

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



TESIS

**EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA E HIDROQUÍMICA
DEL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACOCHA CON
FINES DE PLAN DE CIERRE**

PRESENTADO POR:

Br. DEYVIS RUBEN QUIRITA MOLINA

Br. JAIME JESUS HUAMAN SALOMA

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO GEÓLOGO**

ASESOR:

Dr. JUAN CARLOS ASCUE CUBA

**CUSCO - PERÚ
2026**



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Juan Carlos Ascue Cuba
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: EVALUACIÓN HIDROGEOLOGICA E
HIDROQUÍMICA DEL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha CON
FINES DE PLAN DE CIERRE

Presentado por: Deyvis Rubén Quirita Molina DNI N° 47507050;
presentado por: Jaime Jesus Human Saloma DNI N°: 48141128
Para optar el título Profesional/Grado Académico de Ingeniero Geólogo

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 3 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en 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 sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<u>X</u>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación 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**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 03 de Julio de 2026

Firma

Post firma

Nro. de DNI

ORCID del Asesor

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:604447316

Deyvis Rubén Quirita Molina

Evaluación Hidrogeológica e Hidroquímica del Depósito de Relaves Quiulacocha con Fines de Plan de Cierre.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:604447316

Fecha de entrega

3 jul 2026, 10:45 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

3 jul 2026, 10:53 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

Evaluación Hidrogeológica e Hidroquímica del Depósito de Relaves Quiulacocha con Fines de Pla....pdf

Tamaño del archivo

9.3 MB

227 páginas

44.841 palabras

259.408 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 20 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
47 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
15 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

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.

DEDICATORIA

A mi madre Dionicia Saloma Manchaco y mi padre político Wilber Huillca Lizaraso quienes, con su amor incondicional y su apoyo constante me enseñaron que las metas se cumplen con esfuerzo y perseverancia.

A mis hermanos, hermana y demás familiares por su apoyo y compañía en los momentos difíciles y su aliento constante que me motivo a seguir adelante.

A mi querida hermana Vilma que dios lo tiene en su gloria, estoy seguro que ella estaría muy orgullosa de este logro.

De manera muy especial a mi amada familia, Maritza Silva H. mi compañera de vida, mis bellas hijas Aitana y Helen mis regalos más preciados que dios me dio, quienes me acompañan día a día y le dan sentido a mi vida.

A toda la familia Hidroandes, con quienes estoy en deuda por acogerme. A mis amigos y todas las personas que me apoyaron e impulsaron a ser ingeniero geólogo.

Jaime Jesus Huaman Saloma

A mis queridos padres, Victoria Molina Huamán y Rubén Quirita Quirita, por su amor incondicional, sacrificio, apoyo constante y confianza en cada etapa de mi vida. Gracias por ser el pilar fundamental de mi formación personal y profesional, y por inspirarme a perseverar hasta alcanzar este importante logro.

A mis hermanos y hermanas, por su cariño, comprensión y palabras de aliento, que me motivaron a seguir adelante y superar cada desafío en el camino.

A la memoria de mi amada abuelita, Emilia Huamán, quien hoy goza de la presencia de Dios. Su ejemplo, amor y enseñanzas permanecen siempre en mi corazón y continúan iluminando mi camino.

A mis amigos y a todas las personas que me brindaron su apoyo durante este proceso, por su confianza y acompañamiento. De manera especial, a la familia Hidroandes, por su amistad, respaldo y valioso aporte en mi crecimiento profesional, hacia quienes guardo un profundo agradecimiento.

Con gratitud y cariño.

Deyvis Rubén Quirita Molina

CONTENIDO

Resumen	11
Abstract	12
Introducción.....	13
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES.....	15
1.1. Ubicación y acceso	15
1.2. Componentes del proyecto.....	17
1.3. Planteamiento del problema	17
1.3.1. Descripción del problema	17
1.3.2. Formulación del problema	19
1.3.2.1. Problema general.....	19
1.3.2.2. Problemas específicos.....	19
1.4. Justificación de la investigación	19
1.5. Objetivos	20
1.5.1. Objetivo general.....	20
1.5.2. Objetivos Específicos.....	20
1.6. Hipótesis.....	21
1.6.1. Hipótesis general.....	21
1.6.2. Hipótesis específicas	21
1.7. Aspectos legales.....	22
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	24
2.1. Métodos de investigación.....	24
2.1.1. Diseño de la investigación	24
2.1.2. Tipo de investigación	24
2.1.3. Enfoque de la investigación	25
2.1.4. Variables	25
2.1.5. Matriz de consistencia	26
2.1.6. Operacionalización de variables	29
2.2. Métodos de trabajo	31
2.2.1. Etapa de pre campo.....	31
2.2.2. Etapa de campo	31
2.2.2.1. Mapeo hidrogeológico y aforo de fuentes	32

2.2.2.2. Inventario y registro de niveles en piezómetros	33
2.2.2.3. Muestreo fuentes de agua	34
2.2.2.4. Perforación de sondeos hidrogeológicos	35
2.2.2.5. Ejecución de pruebas hidráulicas	36
2.2.3. Etapa de gabinete	38
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	39
3.1. Marco referencial	39
3.1.1. Antecedentes internacionales	39
3.1.2. Antecedentes nacionales	41
3.1.3. Antecedentes regionales	43
3.2. Estudios anteriores.	45
3.3. Marco conceptual	49
3.3.1. Definición de términos	49
3.4. Bases teóricas	56
3.4.1. Teoría del flujo subterráneo en medios porosos saturados	56
3.4.2. Hidroquímica	57
3.4.3. Modelamiento numérico del flujo subterráneo	58
3.4.4. Evaluación hidrogeológica en planes de cierre de minas	59
CAPÍTULO IV: GEOMORFOLOGÍA	60
4.1. Geomorfología regional	61
4.1.1. Cordillera Oriental	63
4.1.2. Borde oeste de la Cordillera Oriental	64
4.1.3. Altiplanicie disectada	64
4.1.4. Altiplanicie ondulada	65
4.1.5. Planicie.....	65
4.2. Geomorfología local.....	66
4.2.1. Colinas Excelsior	68
4.2.2. Valle glaciar (quebrada Quiulacocha)	68
4.2.3. Altiplanicies.....	69
4.2.4. Llanuras fluvio-glaciares.....	69
CAPÍTULO V: GEOLOGÍA LOCAL	71
5.1. Basamento rocoso	76
5.1.1. Grupo Excelsior	76
5.1.2. Formación Chambará	76
5.1.3. Formación Casapalca	77

5.2. Depósitos cuaternarios	78
5.2.1. Depósitos aluviales	78
5.2.2. Depósitos lacustres.....	79
5.2.3. Depósitos antrópicos – relave	79
5.2.4. Depósitos antrópicos – desmonte	80
5.2.5. Depósitos antrópicos – dique	80
5.3. Geología estructural	81
 CAPÍTULO VI: CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA.....	83
 6.1. Hidrología del área de estudio.....	83
6.1.1. Parámetros geomorfológicos de la microcuenca Quiulacocha	86
6.1.1.1. Área de la cuenca (a)	86
6.1.1.2. Perímetro de la cuenca (p)	86
6.1.1.3. Longitud de la cuenca (l)	87
6.1.1.4. Ancho promedio de la cuenca (ap).....	87
6.1.1.5. Coeficiente de compacidad (kc)	88
6.1.1.6. Factor forma (ff)	88
6.1.1.7. Altitud media de la cuenca (hm)	89
6.1.1.8. Curva hipsométrica.	91
6.1.1.9. Polígono de frecuencia	92
6.1.2. Climatología	93
6.1.3. Estaciones meteorológicas	93
6.1.4. Parámetros meteorológicos	94
6.1.5. Precipitación	94
6.1.6. Evaporación	95
6.1.7. Temperatura	95
6.1.8. Evapotranspiración	96
6.1.9. Balance hídrico	97
6.1.10. Recarga del sistema hidrogeológico	98
6.1.11. Descarga de aguas del depósito de relaves Quiulacocha	100
6.1.12. Caudal entrada V-3 y V-4 Vs precipitación	101
6.1.13. Balance de aguas depósito de relaves Quiulacocha	102
6.1.14. Recarga y descarga de aguas subterránea.....	106
 CAPÍTULO VII: HIDROGEOLOGÍA DEL ÁREA DEL QUIULACOA	107
 7.1. Mapeo hidrogeológico	108
7.1.1. Clasificación de fuentes	111
7.1.2. Aforo de las fuentes subterráneas.....	115
 7.2. Perforaciones de investigación hidrogeológica	116
 7.3. Perforación de sondeos someros.....	121

7.4. Conductividad hidráulica.....	124
7.5. Niveles y evolución subterránea.....	127
7.6. Piezometría y direcciones de flujo.....	130
7.8. Unidades hidrogeológicas	133
7.8.1. Pizarras y filitas Excélsior	135
7.8.2. Brechas calcáreas Casapalca.....	135
7.8.3. Suelos aluviales y coluviales	135
7.8.4. Relaves Quiulacocha	136
7.9. Modelo hidrogeológico conceptual	136
 CAPÍTULO VIII: HIDROQUÍMICA Y CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	 141
8.1. Parámetros fisicoquímicos de campo	142
8.2. Conductividad eléctrica.....	145
8.3. Potencial hidrógeno (pH)	147
8.4. Temperatura.....	148
8.5. Elementos mayoritarios	149
8.6. Elementos minoritarios (Trazas)	152
8.7. Facies hidroquímicas.....	157
8.8. Concentración de carga másica	160
 CAPÍTULO IX: MODELACIÓN NUMÉRICA SUBTERRÁNEA.....	 165
9.1. Elaboración del modelo numérico	166
9.1.1. Dominio del modelo	167
9.1.2. Hidroestratigrafía y parámetros del modelo	168
9.1.3. Malla y discretización vertical.....	169
9.1.4. Calidad de malla.....	170
9.1.5. Condiciones de borde asignados	171
9.1.6. Conductividad hidráulica	173
9.1.7. Recarga asignada al modelo	174
9.2. Calibración del modelo numérico	175
9.2.1. Calibración en régimen estacionario	176
9.2.2. Niveles de agua subterránea simuladas	179
9.2.2.1. Flujo de agua subterránea simulada	179

9.2.3. Balance de masas.....	181
9.2.4. Flujo y velocidad subterránea simulada	183
9.2.5. Pronósticos del modelo numérico de flujo subterráneo.	184
9.2.5.1. Caso base.....	184
9.2.5.2. Análisis de sensibilidad.....	184
9.2.6. Filtraciones estimadas para el cierre del depósito de relaves Quiulacocha.	186
9.2.7. Trayectorias de flujo (Pathlines)	187
9.2.8. Transporte de la pluma de contaminación.....	188
 CAPÍTULO X: PLAN DE CIERRE	190
10.1. Resumen de las condiciones actuales	191
10.2. Descripción de las alternativas de cierre propuestas.....	195
10.2.1. Alternativa 1 del plan de cierre	196
10.2.1.1. Memoria descriptiva del plan de cierre alternativa 1	196
10.2.1.2. Manejo de aguas alternativa 1	199
10.2.1.3. Aspectos de interés alternativa 1.....	199
10.2.2. Alternativa 2 del plan de cierre	200
10.2.2.1. Memoria descriptiva del plan de cierre alternativa 2	201
10.2.2.2. Manejo de aguas alternativa 2.....	205
10.2.2.3. Aspectos de interés alternativa 2.....	205
10.3. Actividades de cierre.....	207
10.4. Evaluación de alternativas.....	210
 CAPÍTULO XI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	214
11.1. Discusión de los resultados del objetivo específico 1	214
11.2. Discusión de los resultados del objetivo específico 2	215
11.3. Discusión de los resultados del objetivo específico 3	216
11.4. Discusión de los resultados del objetivo específico 4	217
11.5. Discusión de los resultados del objetivo específico 5	218
 CONCLUSIONES.....	219
 RECOMENDACIONES.....	222
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	223

Lista de tablas

TABLA 2-1: VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN	26
TABLA 2-2: MATRIZ DE CONSISTENCIA	27
TABLA 2-3: OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	30
TABLA 4-1: CLASIFICACIÓN DE PENDIENTES	63
TABLA 5-1: COLUMNA ESTRATIGRÁFICA LOCAL	74
TABLA 6-1: PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE LA MICROCUENCA QUIULACocha	86
TABLA 6-2: PARÁMETROS FISIAGRÁFICOS DE LA MICROCUENCA QUIULACocha	86
TABLA 6-3: ALTITUD MEDIA DE LA MICROCUENCA QUIULACocha.	90
TABLA 6-4: PORCENTAJE DEL ÁREA DE LA CUENCA QUE QUEDA POR ENCIMA Y POR DEBAJO DE LA ALTITUD	91
TABLA 6-5: ESTACIONES METEOROLÓGICAS DEL ÁREA.....	93
TABLA 6-6: PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL, MULTIANUAL (MM/MES).	94
TABLA 6-7: EVAPORACIÓN MEDIA MENSUALIZADO. (MM/MES)	95
TABLA 6-8: TEMPERATURA MEDIA MENSUAL. (MM/MES).....	95
TABLA 6-9: EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA MENSUAL - TOTAL ANUAL.	96
TABLA 6-10: BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO.	98
TABLA 6-11: VALORES DE RENDIMIENTO ESPECÍFICO	99
TABLA 6-12: RECARGA CALCULADA DE LA FLUCTUACIÓN DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS (WTF)	100
TABLA 6-13: PROMEDIO DE CAUDALES (V-3 Y V-4) VS PRECIPITACIÓN	103
TABLA 7-1: FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	111
TABLA 7-2: FUENTES DE AGUA SUPERFICIAL	111
TABLA 7-3: MONITOREO DE PIEZÓMETROS (MARZO, 2022)	112
TABLA 7-4: MONITOREO DE FUENTES AGUA SUBTERRÁNEA (MARZO 2022)	112
TABLA 7-5: MONITOREO DE PIEZÓMETROS (JUNIO-JULIO, 2022)	113
TABLA 7-6: MONITOREO DE FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA (JUNIO 2022)	114
TABLA 7-7: MONITOREO DE FUENTES AGUA SUPERFICIAL (MARZO 2022).....	114
TABLA 7-8: MONITOREO DE FUENTES DE AGUA SUPERFICIAL (JUNIO 2022).....	115
TABLA 7-9: UBICACIÓN DE PIEZÓMETROS INSTALADOS, 2022	117
TABLA 7-10: CARACTERÍSTICAS E INSTALACIÓN DE PIEZÓMETROS	118
TABLA 7-11: UBICACIÓN DE SONDajes SOMEROS	122
TABLA 7-12: RESUMEN DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	124
TABLA 7-13: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS AIR LIFT REALIZADAS EN LOS SONDajes SOMEROS.	126
TABLA 7-14: RESUMEN CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LAS UNIDADES DEL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha	133
TABLA 8-1: PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS DE FUENTES AGUA (MARZO 2022).	142
TABLA 8-2: PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS EN LOS PIEZÓMETROS (MARZO, 2022).....	143
TABLA 8-3: PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS DE FUENTES DE AGUA, CAMPAÑA JUNIO 2022.	143

TABLA 8-4: PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LOS PIEZÓMETROS, CAMPAÑA JUNIO-JULIO, 2022	144
TABLA 8-5: FORMULA IÓNICA PARA LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	160
TABLA 9-1: CAPAS ASIGNADAS AL DOMINIO DISCRETIZADO.....	168
TABLA 9-2: CARACTERÍSTICAS DE LA MALLA DEL MODELO NUMÉRICO.....	170
TABLA 9-3: COORDENADAS DE ORIGEN Y GEOMETRÍA DEL DOMINIO.....	170
TABLA 9-4: CARACTERÍSTICAS DE LA MALLA Y VALOR DE AJUSTE	171
TABLA 9-5: CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS CALIBRADAS.	173
TABLA 9-6: VALORES DE RECARGA ASIGNADO EN EL MODELO NUMÉRICO.	175
TABLA 9-7: ESTADÍSTICA DE CARGAS HIDRÁULICAS OBSERVADAS Y CALCULADAS.....	176
TABLA 9-8: BALANCE DE MASA DEL MODELO CALIBRADO.	181
TABLA 9-9: BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL MODELO.	182
TABLA 9-10: FILTRACIONES DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha	186
TABLA 10-1: RESUMEN DE RESULTADOS, CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.	192
TABLA 10-2: ALTERNATIVAS DE CIERRE PROPUESTAS.....	195
TABLA 10-3: RESUMEN DE ACTIVIDADES DE CIERRE Y POSTCIERRE.	208
TABLA 10-4: RESUMEN DE EVALUACIÓN DE ALTERNATIVA 1 PARA EL CIERRE DEL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha	211
TABLA 10-5: RESUMEN DE EVALUACIÓN DE ALTERNATIVA 2 PARA EL CIERRE DEL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha.	212

Lista de figuras

FIGURA 1-1: MAPA DE UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	15
FIGURA 4-1: MAPA GEOMORFOLÓGICO REGIONAL	61
FIGURA 4-2: MAPA GEOMORFOLÓGICO LOCAL	66
FIGURA 5-1: MAPA GEOLÓGICO LOCAL DEL ÁREA DE ESTUDIO	72
FIGURA 5-2: COLUMNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL	75
FIGURA 6-1: MAPA HIDROGRÁFICO	84
FIGURA 6-2: LONGITUD DE LA MICROCUENCA QUIULACocha.....	87
FIGURA 6-3: ÁREAS PARCIALES MICROCUENCA QUIULACocha.	89
FIGURA 6-4: BALANCE HÍDRICO DEL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha (PROMEDIO ANUAL).....	104
FIGURA 6-5: BALANCE HÍDRICO DEL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha (AÑOS SECOS).	105
FIGURA 6-6: BALANCE HÍDRICO DEL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha (AÑOS HÚMEDOS).....	105
FIGURA 7-1: MAPA DE MONITOREO DE FUENTES DE AGUA Y MAPA DE MONITOREO DE PIEZÓMETROS.	108
FIGURA 7-2: MAPA DE UBICACIÓN DE SONDEOS EJECUTADOS.....	119
FIGURA 7-3: MAPA DE UBICACIÓN DE PIEZÓMETROS SOMEROS.	122
FIGURA 7-4: MAPA DE PIEZOMETRÍA INTERPRETADA.....	131
FIGURA 7-5: MAPA HIDROGEOLÓGICO: UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS INTERPRETADAS	133
FIGURA 7-6: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL DR QUIULACocha	139

FIGURA 7-7: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL DR QUIULACocha – SECCIONES TRANSVERSALES	140
FIGURA 8-1: MAPA DE ESTACIONES DE MUESTREO	149
FIGURA 8-2: DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN ESPACIAL MANGANESO, JULIO 2022	153
FIGURA 8-3: DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN ESPACIAL HIERRO, JULIO 2022	154
FIGURA 8-4: DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN ESPACIAL ZINC, JULIO 2022	155
FIGURA 8-5: DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN ESPACIAL PLOMO, JULIO 2022	156
FIGURA 8-6: DIAGRAMAS PIPER DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SUPERFICIAL DEL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha.	159
FIGURA 8-7: CONCENTRACIÓN CARGA MÁSCA DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha, CON AFORO DE JULIO, 2022.	162
FIGURA 8-8: MODELO HIDROGEOQUÍMICO CONCEPTUAL DEL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha	164
FIGURA 9-1: CONSTRUCCIÓN BÁSICA DEL MODELO TRIDIMENSIONAL.	167
FIGURA 9-2: DOMINIO DEL MODELO	167
FIGURA 9-3: CAPAS GENERADAS PARA EL MODELO NUMÉRICO.	169
FIGURA 9-4: CONDICIONES DE BORDE PARA EL MODELO 3D.	172
FIGURA 9-5: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.	173
FIGURA 9-6: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA RECARGA.	174
FIGURA 9-7: NIVELES PIEZOMÉTRICOS SIMULADOS.	179
FIGURA 9-8: SECCIÓN LONGITUDINAL (A) Y TRANSVERSAL (B) CON PIEZOMETRÍA SIMULADA EN RÉGIMEN ESTACIONARIO.	180
FIGURA 9-9: REPRESENTACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS AGUAS: ENTRADAS Y SALIDAS Y FLUJOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS DEL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO.	182
FIGURA 9-10: REPRESENTACIÓN DE LA INGENIERÍA DEL DEPÓSITO DE RELAVES EN EL MODELO.	186
FIGURA 9-11: PATHLINES PARA EL ÁREA DEL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha.	187
FIGURA 9-12: ESCENARIO DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES (PB).	189
FIGURA 10-1: ESQUEMA DE INGRESOS Y SALIDAS DE AGUA AL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha, SITUACIÓN ACTUAL.	193
FIGURA 10-2: MAPA DE INGENIERÍA ALTERNATIVA 1.	197
FIGURA 10-3: MAPA DE INGENIERÍA ALTERNATIVA 2.	203

Lista de gráficos

GRÁFICO 6-1: CURVA HIPSOMÉTRICA	92
GRÁFICO 6-2: POLÍGONO DE FRECUENCIA	92
GRÁFICO 6-3: VARIACIÓN DE TEMPERATURAS MENSUALES (CERRO DE PASCO)	96
GRÁFICO 6-4: CAUDAL DE ENTRADA AL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha VS PRECIPITACIÓN DIARIA.	101
GRÁFICO 6-5: CAUDAL DE INGRESO A QUIULACocha (V-3 Y V-4) VS PRECIPITACIÓN MENSUAL (2021-2022).	102
GRÁFICO 6-6: VARIACIÓN PROMEDIO CAUDAL DE VERTEDEROS VS PRECIPITACIÓN PLUVIAL	103
GRÁFICO 7-1: DISTRIBUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA VERTICAL (M/D)	127
GRÁFICO 7-2: VARIACIÓN DE NIVELES 2018-2022	128

GRÁFICO 9-1: CALIDAD DE LA MALLA.....	171
GRÁFICO 9-2: DIAGRAMA DE CARGAS OBSERVADAS VS. CALIBRADAS DEL MODELO.....	177
GRÁFICO 9-3: DIAGRAMA DE CARGAS OBSERVADAS VS. CALIBRADAS PROPIOS DEL MODELO.....	178
GRÁFICO 9-4: VARIACIONES DE LA RECARGA.....	184
GRÁFICO 9-5: VARIACIONES DE LAS CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS EN UN ORDEN DE MAGNITUD.....	185

Lista de fotografías

FOTO 1: AFORO MEDIANTE EL MÉTODO DE CORRENTÓMETRO Y VOLUMÉTRICO	33
FOTO 2: LECTURA Y REGISTRO DE DATOS ENSAYO LEFRANC CARGA VARIABLE.....	37
FOTO 3: LECTURA Y REGISTRO DE DATOS ENSAYO RECUPERACIÓN (SLUG TEST).	37
FOTO 4: VISTA DE LA CORDILLERA ORIENTAL	64
FOTO 5: VISTA DE LA PLANICIE	65
FOTO 6: VISTA DE LA COLINA EXCÉLSIOR Y ALTIPLANICIES.....	68
FOTO 7: VISTA DEL VALLE GLACIAR.....	69
FOTO 8: VISTA DE LLANURAS FLUVIOGLACIARES AL ESTE DEL DEPÓSITO DE RELAVES QUIULACocha.....	70
FOTO 9: VISTA DE CALIZAS DE LA FORMACIÓN CHAMBARÁ	77
FOTO 10: VISTA DE DEPÓSITOS ALUVIALES OBSERVADOS EN EL FLANCO SUR DEL DR QUIULACocha.....	78
FOTO 11: VISTA DE DEPÓSITOS ANTRÓPICOS (RELAVE)	80
FOTO 12: VISTA DE DEPÓSITOS ANTRÓPICOS (DIQUE PRINCIPAL)	81
FOTO 13: VISTA DE LA PLATAFORMA DE PERFORACIÓN Y EL EQUIPO DE PERFORACIÓN	121

Resumen

La zona de estudio se encuentra en la localidad de Quiulacocha, distrito Simón Bolívar (, con el objetivo de realizar la evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de desarrollar un plan de cierre. El estudio abordó el problema de generación de drenaje de ácido y la potencial contaminación de aguas subterráneas y superficiales asociadas al depósito de relaves Quiulacocha. Se aplicó una metodología de investigación descriptivo-explicativo con enfoque mixto cuantitativo-cualitativo, basada en la observación directa y recolección de datos mediante muestreo de aguas subterráneas y superficiales, perforaciones hidrogeológicas, análisis físico-químicos en laboratorio y revisión de estudios previos. Los resultados identificaron tres facies principales de aguas: sulfatada magnésica cálcica (aguas lixiviadas de relaves y desmontes, piezómetros y filtraciones cercanas), bicarbonatada cálcica (aguas de formaciones rocosas) y bicarbonatada sódica (aguas naturales en suelos cuaternarios). Se registraron variaciones de flujos en las estaciones V-3 y V-4, que constituyen la entrada superficial al sistema Quiulacocha: un caudal promedio para la temporada de lluvias de 29.1 l/s y para la temporada de estiaje de 11.9 l/s, con los que coinciden con el caudal base del sistema. Actualmente, las aguas lixiviadas son tratadas en la planta de oxidación operada por AMSAC con el uso de cal (CaO) antes de su disposición en el depósito de relaves Ocroyoc. Se concluye que la evaluación hidrogeológica e hidroquímica constituye una herramienta esencial para sustentar el plan de cierre.

Palabras Clave:

Evaluación hidrogeológica, Hidroquímica, Depósito de relaves Quiulacocha, Plan de cierre.

Abstract

The study area is located in the town of Quiulacocha, Simón Bolívar district (Pasco province), with the objective of conducting a hydrogeological and hydrochemical evaluation of the Quiulacocha tailings dam in order to develop a closure plan. The study addressed the problem of acid mine drainage and the potential contamination of groundwater and surface water associated with the Quiulacocha tailings dam. A descriptive-explanatory research methodology with a mixed quantitative-qualitative approach was applied, based on direct observation and data collection through groundwater and surface water sampling, hydrogeological boreholes, physicochemical laboratory analyses, and a review of previous studies. The results identified three main water facies: calcium magnesium sulfate (leached water from tailings and waste rock, piezometers, and nearby seepage), calcium bicarbonate (water from rock formations), and sodium bicarbonate (natural water in Quaternary soils). Flow variations were recorded at stations V-3 and V-4, which constitute the surface inflow to the Quiulacocha system: an average flow rate of 29.1 l/s during the rainy season and 11.9 l/s during the dry season, which coincide with the system's base flow. Currently, the leachate is treated at the oxidation plant operated by AMSAC using lime (CaO) before being disposed of in the Ocroyoc tailings storage facility. It is concluded that the hydrogeological and hydrochemical assessment is an essential tool to support the closure plan.

Keywords:

Hydrogeological assessment, Hydrochemistry, Quiulacocha tailings deposit, Closure plan

Introducción

El depósito de relaves Quiulacocha (DR) y el depósito de desmonte Excélsior (DDM) son pasivos ambientales del antiguo proyecto minero Cerro de Pasco. Ambos depósitos carecen de un cierre definitivo, lo que genera impactos ambientales significativos. En particular, el DR Quiulacocha presenta un dique flotante que divide el depósito en dos secciones, y sus márgenes descargan aguas al río Ragra, afectando la calidad del agua en la zona. Además, se producen filtraciones desde el DDM Excélsior, con alto contenido en metales pesados, que se dirigen hacia una laguna de aguas ácidas en el borde inferior del DR Quiulacocha, impactando negativamente en el área.

El problema principal radica en la generación de drenaje ácido y la potencial contaminación de aguas subterráneas y superficiales debido a los relaves y desmontes. Este impacto ambiental ha generado la necesidad de desarrollar un plan de cierre para mitigar los efectos negativos. Este estudio se enfoca en realizar una evaluación hidrogeológica e hidroquímica del DR Quiulacocha, con el objetivo de proporcionar la información necesaria para dicho plan.

El objetivo principal de este estudio es realizar una evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha, con el fin de desarrollar un plan de cierre adecuado. Los relaves en Quiulacocha contienen Pb-Zn y Cu de alta sulfuración, principalmente pirita, con un total de aproximadamente 78 millones de toneladas de relave distribuidas en 116 hectáreas acumuladas desde el año 1993 hasta 1992 (Hidroenergía 2008). El depósito recibe aguas provenientes de diversas fuentes de agua, incluida la precipitación y filtraciones de aguas ácidas, lo que genera un impacto negativo adicional en el ambiente.

El área de estudio se encuentra dentro de la microcuenca Quiulacocha, rodeada por otras microcuencas como Ocroyoc y Rumiallana, que juntas componen la cuenca del río San Juan. La geología del área está dominada por rocas calcáreas y dolomías en el norte, que constituyen el principal acuífero de la región. Hacia el sur, se encuentran formaciones como esquistos y pizarras que limitan el flujo subterráneo, actuando como barreras hidráulicas.

La metodología de investigación aplicada fue de tipo descriptivo-explicativo, enfocándose en el análisis hidrogeológico e hidroquímico del depósito. Los resultados obtenidos servirán para fundamentar un plan de cierre que mitigue los impactos ambientales generados por el depósito de relaves.

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

1.1. Ubicación y acceso

El área de estudio está ubicada aproximadamente a 1,2 km al suroeste de la ciudad de Cerro de Pasco, corresponde al distrito de Simón Bolívar, así mismo a la provincia y departamento de Cerro de Pasco - Perú. Geográficamente localizado en la cadena Occidental de los Andes peruanos, en la parte central de la sierra del Perú, a una altitud de 4 300 m.s.n.m. El área de estudio se encuentra entre las coordenadas E 357 000 m hasta E 365 000 m y N 8 814 000 m hasta N 8 823 000 m, en base al sistema de coordenadas UTM WGS 84 que corresponde a la Zona 18s, como se muestra en la figura 1-1.

Figura 1-1:

Mapa de ubicación del área de estudio

El acceso es por la vía central que une las ciudades Lima, La Oroya y Cerro de Pasco (260 km de vía asfaltada), para luego tomar el desvío hacia el depósito de relaves Quiulacocha (6.1 km de vía asfaltada). El recorrido total varía entre 9 y 10 horas de viaje en camioneta.

1.2. Componentes del proyecto

El DR Quiulacocha es un pasivo ambiental que se encuentra bajo la responsabilidad de Activos Mineros S.A.C. (AMSAC) para el cierre de sus instalaciones. El depósito cuenta con un dique flotante que divide el relave en dos partes. En sus márgenes existen dos canales laterales que descargan al río Ragra; estos rodean las instalaciones del DR Quiulacocha.

