- PIEZOMETRO CON DATA PUNTUAL 2018 - 2019
- PIEZOMETRO SECO / CON HUMEDAD 2014 - 2019

COMPONENTES MINEROS

- HUELLA BOTADEROS 2019
- HUELLA PAD DE LIXIVIACION 2019
- HUELLA TAJOS 2019

NOTAS:

1. TOPOGRAFÍA EXTRAIDA DE LA CARTA NACIONAL.
2. EL PLANO SE ENCUENTRA GEOREFERENCIADO EN EL DATUM WGS-84, ZONA 19S.



REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	DIBUJADO	DISEÑADO	REVISADO	APROBADO
3	DIC. 2024	EMITIDO PARA REVISIÓN FINAL	JZC/PMC	JZC/PMC	JCR	JCR

UNIVERSIDAD:

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO

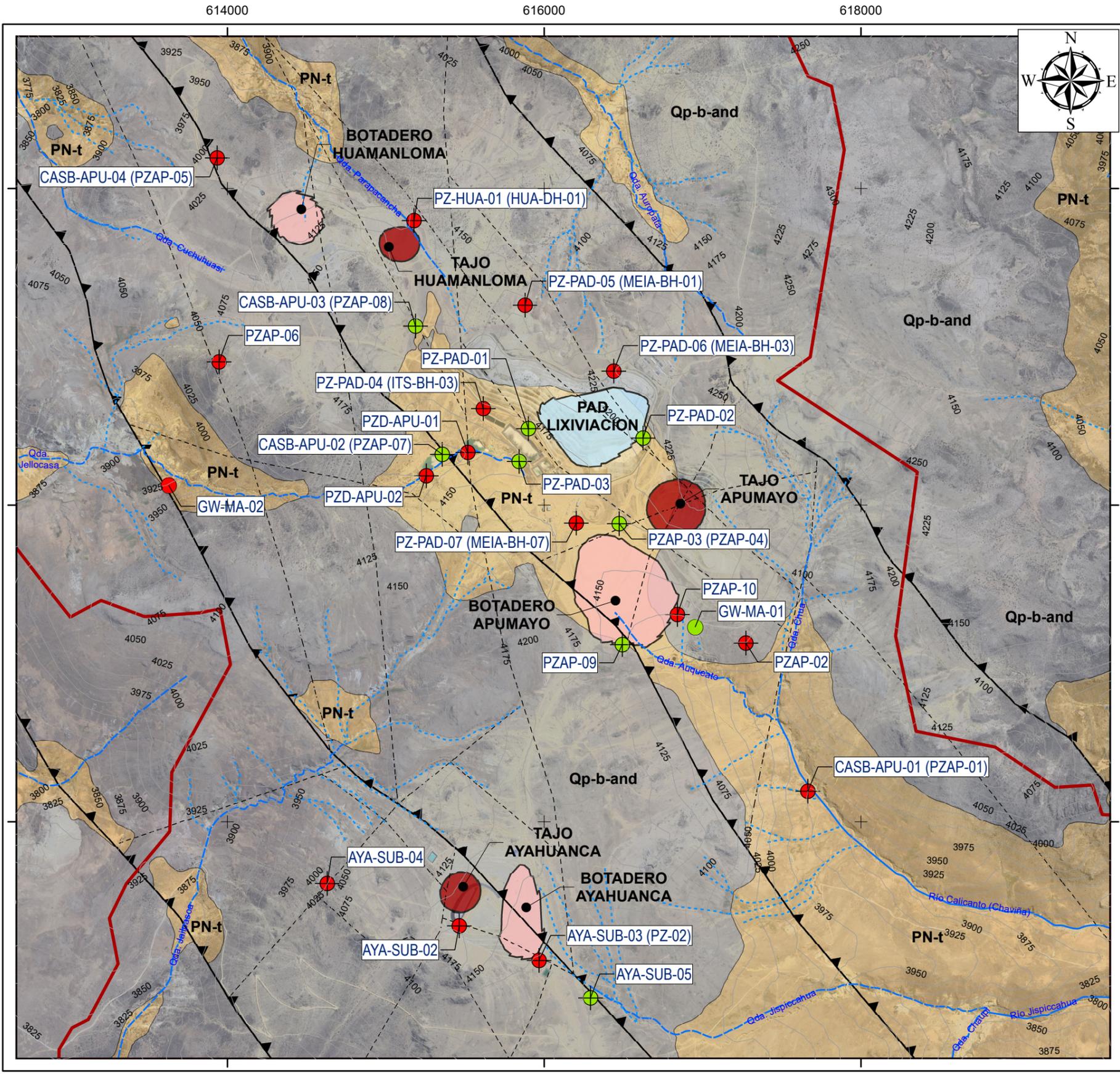
ESCUELA:

 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

PROYECTO:
 MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL Y NUMERICO DEL YACIMIENTO EPITERMAL DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO, PROVINCIA DE LUCANAS, REGION AYACUCHO - PERU 2023

PLANO:
 ESTACIONES MONITOREO DE AGUA SUBTERRANEA - PLANTA

ESCALA: INDICADA	N° PROYECTO: TERCER BORRADOR	PLANO N°: LAMINA-006	REVISIÓN: 3
---------------------	---------------------------------	-------------------------	----------------



LEYENDA

- Q-fl/al CUATERNARIO-----> DEPÓSITOS FLUVIOALUVIALES
- Qp-b-and GRUPO BARROSO-> LAVAS ANDESÍTICAS
- PN-t GRUPO TACAZA-----> LAVAS ANDESITICAS, ARENISCAS Y LIMOLITAS

SIMBOLOGÍA

- FALLA PRINCIPAL
- FALLA SECUNDARIA
- RIOS
- QUEBRADAS SECAS
- QUEBRADAS
- CURVAS CADA 50 M
- LIMITE INTEGRACIÓN GEOLOGICA
- LIMITE MODELO HIDROGEOLOGICO NUMERICO
- PIEZOMETRO CASAGRANDE MUESTREADO
- PIEZOMETRO CASAGRANDE NO MUESTREADO
- MANANTIAL MUESTREADO
- MANANTIAL NO MUESTREADO

COMPONENTES MINEROS

- HUELLA BOTADEROS 2019
- HUELLA PAD DE LIXIVIACION 2019
- HUELLA TAJOS 2019

NOTAS:

1. TOPOGRAFÍA EXTRAIDA DE LA CARTA NACIONAL.
2. EL PLANO SE ENCUENTRA GEOREFERENCIADO EN EL DATUM WGS-84, ZONA 19S.



REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	DIBUJADO	DISEÑADO	REVISADO	APROBADO
3	DIC. 2024	EMITIDO PARA REVISIÓN FINAL	JZC/PMC	JZC/PMC	JCR	JCR