Aguas arriba del DR Quiulacocha se emplaza el DDM Excélsior, que cubre parte de los relaves; asimismo, al noroeste, se encuentra el stockpile Pampa seca con depósitos de sulfuros con alto contenido de plata. Desde el sur y oeste del DDM Excélsior se producen filtraciones de agua, las que son conducidas mediante un canal hacia el borde inferior del DR Quiulacocha, desde el cual el agua es bombeada al DR Ocroyoc, ubicado al noroeste del DR Quiulacocha (Centromin Perú S. A., 2006)

1.3. Planteamiento del problema

1.3.1. Descripción del problema

La relavera Quiulacocha, ubicada en la provincia de Cerro de Pasco, constituye uno de los principales pasivos ambientales mineros del país debido a la acumulación histórica de relaves provenientes de actividades de extracción y procesamiento de minerales. Estos depósitos contienen elevadas concentraciones de metales pesados como plomo, zinc, cadmio, cobre y arsénico, así como minerales sulfurados que favorecen la generación de drenaje ácido de mina (Centromin Perú S. A., 2006).

Las condiciones físico-químicas del DR Quiulacocha, sumadas a la presencia de zonas saturadas y áreas parcialmente expuestas, permiten la interacción constante entre el agua superficial, subterránea y el material de relave. Este proceso favorece la lixiviación de contaminantes, los cuales son transportados a través del flujo subterráneo hacia zonas de descarga natural, incrementando la afectación del sistema hidrogeológico local.

Asimismo, durante los periodos de precipitación, el incremento de la infiltración y escorrentía superficial intensifica la movilización de contaminantes, generando flujos ácidos con alta carga metálica que pueden migrar hacia cuerpos receptores cercanos. En condiciones secas, la exposición del material de relave facilita la dispersión de partículas contaminadas por acción eólica, ampliando el área de impacto ambiental.

El sistema hidrogeológico asociado presenta conexiones con unidades permeables y estructuras fracturadas que facilitan la migración de contaminantes hacia zonas periféricas, afectando potencialmente la calidad de aguas subterráneas y superficiales del entorno. Esta dinámica representa un riesgo continuo para los ecosistemas locales y para las comunidades cercanas, debido a la posible afectación de fuentes de agua y la degradación progresiva del suelo.

En este contexto, la problemática ambiental del depósito de relaves Quiulacocha exige la evaluación hidrogeológica e hidroquímica del sistema como base para el diseño de un plan de cierre adecuado, que contemple alternativas de estabilización física, control del drenaje ácido, reducción de la infiltración y tratamiento de aguas de contacto, orientadas a mitigar los impactos ambientales a largo plazo.

1.3.2. Formulación del problema

1.3.2.1. Problema general.

¿Cuál es el comportamiento hidrogeológico e hidroquímico del depósito de relaves Quiulacocha y cómo estos resultados pueden servir de base para la formulación de un plan de cierre ambiental adecuado?

1.3.2.2. Problemas específicos.

- ¿Cuáles son las características de las unidades hidrogeológicas y geológicas en el área de influencia del depósito de relaves Quiulacocha?
- ¿Qué características hidroquímicas presentan las aguas subterráneas y superficiales en contacto con el depósito de relaves Quiulacocha?
- ¿Como puede estructurarse un modelo hidrogeológico conceptual que represente el funcionamiento hidráulico del depósito de relaves Quiulacocha?
- ¿Cómo puede aplicarse la modelación numérica para calcular los flujos subterráneos y la migración de contaminantes en el depósito de relaves Quiulacocha?
- ¿Cuál es el plan de cierre adecuado a plantearse para el depósito de relaves Quiulacocha?

1.4. Justificación de la investigación

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un plan de cierre para el depósito de relaves Quiulacocha, enfocado en la gestión ambiental responsable y en la mitigación de impactos derivados de la actividad minera. Este estudio se basa en la necesidad de evaluar las

condiciones hidrogeológicas e hidroquímicas del área afectada, especialmente debido a la presencia de metales pesados y otros contaminantes generados por los procesos de lixiviación (Centromin Perú S. A., 2006).

El depósito de relaves Quiulacocha, situado en la parte norte y noroeste del área minera, contiene minerales oxidados de hierro, sulfuros de hierro, óxidos de plata y otros compuestos que, al interactuar con el agua de lluvia y otros factores ambientales, pueden generar grandes cantidades de agua ácida y contaminar las fuentes hídricas superficiales y subterráneas. Esto representa un grave riesgo para la calidad del agua acumulada en el depósito de relaves Quiulacocha y, por lo tanto, para los recursos hídricos de la región (Centromin Perú S. A., 2006).

La evaluación detallada de estas condiciones es crucial para identificar zonas críticas y diseñar un plan de cierre adecuado que asegure la protección del medio ambiente. La investigación proporcionará la base para formular estrategias efectivas de mitigación de riesgos, contribuyendo a la reducción de impactos negativos y promoviendo una gestión sostenible de los pasivos ambientales mineros.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Realizar la evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de desarrollar su plan de cierre.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las unidades hidrogeológicas y geológicas en el área de influencia del depósito de relaves Quiulacocha.

- Determinar las características hidroquímicas de las aguas subterráneas y superficiales asociadas al depósito de relaves Quiulacocha.
- Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual que represente el funcionamiento hidráulico del depósito de relaves Quiulacocha.
- Aplicar la modelación numérica para calcular los flujos subterráneos y la migración de contaminantes en el depósito de relaves Quiulacocha.
- Proponer un plan de cierre adecuado para el depósito de relaves Quiulacocha, basado en los resultados de la evaluación hidrogeológica e hidroquímica.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

La evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha identifica los flujos subterráneos, caracteriza la calidad del agua y determina las zonas críticas de drenaje ácido de mina, constituyendo la base para un plan de cierre ambiental que minimice la contaminación y proteja los recursos hídricos.

1.6.2. Hipótesis específicas

- Las unidades hidrogeológicas y geológicas del área de influencia del depósito de relaves Quiulacocha controlan el flujo de agua subterránea y determinan la migración de contaminantes.
- Las aguas subterráneas y superficiales en contacto con el depósito de relaves Quiulacocha presentan alteraciones hidroquímicas significativas, como

variaciones en pH, conductividad y concentración de metales pesados, en comparación con los valores de referencia establecidos por la normativa ambiental.

- El modelo hidrogeológico conceptual estructurado representa adecuadamente el funcionamiento hidráulico del depósito de relaves Quiulacocha, permitiendo entender la interacción entre los flujos subterráneos y las unidades geológicas.
- La modelación numérica de los flujos subterráneos y la migración de contaminantes en el área de influencia del depósito de relaves Quiulacocha permite identificar las zonas con mayor riesgo de contaminación.
- La integración de los resultados hidrogeológicos e hidroquímicos permite proponer un plan de cierre ambiental adecuado para el depósito de relaves Quiulacocha, orientado a minimizar los riesgos de contaminación y proteger los recursos hídricos de la zona.

1.7. Aspectos legales

El presente estudio se desarrolla en el marco de la normativa ambiental vigente aplicable a la actividad minera y la gestión de pasivos ambientales, la cual establece los lineamientos para la identificación, evaluación y cierre de depósitos de relaves, garantizando la protección del ambiente y la salud de la población.

En este sentido, la investigación considera como base legal principal la Ley N.º 28271, Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera, así como su Reglamento aprobado mediante el D.S. N.º 059-2005-EM, los cuales definen las responsabilidades y criterios técnicos para la remediación y cierre de componentes mineros abandonados o inactivos.

Asimismo, se consideran los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua vigentes en el país, los cuales permiten evaluar la calidad de los recursos hídricos afectados por la interacción con los relaves mineros. De igual forma, se incorporan los lineamientos técnicos establecidos para planes de cierre de minas, orientados a la estabilidad física, química e hidrológica del sitio en etapa de cierre y postcierre.

De esta manera, el desarrollo de la investigación y la formulación del plan de cierre del depósito de relaves Quiulacocha se sustentan en el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, asegurando la viabilidad técnica, ambiental y legal de las alternativas propuestas.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

2.1. Métodos de investigación

El método empleado fue el descriptivo-explicativo.

Método descriptivo: Busca especificar propiedades y características importantes de cualquier fenómeno que se analice. En esta clase de estudios, el investigador debe ser capaz de definir, o al menos visualizar, qué se medirá (qué conceptos, variables, componentes, etc.) y sobre qué o quiénes se recolectarán los datos (personas, grupos, comunidades, objetos, animales, hechos) (Hernández Sampieri, 2014).

Método explicativo: Este método, por otro lado, tiene como propósito identificar y explicar las causas de los fenómenos observados. Va más allá de la descripción, al establecer relaciones causales y explicar los porqués y los cómo de un fenómeno o proceso. El método explicativo no solo describe características, sino que también busca comprender los factores que provocan esos fenómenos. (Hernández Sampieri, 2014).

2.1.1. Diseño de la investigación

Se determinó que el diseño de la investigación es no experimental, descriptivo y explicativo, ya que se analizan condiciones existentes de hidrogeología e hidroquímica sin manipular variables, explicando los procesos de drenaje ácido y transporte de contaminantes. (Hernández Sampieri, 2014).

2.1.2. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, dado que busca generar información técnica y científica que sirva como base para el diseño de un plan de cierre del depósito de relaves Quiulacocha (Hernández Sampieri, 2014).

2.1.3. Enfoque de la investigación

Se determinó un enfoque mixto (cuantitativo-cualitativo), el cual integra el análisis numérico de variables hidrogeológicas e hidroquímicas con la interpretación descriptiva del comportamiento del sistema hidrogeológico del área de estudio.

El componente cuantitativo está representado por el procesamiento de datos hidroquímicos e hidrogeológicos, tales como pH, conductividad eléctrica, concentración de iones, niveles piezométricos, caudales y resultados de la modelación numérica del flujo subterráneo y del transporte de contaminantes.

Por otro lado, el componente cualitativo incluye la interpretación del modelo hidrogeológico conceptual, la caracterización de las unidades geológicas e hidrogeológicas, el análisis de la geología local, así como la identificación de los procesos de interacción agua–relave y la descripción del comportamiento del sistema en condiciones naturales.

En este sentido, la integración de ambos enfoques permite realizar inferencias más robustas a partir de la información recopilada, facilitando la comprensión integral del sistema hidrogeológico y la formulación del plan de cierre del depósito de relaves Quiulacocha (Hernández Sampieri, 2014).

2.1.4. Variables

En esta investigación, se analizan principalmente las variables relacionadas con la evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha. La variable

principal se desglosa en varias dimensiones que permiten evaluar de manera detallada las características geológicas, hidrogeológicas e hidroquímicas del área. Cada dimensión se mide a través de indicadores específicos que ayudarán a determinar el impacto ambiental del depósito de relaves.

Tabla 2-1:

Variables de la investigación

Variable	Dimensiones	Indicadores
Hidrogeológica	Caracterización geológica e hidrogeológica	Unidades geológicas, unidades hidrogeológicas, permeabilidad, dirección del flujo subterráneo, nivel freático
	Modelo hidrogeológico conceptual	Recarga, descarga, interacción agua superficial-subterránea, dirección de flujo, zonas de influencia
	Modelación numérica	Distribución de carga hidráulica, velocidad de flujo subterráneo, trayectorias de flujo, transporte de contaminantes, extensión de la pluma contaminante, zonas críticas de impacto
Hidroquímica	Caracterización hidroquímica	pH, conductividad eléctrica, sulfatos, metales pesados, calidad del agua

2.1.5. Matriz de consistencia

La Matriz de Consistencia presenta la relación entre los problemas específicos, los objetivos, las hipótesis y las variables que serán analizadas en esta investigación. A través de esta tabla 2-2, se muestra cómo cada uno de los elementos de la investigación está interconectado y cómo los resultados esperados de la evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha contribuirán al desarrollo del plan de cierre ambiental.

Tabla 2-2:

Matriz de consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variable	Dimensión	Indicadores	Método de recolección
General	General	General	Hidrogeóloga	Caracterización geológica e hidrogeológica	Unidades geológicas, unidades hidrogeológicas, permeabilidad, dirección del flujo subterráneo, nivel freático	Mediciones de campo, análisis geológicos
¿Cuál es el comportamiento hidrogeológico e hidroquímico del depósito de relaves Quiulacocha y cómo estos resultados pueden servir de base para la formulación de un plan de cierre ambiental adecuado?	Realizar la evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de desarrollar su plan de cierre.	La evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha identificará los flujos subterráneos, caracterizará la calidad del agua y determinará las zonas críticas de drenaje ácido de mina, constituyendo la base para un plan de cierre ambiental que minimice la contaminación y proteja los recursos hídricos.		Modelo hidrogeológico conceptual	Recarga, descarga, interacción agua superficial-subterránea, dirección de flujo, zonas de influencia	Integración de información geológica, hidrogeológica e hidroquímica; análisis conceptual
Específico	Específico	Específico		Modelación numérica	Distribución de carga hidráulica, velocidad de flujo subterráneo, trayectorias de flujo,	Simulación numérica mediante software FEFLOW,
¿Cuáles son las características de las unidades hidrogeológicas y geológicas en el área de influencia del depósito de relaves Quiulacocha?	Caracterizar las unidades hidrogeológicas y geológicas en el área de influencia del depósito de relaves Quiulacocha.	Las unidades hidrogeológicas y geológicas del área de influencia del depósito de relaves Quiulacocha controlan el flujo de agua subterránea y determinan la migración de contaminantes.				
¿Qué características hidroquímicas presentan las aguas subterráneas y superficiales en contacto con el depósito de relaves	Determinar las características hidroquímicas de las aguas subterráneas y superficiales en	Las aguas subterráneas y superficiales en contacto con el depósito de relaves Quiulacocha presentan alteraciones hidroquímicas significativas, como variaciones en pH, conductividad y				

Quiulacocha?	asociadas al depósito de relaves Quiulacocha.	concentración de metales pesados, en comparación con los valores de referencia establecidos por la normativa ambiental.			transporte de contaminantes, extensión de la pluma contaminante, zonas críticas de impacto	calibración, análisis de sensibilidad
¿Cómo puede estructurarse un modelo hidrogeológico conceptual que represente el funcionamiento hidráulico del depósito de relaves Quiulacocha?	Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual que represente el funcionamiento hidráulico del depósito de relaves Quiulacocha.	El modelo hidrogeológico conceptual estructurado representará adecuadamente el funcionamiento hidráulico del depósito de relaves Quiulacocha, permitiendo entender la interacción entre los flujos subterráneos y las unidades geológicas.	Hidroquímica	Caracterización hidroquímica	pH, conductividad eléctrica, sulfatos, metales pesados, calidad del agua	Muestreo de aguas, análisis físicoquímico y de laboratorio
¿Cómo puede aplicarse la modelación numérica para calcular los flujos subterráneos y la migración de contaminantes en el depósito de relaves Quiulacocha?	Aplicar la modelación numérica para calcular los flujos subterráneos y la migración de contaminantes en el depósito de relaves Quiulacocha.	La modelación numérica de los flujos subterráneos y la migración de contaminantes en el área de influencia del depósito de relaves Quiulacocha permitirá identificar las zonas con mayor riesgo de contaminación.				
¿Cuál es el plan de cierre adecuado a plantearse para el depósito de relaves Quiulacocha?	Proponer un plan de cierre adecuado para el depósito de relaves Quiulacocha, basado en los resultados de la evaluación hidrogeológica e hidroquímica.	La integración de los resultados hidrogeológicos e hidroquímicos permitirá proponer un plan de cierre ambiental adecuado para el depósito de relaves Quiulacocha, orientado a minimizar los riesgos de contaminación y proteger los recursos hídricos de la zona.				

2.16. Operacionalización de variables

La operacionalización de las variables describe cómo se van a medir y evaluar las dimensiones e indicadores de la variable principal en esta investigación. En el caso de la evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha, cada una de las dimensiones asociadas a esta variable será medida a través de indicadores específicos que permiten cuantificar y analizar el comportamiento del agua, los flujos subterráneos y las interacciones geoquímicas.

A continuación, en la tabla 2-3, se presenta la operacionalización de las variables, detallando los indicadores y cómo se obtendrán los datos necesarios para cada uno. Esta información es crucial para evaluar el impacto ambiental del depósito de relaves y facilitar el desarrollo del plan de cierre ambiental.

Tabla 2-3:

Operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicadores	Definición Operacional	Unidad de Medida	Fuente de Información	Método de Recolección
Hidrogeológica	Caracterización geológica e hidrogeológica	Unidades geológicas, unidades hidrogeológicas, permeabilidad, dirección del flujo subterráneo, nivel freático	Análisis de las características geológicas e hidrogeológicas del área para identificar la interacción del agua con las unidades geológicas.	Unidades geológicas, m/día	Mapas geológicos, datos de campo	Mediciones de campo, entrevistas con expertos
	Modelo hidrogeológico conceptual	Recarga, descarga, interacción agua superficial-subterránea, dirección de flujo, zonas de influencia	Simulación conceptual de los flujos subterráneos y las interacciones entre el agua y las unidades geológicas.	m ³ /s, m, km ²	Modelos previos, datos de campo	Modelación numérica, análisis de datos
	Modelación numérica	Distribución de carga hidráulica, velocidad de flujo subterráneo, trayectorias de flujo, transporte de contaminantes, extensión de la pluma contaminante, zonas críticas de impacto.	Simulación numérica para predecir el comportamiento del flujo y la migración de contaminantes en el depósito.	m ³ /día, m/s, mg/l	Software de modelación, datos de campo	Uso de software de modelación, simulaciones numéricas, calibración y análisis de sensibilidad
Hidroquímica	Caracterización hidroquímica	pH, conductividad eléctrica, sulfatos, metales pesados, calidad del agua	Medición de los parámetros hidroquímicos del agua subterránea y superficial para identificar alteraciones significativas.	pH, microsiemens, mg/l	Laboratorios de análisis, muestras de agua	Muestreo de agua, análisis de laboratorio

2.2. Métodos de trabajo

La evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre se realizó en 03 etapas:

- Etapa de pre campo
- Etapa de campo
- Etapa de gabinete

2.2.1. Etapa de pre campo

En esta etapa se recopilaron y revisaron los antecedentes e información bibliográfica necesaria para el desarrollo de la investigación. Las fuentes consultadas incluyeron instituciones como el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), la Autoridad Nacional del Agua (ANA), universidades y otras entidades vinculadas al estudio de la cuenca del río San Juan. La información recopilada comprendió estudios hidrogeológicos, geológicos e hidrológicos. Los estudios previos revisados se detallan en el ítem 3.2.

Asimismo, la información cartográfica fue obtenida del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y del INGENMET, mientras que los datos meteorológicos e hidrológicos fueron recopilados del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

2.2.2. Etapa de campo

Los trabajos de campo comprendieron:

- Mapeo hidrogeológico (inventario de fuentes subterráneas y superficiales, aforo de caudales, registro de parámetros fisicoquímicos)
- Inventario y registro de niveles en piezómetros

- Recolección de muestras de agua en manantiales, piezómetros, filtraciones y ríos
- Desarrollo de sondajes hidrogeológicos (supervisión de perforaciones, desarrollo de pruebas hidráulicas, logueo hidrogeológico, medición de niveles de agua e instalación de piezómetros tipo casa grande).

2.2.2.1. Mapeo hidrogeológico y aforo de fuentes

Durante el mapeo hidrogeológico se identificaron puntos de agua subterránea tales como; manantiales, filtraciones (descargas diseminadas) y humedales, habiendo localizado pequeñas descargas de ladera con agua de buena calidad, posible muchas debido al período húmedo, sin embargo, gran parte de ellos tendieron a desaparecer para la época de estiaje.

Clasificación de fuentes y parámetros de campo

La observación de las fuentes subterráneas y superficiales, comprendió en la identificación de estos tres aspectos principales:

- Tipo de fuente: subterráneo o superficial, poniendo énfasis en determinar su origen, estructura de almacenamiento, tipo de descarga, anomalías estructurales (fallas, pliegues, fracturas)
- Parámetros fisicoquímicos de campo: Se midieron parámetros como temperatura, pH, EC, pH y TDS, usando equipos portátiles HANNA, debidamente calibrados. Cabe precisar que estos equipos tienen un margen de error de C.E. $\pm 2\%$, TDS $\pm 2\%$ y pH $\pm 0,1$.
- Estaciones de aforo: se estableció secciones de aforo cercana a las fuentes, cuya metodología empleada consideró el registro de:

- Ubicación geográfica: Se registro coordenadas en el sistema UTM (WGS 84) en cada punto de monitoreo, mediante el uso del GPS portátil.
- Caudal: El aforo de las fuentes fue efectuado en los puntos seleccionados y complementados con información histórica, para lo cual se empleó el método volumétrico en caso de caudales menores, y para flujos mayores se empleó un correntómetro digital utilizando el método velocidad - área para el caso de caudales que superan los 10 l/s, aplicado generalmente para canales y ríos del área.

Foto 1:

Aforo mediante el método de correntómetro y volumétrico



2.2.2.2. Inventario y registro de niveles en piezómetros

Durante el mapeo hidrogeológico se identificaron puntos de agua subterránea tales como; manantiales, filtraciones (descargas diseminadas) y humedales, habiendo localizado pequeñas descargas de ladera con agua de buena calidad, posible muchas debido al período húmedo, sin embargo, gran parte de ellos tendieron a desaparecer para la época de estiaje.

En los trabajos de campo se realizaron las mediciones del nivel freático del agua en cada piezómetro operativo identificado dentro de la zona de estudio, consistió en el registro coordenadas UTM-WGS 84, profundidad del piezómetro, medición de nivel de agua y registro de parámetros fisicoquímicos, para ambas campañas de monitoreo.

2.2.2.3. Muestreo fuentes de agua

Como parte de las investigaciones de campo, se ejecutó el muestreo de fuentes de aguas subterráneas, en una red de muestreo previamente definidas, entre ellas:

- Afloramientos de agua subterránea (filtración).
- Agua subterránea en piezómetros.
- Agua superficial (subdrenaje, laguna, vertedero).

Para definir las estaciones de muestreo se tomó en cuenta la red de monitoreo existente, la distribución de los pasivos ambientales, zonas vulnerables (filtraciones en relaves), piezómetros, aportes laterales de áreas permeables, etc.

Además del muestreo en cada estación, se registraron los parámetros fisicoquímicos de campo, como la temperatura (T), conductividad eléctrica (CE) y pH, utilizando un multiparámetro HANNA, que fue debidamente calibrado antes y durante los trabajos realizados en campo.

Los análisis solicitados al laboratorio incluyen: pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, alcalinidad bicarbonato, alcalinidad carbonato, cloruros y sulfatos; además de análisis de metales totales y disueltos. Los resultados de laboratorio permitieron la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas y su posible procedencia.

2.2.2.4. Perforación de sondeos hidrogeológicos

Se ejecuto un total de doce (12) sondajes de investigación hidrogeológicos en el mes julio 2022, cuyas profundidades fueron entre 30 y 60 m., con buzamiento vertical de -90°, donde se instaló piezómetros “tipo Casagrande”, los mismos que permiten observar el comportamiento de niveles y obtener muestras de agua subterránea.

Al finalizar la perforación del sondeo se instaló piezómetros, con previa limpieza del sondaje. Los piezómetros fueron revestidos con PVC SAP de Ø 2” los que se denominan “piezómetro único” y tubos PVC SAP doble de 2 y 1 pulgadas, denominados “piezómetro doble” para observar el nivel freático profundo y superficial. Dichos tubos van sobre una cama de grava de 0.5 m desde el fondo del sondeo, y revestido con grava de 1/8 pulgadas, en función al diseño preliminar del piezómetro, preparado de acuerdo a la litología, nivel de agua y tramos permeables identificadas en el sondaje.

En el tramo de tubería PVC ranurado se ingresó gravilla de 3 – 5 mm como un filtro que impide el paso de la arena del medio, posteriormente se colocó un sello de bentonita granulada de 4.0 m. de potencia, luego se rellenó inyectando lechada de cemento y bentonita, rellenado hasta la el nivel del suelo. Finamente se monumento el piezómetro con un dado de concreto, protegida con una tubería metálica con tapa y candado.

Posterior a la instalación de los piezómetros se registró los nivele de agua estático y los parámetros fisicoquímicos del agua, entre ellos; T, pH, Eh, C.E, TDS, y además se confeccionaron el registro litológico de los relaves atravesados durante el proceso de perforación.

2.2.2.5. Ejecución de pruebas hidráulicas

Las pruebas hidráulicas fueron ejecutadas durante la perforación de cada sondeo, el tipo de ensayo se eligió de acuerdo a la condición de la litología atravesada, estos pueden ser método Lefranc carga constante o carga variable, (Ver Cuadro B-2; Anexo B), los cuales se describen a continuación:

Ensayos Lefranc Carga Constante

Este método implica inyectar agua a través de la tubería de perforación hasta la boca de la tubería, manteniendo el nivel del agua a ese nivel sin que rebalse, luego se registra el consumo de agua por minuto por medio del caudalímetro, durante un lapso de 10 minutos cuando el consumo es alto, o entre 20 y 30 minutos en tramos de bajo consumo. Este ensayo se aplica en suelos y litologías fracturadas.

Ensayos Lefranc Carga Variable

Este ensayo implica inyectar agua en el sondeo a través de la tubería de perforación hasta la boca de esta, generando una sobrecarga hidráulica sobre el nivel freático del sondaje, luego se toman lecturas de los niveles de descenso con una sonda eléctrica manual en intervalos regulares de tiempo hasta llegar al nivel natural del agua. Este ensayo se lleva a cabo generalmente en rocas ligeramente fracturadas por debajo del nivel freático y en tramos con bajo consumo de agua.

Foto 2:

Lectura y registro de datos ensayo lefranc carga variable



Ensayos de Recuperación (Slug test)

Este ensayo se realiza al llegar al nivel freático durante la perforación, consiste en extraer un cierto volumen de agua de la zona saturada, generando una depresión del nivel freático, para luego medir de recuperación de niveles de agua con una sonda eléctrica cada cierto tiempo, hasta que el nivel freático se recupere a su estado natural; este tipo de ensayo se realiza en suelos y rocas fracturadas donde se pueda medir la recuperación del nivel de agua, como respuesta a la extracción de agua subterránea.

Foto 3:

Lectura y registro de datos ensayo recuperación (Slug Test).



2.2.3. Etapa de gabinete

- Procesamiento de datos de campo, interpretación y análisis
- Clasificación de fuentes de agua
- Análisis de niveles de agua e interpretación piezométrica
- Elaboración de planos
- Evaluación hidroquímica de las muestras de agua obtenidas en campo.
- Elaboración del modelo conceptual
- Elaboración de la modelación numérica
- Elaboración de alternativas de cierre
- Conclusiones y recomendaciones
- Redacción de tesis

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1. Marco referencial

3.1.1. Antecedentes internacionales

- a. Johnson et al., (2000). “The Hydrogeochemistry of the Nickel Rim Mine Tailings Impoundment, Sudbury, Ontario”. Este estudio evaluó el comportamiento hidrogeoquímico de los relaves de la mina Nickel Rim, ubicada en Sudbury, Ontario (Canadá), con el objetivo de analizar la oxidación de minerales sulfurados y la migración de contaminantes en las aguas subterráneas asociadas al depósito de relaves. El estudio concluyó que la oxidación de sulfuros generó aguas de bajo pH y elevadas concentraciones de sulfatos y metales disueltos, como hierro, níquel y aluminio. Asimismo, se determinó que el flujo de agua subterránea y las condiciones geoquímicas controlan el transporte de contaminantes dentro del depósito, influyendo en la calidad del agua y en la evolución ambiental de los relaves. Los resultados demostraron la importancia de integrar la hidrogeología y la hidroquímica para la evaluación ambiental y el diseño de medidas de remediación y cierre minero.
- b. Parviainen, (2009). “**Tailings Mineralogy and Geochemistry at the Abandoned Haveri Au–Cu Mine, SW Finland**”. Este estudio tuvo como objetivo principal delimitar la extensión de la oxidación de sulfuros en los relaves de la mina de oro-cobre Haveri y evaluar su impacto en las aguas superficiales cercanas. Se emplearon técnicas avanzadas como microscopía de luz reflejada, SEM, XRD y un método de extracción secuencial para analizar catorce muestras de relaves. Además, se analizaron doce muestras de agua para determinar concentraciones de diversos elementos.

Los resultados mostraron una capa de oxidación con espesores entre 50 y 140 cm, caracterizada por un agotamiento casi total de sulfuros primarios, como pirrotita y pirita, en la parte superior. En esta capa oxidada, se encontraron (oxi) hidróxidos secundarios y oxihidroxisulfatos de Fe, enriquecidos con arsénico (As), cobre (Cu) y zinc (Zn). El estudio también reveló que el pH de los relaves varió de 2.46 a valores neutros, con un contenido de azufre promedio de 2.9%.

Aunque las concentraciones de cadmio (Cd), cromo (Cr) y paladio (Pd) fueron bajas, la escorrentía de los relaves hacia el lago Haveri transportó concentraciones elevadas de cobalto (Co), cobre (Cu), níquel (Ni) y zinc (Zn), en el rango de 500 a 1,800 µg/L.

c. Sandoval, (2020). **“Assessment of Tailings Ponds by a Combination of Electrical (ERT and IP) and Hydrochemical Techniques”**. Este estudio evaluó la eficacia de la combinación de tomografía de resistividad eléctrica (ERT) y polarización inducida (IP), junto con estudios hidroquímicos, para monitorear el encapsulamiento de los depósitos de relaves en el distrito minero de Linares-La Carolina.

El estudio concluyó que ERT e IP fueron efectivos para visualizar el encapsulamiento de los depósitos. Los perfiles de ERT distinguieron capas de baja resistividad superficial sobre basamento granítico de alta resistividad, indicando la presencia de percolación de lixiviados hacia el granito alterado subyacente, detectada también por anomalías en los perfiles de IP (hasta 8 mV/V) como evidencia de movimiento de lixiviados.

3.1.2. Antecedentes nacionales

a. Mora Palomino, G. L. (2019). “Evaluación del relave minero y su tratamiento en la planta beneficio MVC - 2011-II”. Esta tesis tuvo como objetivo principal evaluar el tratamiento de los relaves mineros en la planta de beneficio MVC 2011-II en Sayán, Lima. La investigación se centró en la necesidad de mejorar la estabilidad física de los relaves, debido a los riesgos ambientales derivados de su inadecuada disposición, como la licuefacción y el debilitamiento de muros de contención, que generan contaminación de suelos y ríos.

El estudio evaluó cómo los cambios en el diseño del sistema de disposición de relaves, la recuperación de aguas y los parámetros de construcción influyen en la estabilidad física de la presa de relaves N°3.

Los resultados respaldan la propuesta de acumular los relaves aguas abajo, utilizando bordes contruídos con material de préstamo, y la implementación de un hidrociclón en el proceso de disposición. Estos cambios garantizaron la estabilidad del depósito frente a eventos sísmicos, alcanzando factores de seguridad de 1.473 para el factor estático y 1.066 para el factor pseudoestático, superando los requisitos de la Guía Ambiental de Estabilidad de Taludes de Desechos Sólidos de Mina (DGAAM, 1997).

b. Ledesma, (2018). “Propuesta de tratamiento del depósito de relaves de Quiulacocha-Pasco para su remediación ambiental, basada en experiencias exitosas en empresas mineras”. Este estudio tuvo como objetivo evaluar cómo una propuesta de tratamiento, basada en experiencias exitosas de la industria minera, puede favorecer la remediación ambiental del depósito de relaves de Quiulacocha - Pasco.

El estudio aborda los impactos ambientales de la minería, como la afectación de ecosistemas, recursos hídricos y suelos, así como los problemas de salud y conflictos sociales. Con un enfoque descriptivo-explicativo, la investigación justifica la implementación de un plan de disposición y monitoreo de relaves para mitigar el daño ambiental y sanitario.

La propuesta se estructura en dos etapas:

- Encapsulamiento de relaves secos (79.38 hectáreas) con geomembranas, seguida de una cobertura de tierra orgánica y revegetación con plantas nativas.
- La remediación del estanque de aguas ácidas tras el cierre definitivo del depósito de desmontes.

El estudio concluye que esta intervención integral contribuirá significativamente a la recuperación de recursos naturales y la mejora de la calidad de vida de las comunidades cercanas.

c. Mendoza, (2019). **“Plan de cierre de relaveras auríferas de la planta de beneficio minera Españolita S.A.”** Este estudio tiene como objetivo restablecer las relaveras R1 y R2 de la planta Españolita asegurando que queden físicamente y químicamente estables mediante el perfilado y revegetación del terreno afectado. La empresa, operando con una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) para 25 TM/día, está tramitando una ampliación a 250 TM/día.

El plan de cierre busca lograr un cierre planificado de las instalaciones colmatadas, minimizando los impactos ambientales previos y transformando el área en un ecosistema viable para el cultivo de pastos, árboles u otros sembríos. Para estabilizar químicamente el área, se implementará una tecnología de neutralización mediante riego con ácido peroximonosulfúrico.

El plan concluye que la rehabilitación de las relaveras R1 y R2, ubicadas en las pampas La Aguada de Chala, eliminará el riesgo ambiental permanente, cumpliendo con la legislación ambiental y permitiendo su posterior uso para actividades agropecuarias.

d. Zeballos, (2019). “Cierre de una presa de relaves mineros por la metodología de encapsulamiento del material contaminante en la provincia de Espinar, 2019”. Este estudio tuvo como objetivo evaluar los materiales más adecuados para el encapsulamiento de los contaminantes en la presa de relaves Ccamacmayo en Espinar, con el fin de proponer una solución sostenible para el problema de los pasivos ambientales mineros y permitir la reforestación con especies nativas.

La propuesta de encapsulamiento incluye el uso de geomembrana, geotextil, una capa de arcilla de 0.20 m y una capa final de tierra de cultivo (Top Soil) de 0.30 m. En cuanto a la reforestación, las especies más recomendadas son las gramíneas *Festuca orthophylla* y *Bromus unioloides*, por sus ventajas ecológicas y geomorfológicas, obteniendo las puntuaciones más altas en la valoración.

3.1.3. Antecedentes regionales

a. Cesel S.A., (2011). “Ingeniería de detalle para el abandono del depósito de desmontes Excélsior – Cerro de Pasco Activos Mineros S.A.C”. El estudio tuvo como objetivo delimitar las zonas de alimentación y descarga del acuífero, analizar la circulación del agua subterránea y la permeabilidad del subsuelo en el depósito de desmontes Excélsior.

El análisis reveló que el flujo de agua subterránea proviene principalmente de la infiltración de precipitaciones y circula a través de morrenas glaciares, el depósito de relaves y rocas fracturadas. Se determinó una variabilidad en la profundidad del nivel freático, desde 0.00 m en el sector sur

hasta 6.95 m en el norte. Además, se identificaron filtraciones permanentes en el sector suroeste que requieren control mediante drenaje francés para su canalización.

El caudal de los manantiales fue estimado en 5 L/s y deberá ser conducido al canal de desagüe izquierdo, ya que el pH del agua es alcalino (aproximadamente 9), en contraste con el pH más ácido de los manantiales (aproximadamente 6).

b. Ego-Aguirre y Smuda, (2010). “Evaluación conceptual del flujo de las aguas de los depósitos Excélsior, Quiulacocha y las Pilas de Minerales”. Este estudio tuvo como objetivo evaluar cómo los depósitos de minerales de Pampa Seca y Paragsha contribuyen al drenaje ácido observado en el depósito de Quiulacocha y dimensionar el flujo de aguas de Quiulacocha y Excélsior hacia el tajo Raúl Rojas.

El estudio encontró que el depósito de desmontes Excélsior, ubicado al sur de Pampa Seca, está hídricamente conectado con la relavera de Quiulacocha, ambos inoperativos y a cargo de Activos Mineros S.A.C. Cerca de la presa de Quiulacocha se observó una laguna con pH de 2.7, cuyas aguas son capturadas y enviadas al depósito de relaves de Ocróyoc. La hipótesis sostenida por Activos Mineros es que el flujo de aguas ácidas de Pampa Seca hacia Excélsior es responsable de la mala calidad del agua en Quiulacocha.

c. Alanya, (2022). “Tratamiento de drenaje ácido de mina por método pasivo con roca caliza de la relavera Quiulacocha en Cerro de Pasco, 2022”. Este estudio evaluó tres sistemas de tratamiento pasivo para mitigar el drenaje ácido de mina (AMD) en la relavera de Quiulacocha, evaluando su capacidad para neutralizar la acidez y remover metales pesados.

Los sistemas probados fueron:

- **T1** (material calcáreo, suelo orgánico y arena),
- **T2** (material calcáreo, suelo natural y arena),
- **T3** (suelo natural, arena y grava).

El sistema T1 fue el más eficiente, alcanzando eficiencias de remoción superiores al 92% para metales como cadmio, cobre, plomo, zinc e hierro (con un máximo de 96.7% para hierro) en 20-25 días, logrando los Límites Máximos Permisibles. El sistema T2 mostró menores eficiencias (entre 79.9% y 94.4%), mientras que el sistema T3 fue ineficaz, con eficiencias negativas para todos los metales y tiempos evaluados.

3.2. Estudios anteriores.

En el depósito de relaves Quiulacocha, existen estudios relativos a la geología, hidrogeología, inventario de recursos naturales, evaluación de recursos hídricos y evolución de procesos geoquímicos; entre ellos se tiene:

- a. Centromin Perú S.A. (2006). “Elaboración del plan de cierre de pasivos ambientales mineros Excélsior y Quiulacocha”, tuvo como objetivo principal desarrollar el plan de cierre de los pasivos ambientales mineros, evaluando la factibilidad técnica de las obras de cierre en los depósitos de relaves Excélsior y Quiulacocha.

Los resultados del estudio evidenciaron que la implementación de medidas de cierre permite reducir significativamente los impactos ambientales asociados a la presencia de relaves, especialmente en lo referente a la dispersión de contaminantes hacia el suelo, agua y aire. Asimismo, se determinó que la aplicación de estrategias de encapsulamiento y control de drenajes contribuye a disminuir la movilidad de metales pesados y la generación de drenaje ácido de mina.

Finalmente, el estudio concluye que la ejecución de un plan de cierre adecuado mejora la estabilidad física y química del depósito, garantizando la protección de la salud pública, la seguridad de las poblaciones cercanas y la preservación del medio ambiente.

b. GWI (2007). “Investigación hidrogeológica de la mina subterránea y las instalaciones superficiales de la unidad minera Cerro de Pasco”, tuvo como objetivo caracterizar el comportamiento hidrogeológico del sistema de aguas subterráneas y superficiales en el área de influencia de la unidad minera, mediante la integración de información hidrogeológica, hidrológica e hidroquímica.

Los resultados del estudio evidenciaron la existencia de un sistema hidrogeológico complejo, en el cual se identificaron variaciones en la calidad del agua asociadas a las diferentes unidades mineras y litológicas. Asimismo, los ensayos de caudal, calidad de agua y trazadores permitieron determinar la interacción entre el agua subterránea y superficial, así como la influencia de las actividades mineras en la modificación del flujo natural del sistema.

Del mismo modo, la red de piezómetros y los ensayos de permeabilidad realizados en materiales superficiales y del basamento permitieron modelar el comportamiento hidrogeológico del sistema, identificando zonas de recarga, descarga y circulación preferencial del flujo subterráneo.

Finalmente, el estudio desarrolló el balance hídrico de los depósitos de relaves y desmonte, incluyendo Quiulacocha, lo que permitió representar el cono de depresión generado por las actividades mineras y diferenciar los flujos superficiales, someros y profundos, contribuyendo a la comprensión integral del sistema hidrogeológico regional.

c. Hidroenergía (2008). “Estudio hidrogeológico en los depósitos de relaves Quiulacocha y de desmontes Excélsior”, planteo como objetivo principal evaluar el comportamiento hidrogeológico de los depósitos mineros mediante el análisis de los flujos de agua y la caracterización del sistema hídrico asociado a los componentes de la unidad minera.

Los resultados del estudio evidenciaron la presencia de flujos de agua asociados a los bordes de los depósitos de relaves Quiulacocha y Excélsior, los cuales presentan interacción directa con el sistema superficial y subterráneo. Asimismo, se determinó que el sistema hídrico presenta variaciones en su comportamiento en función de las condiciones del terreno y la influencia de los pasivos mineros.

Asimismo, el balance hídrico desarrollado permitió cuantificar los aportes y pérdidas de agua en los depósitos, evidenciando la influencia de los relaves y desmonte en la dinámica hídrica del sistema. Estos resultados permitieron identificar la existencia de una interacción constante entre los flujos superficiales y subterráneos.

El estudio incluyó una caracterización descriptiva de la calidad del agua en los depósitos de Quiulacocha y Excélsior, determinando la presencia de alteraciones asociadas a la actividad minera, lo cual contribuye a comprender el grado de impacto hidroquímico en el área de estudio.

d. Golder (2010). “Estudio de prefactibilidad física y química del depósito de relaves Quiulacocha”, planteo como objetivo evaluar las condiciones físicas, hidrogeológicas e hidroquímicas del depósito de relaves Quiulacocha, considerando su interacción con el depósito de desmontes Excélsior debido a la conexión hidráulica existente entre ambos sistemas.

Los resultados del estudio evidenciaron que existe una relación hidrogeológica entre los depósitos de Excélsior y Quiulacocha; sin embargo, esta interacción se encuentra condicionada

por la baja permeabilidad del basamento rocoso, lo que limita significativamente la migración de flujos hacia sistemas externos. Asimismo, se determinó que la mayor parte del flujo hídrico es retenido dentro del sistema lagunar y del dique de la relavera, funcionando como zonas de acumulación y control del agua de contacto.

Asimismo, el análisis de calidad de agua permitió establecer que los cursos de agua asociados al río Ragra no presentan influencia directa de las aguas provenientes del depósito de relaves Quiulacocha, debido a que los valores de pH registrados en los cuerpos de agua cercanos se mantienen en condiciones neutras. Esto sugiere que la afectación hidroquímica del sistema hacia el río Ragra es limitada en ese tramo.

Finalmente, el estudio concluye que la calidad del agua en el río Ragra, aguas abajo del área de influencia directa del DR Quiulacocha, estaría influenciada principalmente por la presencia de pasivos mineros ubicados en sectores inferiores de la cuenca, lo que redefine las fuentes potenciales de contaminación en el sistema hidrogeológico regional.

e. Geo-Logic (2014), en el estudio titulado “Estudio para identificar fuentes de ingreso de aguas subterráneas y determinación de la participación de la empresa administradora Cerro S.A.C. y Activos Mineros S.A.C. en el tratamiento de las mismas”, desarrolló un modelamiento numérico del flujo subterráneo y un análisis hidrogeológico detallado de la cuenca de drenaje, con énfasis en la identificación de las fuentes de ingreso de agua hacia los depósitos de relaves Quiulacocha y desmontes Excélsior.

Los resultados del estudio evidenciaron que las principales contribuciones al sistema hídrico provienen de diferentes componentes con aportes diferenciados. En el sector aguas arriba de Excélsior (Pampa Seca, Paragsha y Miraflores), se determinó una contribución equivalente al

13.5% del flujo total, con aportes de 19.7% en carga de metales, 18.2% en sólidos disueltos y 4.7% en acidez.

De igual forma, la infiltración y escorrentía asociada al depósito de Excélsior representan el componente dominante del sistema, aportando 69.6% del flujo total, 79.7% de los metales, 80.8% de sólidos disueltos y 95.2% de la acidez, evidenciando su alta influencia en la generación de condiciones hidroquímicas degradadas.

Por otro lado, el aporte del agua subterránea natural constituye el 14.3% del flujo total, caracterizándose por una contribución mínima en términos de carga de metales y acidez, lo que indica un bajo grado de impacto en comparación con las fuentes mineras.

Finalmente, se determinó que la descarga proveniente del depósito de desmontes Excélsior hacia la relavera Quiulacocha representa el principal mecanismo de transferencia de contaminantes del sistema, concentrando el 92.8% del flujo total, así como el 94.4% de los metales, 94.1% de los sólidos disueltos y el 99.7% de la acidez, consolidándose como la fuente dominante de impacto hidroquímico en el área de estudio.

3.3. Marco conceptual

3.3.1. Definición de términos

Para fines de mejor entendimiento y facilitar el seguimiento del presente trabajo de investigación, se considera desarrollar los conceptos básicos como:

DR Quiulacocha. - Depósito de relaves Quiulacocha.

DDM Excélsior. - Depósito de desmonte Excélsior.

DR Ocroyoc. – Depósito de relaves Ocroyoc.

Hidrología. - Es el estudio científico de las aguas de la Tierra. La hidrología examina las propiedades del agua, así como su presencia, ocurrencia, distribución y movimiento sobre el planeta. (Pulido, Bosch, 2014).

Ciclo hidrológico. - La mayor parte del agua subterránea existente en la tierra tiene origen en el ciclo hidrológico, que es el sistema por el cual circula desde océanos y mares hacia la atmósfera y de allí hacia los continentes, donde retorna superficial o subterráneamente a los mares y océanos. Los factores que influyen en los procesos del ciclo hidrológico son fundamentalmente los factores climáticos, como la temperatura del aire, intensidad de los vientos, la humedad relativa del aire y la insolación y el tipo y densidad de la cobertura vegetal. (Pulido, Bosch, 2014).

Evaporación. - La evaporación es el resultado del proceso físico, por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, retornando directamente a la atmósfera en forma de vapor. (Custodio E. Llamas M.R., 1983, pág. 314).

Precipitación. - Es el agua liberada de las nubes en forma de lluvia, aguanieve, nieve o granizo. Es el principal proceso por el cual el agua retorna al continente; la tasa de precipitación varía geográficamente y con el tiempo. (Pulido, Bosch, 2014).

Escorrentía superficial. - Se llama escorrentía superficial a aquella que alcanza el punto considerado, habiendo circulado siempre sobre la superficie del terreno. En la práctica, es asimilable a la escorrentía directa (Custodio E. Llamas M.R., 1983, pág. 274).

Escorrentía subterránea. - Se denomina escorrentía subterránea a la que llega al punto después de haber circulado un trayecto más o menos largo dentro de un acuífero o embalse subterráneo. Dada la lentitud de movimiento del agua subterránea, esto puede suponer que pasen

semanas, meses o años entre la lluvia que originó la infiltración eficaz correspondiente y la llegada de esa agua al punto del río considerado (Custodio E. Llamas M.R., 1983, pág. 274).

Infiltración. - Es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo, a través de la superficie de la tierra, y queda retenida por él o alcanza un nivel acuífero, incrementando el volumen acumulado anteriormente (Custodio E. Llamas M.R., 1983, pág. 273, 342).

Agua subterránea. La mayor parte del agua del suelo proviene del agua de la precipitación, que se infiltra a través de la superficie del suelo. Por debajo de esta capa, se ubica la zona de saturación, en donde todos los espacios entre las partículas se encuentran saturados de agua; el término agua subterránea es utilizado para describir esta zona (Pulido, Bosch, 2014).

Manantial. - Un manantial puede definirse como un punto o zona de la superficie del terreno en la que, de modo natural, fluye a la superficie una cantidad apreciable de agua, procedente de un acuífero o embalse subterráneo. Los manantiales son, pues, a modo de aliviaderos o desagües por los que sale la infiltración o recarga que reciben los embalses subterráneos (Custodio E. Llamas M.R., 1983, pág. 1102).

Cuenca. - Es la unidad básica de estudio del ciclo hidrológico donde tienen lugar los procesos. Es el área donde toda el agua que cae dentro de esta дрена; se dirigirá hacia un mismo punto (Pulido, Bosch, 2014).

Piezómetro. - Instrumento utilizado para medir el nivel piezométrico y la presión hidráulica en un punto específico del subsuelo. Los datos obtenidos con piezómetros son fundamentales para la calibración y validación de modelos numéricos, ya que permiten comparar las condiciones simuladas con las observadas en campo. (Gamboa et al., 2021).

Stick up. - Se refiere a la parte de un piezómetro o tubo de medición que sobresale por encima del nivel del terreno, de manera que la tubería o estructura del piezómetro queda visible y accesible para su monitoreo y lectura. (Gamboa et al., 2021).

Nivel freático. - Es la superficie en la que la presión del agua subterránea es igual a la presión atmosférica. Este nivel representa el límite superior de la zona saturada y su posición puede variar en función de la recarga, la extracción y las condiciones climáticas (Fetter, 2018).

Aforo con molinete (correntómetros). - El aforo con molinete se fundamenta en determinar mediante el mismo la velocidad de las aguas en distintos puntos de un transversal del río, lo suficientemente próximos como para poder dibujar en ese mismo transversal, en escala suficientemente grande, las líneas isotacas, o sea, aquellas líneas que son el lugar geométrico de los puntos donde la velocidad es la misma (Custodio E. Llamas M.R., 1983, pág. 364).

Depósito de relaves. - Son acumulaciones de materiales de desechos provenientes de la molienda y flotación luego de la recepción de los minerales valiosos; éstos algunas veces pueden adquirir valor económico debido a la mejora tecnológica que se les da (Southern Corpper, s.f.).

Ecuación de balance hídrico. - Consiste en establecer una igualdad entre las entradas y salidas de agua en una zona concreta. La concepción responde exactamente al proceso real, pero existe gran posibilidad de error en la medida de los términos que intervienen en el balance, con lo cual los resultados pueden estar muy alejados de los verdaderos (Custodio E. Llamas M.R., 1983, pág. 317). La diferencia entre el total de entradas y el total de las salidas debe ser igual a la variación en el almacenamiento:

$$\text{Entradas (E)} - \text{salidas (S)} = \text{Variación en el almacenamiento}$$

El balance requiere conocer los flujos de entrada y de salida, así como el almacenamiento de agua. Los términos del balance pueden contener errores de medición, interpretación, estimación y metodología. Por lo anterior, generalmente la ecuación “no cierra” de forma exacta.

Acuífero. - Un acuífero a aquel estrato o formación geológica que, permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades (Custodio E, Llamas M.R., 1983, Pág. 259).

Conductividad hidráulica (K). - Medida de la facilidad con la que el agua circula a través de los distintos estratos; depende de la naturaleza del medio poroso y de las propiedades físicas del fluido (Pulido, Bosch, 2014).

La transmisividad (T). - La transmisividad fue introducida por Theis en 1935, y se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura fija determinada (Custodio E. Llamas M.R., 1983, pág. 263).

Gradiente hidráulico (I). - Se refiere a la diferencia de carga hidráulica entre dos puntos de un sistema subterráneo, dividida por la distancia que los separa. Este gradiente constituye el motor del flujo subterráneo, dirigiendo el movimiento del agua desde zonas de mayor energía hacia zonas de menor energía (Bear, 2013).

Modelo conceptual. - Corresponde al entendimiento y descripción cualitativa y cuantitativa del sistema hidrogeológico (Pulido, Bosch, 2014), incluyendo al menos:

- Modelo y parametrización de unidades hidrogeológicas
- Piezometría y direcciones de flujo y

- Balance hídrico

Facies hidroquímica. - Conjunto de características químicas del agua subterránea que reflejan su origen, interacción con las rocas encajonantes y los procesos geoquímicos dominantes. El análisis de facies permite identificar zonas de recarga y descarga, así como evaluar posibles procesos de contaminación (García y Herrera, 2017).

Zonas de recarga y descarga. - La zona de recarga es el área en la que el agua superficial se infiltra y pasa a formar parte del sistema subterráneo, mientras que la zona de descarga corresponde a las áreas donde el agua subterránea emerge o fluye hacia cuerpos superficiales. Ambas zonas son fundamentales en el balance hídrico y en el establecimiento de condiciones de frontera en los modelos (Anderson et al., 2015).

Modelación numérica. - La modelación hidrogeológica permite desarrollar modelos conceptuales y numéricos, con el fin de predecir el comportamiento futuro de sistemas subterráneos (Pulido, Bosch, 2014).

Balance iónico. - En un análisis químico completo debe verificarse que: suma de miliequivalentes de aniones = suma de miliequivalentes de cationes (Custodio E. Llamas M.R., 1983, pág. 223). El error de balance iónico (EBI) se calcula de esta forma:

$$EBI (\%) = \frac{\sum \text{cations meq/L} - \sum \text{anions meq/L}}{\sum \text{cations meq/L} + \sum \text{anions meq/L}} * 100 \%$$

Donde:

- Σ cationes = Sumatoria de cationes (meq/L).
- Σ aniones = Sumatoria de aniones (meq/L).

Perforación. – Es el proceso de realizar un agujero en el terreno utilizando un equipo especializado (perforadora) para alcanzar grandes profundidades. Este procedimiento se utiliza principalmente para obtener muestras de materiales a diferentes profundidades del suelo, como agua subterránea, minerales o hidrocarburos. También se utiliza para instalar infraestructuras como pozos de agua, sistemas de monitoreo o drenajes. (Sánchez, M. 2015)

Sondeo. - Es el proceso de introducir un equipo o herramienta en el suelo con el objetivo de obtener información sobre las propiedades geológicas o hidrogeológicas del terreno a profundidades más superficiales. Se utiliza para evaluar la composición del suelo, determinar la presencia de agua subterránea o explorar el comportamiento de la tierra bajo ciertas condiciones. (Sánchez, M. 2015)

Plan de cierre técnico de los relaves. - El cierre de los depósitos de relaves debe estar incluido en el plan de cierre de la mina, de modo que se garantice la estabilidad de la comunidad, salud y medio ambiente.

Esta fase se inicia al culminar la operación de la concentradora y al término de las descargas de los relaves; se debe plantear la construcción de estructuras que ayuden a controlar, monitorear y asegurar la estabilidad fisicoquímica de estos. Estas medidas tomadas pueden ser zanjaz, conductos de derivación de agua, rehabilitación con tierra de cultivo, etc.; cuando exista documentación financiera de respaldo al cumplimiento exitoso de la fase de cierre, este coincidirá con el fin de la fase para su devolución de dichos documentos. (Banco Mundial y Programa de Asistencia Técnica al Ministerio de Energía y Minas del Perú, s.f.)

Después de ellos continúa con la etapa de postcierre, que se da con el abandono a consecuencia del cierre exitoso del medio comprendido en sus características físicas y químicas

del depósito de relave. (Banco Mundial y Programa de Asistencia Técnica al Ministerio de Energía y Minas del Perú, s.f.).

3.4. Bases teóricas

3.4.1. Teoría del flujo subterráneo en medios porosos saturados

El flujo subterráneo constituye el movimiento del agua a través de los poros y fracturas del subsuelo bajo la influencia de gradientes de energía hidráulica. Este proceso es fundamental para la comprensión de sistemas hidrogeológicos, ya que determina la dirección, velocidad y distribución espacial del agua en medios naturales o perturbados por actividades humanas (Bear, 2013).

La base conceptual del estudio del flujo subterráneo fue establecida por Henry Darcy (1856), quien formuló la ley que describe la relación proporcional entre la velocidad del flujo (v) y el gradiente hidráulico dh/dl en un medio poroso:

$$v = -K \frac{dh}{dl}$$

donde K es la conductividad hidráulica, parámetro que refleja la capacidad del medio para transmitir agua y que depende de propiedades físicas como la porosidad, permeabilidad y textura del material geológico (Fetter, 2018).

En medios heterogéneos característicos de entornos mineros andinos, las variaciones en la litología y estructura geológica generan anisotropías hidráulicas que influyen en la distribución del flujo (Domenico & Schwartz, 1998). Esta complejidad hace indispensable la caracterización espacial de propiedades hidráulicas y el análisis de condiciones de frontera, que incluyen recarga

por precipitación, interacción con cuerpos superficiales y descargas inducidas por bombeo (Freeze & Cherry, 1979).

3.4.2. Hidroquímica

La hidroquímica es la rama de la hidrología que estudia la composición química del agua y los procesos que determinan la presencia, distribución y concentración de los diferentes elementos y compuestos químicos disueltos. Su objetivo principal es caracterizar la calidad del agua y evaluar los factores naturales y antrópicos que influyen en sus propiedades físico-químicas (Hem, 1985).

La composición química de las aguas naturales depende de diversos factores, entre ellos las características geológicas de la cuenca, las condiciones climáticas, los procesos de meteorización, el tiempo de contacto entre el agua y los materiales geológicos, así como las actividades humanas que pueden incorporar sustancias contaminantes al medio hídrico. Como resultado de estos procesos, el agua adquiere una composición química particular que puede utilizarse para identificar su origen, evolución y aptitud para diferentes usos.

La evaluación hidroquímica comprende el análisis de parámetros físicos y químicos tales como el potencial de hidrógeno (pH), la conductividad eléctrica (CE), los sólidos disueltos totales (SDT), la temperatura, el potencial de oxidación-reducción (ORP) y las concentraciones de los principales iones disueltos. Entre los cationes más comunes se encuentran calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+), mientras que los aniones predominantes son bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-) y nitrato (NO_3^-) (Custodio y Llamas, 1983).

3.4.3. Modelamiento numérico del flujo subterráneo

El modelamiento numérico es una herramienta analítica que permite representar, con alto nivel de detalle, la dinámica del flujo subterráneo y predecir su comportamiento bajo diferentes condiciones naturales u operativas. Estos modelos se basan en la solución de la ecuación diferencial de flujo en medios porosos, derivada de la Ley de Darcy y la ecuación de continuidad (Anderson, Woessner & Hunt, 2015):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - q$$

donde S_s es el coeficiente de almacenamiento específico y q representa las fuentes o sumideros de agua.

El proceso de modelamiento numérico comprende varias etapas fundamentales: (1) la construcción del modelo conceptual, que sintetiza la geología, hidrodinámica y condiciones de contorno; (2) la discretización del dominio; (3) la calibración y validación del modelo con datos de campo (niveles piezométricos, ensayos hidráulicos); y (4) la simulación de escenarios proyectados para evaluar impactos futuros (Zheng & Bennett, 2002; FEFLOW, 2016).

La aplicación de herramientas como MODFLOW, desarrollado por el U.S. Geological Survey, y FEFLOW, basado en el método de elementos finitos, ha permitido avances sustanciales en la hidrogeología aplicada a la minería, ya que posibilitan analizar el efecto de las operaciones sobre el sistema subterráneo y predecir la evolución del flujo ante el recrecimiento de depósitos de relaves (Anderson et al., 2015; Ritcey, 2018).

3.4.4. Evaluación hidrogeológica en planes de cierre de minas

La evaluación hidrogeológica en los planes de cierre de minas constituye un componente fundamental para garantizar la estabilidad física, química e hidrológica de las unidades mineras tras el cese de las operaciones extractivas. Este análisis permite caracterizar el comportamiento del sistema hidrogeológico, considerando la interacción entre aguas superficiales y subterráneas, así como la influencia del entorno geológico en la migración de flujos, contribuyendo a la identificación del medio hidrogeológico que controla la movilidad de contaminantes y la estimación de impactos ambientales en la etapa de postcierre, además del diseño de medidas de mitigación para la protección de los recursos hídricos y la salud humana (Younger et al., 2002).

En el marco de los planes de cierre, la evaluación hidrogeológica se orienta al cumplimiento de criterios técnicos que aseguren la adecuada gestión del sistema hídrico del área impactada, permitiendo caracterizar las condiciones hidrogeológicas del depósito de relaves, identificar fuentes de contaminación, analizar rutas de migración de contaminantes y definir medidas de control a largo plazo, aspectos que garantizan la estabilidad física y química del sistema en la etapa de postcierre (INAP, 2009).

La hidroquímica se basa en el análisis de las interacciones agua–roca que determinan la composición del agua subterránea, controladas por procesos termodinámicos y cinéticos asociados al tiempo de residencia, la litología y las condiciones fisicoquímicas del medio; en depósitos de relaves como Quiulacocha, estos procesos son relevantes por la interacción entre el agua subterránea y los materiales mineros, lo que influye en la generación y movilidad de contaminantes en el entorno hidrogeológico (Drever, 1997).

CAPÍTULO IV: GEOMORFOLOGÍA

El presente capítulo constituye una base fundamental para la interpretación del sistema físico del área de estudio, debido a que la geomorfología controla la distribución del drenaje superficial, la dinámica de escorrentía y los procesos de erosión y sedimentación que influyen en la estabilidad del depósito de relaves Quiulacocha.

La caracterización de las unidades geomorfológicas permite comprender la configuración del relieve, los patrones de drenaje y la dirección del flujo superficial, factores que influyen directamente en la recarga hídrica y la interacción entre aguas superficiales y subterráneas.

En este sentido, la información geomorfológica obtenida sustenta el cumplimiento del Objetivo Específico 1, contribuye al modelo hidrogeológico conceptual (objetivo específico 3) y a la modelación numérica del flujo subterráneo (objetivo específico 4), además de constituir un insumo clave para la evaluación de escenarios de cierre del depósito de relaves Quiulacocha (objetivo específico 5).

En conclusión, la geomorfología del área de estudio condiciona de manera directa el comportamiento del sistema hidrológico superficial, especialmente en la distribución del drenaje, la dinámica de la escorrentía y los procesos de erosión y sedimentación. Estas características controlan la forma en que el agua se moviliza e interactúa con el medio físico, influyendo en la conectividad entre zonas de recarga y áreas de acumulación. Por tanto, los resultados obtenidos permiten sustentar técnicamente la interpretación del sistema y constituyen una base fundamental para el análisis hidrogeológico integral del depósito de relaves Quiulacocha.

4.1. Geomorfología regional

A nivel regional, la zona de estudio se localiza en las altiplanicies interandinas de la parte central del Perú, entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental. Entre ellas se encuentran varios dominios tectoestratigráficos y numerosas minas polimetálicas. Los rasgos estructurales están en estrecha relación con las características de las rocas existentes, producto de los esfuerzos producidos durante la orogenia andina. Geo-Logic, (2014), ver figura 4-1.

Figura 4-1:

Mapa geomorfológico regional

Morfológicamente, la mayor parte de la zona de investigación se encuentra dentro de las altiplanicies interandinas que separan la Cordillera Occidental de la Cordillera Oriental. Las características que se han considerado para diferenciar las unidades morfológicas regionales fueron: altitud sobre el nivel del mar, relieve y tipo de roca aflorante. Como resultado, se han diferenciado las siguientes cinco unidades, de acuerdo a la siguiente tabla 4-1:

Tabla 4-1:

Clasificación de pendientes

Término Descriptivo	Rango (%)
Plano o casi a nivel	0-2
Ligeramente inclinada	2-4
Moderadamente inclinada	4-8
Fuertemente inclinada	8-15
Moderadamente empinada	15-25
Empinada	25-50
Muy empinada	50-75
Extremadamente empinada	>75

Fuente: Ministerio de agricultura, 2009.