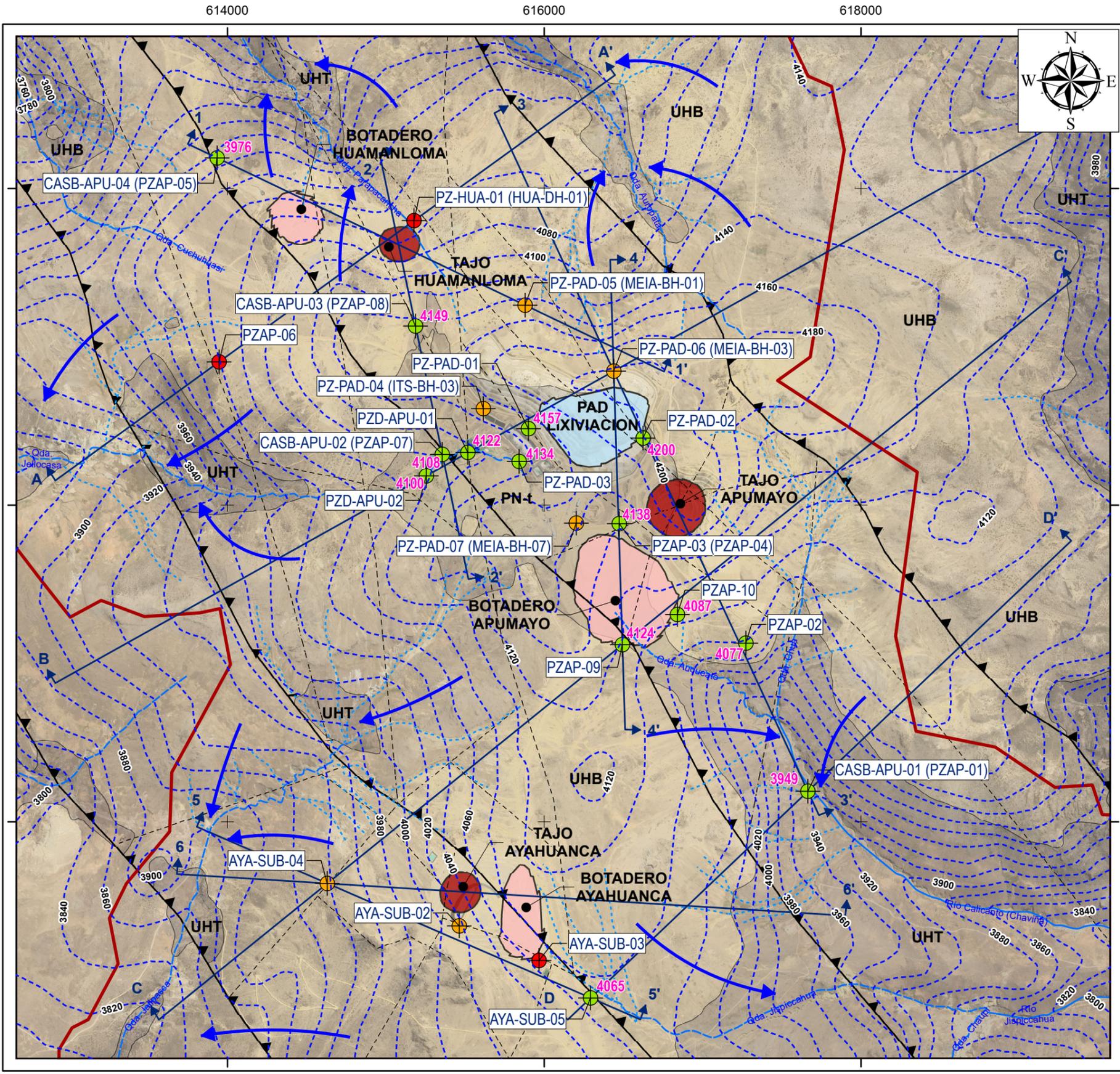
UNIVERSIDAD:

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO

ESCUELA:

 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

PROYECTO: MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL Y NUMERICO DEL YACIMIENTO EPITERMAL DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO, PROVINCIA DE LUCANAS, REGION AYACUCHO - PERU 2023			
PLANO: ESTACIONES MUESTREO HIDROQUIMICO DE AGUA SUBTERRANEA - PLANTA			
ESCALA: INDICADA	N° PROYECTO: TERCER BORRADOR	PLANO N°: LAMINA-007	REVISIÓN: 3



LEYENDA

- UHQ CUATERNARIO-----> MÍNIMO ESPESOR / NO REPRESENTATIVO
- UHB GRUPO BARROSO-> ACUÍFERO MENOR CON RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA LOCAL Y LIMITADO
- UHT GRUPO TACAZA-----> NO PRESENCIA DE RECURSOS HÍDRICOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