4.1.1. Cordillera Oriental

Ubicada en el extremo este del depósito de relaves Quiulacocha, abarcando altitudes entre 4 200 y 4 400 msnm. El relieve es agreste, con pendientes mayores de 50 %, con numerosos escarpes y presencia de valles en “V”, en cuyo fondo se encuentran ríos rectilíneos y valles glaciares en forma de “U”. Geo-Logic, (2014).

Foto 4:

Vista de la cordillera oriental



4.1.2. Borde oeste de la Cordillera Oriental

Su altura promedio varía entre 4 200 y 4 400 msnm. El relieve está conformado por valles glaciares en forma de “U” y dirección NE-SO; las laderas muestran una pendiente dominante de 20 a 50 %. En el fondo de los valles se encuentran lagunas morrénicas y ríos anastomosados de poca pendiente. Geo-Logic, (2014).

4.1.3. Altiplanicie disectada

Se encuentra conformada por acumulaciones morrénicas como consecuencia de la acción de glaciaciones cuaternarias, con superficie de erosión y superficie estructural del substrato rocoso. La pendiente dominante de la altiplanicie disectada es de 15 a 25 % de inclinación. Geo-Logic Perú (2014).

4.1.4. Altiplanicie ondulada

La altiplanicie ondulada se encuentra conformada por acumulación fluvio-glacial y morrénica, con frecuentes accidentes topográficos. En este ámbito es habitual la acumulación arcillosa y, consecuentemente, las condiciones de mal drenaje. El grado de erosión es muy leve. La pendiente dominante es de 4 a 15 % (Geo-Logic,2014).

4.1.5. Planicie

Es una gran depresión topográfica y cuenca sedimentaria rellena o parcialmente cubierta por depósitos glaciares, periglaciares, aluviales y lacustres. El terreno generalmente es plano (pendiente de 0 a 4 %) con accidentes topográficos localizados (Geo-Logic,2014).

Foto 5:

Vista de la planicie

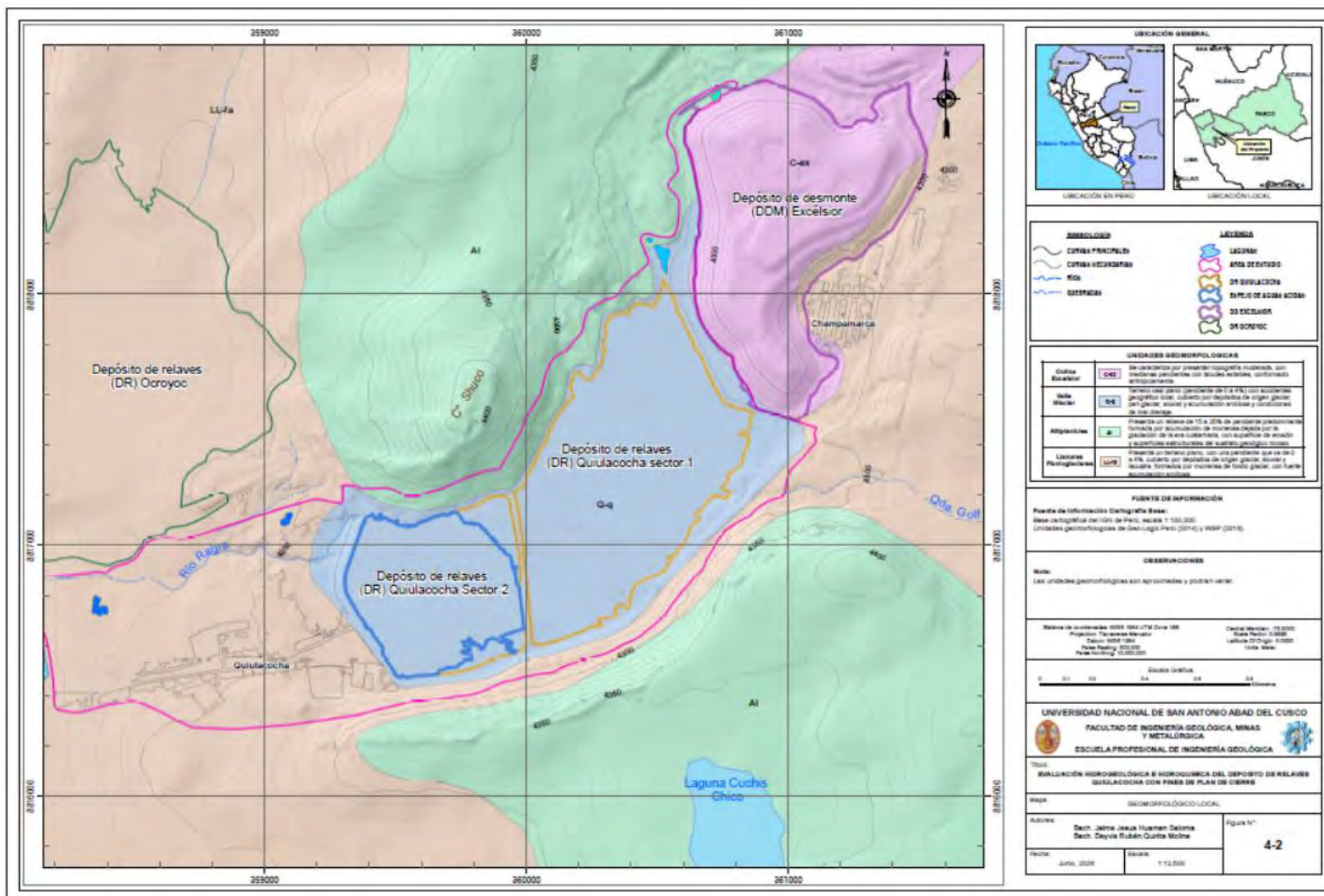


4.2. Geomorfología local

Geomorfológicamente, según Geo-Logic, (2014) el área de estudio se encuentra emplazada entre altiplanicies y llanuras fluvioglaciares; las mismas que se caracterizan por presentar un relieve esencialmente accidentado, propio de puna llano con lomadas y colinas aisladas, remanentes de los procesos denudativos. La planicie costanera se desarrolla como una faja paralela a la costa, limitada al oeste por el litoral y al este por el conjunto de cerros de moderada pendiente, correspondientes a las primeras estribaciones andinas Occidentales. Asimismo, se aprecian pequeños valles que interceptan las colinas que constituyen terrazas bajas, las cuales alcanzan algunos metros de altura. Algunos sectores presentan acumulaciones eólicas en forma de conspicuos mantos de arenas; a continuación, se detallan las unidades geomorfológicas observadas como se muestra en la siguiente figura 4-2.

Figura 4-2:

Mapa geomorfológico local



4.2.1. Colinas Excelsior

El área de estudio se caracteriza por presentar topografía moderada, con medianas pendientes con taludes estables conformados entrópicamente (Geo-Logic, 2014).

Foto 6:

Vista de la colina Excelsior y Altiplanicies



4.2.2. Valle glaciario (quebrada Quiulacocha)

Presenta un terreno casi plano, con una pendiente que va de 0 a 4%, con accidente geográfico local, cubierto por depósitos de origen glaciario, periglaciario, aluvial y lacustre, formados por morrenas de fondo glaciario, con fuerte acumulación arcillosa y condiciones de mal drenaje. Generalmente, no hay erosión glaciario, salvo en sectores más elevados donde ocurre escurrimiento difuso y en surcos como disturbación del suelo por agujas de congelamiento. Cabe resaltar que encima de estas unidades se ha dispuesto el depósito de relaves Quiulacocha (Geo-Logic, 2014).

Foto 7:

Vista del valle glaciar



4.2.3. Altiplanicies

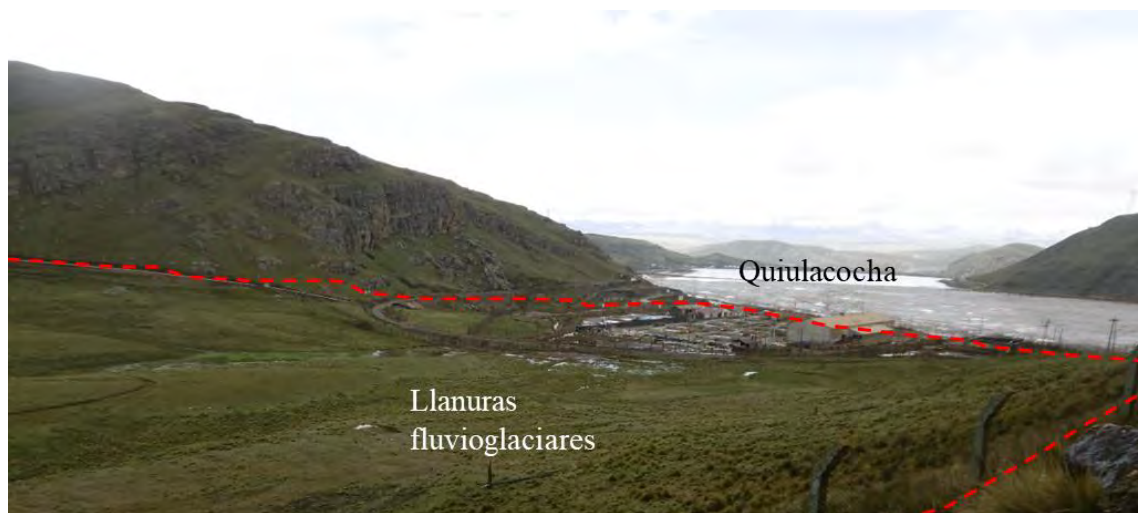
Presenta un relieve de 15 a 25% de pendiente predominante, formada por acumulación de morrenas dejadas por la glaciación de la era cuaternaria, con superficie de erosión y superficies estructurales del sustrato geológico rocoso (Geo-Logic, 2014).

4.2.4. Llanuras fluvioglaciares

Presenta un terreno plano con una pendiente que varía entre 0 y 4%, cubierto por depósitos de origen glaciar, aluvial y lacustre, formados por morrenas de fondo glaciar, con fuerte acumulación arcillosa (Geo-Logic, 2014).

Foto 8:

Vista de llanuras fluvio-glaciares al este del depósito de relaves Quiulacocha



CAPÍTULO V: GEOLOGÍA LOCAL

Las rocas del Grupo Excelsior son las más antiguas de la zona de estudio, las cuales están formadas por pizarras y filitas del Devónico superior, seguidas en discordancia por la Formación Casapalca del Paleógeno inferior, compuesta por conglomerados y brechas calcáreas. Finalmente, se presentan depósitos cuaternarios y depósitos antrópicos variados. Estas unidades estratigráficas pueden observarse en la figura 5-1. Seguidamente, se detallan las unidades estratigráficas presentes en la zona de estudio.

El presente capítulo constituye una base fundamental para la investigación, debido a que la geología local controla el comportamiento hidrogeológico del área de estudio. La identificación de unidades litológicas, estructuras geológicas y del basamento rocoso permite comprender las condiciones de permeabilidad, fracturamiento y estabilidad del medio físico.

Esta información sustenta directamente el cumplimiento del objetivo específico 1 y aporta parámetros esenciales para el modelo hidrogeológico conceptual (objetivo específico 3), la modelación numérica del flujo subterráneo (objetivo específico 4) y la formulación del plan de cierre (objetivo específico 5), al establecer las condiciones de estabilidad del medio geológico frente a escenarios de intervención y postcierre.

En conclusión, la geología local del área de estudio permite definir el marco estructural y litológico que controla el comportamiento hidrogeológico del sistema. La presencia de unidades con diferentes grados de fracturamiento y permeabilidad condiciona la circulación del agua subterránea, así como la interacción entre el medio rocoso y los posibles contaminantes asociados al depósito de relaves. Por tanto, la información geológica obtenida constituye una base

fundamental para la interpretación del sistema hidrogeológico y para el desarrollo del modelo conceptual y numérico del área de estudio.

Figura 5-1:

Mapa geológico local del área de estudio

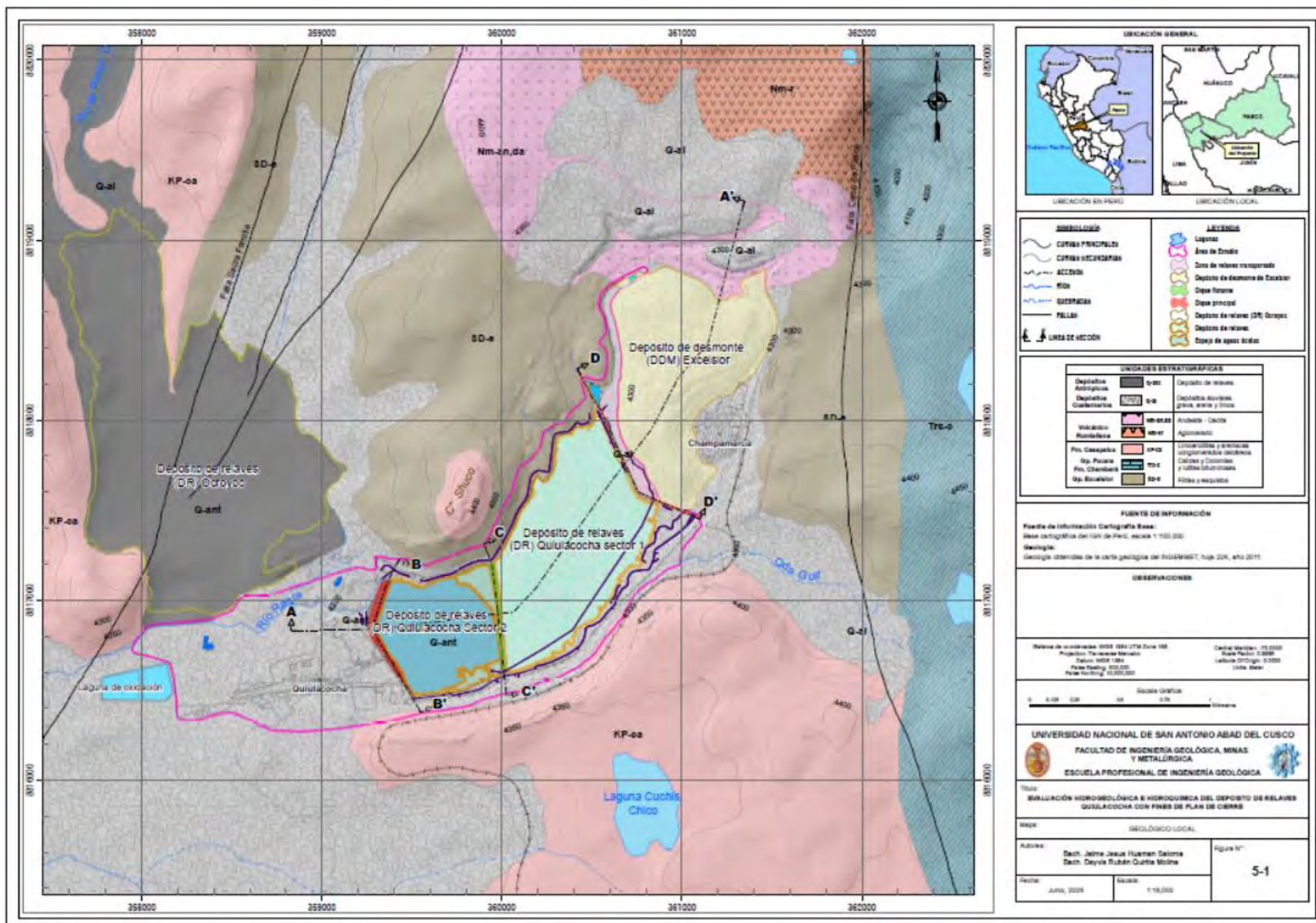


Tabla 5-1:*Columna estratigráfica local*

Era	Sistema	Serie	Unidad / formación	Símbolo	Descripción
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno (reciente)	Depósitos Antrópicos (Dique)	Q-an-di	Material de desmonte de mina: grava arenosa a gravo arcilloso, utilizado para la conformación del dique principal y dique flotante.
			Depósitos Antrópicos (Desmonte)	Q-an-dm	Material de desmonte de mina: grava arenosa, con cierta cantidad de limos y arcillas. Fuertemente oxidado.
			Depósitos Antrópicos (Relave)	Q-an-r	Se considera a todo el cuerpo de relaves del depósito Quiulacocha.
			Depósitos Lacustres	Q-la	Formadas por arcillas oscuras orgánicas, plásticas, en ocasiones con presencia de gravas polimícticas redondeadas. Aparecen inmediatamente debajo del depósito Quiulacocha, constituyendo el nivel superior del suelo de fundación.
			Depósitos Aluviales	Qh-al	Gravas arcilloarenosas y arenas arcillosas con gravas. Morfologías redondeadas y naturaleza predominantemente calcárea. Distribuidas a lo largo del valle aguas abajo del depósito y como material de fundación subyaciendo a los niveles de arcillas lacustres.
Paleozoico	Paleógeno	Inferior	Formación Casapalca	KP-ca	Conglomerados y brechas de naturaleza calcárea, con intercalaciones de calizas, limolitas y areniscas. Su presencia es notable al oeste del depósito.
	Devónico	Superior	Grupo Excélsior	SD-e	Lutitas pizarrosas con intercalaciones de areniscas; sus afloramientos se encuentran en el flanco oeste del depósito.

Fuente: Adaptado de INGEMMET (2011), mapa geológico del cuadrángulo de Cerro de Pasco, escala 1:50 000.

Figura 5-2:

Columna estratigráfica regional

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	EDAD (Ma)	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS			ROCAS INTRUSIVAS Y SUBVOLCÁNICAS								
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	0.01	Depósito aluvial	Q-al	Gravas heterométricas y arenas con matriz limo arenosa. Se encuentra formando terrazas	Huarón	N-h-mz	Monzonita						
				Depósito aluvial	Qh-al	Gravas y arenas con matriz limoarenosa				Nm-and,da	Andesita, dacita				
		PLEISTOCENO		Depósito biogénico	Q-bi	Intercalación de limos, arenas y niveles orgánicos						Nm-mar-da,cla	Dacita, cuarzoilita		
				Depósito glacial, fluvial	Q-gfl	Gravas y arenas, subredondeadas, en matriz limoarenosa									
				Depósito glacial	Q-gl	Acumulaciones de bloques rocosos heterométricos, subangulosos con matriz areno-limosa									
	NEÓGENO	PLIOCENO	2.58	Formación Huayllay	Np-huay	Tobas de cristales blancas, friables, intercaladas con toba de lapilli y bombas piroclásticas		Atacocha	Po-dap			Dacita porfídica			
				Formación Milotingo	Membro Parlamachay	Nm-m/p-tb, andp				Tobas y andesitas porfídicas	Pp-and,ba		Andesita, basalto		
						Formación Rumilana				Nm-rum				Aglomerados de clastos angulosos y subangulosos de calizas, filitas, chert e intrusivos; tobas blancas	Pp-a-mgb
		MIOCENO		PALEÓGENO	OLIGOCENO	23.03			Grupo Calipuy	PN-c	Intercalación de lavas andesíticas, tobas de cenizas y secuencias clásticas	P-rda	Riodacita		
														EDOCENO	30.9
MESOZOICO	CRETÁCICO	SUPERIOR	100.5	Formación Casapalca	KsP-c	Areniscas rojas intercaladas con limolitas, limoarcillitas, conglomerados, yeso y calizas	Granito, granodiorita								
				Formación Jumasha	Ks-j	Calizas micríticas gris claras a beige en capas medianas o gruesas, intercaladas con calizas nodulares									
		INFERIOR		Formación Parílambo	Ki-pt	Calizas micríticas negras bituminosas intercaladas con lutitas gris oscuras									
				Formación Chulec	Ki-chu	Calizas arenosas, areniscas calcáreas en capas medianas, coloraciones gris clara a beige.									
				Formación Chaylacatana	Ki-ch	Secuencias volcánicas basálticas, brechas, lavas con intercalaciones de areniscas y limolitas rojas									
	TRÁSICO	INFERIOR	145	Grupo Goyllarisquizga	K-g	Areniscas cuarzosas blancas intercaladas con limoarcillitas grises y niveles de carbón									
				Formación Condorsinga	Ji-c	Calizas gris claras y oscuras y calcarenitas amarillentas en estratos gruesos									
					Formación Aramachay	Ji-a	Areniscas calcáreas negras a gris claras intercaladas con calizas carbonosas con nodulos								
		SUPERIOR		Formación Chambara	Ts-ch	Calizas blancas, calizas arenosas y areniscas calcáreas con limoarcillitas estratos de medianos a gruesos									
				Grupo Mito	PET-m	Areniscas intercaladas con limoarcillitas y conglomerados violáceos; tobas y lavas andesíticas y basálticas									
PALEOZOICO	PERMIANO	LOPINGIANO	252.17	Grupo Tarma	Cp-t	Areniscas gris verdosas en bancos gruesos, intercaladas con lutitas marrón oscuras, estratificadas en capas delgadas y areniscas calcáreas.									
							PENNSYLVANIANO	Grupo Ambo	Cm-a	Areniscas cuarzosas en estratos gruesos con estratificación sesgada, intercaladas con limolitas y lutitas que poseen regular contenido de materia orgánica					
		MISSISSIPPIANO									SUPERIOR	360.3	Grupo Exoelsior	SD-e	Filitas intercaladas con cuarcitas gris oscuro, metafitos y mármoles
		DEVÓNICO					INFERIOR	360.3							
	SILURIANO	PRIDOLIANO	419.2												
		LUDLOWIANO	423.6												
		WENLOCKIANO	427.6												
		LLANDOVERIANO	433.4												
		440.4													
NEO-PROTEROZOICO			561.0	Complejo Marañón	NP-cm-esq	Esquistos									
							NP-cm-esq,gn	Esquistos y gneis							

Fuente: INGEMMET (20211), mapa geológico del cuadrángulo de Cerro de Pasco (22-k-IV), escala 1:50 000.

5.1. Basamento rocoso

5.1.1. Grupo Excélsior

El Grupo Excélsior se encuentra representado por pizarras y filitas con intercalaciones de areniscas. Esta unidad aflora en el flanco norte del depósito con potencias superiores a los 200 m, en tanto que en el flanco sur de la ladera del valle Quiulacocha, esta unidad se encuentra cubierta por suelos cuaternarios. Las pizarras y filitas son de color gris oscuro, en ocasiones con tonos pardos debido a fenómenos de oxidación; se encuentran finamente estratificadas, dando lugar a capas delgadas con buzamientos de en torno a 80° inclinados generalmente hacia el sur. Han experimentado un metamorfismo parcial, evidenciado por la formación de láminas de mica debido a la proximidad de cuerpos intrusivos hipoabisales y el Complejo Cerro de Pasco.

Las capas de areniscas presentan espesores de menos de 1 m, son de grano fino a medio, que al intemperizarse dan lugar a cubiertas de colores rojizos y amarillentos (Golder, 2010).

5.1.2. Formación Chambará

Se puede apreciar al norte y noroeste del depósito de relaves Quiulacocha, compuesta litológicamente por calizas silicificadas con nódulos de cherts y calcarenitas; su buzamiento es hacia el N-S. Se presentan en capas bien estratificadas con dirección NE, poco fracturadas. Su color en condición fresca es gris oscuro, pero en su parte exterior se muestra blanquecino, atribuido a la meteorización y a su moderada solubilidad, lo que facilita la formación de zonas cársticas y espacios abiertos; en el caso de las calizas, pueden constituir potenciales acuíferos y medios favorables para el flujo y recarga de las aguas subterráneas en el medio cárstico. Son calizas de moderada permeabilidad; en ellas se pueden observar una serie de descargas de aguas subterráneas, especialmente en el interior de la mina Cerro de Pasco (Golder, 2010).

Foto 9:

Vista de calizas de la Formación Chambará



5.1.3. Formación Casapalca

La Formación Casapalca sobreyace discordantemente sobre el Grupo Excélsior, aflora en la zona superior del cerro Shuco al norte del depósito de relaves Quiulacocha y parcialmente en las laderas del flanco sur, dando lugar a los relieves naturales con mayor pendiente (15 a 25 %). Litológicamente, se caracteriza por la alternancia de brechas y conglomerados de clastos calcáreos, así como cuarcíticos en menor proporción, envueltos en una matriz arenoarcillosa de tonalidades rojizas en la base; además, se observa intercalación de areniscas, conglomerados y lutitas con capas de calizas y chert igualmente rojizas, que gradualmente pasan a blanquecinas y verdosas en la parte superior; esta unidad alcanza una potencia aproximada de 50 m., (Golder, 2010).

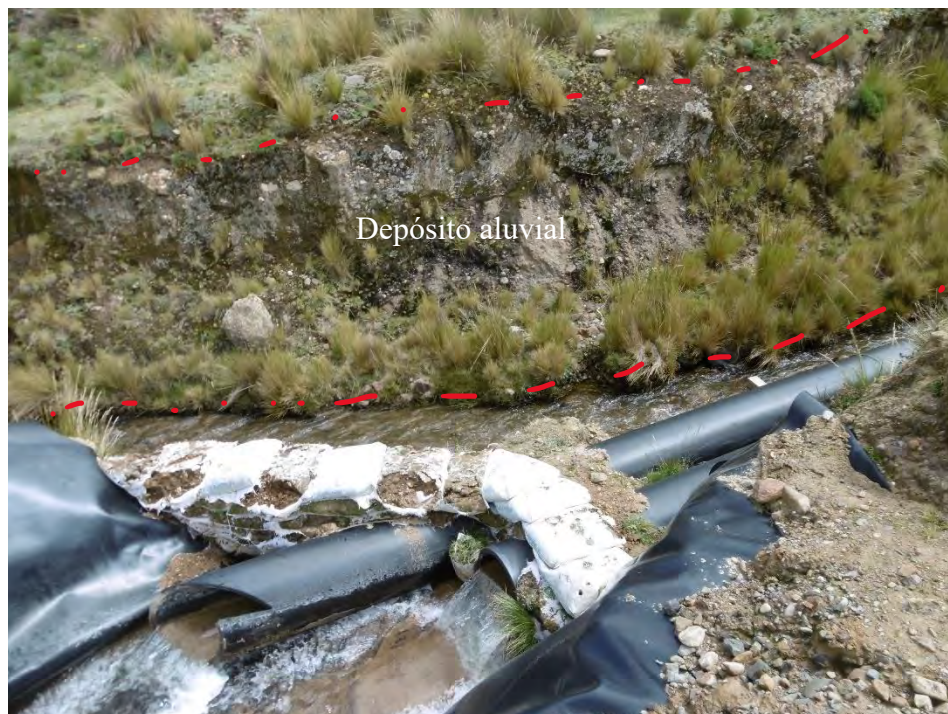
5.2. Depósitos cuaternarios

5.2.1. Depósitos aluviales

Constituyen depósitos recientes, compuestos por materiales no consolidados transportados por las corrientes de agua, de gravas redondeadas de diversas litologías, aunque con mayor presencia de clastos de naturaleza calcárea mezclados con arenas arcillosas; en ocasiones, el componente arenoso es mayoritario respecto a las gravas. Usualmente, se observan capas y lentes de arcillas negras con contenido en materia orgánica con clastos polimícticos de forma redondeada. Estos depósitos se ubican rellenando el fondo del valle Quiulacocha, por encima del sustrato rocoso (Golder, 2010).

Foto 10:

Vista de depósitos aluviales observados en el flanco sur del DR Quiulacocha



5.2.2. Depósitos lacustres

La presencia de estos depósitos se encuentra ligada a los remanentes de la antigua laguna del área, en la que actualmente se ubica el depósito de relaves Quiulacocha. Se encuentran compuestos fundamentalmente por arcillas y limos de color gris oscuro, en ocasiones con tonos verdosos; pueden llegar a tener cierto contenido de materia orgánica. Estos materiales finos contienen de forma más aislada gravas redondeadas polimícticas y heterométricas.

En el área, los suelos lacustres se disponen verticalmente entre los materiales antrópicos que constituyen el depósito y los suelos aluviales; en el área restante se pueden observar en contacto con los depósitos morrénicos. Su potencia es variable, pudiendo ser en promedio 5m. (Golder, 2010).

5.2.3. Depósitos antrópicos – relave

Los relaves del depósito de relaves Quiulacocha están compuestos por materiales limo arenosos y limos arcillosos en condición de saturación, los cuales cubren una extensión de 10.98 km². El depósito se encuentra confinado por diques que lo dividen en sector I (aguas arriba) y sector II (aguas abajo), este último con presencia de un espejo de agua sobrenadante asociado a los relaves (Golder, 2010).

Foto 11:

Vista de depósitos antrópicos (relave)



5.2.4. Depósitos antrópicos – desmonte

Se trata de material excedente de mina depositado al noroeste del área de estudio (DDM Excélsior). Están compuestos por materiales provenientes del desmonte de la minera Cerro de Pasco con presencia de rocas de cuerpo de sulfuros masivos en forma de óxidos, rocas volcánicas (principalmente tobas y tufos) y rocas carbonatadas (principalmente dolomías). Presenta granulometría muy variada; así mismo, se observa presencia de pocos finos, bloques de roca mayores a 2 m, bolonería, grava, con una matriz de arenas y limo arcillosas, en parte cementados por minerales oxidados (Golder, 2010).

5.2.5. Depósitos antrópicos – dique

Los diques presentes en la zona de evaluación (dique principal y dique flotante) están conformados por depósitos de gravas arcillosas y niveles de arcillas y limos con gravas. Los clastos muestran cierta heterometría y un grado de oxidación notable en las zonas en las que se

produce filtración de aguas ácidas procedentes del vaso del depósito; la ubicación de estas es visible en el sector sur, al pie del dique principal (Golder, 2010).

Foto 12:

Vista de depósitos antrópicos (dique principal)



5.3. Geología estructural

La estructura principal de la zona es la falla Cerro de Pasco con una dirección general SE-NW, alcanzando una longitud de 35 km., la que corta a las rocas de la Formación Casapalca. Esta falla tiene buzamiento de 65° hacia el este y cruza las lagunas Huayhuacocha y Quiulacocha, siguiendo hacia la ciudad Cerro de Pasco. Esta falla controla el contacto de la formación Chambará del Grupo Pucará, mostrando desplazamiento sinextral. Esta falla constituye control estructural, siendo umbral hidráulico que favorece el flujo del agua subterránea.

En esta zona se desarrolló un fuerte plegamiento tanto sinclinal como anticlinal con flexuras por fuerzas compresivas orogénicas actuantes en época del prepaleógeno y paleógeno

(cenozoico). También hacia el lado noreste de Quiulacocha se observa una secuencia de sinclinales y anticlinales de rumbo general N-NW, siendo el sinclinal Yanamate-Colquijirca la estructura de mayor predominancia.

Hacia el lado oeste de la Falla Cerro de Pasco se observa un alineamiento anticlinal con rumbo N-NW que cruza por la parte media de las lagunas Huaygacocha y Cuchis a través de la formación Casapalca, terminando al lado oeste de la ciudad Cerro de Pasco en la formación Excélsior. También aguas abajo de la laguna Cuchis, después de la falla transversal Yurajhuanca – Pachamacha de rumbo E-W, se observa una secuencia de plegamientos sinclinal y anticlinal de rumbo general N-NW. Golder (2010).

CAPÍTULO VI: CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

6.1. Hidrología del área de estudio

El área de estudio de la relavera Quiulacocha se ubica dentro de la microcuenca Quiulacocha, la cual forma parte del sistema de cuencas asociado al río San Juan, junto con las microcuencas de Ocroyoc, Rumiallana, Yanamate y Culcahuain. Los flujos de agua se originan principalmente en la parte alta del DR Quiulacocha y DDM Excélsior, siendo captados mediante canales que los conducen hacia el vaso del depósito de relaves, constituyendo aportes superficiales al sistema hídrico del área de estudio.

La caracterización hidrológica permite evaluar la disponibilidad, distribución y dinámica del recurso hídrico superficial, siendo clave para los procesos de recarga, descarga e infiltración que influyen en la dinámica hidrogeológica del sistema.

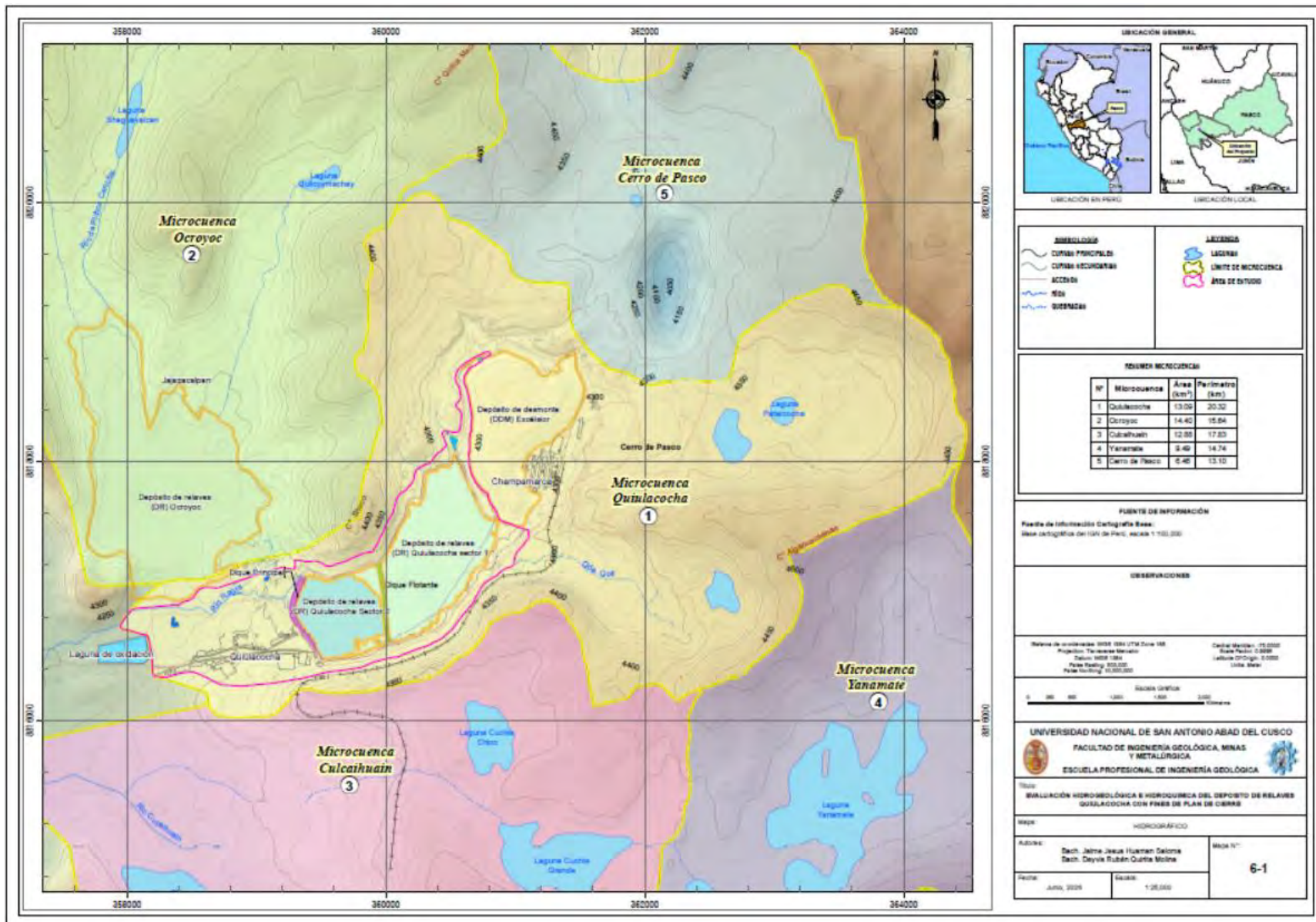
En este sentido, la información hidrológica obtenida sustenta el cumplimiento del objetivo específico 1, y constituye un insumo base para el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual (objetivo específico 3) y la modelación numérica del flujo subterráneo (objetivo específico 4), además de aportar criterios para la evaluación de escenarios de cierre del depósito de relaves Quiulacocha (objetivo específico 5), orientados al control del balance hídrico del sistema. La siguiente figura 6-1 muestra las microcuencas mencionadas.

En conclusión, la caracterización hidrológica del área de estudio permite comprender la dinámica del sistema superficial, evidenciando que la disponibilidad y distribución del recurso hídrico están controladas por la interacción entre las microcuencas y las condiciones topográficas del entorno. Estos procesos determinan los mecanismos de recarga, escorrentía e infiltración que influyen directamente en la conectividad entre el sistema superficial y subterráneo.

Asimismo, la información obtenida sustenta el comportamiento hidrológico del sistema en estudio, al evidenciar la influencia directa de la dinámica superficial sobre el sistema hidrogeológico. En este sentido, constituye una base fundamental para el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual, la modelación numérica del flujo subterráneo y la evaluación de escenarios de cierre del depósito de relaves Quiulacocha, orientados al control del balance hídrico y la protección del sistema ambiental.

Figura 6-1:

Mapa hidrográfico



6.1.1. Parámetros geomorfológicos de la microcuenca Quiulacocha

El análisis de los parámetros geomorfológicos para la microcuenca Quiulacocha se observa a continuación:

Tabla 6-1:

Parámetros geomorfológicos de la microcuenca Quiulacocha

Parámetro	Símbolo	Unidad	Quiulacocha
Área	A	Km ²	13.18
Perímetro	P	km	20.11
Longitud de cuenca	L	km	8.6
Ancho Promedio	Ap	km	2.45
Coefficiente de compacidad	Kc	--	1.56
Factor forma	Ff	--	0.18
Rectángulo equivalente	RE	km	8.6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-2:

Parámetros fisiográficos de la microcuenca Quiulacocha

Parámetro	Símbolo	Unidad	Quiulacocha
Longitud de cauce	L	km	5.38
Altitud Mínima	Cmin	msnm	4244
Altitud Máxima	Cmax	msnm	4545
Pendiente Media	Sc	m/m	0.16
Altitud Media	Cmed	msnm	4361.54

Fuente: Elaboración propia.

6.1.1.1. Área de la cuenca (a)

A Quiulacocha = 13.18 km²

6.1.1.2. Perímetro de la cuenca (p)

P Quiulacocha = 20.11 km

6.1.1.3. Longitud de la cuenca (l)

L Quiulacocha = 8.60 km

6.1.1.4. Ancho promedio de la cuenca (ap)

El ancho promedio de la cuenca (A_p) es un parámetro morfométrico que relaciona el área de la cuenca y la longitud del cauce principal, cuya expresión matemática es:

$$A_p = \frac{A}{L}$$

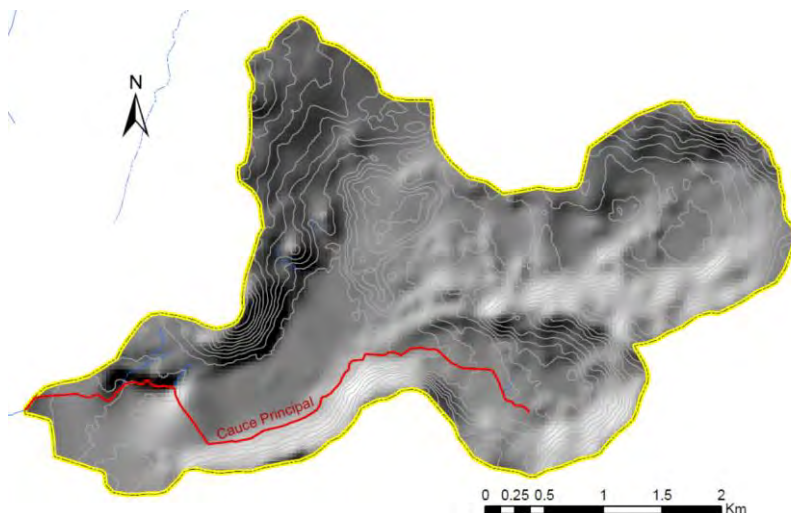
Donde:

- A_p = Ancho promedio de la cuenca (km)
- A = Área de la cuenca (km²)
- L = Longitud del cauce principal (km)

Según Chow et al. (1988), este parámetro permite caracterizar la forma de la cuenca y determinar si esta presenta una geometría alargada.

Figura 6-2:

Longitud de la microcuenca Quiulacocha



6.1.1.5. Coeficiente de compacidad (kc)

El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius es un parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de igual área, permitiendo caracterizar la geometría de la cuenca y su respuesta hidrológica. Este parámetro se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

- K_c = Índice de Gravelius.
- P = Perímetro de la cuenca (km).
- A = Área de la cuenca (km²).

Chow et al. (1988), este índice permite evaluar el grado de compacidad de la cuenca, indicando valores cercanos a 1 para cuencas de forma circular y valores mayores para cuencas alargadas.

El coeficiente de compacidad obtenido para la microcuenca Quiulacocha es $K_c = 1.56$, lo cual indica que la cuenca presenta una forma alargada, con menor tendencia a concentraciones rápidas de escorrentía y menor susceptibilidad a crecidas súbitas.

6.1.1.6. Factor forma (ff)

El factor de forma (F_f) es un parámetro morfométrico que relaciona el área de la cuenca con el cuadrado de la longitud del cauce principal, expresado mediante la siguiente ecuación:

$$F_f = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

- F_f = Factor de forma
- A = Área de la cuenca (km²)
- L = Longitud del cauce principal (km)

Para las cuencas redondas, el factor de forma puede ser mayor que la unidad. Los valores inferiores a la unidad corresponden a cuencas alargadas y con un flujo de agua más veloz, así como también poseen la capacidad de arrastrar sedimentos hacia el nivel base; sin embargo, las cuencas alargadas no son características de flujo torrencial debido a que tienen una larga duración del tiempo de concentración. Esto se puede expresar de la siguiente forma:

- $F_f \geq 1$ Cuenca redonda, flujo lento con poco arrastre de sedimentos y son torrentes con elevadas avenidas.
- $F_f < 1$ Cuenca alargada, flujo veloz con arrastre de sedimentos y menos torrenciales, con bajas avenidas.

Según Chow et al. (1988), el factor de forma obtenido para la microcuenca Quiulacocha es $F_f = 0.18$, lo que indica que la cuenca presenta una forma alargada, con menor susceptibilidad a avenidas súbitas y mayor tiempo de concentración del flujo.

6.1.1.7. Altitud media de la cuenca (hm)

Se han obtenido los siguientes valores, expuestos en la tabla 6-1.

Figura 6-3:

Áreas parciales microcuenca Quiulacocha.

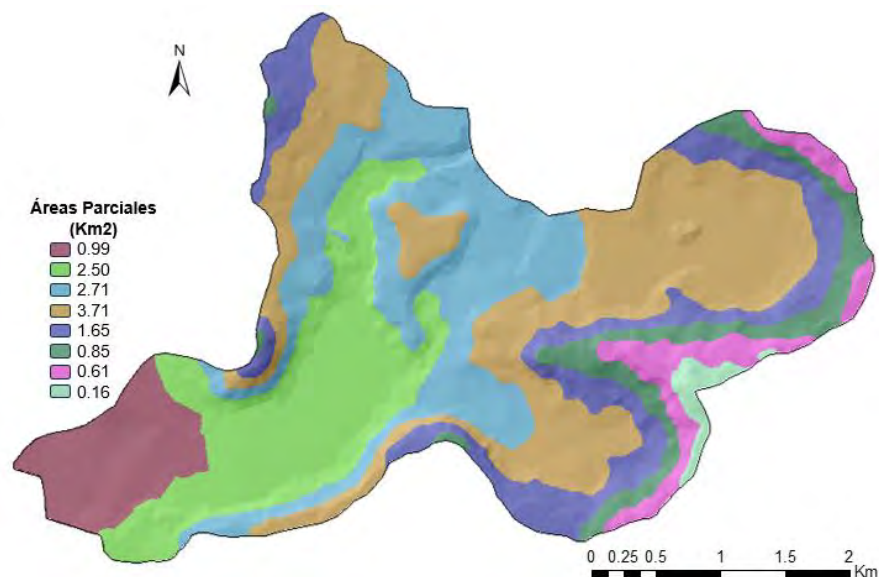


Tabla 6-3:

Altitud media de la microcuenca Quiulacocha.

Cm	CM	Áreas parciales (Si)		Cmd (hi)	Cmd*Área (hi*Si)
(msnm)	(msnm)	(km²)	(%)	(msnm)	(msnm*km²)
4244	4281	0.99	7.51	4262.3	4218.34
4281	4319	2.5	18.95	4300	10738.15
4319	4357	2.71	20.58	4337.7	11764
4357	4394	3.71	28.15	4375.4	16231.56
4394	4432	1.65	12.51	4413.1	7272.89
4432	4470	0.85	6.43	4450.8	3769.03
4470	4507	0.61	4.64	4488.5	2746.5
4507	4545	0.16	1.23	4526.2	733.8
Área total (km²)		13.18	100	--	57474.27
Elevación media (msnm)				4361.54	

Fuente: *Elaboración propia.*

Nota: Cm: Cota menor, CM: Cota mayor, Cmd: Cota media.

De la siguiente obtendremos la altitud media de la microcuenca Quiulacocha:

$$Hm = \sum(hi * Si) / A$$

$$Hm = 57474.27 / 13.18$$

Hm = 4361.54 msnm.

6.1.1.8. Curva hipsométrica.

La curva hipsométrica representa la relación entre la altitud y la superficie de la microcuenca que queda sobre dicha altitud. Las curvas hipsométricas también son asociadas con las edades de los ríos de las respectivas microcuencas.

Del análisis del modelo digital de elevación de la microcuenca, se determinaron los siguientes valores mostrados en la tabla 6-4.

Tabla 6-4:

Porcentaje del área de la cuenca que queda por encima y por debajo de la altitud

Cm	CM	Rango	Área	Área	Área Ac.	Área Ac.	Área Ac.	Área Ac.
(msnm)	(msnm)		(km ²)	(%)	Debajo	(%)	Encima	(%)
4244	4281	0-25	0.99	7.51	0.99	7.51	12.19	92.49
4281	4319	25-200	2.5	18.95	3.49	26.46	9.69	73.54
4319	4357	200-400	2.71	20.58	6.2	47.04	6.98	52.96
4357	4394	400-600	3.71	28.15	9.91	75.19	3.27	24.81
4394	4432	600-800	1.65	12.51	11.56	87.7	1.62	12.3
4432	4470	800-1000	0.85	6.43	12.4	94.13	0.77	5.87
4470	4507	1000-1200	0.61	4.64	13.02	98.77	0.16	1.23
4507	4545	1200-1400	0.16	1.23	13.18	100	0	0
Área total (Km ²)			13.18	100				

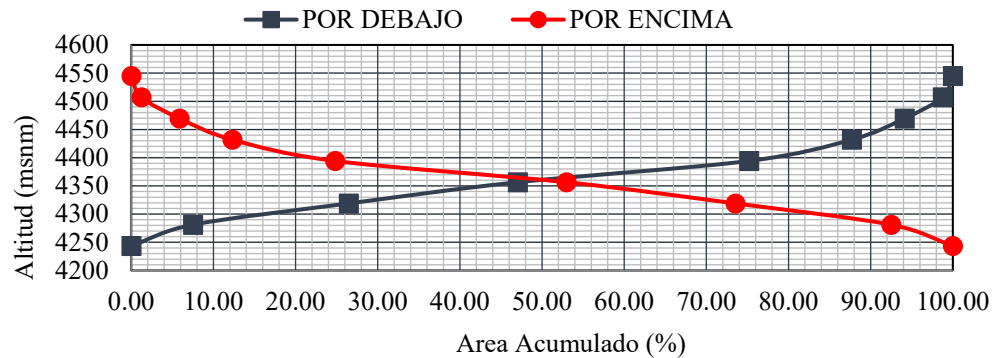
Fuente: *Elaboración propia.*

Nota: Cm: Cota menor, CM: Cota mayor, Cmd: Cota media.

Una forma de expresar la curva hipsométrica es considerando el porcentaje del área de la microcuenca que queda por encima y por debajo de la altitud; con los datos del cuadro se obtiene el gráfico 6-1.

Gráfico 6-1:

Curva Hipsométrica



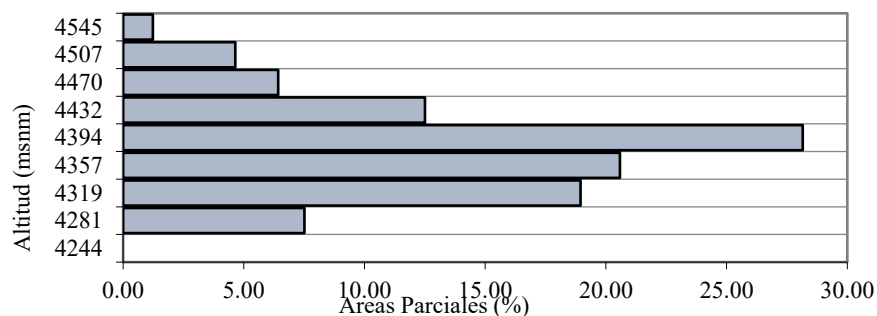
6.1.1.9. Polígono de frecuencia

La curva de distribución de frecuencias describe la distribución porcentual de las áreas comprendidas entre curvas de nivel equidistantes en la cuenca. En el polígono de frecuencias existen valores representativos como la altitud más frecuente, que es el polígono de mayor porcentaje o frecuencia.

La distribución gráfica del porcentaje de superficies ocupadas por diferentes rangos de altitud para la cuenca se distingue en el gráfico 6.2. La microcuenca de Quiulacocha, 28.15 %, es la que concentra mayor porcentaje de área entre la altitud de 4356.56 a 4394.5 m.s.n.m.

Gráfico 6-2:

Polígono de frecuencia.



6.1.2. Climatología

La climatología del área ha sido caracterizada en el estudio de clima y meteorología (Consortio Yanamate, 2022), cuya evaluación analiza los datos meteorológicos a partir de estaciones cercanas al depósito de relaves Quiulacocha. Según la caracterización climática de Thornwaite para el área, el clima a nivel local es “súper húmedo”, con poca o nula excedencia de agua, con frío moderado y baja concentración estival.

6.1.3. Estaciones meteorológicas

El área de estudio tiene datos de precipitación de nueve (09) estaciones meteorológicas. La tabla 6-5 presenta las estaciones meteorológicas de referencia para esta evaluación.

Tabla 6-5:

Estaciones meteorológicas del área

Nº	Nombre estación	Administración	Coord. UTM - WGS 84		Elevación (msnm)
			Este (m)	Norte (m)	
1	Cerro de Pasco		363 266	8 817 621	4 260
2	Shelby		365 159	8 812 074	4 132
3	Paragsha		362 512	8 827 782	4 310
4	Upamayo		361 559	8 801 072	4 083
5	Yanacancha		363 222	8 821 021	4 150
6	Taza - Oroya	SENAMHI	399 417	8 734 676	3 900
7	Mayupampa		401 839	8 735 294	3 750
8	Marcapomacocha		354 512	8 747 930	4 413
9	Planta de Catodos	Privada	--	--	4 150

Fuente: *Elaboración propia con datos del SENAMHI (2022).*

6.1.4. Parámetros meteorológicos

En el estudio de clima y meteorología para el depósito de relaves Quiulacocha, se evaluaron los parámetros de precipitación, evaporación y temperatura (Consortio Yanamate, 2022), los cuales se describen brevemente a continuación:

6.1.5. Precipitación

Para la zona de evaluación, la precipitación media anual (PMA) se consideró del estudio hidrológico del Consortio Yanamate (agosto, 2022), el cual fue determinado a partir de la relación lineal entre precipitación y altitud metodología ampliamente usada en hidrología de cuencas (Chow et al., 1988; Dingman, 1994) a partir de datos de las estaciones meteorológicas Cerro de Pasco, Shelby, Upamayo y Planta de Cátodos (coeficiente de correlación 84 %) debido a su proximidad al área de estudio.

$$PMA (mm) = 1,7814 \times Elevación - 6640,7 (R^2 = 0,844)$$

A partir de la correlación, se calculó para el área de estudio una precipitación media de 1147.6 mm/año. Asimismo, a partir de los cálculos de la distribución mensualizada de la precipitación para un año promedio (tabla 6-6), la menor precipitación se encuentra entre los meses de mayo y septiembre, y los de mayor precipitación, entre los meses de octubre y abril. El patrón de precipitación es típico de la serranía peruana, dominado por la orografía del territorio nacional.

Tabla 6-6:

Precipitación media mensual, multianual (mm/mes).

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Año
Cerro de Pasco	166.4	164.9	163.6	89.6	50	27.1	18.6	32.1	63.3	113.8	129.7	144	1163.1

Shelby	129.1	130.5	121.6	68.2	26.9	11	7.1	18.8	38.6	84.5	81.7	118.6	836.6
Paragsha	118.9	122.7	123	75.5	32.6	17.3	10.4	16.6	46.8	74.9	101.4	108	848.1
Upamayo	128.4	136.8	127.3	66.4	36.7	14.3	9.3	21	54.1	79.3	90.7	115.3	879.6
Planta Cátodos	99.1	149.7	143.3	87.1	28.6	17	20.3	18.2	64.2	92.4	111.5	141.4	972.8

Fuente: Consorcio Yanamate, agosto 2022.

6.1.6. Evaporación

La tabla 6-7 presenta la evaporación obtenida de las estaciones meteorológicas Cerro de Pasco, Yanacancha y Planta de Cátodos. Para efectos del balance; sin embargo, se consideró la estación meteorológica de Cerro de Pasco por presentar similar altitud a la zona de evaluación.

Tabla 6-7:

Evaporación media mensualizado. (mm/mes)

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Cerro Pasco	28	23	23	24	34	40	42	45	35	34	34	35	397
Yanacancha	83	80	60	76	82	78	90	100	87	90	90	84	999
Planta Cátodos	93	77	99	80	59	57	60	50	61	78	77	91	879

Fuente: Consorcio Yanamate, agosto 2022.

6.1.7. Temperatura

En el gráfico 6-8, se muestra el resumen de las temperaturas máximas, mínimas y medias mensuales para un año promedio (Estudio climatológico – Consorcio Yanamate, agosto 2022). La estación Cerro de Pasco se encuentra más cerca de la zona de evaluación y se utilizó para la caracterización hidrológica de la zona de evaluación. La temperatura promedio anual de los promedios es de 5.2 °C, la máxima 10.9 °C y la mínima 0.3 °C.

Tabla 6-8:

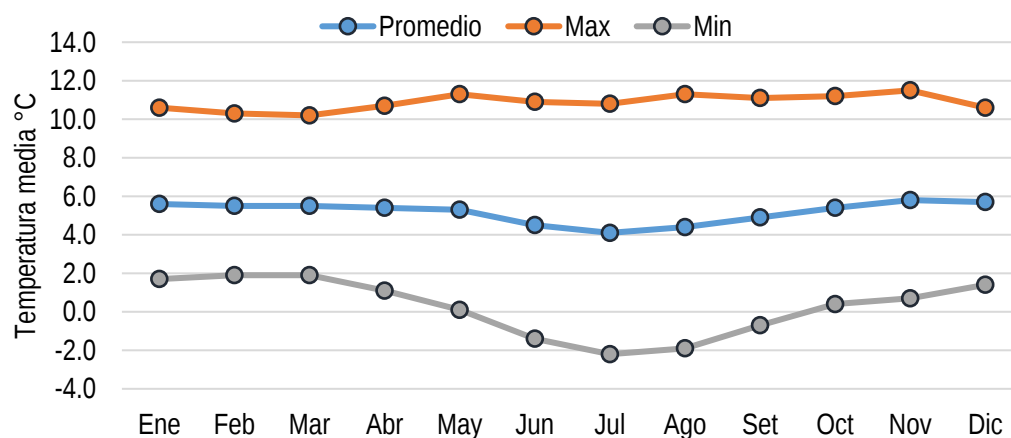
Temperatura media mensual. (mm/mes)

Temperatura	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio Anual
Promedio	5.6	5.5	5.5	5.4	5.3	4.5	4.1	4.4	4.9	5.4	5.8	5.7	5.2
Max	10.6	10.3	10.2	10.7	11.3	10.9	10.8	11.3	11.1	11.2	11.5	10.6	10.9
Min	1.7	1.9	1.9	1.1	0.1	-1.4	-2.2	-1.9	-0.7	0.4	0.7	1.4	0.3

Fuente: Consorcio Yanamate, agosto 2022.

Gráfico 6-3:

Variación de temperaturas mensuales (Cerro de Pasco).



6.1.8. Evapotranspiración

La evapotranspiración fue calculada usando el método de Thornthwaite con una tasa de reserva de 50 mm/mes, en base a la precipitación y la temperatura media regional; de acuerdo al balance hídrico, se estima una evapotranspiración potencial promedio de 525.5 mm/año, con un excedente hídrico promedio igual a 622.3 mm, disponible entre septiembre y mayo; los detalles se observan en el balance hídrico de la tabla 6-9.

Tabla 6-9:

Evapotranspiración media mensual - total anual.

Mes	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Total Anual (mm)
ETP (mm)	42.7	47.3	47.4	47.9	46.9	41.9	45.6	44.6	45.5	39.9	38.9	41.2	529.9
ETR (mm)	42.7	47.3	47.4	47.9	46.9	41.9	45.6	44.6	45.5	39.9	38.9	41.2	530

Fuente: Consorcio Yanamate, agosto 2022.

6.1.9. Balance hídrico

Se realizó el balance hídrico para estimar la recarga y determinar la cuantía de los flujos subterráneos dentro del depósito de relaves Quiulacocha, con la que se determinó el balance hídrico del depósito de relaves Quiulacocha mediante datos de precipitación de la estación meteorológica de Cerro de Pasco, tomado del estudio hidrológico (Consortio Yanamate, 2022), y detallado en los ítems precedentes, con la finalidad de comparar la descarga en los vertederos V3 y V-4 para el período de marzo 2021 a julio 2022.

De acuerdo al balance hídrico y evaluación de descarga de vertederos, se estima que tiene una evapotranspiración potencial promedio de 525.5 mm/año. La descarga de flujo base se estimó en 84 mm/año del análisis de flujo de descarga (V-3), lo cual indica que el depósito de relaves Quiulacocha presenta aporte subterráneo lateral. Los valores calculados para el balance hídrico se muestran en la tabla 6-10.

$$Pp=Et + Dsp + Dfb \pm VA$$

Donde:

- Pp = Precipitación media anual
- Et = Evapotranspiración
- Dsp = Descarga superficial
- Dfb = Descarga flujo base
- VA = Variación de almacenamiento

Tabla 6-10:

Balance hídrico climático.

Parámetro	(mm/año)	(m ³ /s)
Precipitación (Pp)	1148	0.13
Evapotranspiración (Et)	526	0.06
Descarga superficial (Dsp)	175	0.02
Descarga flujo base (Dfb)	84	0.01
Variación almacenamiento (VA)	342	0.04

Fuente: *Elaboración propia.*

6.1.10. Recarga del sistema hidrogeológico

Para el área de influencia del depósito de relaves Quiulacocha; se calcula la recarga anual promedio de 84 mm/año, equivalente a 12 l/s; este valor es variable de acuerdo al tipo de roca, pendiente, cobertura del suelo y su altitud. La mayor zona de recarga constituye los cerros con mayor altitud: Shuco, Algahuachanan y Tuncaga alto, que se encuentran por encima de los 4400 a 4500 msnm, donde afloran las rocas de mayor permeabilidad.

En zonas por debajo de 4300 msnm, predominan las rocas metamórficas (filitas), donde la infiltración es limitada por su baja permeabilidad. Sin embargo, en depósitos cuaternarios, la

infiltración resulta más eficaz por su granulometría y alta permeabilidad, lo que suministra agua subterránea lateralmente al río Ragra.

Mediante la fluctuación de niveles piezométricos (WTF, por siglas en inglés), metodología que proporciona la estimación de la tasa de recarga mediante el análisis de fluctuación de niveles en los piezómetros de observación y la medición directa de los caudales, se calculó la tasa de recarga. Este método requiere el rendimiento específico del suelo o porosidad eficaz, y la fluctuación de niveles en el tiempo (Healy y Cook, 2002).

$$R(t_j) = S_y * \Delta H(t_j)$$

Donde $R(t_j)$ es la recarga que ocurre entre los tiempos t_0 y t_j , S_y es el rendimiento específico (una unidad adimensional), y $\Delta H(t_j)$ es el incremento máximo del nivel de agua con respecto al período de recarga (m). El rendimiento específico (S_y) valores definidos por Morris y Johnson (1967). Los cuales se muestran en la siguiente tabla 6.11.

Tabla 6-11:

Valores de rendimiento específico

Material	S_y (%)
Suelo	40
Arcilla	2
Arena	22
Grava	19
Caliza	18
Arenisca (no consolidado)	6
Granito	0.09
Basalto	8

Fuente: *Elaboración propia, adaptado de Morris y Johnson (1967).*

La tasa de recarga para el área de estudio se calculó en base a valores de rendimiento específico y la diferencia de nivel piezométrico entre la temporada húmeda y seca. De acuerdo a esta metodología, se calculó una recarga entre 53 y 143 mm/año, la cual es representativa para el área de influencia; en la siguiente tabla 6-12 se presentan los valores de recarga según su litología.