SIMBOLOGÍA

- FALLA PRINCIPAL
- FALLA SECUNDARIA
- RIOS
- QUEBRADAS SECAS
- QUEBRADAS
- PIEZOMETRIA CADA 20 M (ENERO 2014)
- SECCIONES HIDROGEOLOGICAS
- DIRECCIÓN FLUJO SUBTERRÁNEO (ENERO 2014)
- LIMITE INTEGRACIÓN GEOLOGICA
- LIMITE MODELO HIDROGEOLOGICO NUMERICO
- PIEZOMETRO CON DATA HISTORICA 2014 - 2019
- PIEZOMETRO CON DATA PUNTUAL 2018 - 2019
- PIEZOMETRO SECO / CON HUMEDAD 2014 - 2019

COMPONENTES MINEROS

- HUELLA BOTADEROS 2019
- HUELLA PAD DE LIXIVIACION 2019
- HUELLA TAJOS 2019

NOTAS:

- TOPOGRAFÍA EXTRAIDA DE LA CARTA NACIONAL.
- EL PLANO SE ENCUENTRA GEOREFERENCIADO EN EL DATUM WGS-84, ZONA 19S.



REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	DIBUJADO	DISEÑADO	REVISADO	APROBADO
3	DIC. 2024	EMITIDO PARA REVISIÓN FINAL	JZC/PMC	JZC/PMC	JCR	JCR

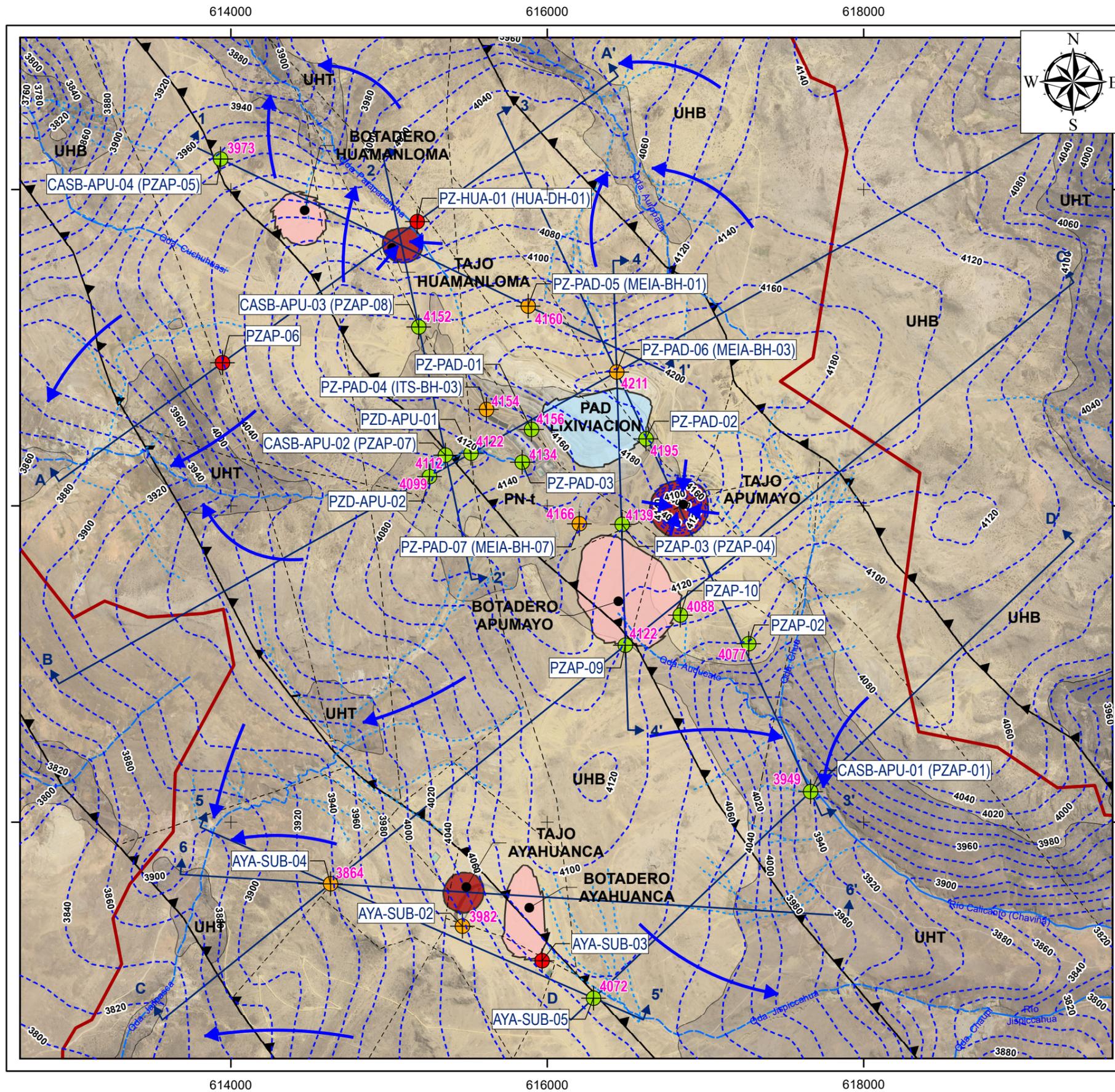
UNIVERSIDAD:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO

ESCUELA:

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

PROYECTO: MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO DEL YACIMIENTO EPITERMAL DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO, PROVINCIA DE LUCANAS, REGIÓN AYACUCHO - PERÚ 2023			
PLANO: MAPA HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL PREMINADO (ENERO 2014) - PLANTA			
ESCALA: INDICADA	N° PROYECTO: TERCER BORRADOR	PLANO N°: LAMINA-008	REVISIÓN: 3



LEYENDA

- UHQ CUATERNARIO-----> MÍNIMO ESPESOR / NO REPRESENTATIVO
- UHB GRUPO BARROSO-> ACUÍFERO MENOR CON RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA LOCAL Y LIMITADO
- UHT GRUPO TACAZA-----> NO PRESENCIA DE RECURSOS HÍDRICOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

SIMBOLOGÍA

- FALLA PRINCIPAL
- FALLA SECUNDARIA
- RIOS
- QUEBRADAS SECAS
- QUEBRADAS
- PIEZOMETRIA CADA 20 M (DICIEMBRE 2018)
- SECCIONES HIDROGEOLOGICAS
- DIRECCIÓN FLUJO SUBTERRÁNEO (DICIEMBRE 2018)
- LIMITE INTEGRACIÓN GEOLOGICA
- LIMITE MODELO HIDROGEOLOGICO NUMERICO
- PIEZOMETRO CON DATA HISTORICA 2014 - 2019
- PIEZOMETRO CON DATA PUNTUAL 2018 - 2019
- PIEZOMETRO SECO / CON HUMEDAD 2014 - 2019

COMPONENTES MINEROS

- HUELLA BOTADEROS 2019
- HUELLA PAD DE LIXIVIACION 2019
- HUELLA TAJOS 2019

NOTAS:

- TOPOGRAFÍA EXTRAIDA DE LA CARTA NACIONAL.
- EL PLANO SE ENCUENTRA GEOREFERENCIADO EN EL DATUM WGS-84, ZONA 19S.



REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	DIBUJADO	DISEÑADO	REVISADO	APROBADO
3	DIC. 2024	EMITIDO PARA REVISIÓN FINAL	JZC/PMC	JZC/PMC	JCR	JCR

UNIVERSIDAD:



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO

ESCUELA:



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

PROYECTO:

MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO DEL YACIMIENTO EPITERMAL DE LA UNIDAD MINERA APUMAYO, PROVINCIA DE LUCANAS, REGIÓN AYACUCHO - PERÚ 2023

PLANO:

MAPA HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL OPERACIONAL (DICIEMBRE 2018) - PLANTA

ESCALA:

INDICADA

N° PROYECTO:

TERCER BORRADOR

PLANO N°:

LAMINA-009

REVISIÓN:

3