Tabla 6-12:

Recarga calculada de la fluctuación de niveles piezométricos (WTF)

Litología	ΔH (m)	Sy (%)	Recarga (mm/año)
Andesitas	2.64	2	53
Deposito aluviales	1.43	10	143
Grupo Excelsior	0.76	10	76
Relaves	1.31	7	92

Fuente: *Elaboración propia basada en el método WTF (Healy & Cook, 20002).*

6.1.11. Descarga de aguas del depósito de relaves Quiulacocha

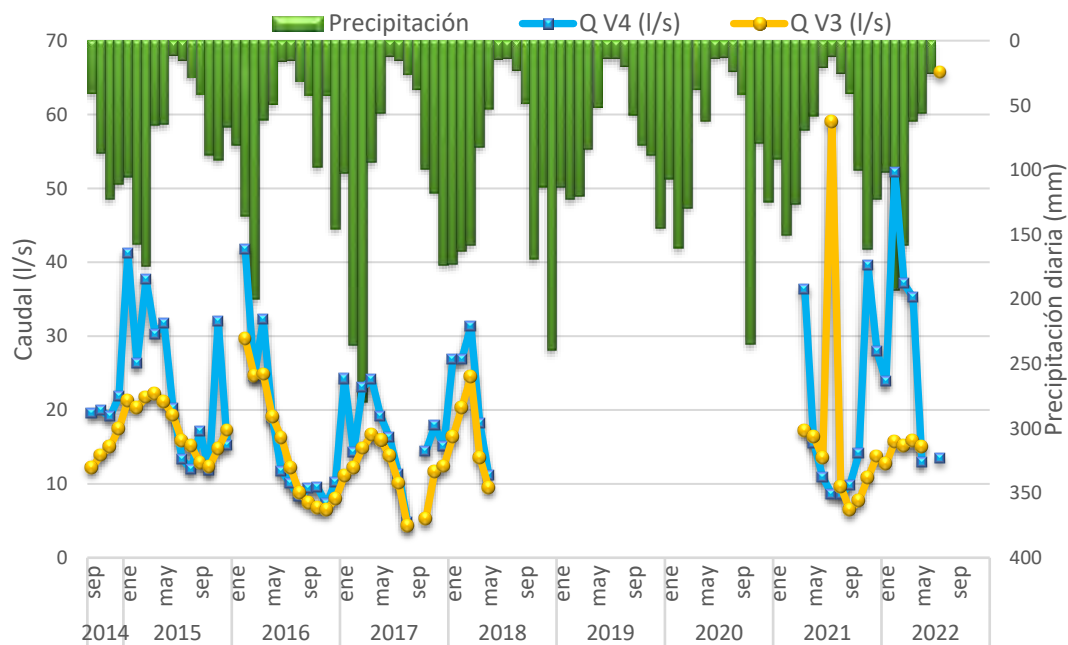
La mayor descarga se origina principalmente en la base del depósito de desmontes (DDM) Excelsior y Pampa Seca, con caudales promedio de 12.2 y 1.4 l/s, respectivamente, los cuales se observan en los vertederos V-1, V-2, V-3 y V-4. La estación V-3 registra la totalidad de los caudales de entrada hacia la relavera Quiulacocha. El gráfico 6-4 muestra los caudales diarios registrados por Activos mineros, en los cuales observa que los caudales medios de la temporada de lluvias están entre 12 l/s y 19.2 l/s, y para la temporada de seca, entre 8.8 y 15.6 l/s, el cual coincide con el caudal base para el área del depósito de relave Quiulacocha.

El flujo de entrada principal observado en (V-3) tiene un registro interdiario desde marzo 2021 a junio 2022; el flujo de entrada al depósito de relaves Quiulacocha se consideró como promedio el promedio de la serie observada. Se asumió también que la pérdida por infiltración en

el depósito de relaves Quiulacocha es insignificante y en el balance no se considera la retención de agua en relave depositado. La pérdida por filtración desde el dique se considera cero, por que dichas aguas son recirculadas hacia el depósito Quiulacocha, mediante bombeo.

Gráfico 6-4:

Caudal de entrada al depósito de relaves Quiulacocha vs precipitación diaria.



Fuente: Elaboración propia con datos hidrológicos de AMSAC (2014–2022).

6.1.12. Caudal entrada V-3 y V-4 Vs precipitación

Se realizó el análisis del caudal de ingreso vs. precipitación, para evaluar la influencia de la precipitación media mensual de la estación Cerro de Pasco sobre las descargas mensuales promedio de los vertederos V-3 y V-4 (mar, 2021 – jul, 2022). En el gráfico 6-5, se pueden observar los flujos observados y su influencia en la respuesta de la precipitación.

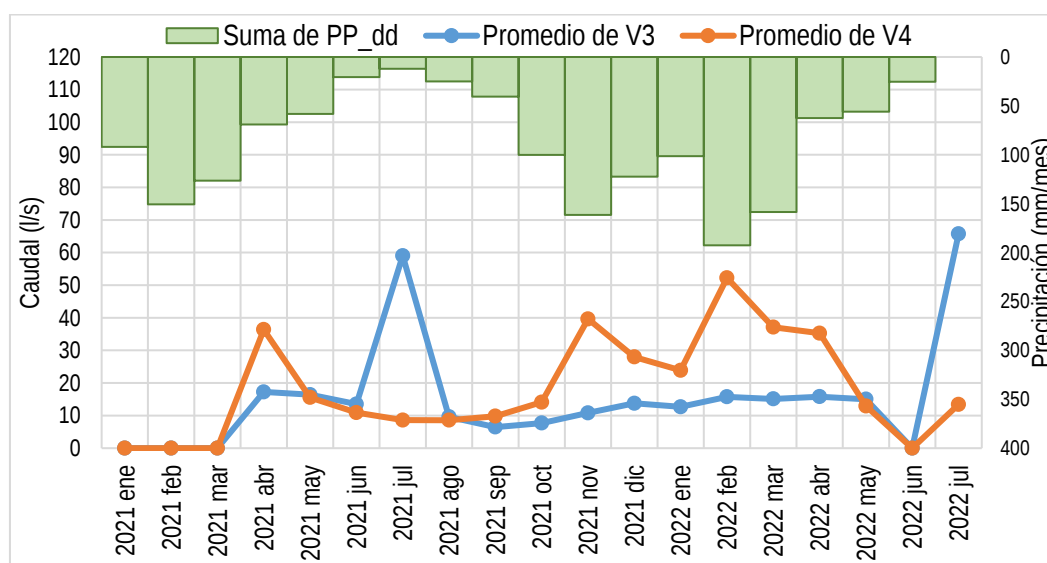
En el punto de aforo V-3 se refleja el flujo base, las que se generan desde el depósito de desmonte (DDM) Excélsior y los aportes del depósito de relaves Quiulacocha, y en el punto de

aforo V-4 se incrementan las descargas al flujo superficial del canal principal desde el depósito de relave, los que se incrementan de forma notoria en temporada lluviosa.

La zona del DDM Excélsior de manera singular registrada en el V-3, se observó dos picos en los registros del mes de julio del 2021 y en el 2022 mostrado en el gráfico 6-5, el cual puede estar relacionado con el retardo de la respuesta hidrológica y/o al tiempo de tránsito de la recarga desde el DDM Excélsior y en el tránsito por el canal entre V-3 y V-4 se atenúa el flujo, el cual puede deberse a la pérdida por infiltración desde el cuerpo de relaves.

Gráfico 6-5:

Caudal de ingreso a Quiulacocha (V-3 y V-4) vs precipitación mensual (2021-2022).



Fuente: Elaboración propia.

6.1.13. Balance de aguas depósito de relaves Quiulacocha

Se realizó un balance de las aguas subterráneas para el depósito de relaves Quiulacocha, para lo cual se consideró toda la superficie de la zona tributaria, seca e inundada, con un área de 1.13 km², la superficie de influencia hidrológica con área 2.8 km² y la superficie del sistema hidrogeológico en proyecto, que es de 6.8 km².

Se han analizado los datos de aforo de ambos vertederos V-3 y V-4, los que tienen registros continuos desde los años 2014 al 2018 y 2020 al 2022, los que permitieron calcular los aportes promedios mensualizados para cada vertedero, y también la lámina de lluvia media mensual en la zona de evaluación, los que se observan sintetizados en la tabla 6-13 y gráfico 6-6, a continuación:

Tabla 6-13:

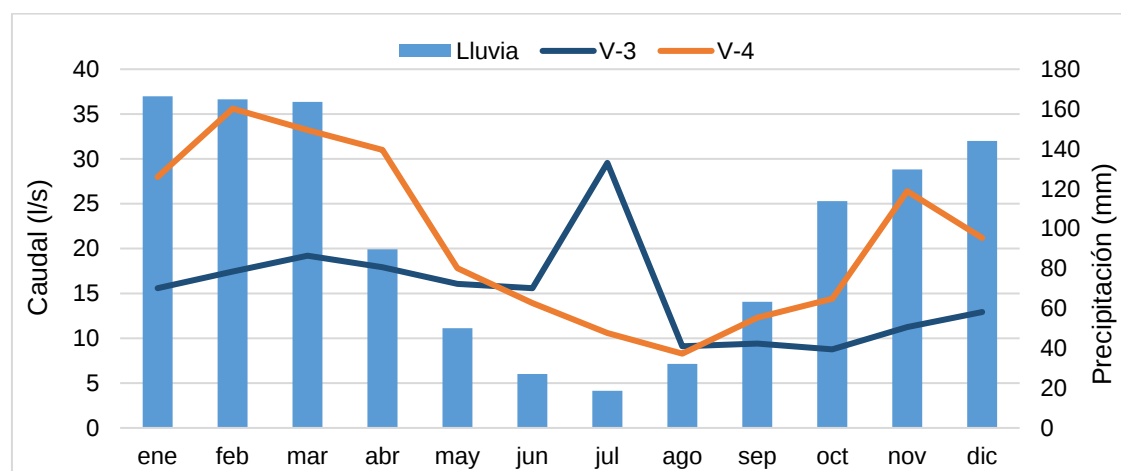
Promedio de caudales (V-3 y V-4) vs precipitación

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May..	jun	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Annual
V-3	15.6	17.4	19.2	17.9	16.1	15.6	29.6	9.1	9.4	8.8	11.2	12.9	15.2
V-4	28.0	35.6	33.2	31.0	17.8	13.9	10.6	8.3	12.3	14.4	26.4	21.2	21.1
Lluvia	166.4	164.9	163.6	89.6	50.0	27.1	18.6	32.1	63.3	113.8	129.7	144.0	1163.1

Fuente: *Elaboración propia.*

Gráfico 6-6:

Variación promedio caudal de vertederos vs precipitación pluvial



Fuente: *Elaboración propia.*

De acuerdo a la información precedente analizada, se establece un balance hídrico para año promedio, años secos y años húmedos, que se observa en las figuras 6-4, 6-5 y 6-6, las que

muestran las entradas y las salidas del sistema hidrogeológico del depósito de relaves Quiulacocha.

Figura 6-4:

Balance hídrico del depósito de relaves Quiulacocha (promedio anual).

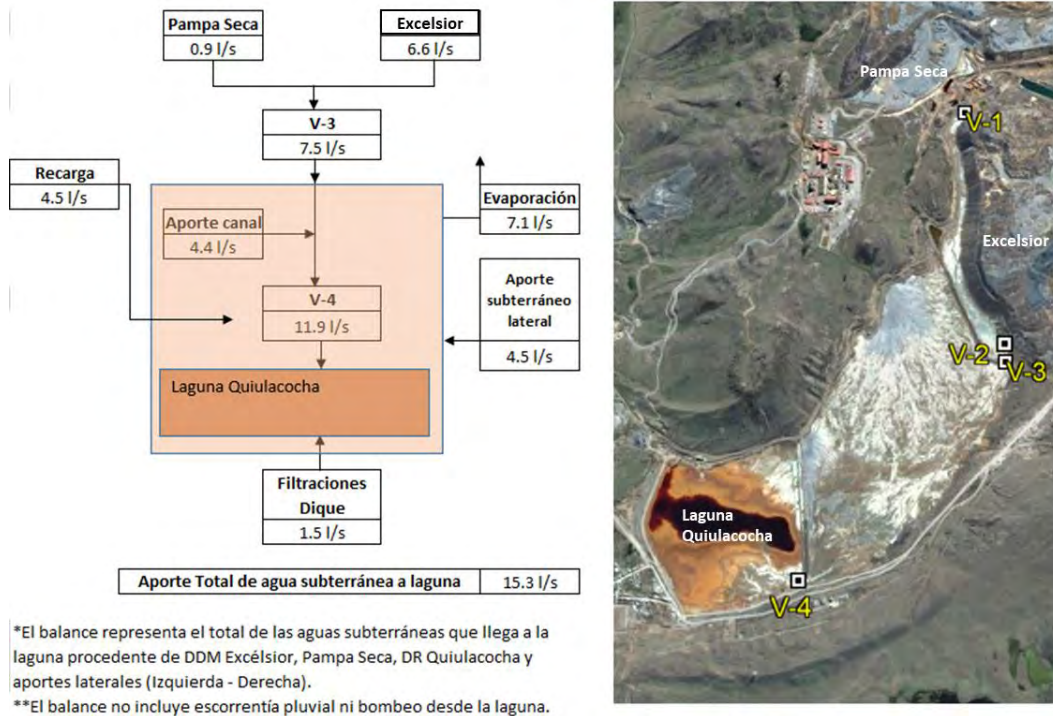


Figura 6-5:

Balance hídrico del depósito de relaves Quiulacocha (años secos).

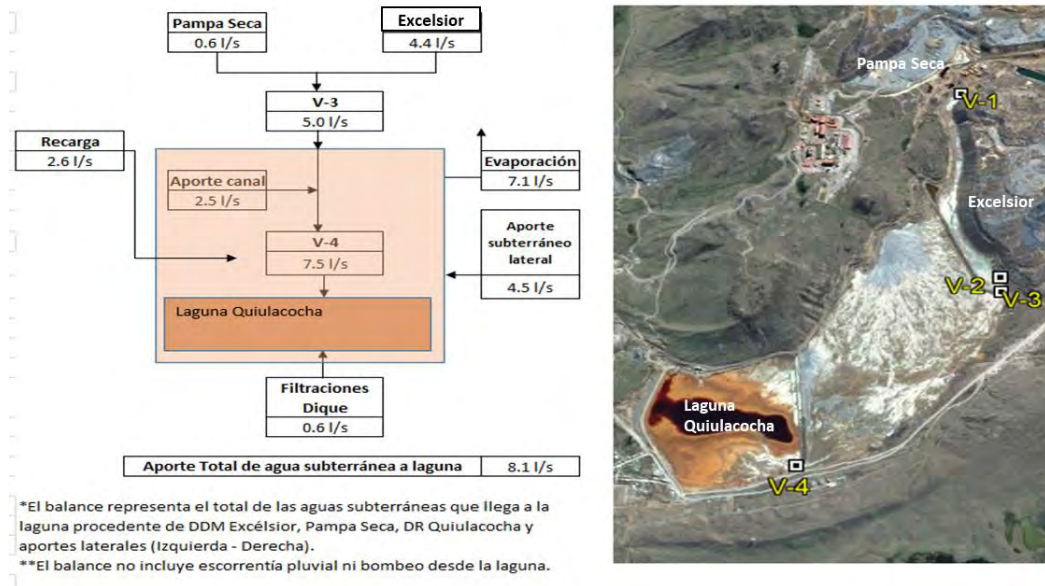
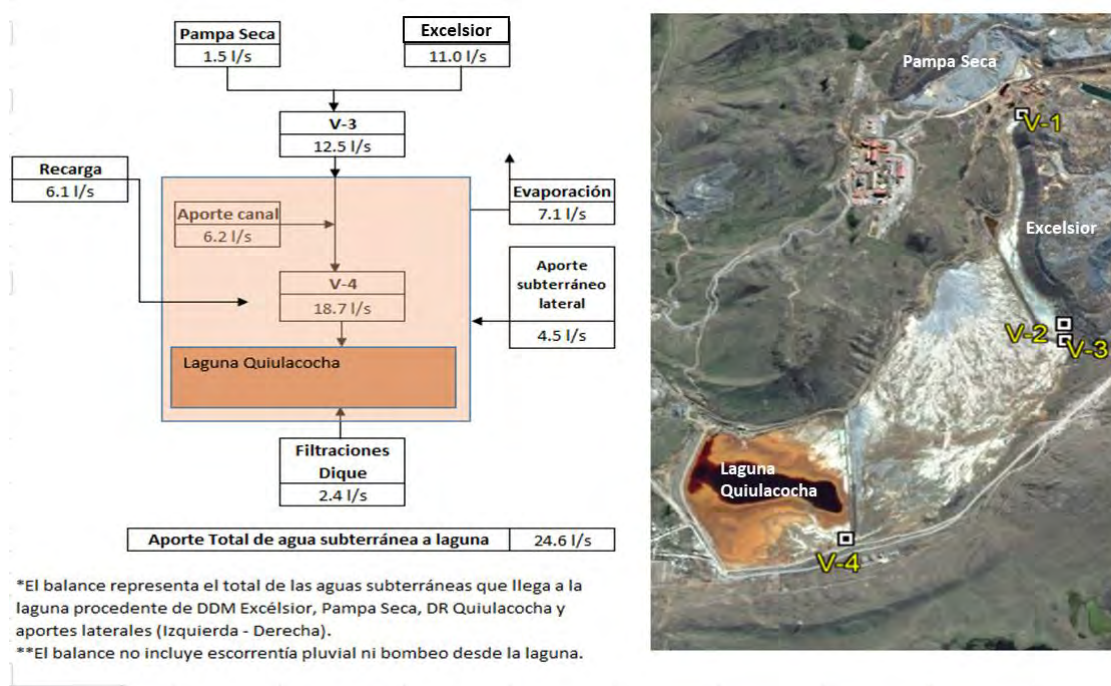


Figura 6-6:

Balance hídrico del depósito de relaves Quiulacocha (años húmedos).



6.1.14. Recarga y descarga de aguas subterránea

De manera general, el nivel freático en el depósito de relaves Quiulacocha se encuentra somero, el que recibe flujos desde el depósito de desmontes Excélsior con caudales alrededor de 12 a 25 l/s. En la parte alta de la quebrada El Golf afloran calizas del Grupo Pucará; en esta zona se registran descargas subterráneas estacionales (2.5 a 158 l/s) atribuidas a la recarga pluvial estacional, las que alimentan los riachuelos y las áreas hidromórficas; sin embargo, de la zona El Golf ingresa al medio subterráneo aproximadamente 0.8 l/s.

En el área del depósito de relaves Quiulacocha se identificaron descargas de bajo caudal, calificadas como filtraciones, manantiales y cuerpos de agua (laguna y lagunillas), producto de las filtraciones estacionales que se estima sean aguas de precipitación pluvial lixiviadas por contacto con relaves y minerales del desmonte de mina.

CAPÍTULO VII: HIDROGEOLOGÍA DEL ÁREA DEL QUIULACocha

El presente capítulo constituye una base fundamental para la comprensión del comportamiento hidrogeológico del área de estudio, debido a que permite analizar la distribución, dirección y dinámica del flujo subterráneo asociado al depósito de relaves Quiulacocha.

La caracterización hidrogeológica integra la información geológica y geomorfológica, permitiendo identificar las unidades hidrogeológicas, los niveles de saturación, la conductividad hidráulica y las condiciones de recarga y descarga del sistema. Asimismo, se establece la interacción entre el flujo subterráneo y el depósito de relaves, determinando las zonas de mayor vulnerabilidad a la migración de contaminantes.

En este sentido, la información hidrogeológica obtenida sustenta el cumplimiento del Objetivo Específico 1, y constituye un insumo clave para la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual (Objetivo Específico 3), la modelación numérica del flujo subterráneo (Objetivo Específico 4) y la evaluación de escenarios de cierre del depósito de relaves Quiulacocha (Objetivo Específico 5), al definir el comportamiento hidráulico del sistema y sus condiciones de flujo.

Los resultados obtenidos permiten establecer un marco conceptual sólido del funcionamiento hidrogeológico del área de estudio, el cual sustenta el desarrollo del modelo conceptual, la modelación numérica del flujo subterráneo y la evaluación de escenarios de cierre del depósito de relaves Quiulacocha.

En conclusión, la hidrogeología del área de estudio evidencia un sistema de flujo subterráneo cuya dinámica y distribución están controladas por la interacción entre unidades hidrogeológicas con distintas propiedades hidráulicas. Este comportamiento define la dirección

del flujo subterráneo y condiciona la conectividad hidráulica dentro del sistema, así como la potencial migración de contaminantes asociados al depósito de relaves Quiulacocha.

7.1. Mapeo hidrogeológico

En el marco del estudio hidrogeológico, se realizó un inventario de fuentes de agua subterránea y puntualmente de aguas superficiales durante dos temporadas (marzo 2022 y junio-julio 2022), para evaluar su interacción dentro del área de estudio. La que proporcionó información sobre las características hidrodinámicas de las fuentes en su condición actual, habiendo logrado identificar y registrar durante la temporada húmeda (marzo 2022) cuarenta y seis (46) puntos de agua; entre ellos, treinta y dos (32) corresponden a aguas subterráneas, y catorce (14) estaciones corresponden a fuentes superficiales. Durante la temporada de estiaje (junio - julio 2022); se registraron setenta y uno (71) puntos de agua; entre ellos, cincuenta y cuatro (54) corresponden a aguas subterráneas, que incluyen 20 piezómetros recientemente instalados, siendo 08 piezómetros dobles de tipo casa grande y diecisiete (17) estaciones son aguas superficiales, los cuales se pueden observar en las figuras 7-1.

Figura 7-1:

Mapa de monitoreo de fuentes de agua y mapa de monitoreo de piezómetros.

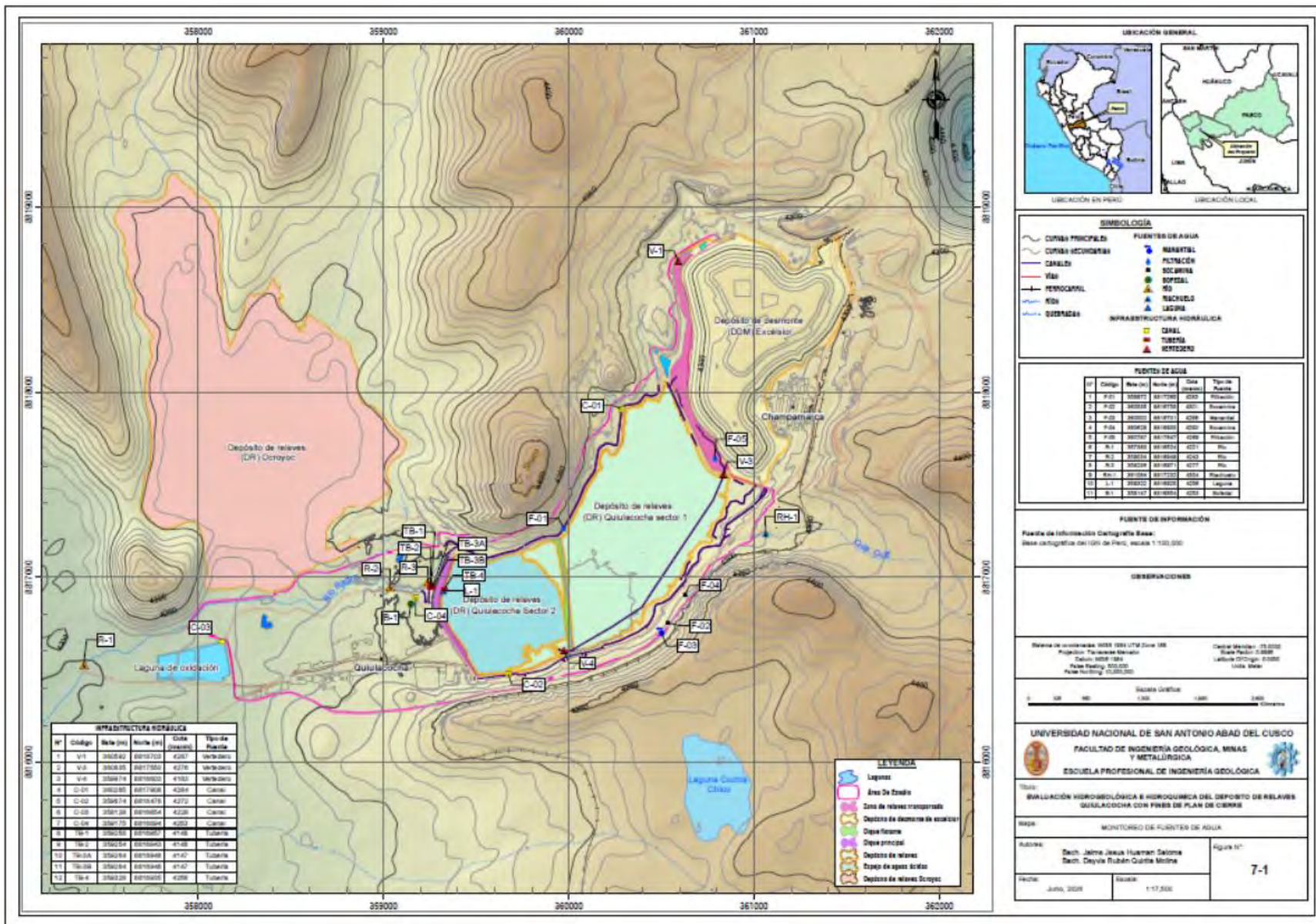


Tabla 7-1:*Fuentes de agua subterránea*

Fuentes	Manantial	Piezómetros	Filtraciones	Áreas hidromórficas	Efluente (bocamina)
1era Campaña (temporada seca)	1	28	1	0	2
2da Campaña (temporada húmeda)	1	48	2	1	2

Fuente: *Elaboración propia.***Tabla 7-2:***Fuentes de agua superficial*

Fuente	Estaciones en río	Estaciones en riachuelos	Estaciones Laguna	Estaciones Infraestructura Hidráulica
1era Campaña (temporada seca)	3	1	0	10
2da Campaña (temporada húmeda)	3	1	1	12

Fuente: *Elaboración propia.***7.1.1. Clasificación de fuentes**

Se llevó a cabo según el tipo de fuente, detallando los parámetros fisicoquímicos de campo, y su probable origen. Se muestra a continuación un resumen de las fuentes analizadas para las dos temporadas:

Fuentes subterráneas: Se realizó el monitoreo de fuentes de agua en manantiales, piezómetros, filtraciones y bocaminas.

Tabla 7-3:

Monitoreo de piezómetros (marzo, 2022)

N°	Código	Parámetros Fisicoquímicos				N°	Código	Parámetros Fisicoquímicos			
		T	pH	CE	TDS			T	pH	CE	TDS
1	P-01	9.5	7.3	403	200	15	P-17	11.2	5.6	4410	2210
2	P-02	10	4.9	21650	10825	16	P-18	13	2.5	2225	1130
3	P-03	10.6	5.3	7540	3740	17	P-19	9.8	5.8	8000	3970
4	PM-	10.9	5.2	7570	3780	18	P3-B	9.9	6.2	3170	1580
5	PM-	10.4	4.2	13650	6840	19	P-09-1	-	-	-	-
6	P-04 A	10.8	7	1550	770	20	P-09-2	11.2	7.1	3460	1730
7	P-04-B	11	7	2000	1000	21	PZ-BQ	11.07	7.2	426	211
8	P-05	11	1.2	21800	10900	22	HG-01	12.5	2.3	44580	22340
9	P-06	10.2	6.8	4470	2240	23	HG-02	10.9	2.3	17750	9040
10	P-08	12.4	6.2	4370	2190	24	HG-03	10.2	5.9	7380	3700
11	P-12	10.1	7	741	369	25	HG-04	11.8	5.6	3459	1726
12	P-13	10.5	7.4	340	761	26	P-NN1	14.4	6.4	2510	1279
13	P-14	12.3	7.1	427	213	27	P-NN2	11.1	8.1	712	358
14	P-15	11.8	7.2	759	379	28	CAZ-	10.8	6.7	1066	531

Fuente: Elaboración propia.

Nota: (--) no registrado por reducido diámetro

Tabla 7-4:

Monitoreo de fuentes agua subterránea (marzo 2022)

N°	Código	Parámetros fisicoquímicos				Tipo
		T (°C)	pH	CE (μS/cm)	TDS	
		(ppm)				
Inventario de fuentes subterráneas.						
1	F-01	9.03	7.4	216	106	Filtración
2	F-02	10.6	7.3	311	155	Bocamina
3	F-03	11.4	7.42	344	172	Manantial
4	F-04	11.7	7.35	725	362	Bocamina

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-5:*Monitoreo de piezómetros (junio-julio, 2022)*

N°	Código	Parámetros Fisicoquímicos				N°	Código	Parámetros Fisicoquímicos			
		T	pH	CE	TDS			T	pH	CE	TDS
		(°C)		(μS/cm)	(ppm)			(°C)		(μS/cm)	(ppm)
1	CAZ- CHAMP	10.2	6.2	1056	527	25	P-06	8.8	7.5	6000	3000
2	HG-01	12.6	4.5	20000	10000	26	P-13	9.5	5.6	430	230
3	P-NN1	12.4	1.2	4870	2550	27	P-14	8.5	7	460	230
4	GW-04A	11.4	6.7	3000	1550	28	P-15	10.5	6.7	990	490
5	GW-04B	9.2	6	5480	2850	29	P-17	-	-	-	-
6	P-04 A	11.4	6.8	1220	640	30	P-18	12	5.4	2350	1150
7	P-04-B	10.6	6.3	2300	1190	31	P3-B	13.1	6.8	2730	1430
8	P-19	13	5.4	2720	1400	32	PZ-BQ	9.3	7.8	500	250
9	P-09-1	-	-	-	-	33	HG-02	11.8	2.4	11960	6150
10	P-09-2	11.3	6	2830	1450	34	HG-03	11	6.3	7140	3560
11	GW-01A	12.8	6.2	1070	560	35	P-NN2	10	7.9	850	420
12	GW-01B	12.7	5.1	9610	4980	36	GW-03A	12.3	7.3	410	210
13	GW-02A	12.2	7.3	330	170	37	GW-03B	10.3	8.1	720	410
14	GW-02B	11.3	6.3	3450	1860	38	GW-05A	12.2	7.1	220	110
15	P-08	12.2	6.5	4680	2341	39	GW-05B	11.5	8.6	200	100
16	HG-04	10.9	5.4	5500	2750	40	GW-06A	12.1	7.3	940	480
17	GW-09	15.6	1.8	10710	5570	41	GW-06B	14.3	5.4	16170	8400
18	P-01	9.5	7.3	400	200	42	GW-07A	11.9	6.2	4230	2140
19	P-03	11.4	6.4	5660	2820	43	GW-07B	12.2	6.2	4730	2410
20	PM-06-08A	10.8	3.5	10530	5270	44	GW-08	12.7	8.1	570	290
21	PM-06-08B	10.9	3	15480	7710	45	GW-10	13.1	7.9	1460	740
22	P-12	9.8	5.3	880	450	46	GW-11A	10.6	7.8	780	400
23	P-02	10.6	5.1	20000	10000	47	GW-11B	11.1	7.5	990	500
24	P-05	11.1	5.9	16080	8040	48	GW-12	11.3	7.3	1570	800

Fuente: *Elaboración propia.***Nota:** (-) no registrado por reducido diámetro y escasa columna de agua

Tabla 7-6:*Monitoreo de fuentes de agua subterránea (junio 2022)*

N°	Código	Parámetros Físicoquímicos				Tipo
		T (°C)	pH	CE (μS/cm)	TDS	
Inventario de fuentes subterráneas.						
1	F-01	-	-	-	-	Filtración
2	F-02	10	8.03	430	220	Bocamina
3	F-03	10.2	8.3	460	240	Manantial
4	F-04	12	7.9	740	280	Bocamina
5	F-05	23.1	5.89	9860	5060	Filtración

Fuente: *Elaboración propia.***Nota:** (-) no registraron flujo

Fuentes superficiales: Se realizó el monitoreo de fuentes de agua en ríos, riachuelos, lagunas y fuentes de agua en infraestructura hidráulica.

Tabla 7-7:*Monitoreo de fuentes agua superficial (marzo 2022).*

N°	Código	Parámetros fisicoquímicos				Tipo
		T (°C)	pH	CE (μS/cm)	TDS (ppm)	
Inventario fuentes superficiales naturales						
1	R-1	14.1	7.65	2207	1108	Río
2	R-2	13.1	7.36	1251	625	Río
3	R-3	13.7	7.48	1428	717	Río
4	RH-1	10.2	7.44	510	251	Riachuelo
Estaciones de aguas superficiales en infraestructura.						
1	V-1	10	1.58	19500	9810	Vertedero
2	V-3	14.4	3.2	19790	9890	Vertedero
3	V-4	12.2	2.86	18570	9390	Vertedero
4	C-01	15	7.27	1589	794	Canal
5	C-02	15.5	6.72	668	337	Canal
6	C-03	12.9	7.52	427	211	Canal
7	TB-1	11.4	2.79	13180	6660	Tubería
8	TB-2	10.4	3.58	11040	5480	Tubería

9	TB-3A	11.4	2.27	12860	6490	Tubería
10	TB-3B	10.6	3.95	12160	6120	Tubería

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 7-8:

Monitoreo de fuentes de agua superficial (junio 2022)

N°	Código	Parámetros Fisicoquímicos				Tipo
		T (°C)	pH	CE (µS/cm)	TDS	
Inventario fuentes superficiales naturales						
1	R-1	11.6	7.6	2880	1480	Río
2	R-2	11.9	7.6	1500	780	Río
3	R-3	13.1	8.7	1310	680	Río
4	RH-1	11.94	6.85	730	360	Riachuelo
5	L-1	12.6	2.62	9760	4870	Laguna
6	B-1	8.4	8.29	310	160	Area hidromórfica
Estaciones de aguas superficiales en infraestructura.						
1	V-1	14.72	1.72	>20000	>10000	Vertedero
2	V-3	17.1	3.47	17370	8600	Vertedero
3	V-4	12.05	2.95	17430	8680	Vertedero
4	C-01	12	7.3	1770	880	Canal
5	C-02	12.8	7.5	730	370	Canal
6	C-03	10.4	8.19	440	230	Canal
7	C-04	12	7.9	740	280	Canal
8	TB-1	10.9	4.3	8510	4380	Tubería
9	TB-2	9.7	4.88	7600	3880	Tubería
10	TB-3A	10.4	3.08	8490	4350	Tubería
11	TB-3B	10.9	3.89	8530	4340	Tubería
12	TB-4	12.2	3.95	10710	5350	Tubería

Fuente: *Elaboración propia.*

7.1.2. Aforo de las fuentes subterráneas

Las mediciones de flujo fueron efectuadas para los puntos seleccionados en el área de estudio; para los flujos mayores se empleó un correntómetro digital, para calcular por el método velocidad por área. En casos de flujos menores, se empleó para medir mediante el método volumétrico.

Se evaluó cursos de agua superficial usando el método volumétrico para caudales bajos y el método “velocidad – área” para caudales mayores, habiendo logrado aforar entre filtraciones, manantiales, bocaminas, ríos, riachuelos e infraestructura hidráulica. Las bocaminas presentan caudales de menor flujo: 0.1 y 0.46 l/s, así como la filtración 0.2 l/s, seguido por manantial con 0.33 l/s, dentro de fuentes subterráneas, y en las fuentes superficiales, el riachuelo registró caudal de 158.3 l/s y el río Ragra 2490 l/s, siendo la mayor; los canales de coronación registraron caudales entre 31.35 y 434.1 l/s, los vertederos registraron caudales entre 0.45 y 25.99 l/s y las estaciones en tubería registraron caudales entre 0.22 y 1.5 l/s. Para la segunda campaña, las bocaminas registraron caudales de 0.1 l/s, la filtración se encontró seca, el manantial 0.1 l/s; así mismo, las fuentes superficiales registraron bajos caudales en comparación con la primera campaña: el riachuelo 2.5 l/s y la de mayor caudal, el río Ragra con 1335.87 l/s. Los canales de coronación tuvieron caudal de 1.04 a 74.05 l/s, los vertederos registraron caudales entre 0.2 y 6.51 l/s, y las estaciones en tubería registraron caudales entre 0.03 y 3.05 l/s.

7.2. Perforaciones de investigación hidrogeológica

Las investigaciones de campo incluyeron la perforación de sondajes hidrogeológicos y la instalación posterior de piezómetros tipo casa grande. Se perforaron un total de 12 sondajes con el objetivo de evaluar las unidades litológicas y sus propiedades hidráulicas, principalmente el nivel de agua y las características hidroquímicas del medio subterráneo. Los detalles de las perforaciones se encuentran en el anexo B.

La instalación de los piezómetros permitió la instrumentación de los componentes proyectados, para futuras observaciones de la variación de niveles y la química del agua; en la tabla 7-3 se muestra el resumen de las perforaciones ejecutadas. Cuya perforación fue realizada por la empresa VEDEL INGENIEROS S.A.C., habiendo trabajado con la máquina de perforación

LONGYEAR 38, con broca tipo diamantina y diámetro HQ y revestimiento (reperforación) utilizando broca HW.

Tabla 7-9:

Ubicación de piezómetros instalados, 2022

Código	Coordenadas WGS		Prof. (m)	Tipo Piezómetro	N.A. (m)	Piezómetro
	84 18S					
	Este	Norte				
GW-01A	359332	8816965	53.5	Doble	16.97	Hidrogeológico
GW-01B			6.0		4.41	
GW-02A	359404	8816649	59.5	Doble	5.85	Hidrogeológico
GW-02B			6.0		4.32	
GW-03A	359836	8816535	41.5	Doble	3.11	Hidrogeológico
GW-03B			12.8		1.91	
GW-04A	360004	8816678	59.5	Doble	3.6	Hidrogeológico
GW-04B			8.5		1.87	
GW-05A	360440	8816830	29.5	Doble	4.72	Hidrogeológico
GW-05B			13.6		2.81	
GW-06A	360759	8817599	35.5	Doble	5.72	Hidrogeológico
GW-06B			5.0		0.27	
GW-07A	360644	8817846	39.5	Doble	3.55	Hidrogeológico
GW-07B			5.4		0.26	
GW-08	361082	8817458	52.5	Simple	11.38	Hidrogeológico
GW-09	361503	8818585	53.5	Simple	10.04	Hidrogeológico
GW-10	360271	8817683	39.5	Simple	1.54	Hidrogeológico
GW-11A	359762	8817161	49.5	Doble	1.26	Hidrogeológico
GW-11B			14.0		3.65	
GW-12	359279	8816987	48.5	Simple	7.0	Hidrogeológico

Fuente: *Elaboración propia.*

Nota: N.A. = Nivel de agua medido respecto al Stick up.

En la tabla 7-10 se detalla el resumen de las principales características e instalación de piezómetros ejecutados; así mismo, la descripción litológica, las características de las aguas

subterráneas, los detalles de la roca atravesada de la perforación y el diseño de instalación de piezómetros se encuentran en el anexo B. Se utilizó una metodología estándar y guía para la descripción de suelos y rocas, especializados para registros hidrogeológicos. Así mismo, las ubicaciones de los sondeos ejecutados se muestran en la figura 7-2.

Tabla 7-10:

Características e instalación de piezómetros

Código Sondeo	Inclinación (°)	Prof. Ejec. (m)	Prof. Piezómetro (m)	Tubería ciega	Tubería ranurada	Stick up PVC (m)
GW-01A	-90°	54.0	53.5	35.5	18	0.5
GW-01B	-90°	6.0	6.0	3.0	3	0.5
GW-02A	-90°	60.0	59.5	53.5	6	0.5
GW-02B	-90°	6.5	6.0	3.0	3	0.5
GW-03A	-90°	42.0	41.5	35.5	6	0.4
GW-03B	-90°	12.8	12.8	3.8	9	0.4
GW-04A	-90°	60.0	59.5	47.5	12	0.4
GW-04B	-90°	9.0	8.5	5.5	3	0.4
GW-05A	-90°	30.0	29.5	20.5	9	0.5
GW-05B	-90°	14.1	13.6	7.6	6	0.5
GW-06A	-90°	36.0	35.5	23.5	12	0.5
GW-06B	-90°	5.0	5.0	2.0	3	0.5
GW-07A	-90°	40.0	39.5	30.5	9	0.5
GW-07B	-90°	4.0	5.4	2.4	3	0.5
GW-08	-90°	53.0	52.5	31.5	21	0.7
GW-09	-90°	55.0	53.5	51.4	21	0.7
GW-10	-90°	40.0	39.5	18.5	21	0.5
GW-11A	-90°	50.0	49.5	28.5	21	0.5
GW-11B	-90°	14.0	14.0	11.0	3	0.5
GW-12	-90°	50.0	48.5	27.5	21	0.4

Fuente: *Elaboración propia.*

Durante la perforación se ejecutaron ensayos de permeabilidad tipo Lefranc y recuperación de niveles de agua, a intervalos de 6 y 8 m., con lecturas de parámetros fisicoquímicos de las aguas

y el registro de niveles estáticos. En las perforaciones se instaló piezómetro doble de 2 y 1 pulgadas de diámetro y piezómetros simples de 2 pulgadas, como se muestra en la tabla 7-10.

Figura 7-2:

Mapa de ubicación de sondeos ejecutados.

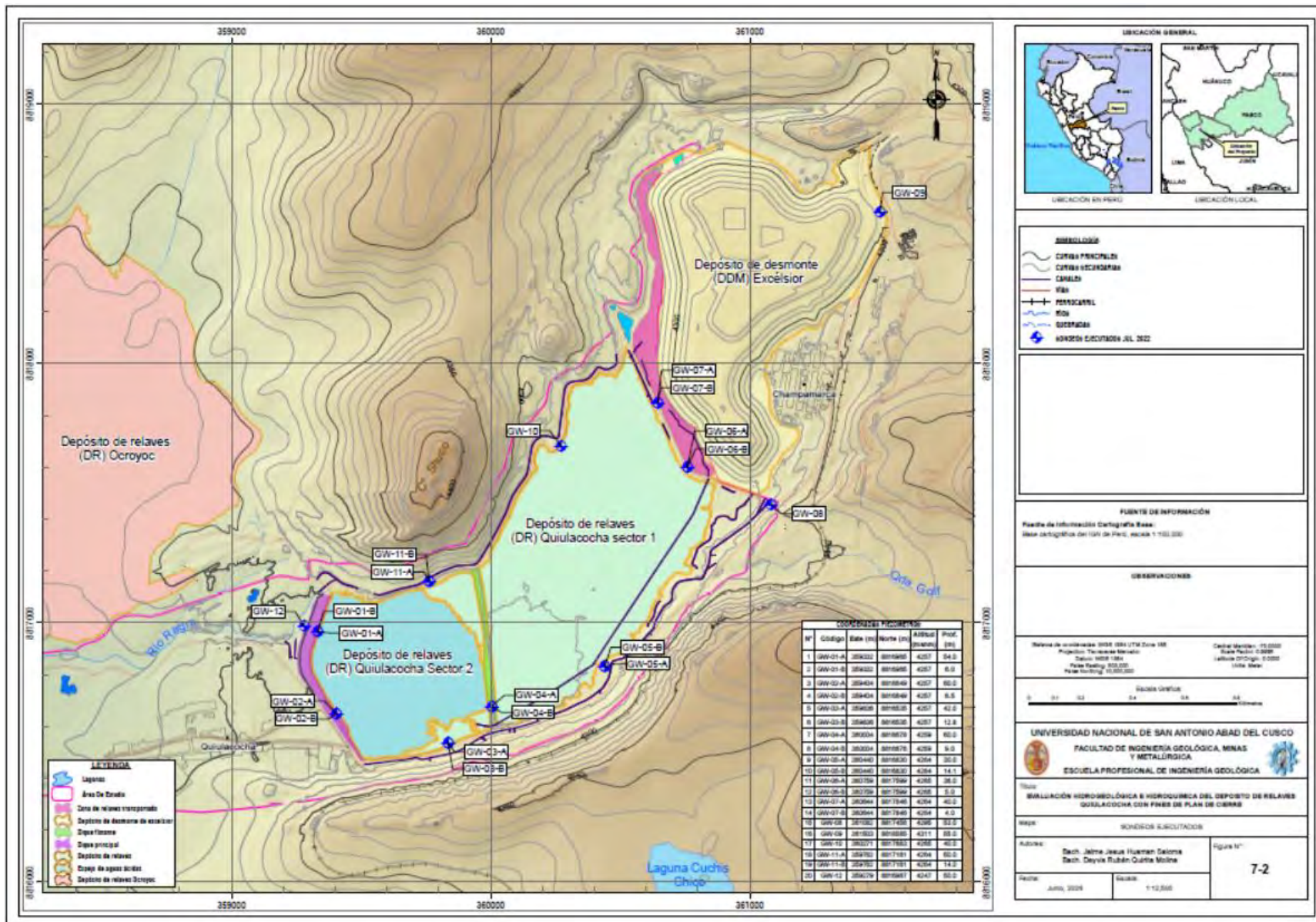


Foto 13:

Vista de la plataforma de perforación y el equipo de perforación



7.3. Perforación de sondajes someros

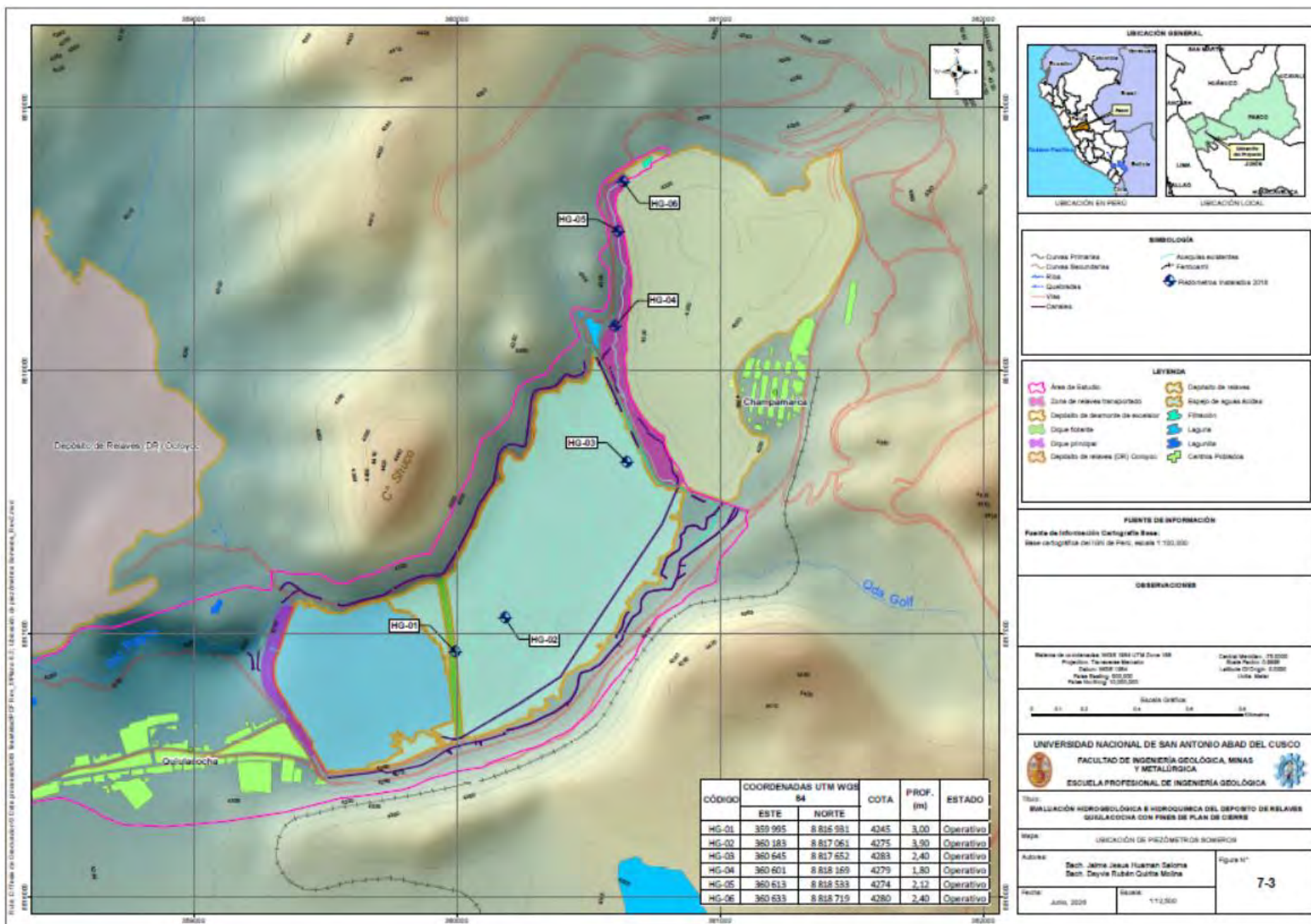
Se ejecutaron perforaciones someras (entre 1.8 y 3.9 m) dentro del depósito de relaves Quiulacocha con el objetivo de determinar el nivel freático en el centro, mejorar la piezometría, realizar pruebas hidráulicas y obtener la química de aguas subterráneas, además de proporcionar el sistema de monitoreo para las aguas de relave.

Las perforaciones someras se ejecutaron entre el 7 y 9 de agosto de 2022, habiendo logrado ejecutar seis (06) sondajes someros, donde se instalaron piezómetros, los que se realizaron con el uso de un barreno manual (auger), de 4", de diámetro, el que permitió instalar una tubería PVC de 2", con ranuras de 1.0 mm, forrada con geomembrana porosa, la que fue envuelta en la tubería cribada antes de su instalación. No se utilizó arena gruesa como prefiltro debido al relave fino; en su lugar se colocó geomembrana. Los detalles se muestran en la tabla 7-11 y figura 7-3.

Tabla 7-11:*Ubicación de sondajes someros*

Código	Coord. UTM WGS		Cota (msnm)	Fecha dd/mm/aa		Prof. (m)	N.A. (m)	Ubicación
	84 18S			Inicio	Fin			
	Este	Norte						
HG-01	359995	8816931	4245	07/08/22	07/08/22	3.0	1.785	Dique flotante
HG-02	360183	8817061	4275	09/08/22	09/08/22	3.9	0.09	DR Quiulacocha
HG-03	360645	8817652	4283	07/08/22	07/08/22	2.4	0.22	DR Quiulacocha
HG-04	360601	8818169	4279	08/08/22	08/08/22	1.8	0.155	Excélsior
HG-05	360613	8818533	4274	08/04/22	08/08/22	2.12	0.59	Excélsior
HG-06	360633	8818719	4280	09/08/22	09/08/22	2.4	0.455	Excélsior

Fuente: *Elaboración propia.***Figura 7-3:***Mapa de ubicación de piezómetros someros.*



Después de la ejecución de los sondajes someros, se realizaron lecturas de los parámetros físicoquímicos del agua de relave, entre ellos T°, pH, Eh, C.E, TDS, OD.

Cabe resaltar que se obtuvo la conductividad hidráulica mediante ensayos de recuperación en las perforaciones someras.

7.4. Conductividad hidráulica

Para la caracterización hidráulica de las unidades hidrogeológicas de la zona del depósito de relaves Quiulacocha, se acopiaron pruebas hidráulicas de sondajes de investigación hidrogeológica de los estudios anteriores, realizados por consultoras: GWI 2006 (9 sondajes profundos) con 22 pruebas hidráulicas, Hydroenergía, 2008 (15 sondajes) con 37 pruebas hidráulicas, Golder Associates, 2010 (8 sondajes) con 75 pruebas hidráulicas y Consorcio Yanamate (2022) 12 sondajes y 72 pruebas hidráulicas, obtenidos mediante ensayos: Lefranc carga variable, Lefranc carga constante y pruebas Lugeon, además de algunas pruebas Slug Test y Air Lift, para más detalles ver anexo B.

La clasificación de los valores de conductividad hidráulica se realizó en base al origen y la granulometría de los suelos, además de su tipo de roca, cuyos resultados se interpretaron, los que se presentan resumidos en la tabla 7-12.

Tabla 7-12:

Resumen de conductividad hidráulica

Formación/ Litología	Permeabilidad (cm/s)				Permeabilidad (m/d)				N° Pruebas
	Prom.	Med. geo	Max.	Min.	Prom.	Med. geo	Max.	Min.	
Desmonte	2.00E-03	1.10E-03	8.40E-03	1.60E-04	1.69	0.94	7.29	0.14	13
Dique	6.700E-04	5.40E-04	1.80E-03	1.8E0-04	0.58	0.47	1.55	0.16	9
Relave	2.400E-04	6.20E-05	2.20E-03	1.40E-06	0.21	0.05	1.94	0.001	25

Coluvial	3.500E-03	4.10E-04	3.10E-02	6.50E-07	3.06	0.36	26.87	0.001	64
Aluvial	8.500E-04	5.70E-04	2.30E-03	1.20E-04	0.51	0.32	1.95	0.04	21
Lacustre	5.500E-04	3.40E-04	2.30E-03	9.30E-05	0.47	0.30	1.95	0.08	9
Monzonita	3.200E-04	4.50E-05	2.10E-03	3.30E-06	0.27	0.04	1.83	0.003	9
Rumiallana	5.200E+00	2.30E-01	1.50E+01	1.60E-03	5.50	0.23	16.00	0.002	8
Pucara	2.100E-03	3.20E-04	7.90E-03	1.80E-05	1.85	0.28	6.83	0.02	6
Excelsior	6.5E-04	7.3E-05	5.1E-03	3.6E-08	0.52	0.06	4.36	0.00003	121

Fuente: GWI 2006, Hidroenergía 2008, Golder, 2010 y Consorcio Yanamate 2022.

Del resumen obtenido de la conductividad hidráulica en la tabla 7-12 se puede describir que para desmonte y reservas de mineral con materiales de grano grueso, se tiene valores de conductividad hidráulica media (K) entre 1.1E-3 a 2.0E-3 cm/s (0.9 a 1.7 m/d), los que muestran la mayor permeabilidad del área; por su limitada exposición, es calificado como depósitos antrópicos permeables que permiten la infiltración y el flujo de agua al depósito de relaves Quiulacocha, desde el noreste y parte de sus aguas discurren hacia el tajo Raúl Rojas.

Así mismo, los depósitos coluviales del pie de valle esta entre 4.1E-4 y 3.6E-3 cm/s (0.4 a 3.1 m/d), atribuida a su gran variación granulométrica y sus ambientes deposicionales. Estos materiales poseen una conductividad moderada a alta debido a la gran heterogeneidad de sus granos, y en tramos tienen mayor proporción de suelos de arcillas y limos.

Por otro lado, las brechas calcáreas fracturadas de la Fm. Casapalca tiene K media entre 3.2E-4 y 2.1E-3 cm/s (0.3 y 1.85 m/d), las que son denominadas como una litología de conductividad hidráulica moderada, por su alternancia con clastos calcáreos de moderada solubilidad.

Para lutitas, filitas y pizarras del Grupo Excelsior del basamento rocoso del depósito de relaves Quiulacocha, los que fueron obtenidos mediante perforaciones de estudios anteriores y las

actuales, resulta en valores entre $7.3\text{E-}5$ y $6.5\text{E-}4$ (0.06 y 0.52 m/d), clasificadas como roca de “baja conductividad hidráulica” hasta un grado de fracturación moderado en superficie, por su metamorfismo y granulometría fina, que a mayor profundidad sellan las fracturas.

La conductividad hidráulica para los relaves almacenados se calculó en promedio K entre $6.2\text{E-}4$ y $2.4\text{E-}4$ cm/s (0.05 y 0.21 m/d), atribuida a su gran variación granulométrica y sus ambientes deposicionales. Estos materiales poseen una moderada a alta conductividad debido a la gran heterogeneidad de sus granos, y en tramos tienen mayor proporción de suelos de arcillas y limos. De forma complementaria, se realizaron 06 perforaciones someras y pruebas de recuperación tipo “Air Lift”, las que identificaron dos grupos de permeabilidad en relave, mostrados a continuación:

Tabla 7-13:

Resultados de las pruebas Air Lift realizadas en los sondajes someros.

Código Sondeo	Profundidad (m)		Conductividad hidráulica		Litología
	de	hasta	K(cm/s)	K(m/d)	
HG-01	1.97	3.00	$5.4\text{E-}05$	0.046	Relave fino
HG-02	0.09	3.90	$1.4\text{E-}05$	0.012	Relave fino
HG-03	0.22	2.40	$4.6\text{E-}05$	0.039	Relave fino
HG-04	0.16	1.80	$1.2\text{E-}03$	1.072	Relave grueso
HG-05	0.59	2.12	$2.2\text{E-}03$	1.937	Relave grueso
HG-06	0.46	2.40	$2.4\text{E-}04$	0.208	Relave grueso

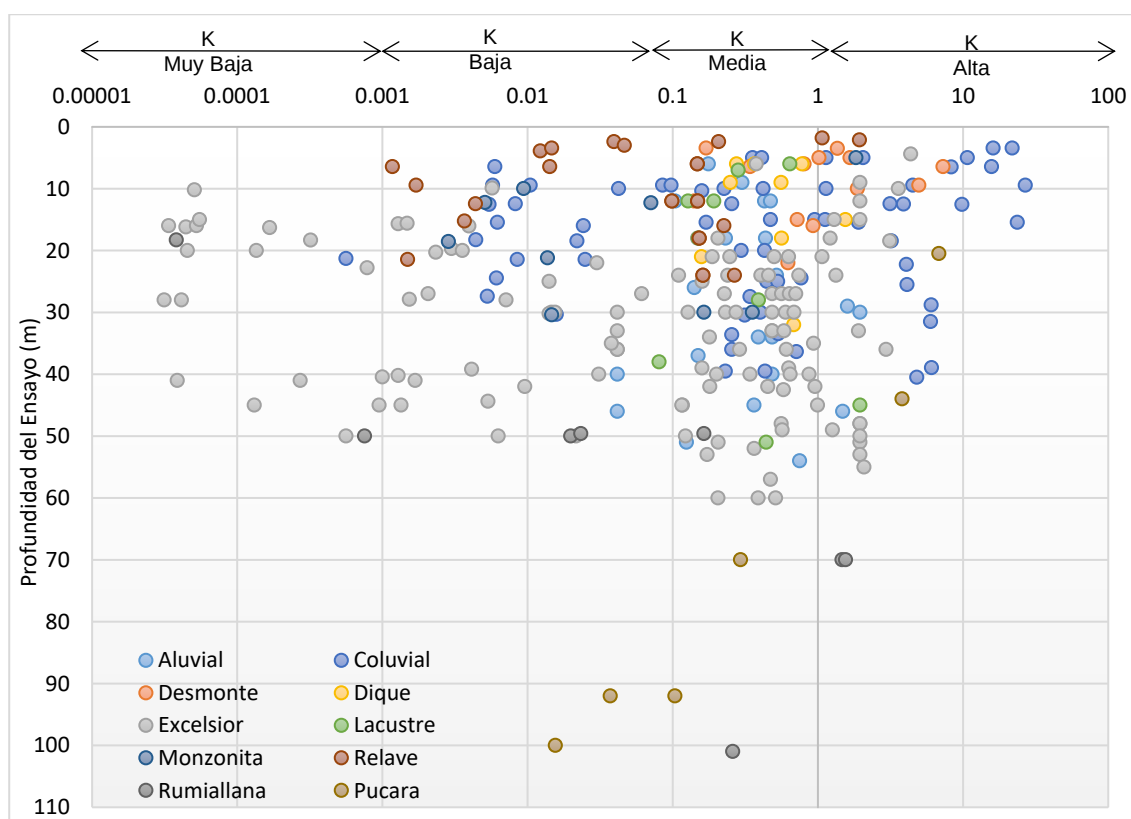
Fuente: *Elaboración propia.*

El gráfico 7-1 presenta la distribución de la conductividad hidráulica vertical, obtenida durante el proceso de perforación, y su relación con la litología de los materiales atravesados durante la perforación de los sondajes en el área y alrededores, donde se puede observar que la conductividad hidráulica en los relaves tiene moderada variabilidad en superficie, diferenciando

relaves gruesos en superficie y relaves finos a profundidad. Los depósitos cuaternarios tienen moderada dispersión y baja variabilidad a profundidad, dependiendo de su granulometría. Sin embargo, las filitas y pizarras del Grupo Excelsior tienen un amplio rango de variación en superficie, la que posiblemente esté influenciada por el grado de fracturamiento, siendo a profundidad roca compacta, en la que se reduce su conductividad hidráulica y es más homogénea.

Gráfico 7-1:

Distribución de la conductividad hidráulica vertical (m/d)



Fuente: *Elaboración propia.*

7.5. Niveles y evolución subterránea

Los niveles de agua subterránea obtenidos mediante datos observados durante 10 años (2006, 2008, 2010, 2012, 2013, 2014, 2016, 2018 y 2021, 2022) en 28 piezómetros (ubicados

dentro y alrededor del depósito de relaves Quiulacocha) muestran distinto comportamiento en la fluctuación de sus niveles, lo cual es debido a la heterogeneidad de las unidades geológicas donde se emplazan los piezómetros, las que están relacionadas con la tasa de recarga y su relación con su carga hidráulica.

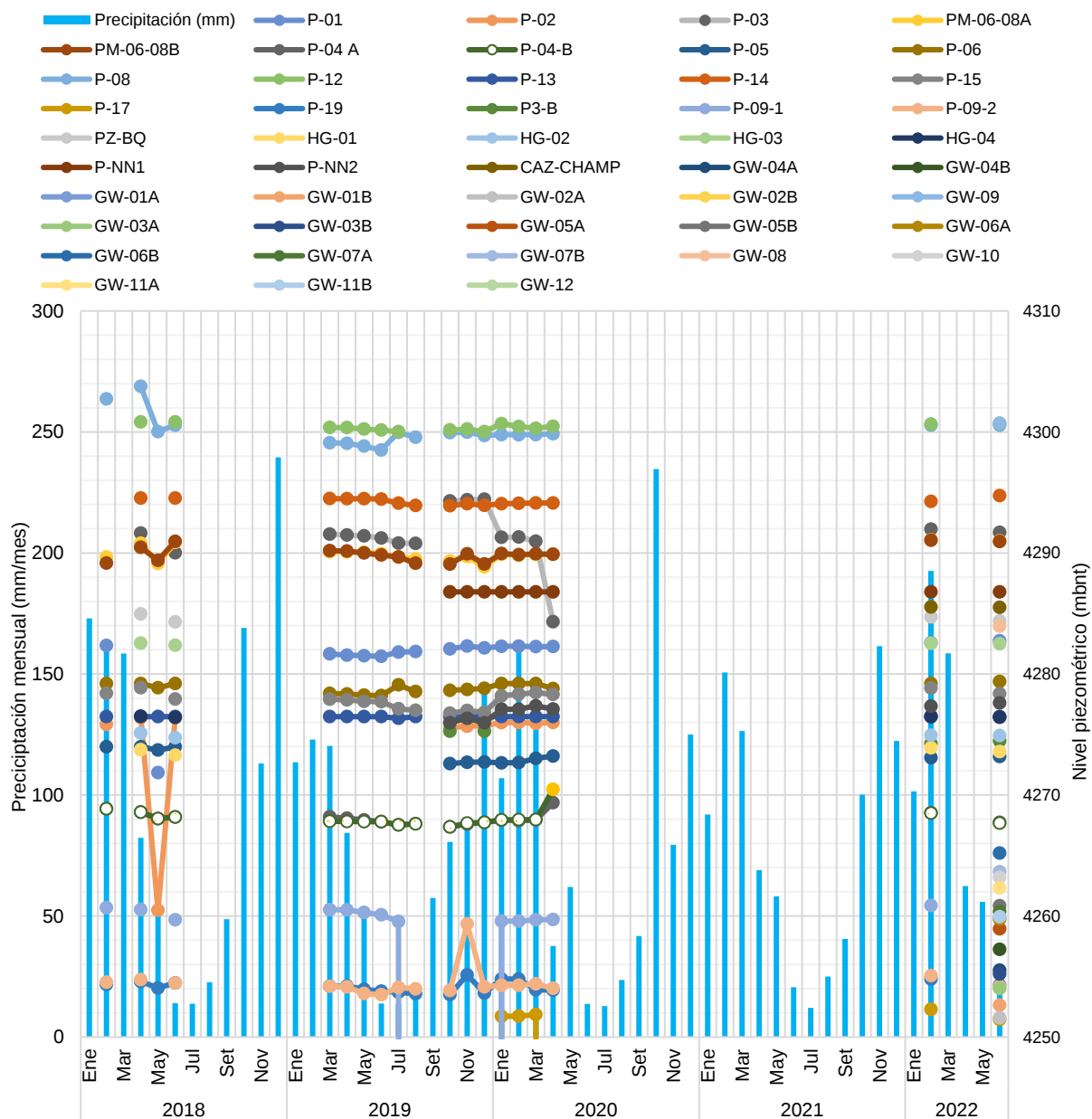
La mayor variación del nivel estático ocurre al norte en el depósito de desmontes Excélsior, en los piezómetros P-3, P-4, P-8, P-9, P-10, PM06-06, PM06-07, PM-06-8A y B; en estas, su nivel se encuentra a 1.2 m de profundidad. En el piezómetro P-10 hasta 9.44 m. En el piezómetro P-9, su oscilación mínima es 1.69 m, y la máxima 4.43 m; esta última tiene una variación más alta debido a que se encuentra en andesitas y dacitas de permeabilidad media.

A diferencia de los piezómetros P-NN1 y P-13, cuyos niveles son surgentes y se mantienen surgentes durante la época seca, sin embargo, en el piezómetro P-06, cuyo nivel es surgente y desciende hasta 0.46 m durante la época seca, la que muestra mayor estabilidad en la fluctuación de sus niveles estáticos debido a los suelos cuaternarios (superficialmente), pizarras y filitas del grupo Excélsior a profundidad, los que tienen una conductividad hidráulica muy baja a baja.

Al sur del depósito de desmontes Excélsior, la fluctuación de niveles estáticos en los piezómetros P-1, P-2, P-5, P-6 y P-7 es baja, en promedio, fluctúa anualmente 1,08 m. Los niveles estáticos fluctúan desde surgentes hasta descenso de 1,5 m de profundidad, las que tienen una estrecha relación con la litología del grupo Excélsior (pizarras y filitas), cuya permeabilidad es baja a muy baja. Asimismo, están sujetos a la época húmeda (diciembre a abril), donde se observan surgentes; y en la época seca (junio a setiembre) bajan ligeramente su nivel en el año.

Gráfico 7-2:

Variación de niveles 2018-2022



Fuente: Elaboración propia.

Los piezómetros P-12, P-13, P-14, P-15 y PZ-BQ-01, situados al noreste del depósito de relaves Quiulacocha, muestran sus niveles estáticos a superficie (surgentes) hasta 7,64 m de profundidad; estos piezómetros tienen fluctuación entre 0,44 y 2,19 m. La evolución de sus niveles no muestra cambios significativos; estos mantienen tendencia estable, consistente con la permeabilidad de las pizarras y filitas donde se emplazan los piezómetros. En el dique principal

del depósito de relaves Quiulacocha, los niveles estáticos en los piezómetros del área se encuentran a superficie (surgente) y hasta 17,44 m de profundidad; estos tienen fluctuaciones entre 0,87 y 3,99 m, en el año.

La fluctuación del nivel estático en los piezómetros tiene tendencia ligeramente variable atribuida a su litología, cuya fluctuación más alta de esta zona se observa en el piezómetro P-09-1” instalado en material de relleno. Similar comportamiento tiene los piezómetros P-17, P-18 y PZ-04A, los que contrastan con la permeabilidad del suelo cuaternario.

Por otro lado, los piezómetros P19, P-09-2” y PZ-04B muestran poca variación del nivel estático. En el dique flotante, el piezómetro PZ-05 se mantiene surgente todo el año, no evidencia variación de niveles y refleja una baja permeabilidad del material de relave que confina a la roca de basamento. El piezómetro PZ-02 tiene muy pocos registros, por lo que no es posible hacer un análisis adecuado.

En general, la mayoría de los niveles estáticos en los piezómetros son estables, sin tendencias marcadas de descenso o ascenso, reflejando una relación cercana entre la precipitación y su litología en la variación de niveles; ver gráfico 7-2.

7.6. Piezometría y direcciones de flujo

La superficie freática registrada en la parte baja del depósito de relaves Quiulacocha (piezómetros P-18, P9-1, P9-2, P-19, PZ-04A y PZ-04B) se encuentra entre 2.98 y 16.8 m, los que corresponden a niveles piezométricos entre 4,231 y 4,275 msnm. Los niveles estáticos registrados en la parte media del depósito de relaves Quiulacocha HG-01, HG-02, HG-03 y PZ-BQ se encuentran entre 0.1 y 5.84 m, la que corresponde a 4,245 a 4,294 msnm.

Los niveles estáticos registrados en la parte alta de la quebrada del depósito Excélsior, observados en los piezómetros P-01, P-02, P-03, P-08, PM-06-08A, PM-06-08B y HG-04, se encuentran entre 0.16 y 6.96 m de profundidad, la que corresponde a los niveles piezométricos calculados entre 4,273 y 4,314 msnm.

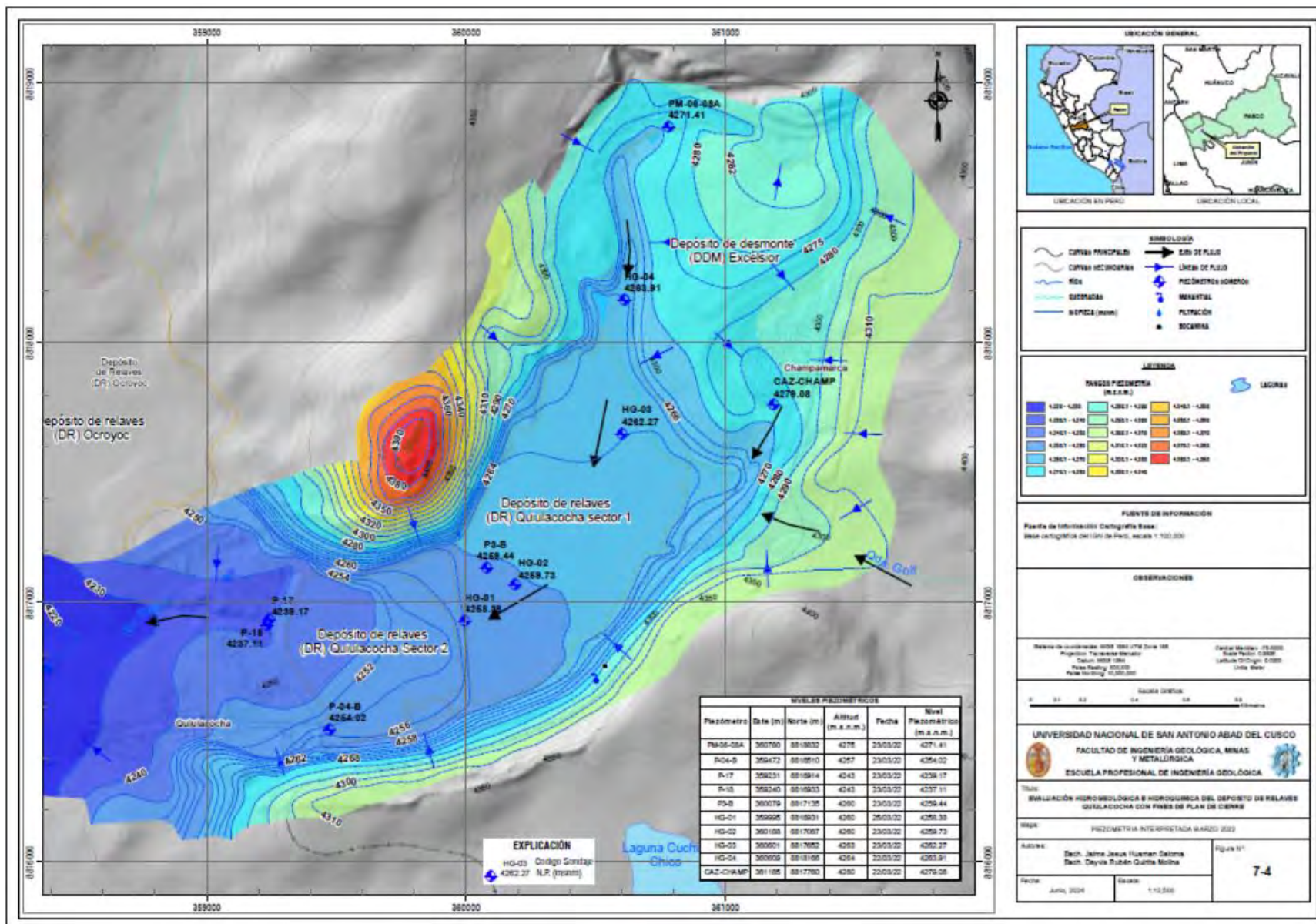
En los alrededores de la relavera, en la zona límite con el depósito de desmonte Excélsior, el piezómetro P-13 muestra nivel surgente; los piezómetros P-NN1 y P-06 también muestran niveles surgentes; los piezómetros ubicados en la parte alta del depósito de relaves Quiulacocha P-14, P-15, P-05 y HG-03 se encuentran entre 0.33 y 1.44 m de profundidad, lo que corresponde a niveles piezométricos entre 4,273 y 4,294 msnm.

Durante la temporada seca, los niveles piezométricos disminuyen ligeramente, con descensos entre 0.02 y 3.21 m, destacando los piezómetros P-3 y P-8 como los de mayor variación. A pesar de ello, la superficie freática se mantiene poco variable, entre 0 y 6 m de profundidad, con presencia de surgencias cerca del depósito Excélsior.

La superficie piezométrica interpretada muestra que las aguas subterráneas fluyen desde las cotas altas hacia el eje de la quebrada Quiulacocha, donde se producen las descargas de agua subterránea, los que fluyen lentamente hacia el cauce del río Ragra, que es el principal colector del área, tal como se muestra en la figura 7-5. La dirección preferencial de los flujos es de Noreste a Suroeste, con gradiente hidráulico entre 0.1 y 0.2 en la parte alta, y de 0.01 en la zona de los relaves, lo cual es consistente con la topografía llana del área de relaves. En las calizas, el gradiente hidráulico es moderado (0.2), mientras que en suelos fluvioglaciares el gradiente es más tendido (0.04).

Figura 7-4:

Mapa de piezometría interpretada



7.8. Unidades hidrogeológicas

En la presente evaluación hidrogeológica se han logrado diferenciar siete (07) unidades hidrogeológicas significativas para el área de estudio, las cuales determinan el comportamiento del flujo de aguas subterráneas dentro del depósito de relaves Quiulacocha y su entorno. En la Tabla 7-14 y figura 7-5, se muestran resumidas las características hidrogeológicas encontradas durante las exploraciones hidrogeológicas.

Tabla 7-14:

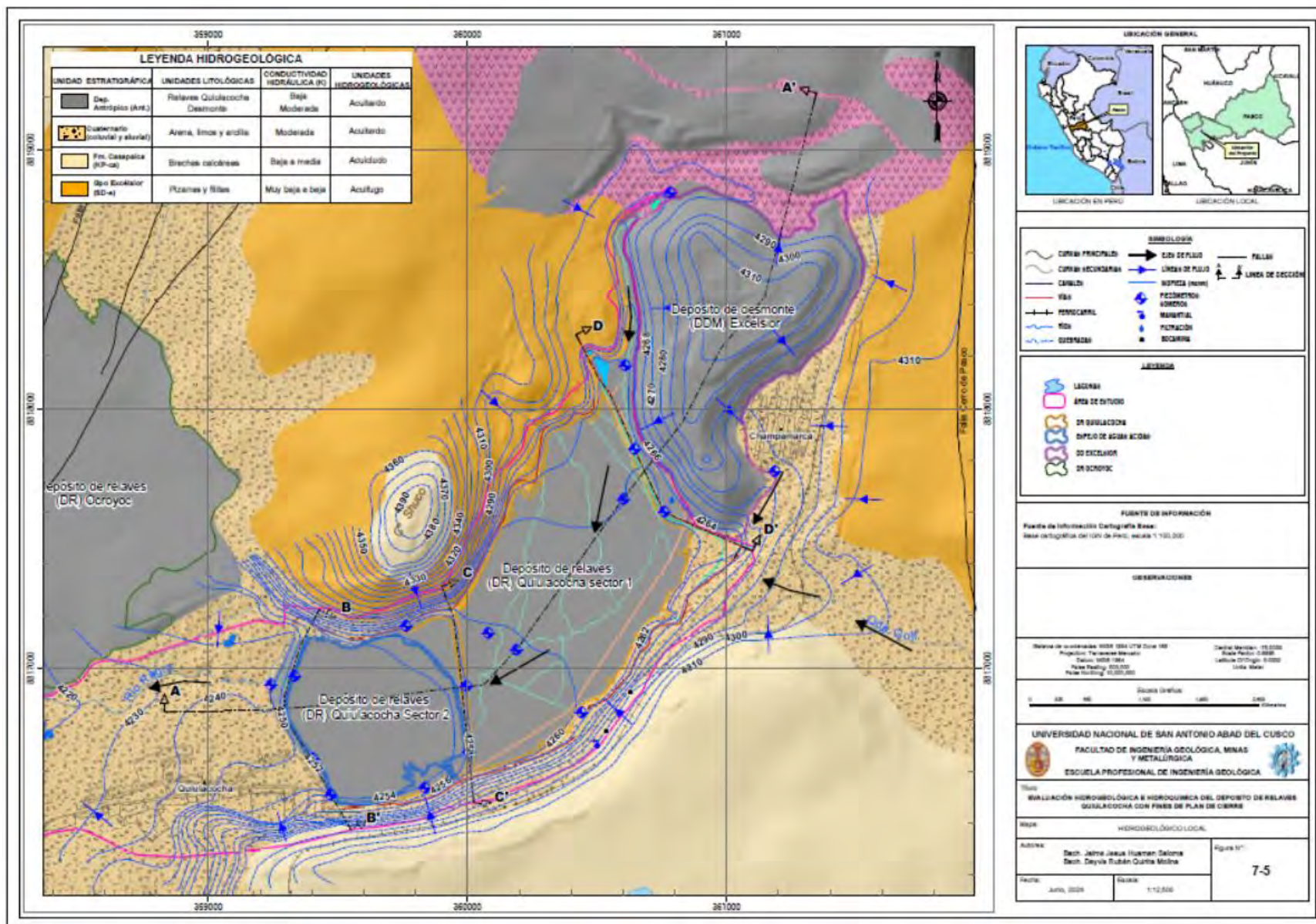
Resumen conductividad hidráulica de las unidades del depósito de relaves Quiulacocha

Unidad geológica	Unidad hidrogeológica	Conductividad hidráulica media (m/d)	Espesor (m)	Clasificación
Antrópico	Relaves	0.1 a 0.2	15 a 20	Baja
Antrópico	Desmontes	0.9 a 1.7	5 a 30	Moderada
Coluvial	Pie de monte	0.4 a 3.1	1 a 15	Moderada
Aluvial y/o lacustre	Arena limo y	0.3 a 0.5	5 a 10	Baja
Dique central y flotante	Material de préstamo	0.5 a 0.6	10 a 30	Baja
Casapalca	brechas calcáreas	1.2 a 2.1	>100	Baja a Media
Grupo Excelsior	Filitas y pizarras	0.1 a 0.5	>200	Muy baja a baja

Fuente: *Elaboración propia.*

Figura 7-5:

Mapa hidrogeológico: unidades hidrogeológicas interpretadas



7.8.1. Pizarras y filitas Excélsior

Esta unidad se compone de pizarras, filitas y ocasionalmente de arenisca color gris oscuro. En la zona superficial tiene intensa fracturación, la que disminuye a profundidad. Esta unidad muestra una potencia >200 m, la que presenta baja a muy baja permeabilidad (0.1 a 0.5 m/d) y se cataloga como “acuifugo”, constituyendo estratos poco a impermeables, por lo que es escasa la capacidad de circulación de las aguas subterráneas, siendo unidades limitantes para el aporte lateral.

7.8.2. Brechas calcáreas Casapalca

La unidad está conformada por brechas calcáreas, margas y lutitas de las capas rojas Casapalca, con un espesor mayor a 100 m; la conductividad hidráulica se estima entre 1.2 y 2.1 m/d; se ha estimado en base a dos (06) ensayos hidráulicos. Asimismo, presenta menor transmisividad debido a la sucesión de estratos finos de marga y lutitas; sin embargo, la parte expuesta en la zona de relaves son brechas calcáreas. Este afloramiento brechoide se comporta como “acuicludo” circunscrito a las brechas calcáreas y areniscas, la que produce algunas descargas locales en la ladera de la margen izquierda del depósito de relaves Quiulacocha.

7.8.3. Suelos aluviales y coluviales

Los suelos coluviales observados en los laterales del depósito están compuestos por arcillas con gravas y lentes de limos arcillosos, heterogéneos y poco estratificados; su espesor es variable, entre 1 y 15 m en la dirección sur del depósito. Su conductividad hidráulica es moderada (0.4 a 3.1 m/d), conteniendo niveles arenosos (canales lobulares) dejados por los antiguos flujos hídricos (cuaternario aluvial k 0.3 a 0.5 m/d). Tiene saturación, pero escaso flujo de agua subterránea (posibles niveles colgados), los que son catalogados como “acuitardo”, su

transmisividad en general es baja. Los depósitos finos como arcillas y limos (cuaternario lacustre) están catalogados como “acuifugo”, siendo una capa confinante.

7.8.4. Relaves Quiulacocha

Estos depósitos incluyen materiales de relave depositado durante la vida de la mina, con una potencia entre 15 y 20 m; de acuerdo a su ritmo de disposición, estos se han ido estratificando y seleccionando al ser transportados, en función de su pendiente de relleno y su escurrimiento superficial. En general, en la parte de la cabecera (zona norte) se tienen relaves gruesos ($K = 0.2$ m/d), conformados por arenas media a gruesa con limos; sin embargo, aguas abajo, a la altura del dique flotante, se observa limos y arena fina de baja conductividad hidráulica ($K = 0.1$ m/d). La conductividad hidráulica para estos materiales indica valores de baja a muy baja conductividad hidráulica (0.1 a 0.3 m/d).

7.9. Modelo hidrogeológico conceptual

El modelo hidrogeológico conceptual del depósito de relaves Quiulacocha mostrado en la Figura 6-9 está limitado por el norte con el DDM Excélsior, y en sus fronteras por los canales de agua pluvial y residual proveniente del centro poblado Cerro de Pasco, mientras que por el sur limita con el dique, donde se localiza el sistema de subdrenaje del depósito de relave. El depósito evaluado se constituye de relaves finos en la base y en la cima al norte con textura más gruesa, lo que define la reología de los relaves y su conductividad hidráulica; está en función de la elección de sus granos por deposición y segregación de los relaves.

En el plano 13.1 adjunto al final del presente capítulo, se encuentra el modelo hidrogeológico conceptual, mostrando en un corte longitudinal 2D, el cual muestra que el flujo subterráneo va desde el depósito de desmonte (DMM) Excélsior con dirección noreste a suroeste,

siendo flujo constante con descargas situadas al pie del DDM Excélsior, y en el dique flotante y poza de subdrenaje, que ocurren durante la temporada húmeda. Los aportes provenientes de Pampa Seca y del DDM Excélsior, un canal recoge estas descargas: aproximadamente 26 l/s (marzo, 2022), 5.81 l/s (junio, 2022).

El agua subterránea en el depósito de relaves Quiulacocha fluye de noreste a suroeste. Durante las épocas de lluvias y en estiaje, los relaves presentan saturación de nivel freático alto (0.4 m) en partes cerca de superficie, indicando que el cuerpo del depósito está completamente saturado. Se produce recarga por ingresos laterales desde los conglomerados y brechas calcáreas de la margen izquierda, perceptible solo en la época húmeda, siendo pequeños flujos diseminados que generan goteras con humedad constante como áreas hidromórficas, debido a la carga hidráulica que ejercen las rocas de moderada permeabilidad.

El mayor flujo de agua subterránea proviene de las filtraciones del depósito de desmonte Excélsior, al pie del depósito de relaves Quiulacocha, donde se observaban tres (03) puntos de descarga permanentes; actualmente ya no existen debido a las obras de cierre. Además, hay una filtración pequeña desde Pampa Seca como resultado de la lixiviación del Stock Pile (agua de contacto), que se infiltra al subsuelo y contribuye al depósito de relaves Quiulacocha, fluyendo de forma constante. En el depósito de relaves Quiulacocha, las descargas fluyen hacia el canal central que atraviesa el área, al pie del dique flotante, y finalmente a un sistema de subdrenaje del dique principal, que evacua las aguas subterráneas hacia una poza de acumulación para su recirculación.

Las aguas subterráneas basales circulantes debajo del depósito de relave, tanto en suelo como en roca, se encuentran “semiconfinadas a confinadas”, identificado en el piezómetro PNN-1, surgente localizado al centro del dique flotante, así como en la carretera de acceso a Pampa

Seca (P-13), lo cual indica que no existen flujos verticales descendentes desde el depósito, que puedan atravesar debajo del dique principal.

Es improbable que se produzca la formación de una pluma contaminante debajo del depósito de relaves Quiulacocha, debido a que su área de fundación se encuentra sobre depósitos lacustres (arcillas y lutitas) y rocas metamórficas (esquistos y pizarras) de baja permeabilidad, lo cual favorece al encapsulamiento de los relaves, evitando el flujo vertical descendente. La polución actual se produce en forma subsuperficial, debido al contacto de las aguas pluviales circulantes con desmontes y relaves, generando agua ácida por oxidación de sulfuros.

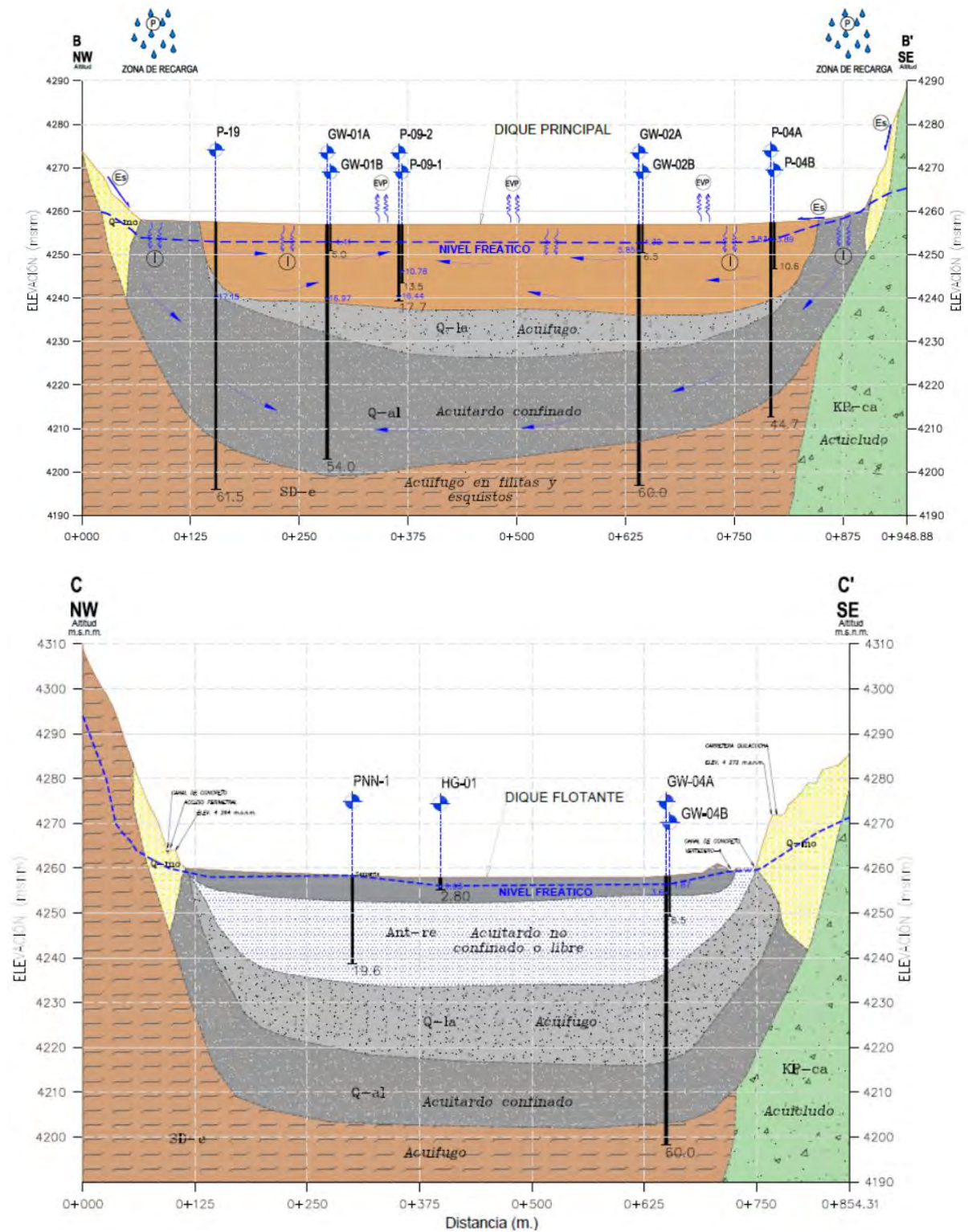
Los flujos laterales son ínfimos a despreciables (0.2 l/s), estos solo se producen durante la temporada húmeda, en la que se observa escasos flujos diseminados con aporte desde la margen izquierda del depósito de relaves Quiulacocha, procedente desde las brechas calcáreas de moderada permeabilidad. Sin embargo, hacia el piso de valle, se encuentran confinadas por los suelos fluvioglaciares y lacustres, y existen áreas húmedas en algunas áreas, como al pie de la quebrada El Golf. Ver figura 7-6 y 7-7.

Modelo hidrogeológico conceptual del DR Quiulacocha



Figura 7-7:

Modelo hidrogeológico conceptual del DR Quiulacocha – Secciones transversales



CAPÍTULO VIII: HIDROQUÍMICA Y CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La evaluación hidroquímica permitió determinar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas asociadas al sistema hidrogeológico del depósito de relaves Quiulacocha, mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos y la concentración de elementos mayoritarios y trazas.

Los resultados evidencian procesos hidroquímicos asociados principalmente al drenaje ácido de mina, reflejados en la variación de pH, conductividad eléctrica y elevadas concentraciones de metales disueltos, producto de la interacción agua–relave y de procesos de oxidación y lixiviación de minerales sulfurados.

Asimismo, se identifican facies hidroquímicas representativas del sistema, lo que permite interpretar la evolución química del agua dentro del medio hidrogeológico y las condiciones de movilidad de contaminantes en el subsuelo.

En este sentido, la información hidroquímica obtenida sustenta el cumplimiento del objetivo específico 2, y contribuye directamente al desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual (objetivo específico 3), al definir las condiciones de calidad del agua e interacción geoquímica del sistema. asimismo, constituye un insumo clave para la modelación numérica del transporte de contaminantes (objetivo específico 4), permitiendo representar la evolución espacial y temporal de la contaminación. finalmente, estos resultados aportan criterios técnicos para la evaluación de escenarios de cierre del depósito de relaves Quiulacocha (objetivo específico 5), orientados a la mitigación del impacto ambiental y protección del recurso hídrico.

En conclusión, la hidroquímica del área de estudio evidencia un sistema de aguas subterráneas y superficiales influenciado por procesos de drenaje ácido de mina, los cuales

controlan la variación de los parámetros fisicoquímicos y la concentración de metales disueltos en el sistema. Estos resultados reflejan la interacción entre el agua y los materiales del depósito de relaves, así como los procesos de oxidación y lixiviación de minerales sulfurados.

8.1. Parámetros fisicoquímicos de campo

Durante las actividades del mapeo de fuentes de agua subterránea y superficial, se recogieron parámetros de campo como conductividad eléctrica (CE), TDS, temperatura y pH para las dos campañas de observación (abril, 2022 y julio 2022), de los cuales se seleccionaron los puntos de muestreo.

Las tablas 8-1 al 8-4 muestran el registro de parámetros de campo para aguas subterráneas entre filtraciones, manantiales y piezómetros, en el depósito de desmonte Excelsior y el depósito de relaves Quiulacocha, así como en sus alrededores, que ingresan a su red de drenaje.

Tabla 8-1:

Parámetros fisicoquímicos de fuentes agua (marzo 2022).

N°	Código	Parámetros fisicoquímicos				Tipo
		T (°C)	pH	CE (μS/cm)	TDS (ppm)	
Inventario de fuentes subterráneas.						
1	F-01	9.03	7.4	216	106	Filtración
2	F-02	10.6	7.3	311	155	Bocamina
3	F-03	11.4	7.42	344	172	Manantial
4	F-04	11.7	7.35	725	362	Bocamina
Inventario fuentes superficiales naturales						
1	R-1	14.1	7.65	2207	1108	Río
2	R-2	13.1	7.36	1251	625	Río
3	R-3	13.7	7.48	1428	717	Río
4	RH-1	10.2	7.44	510	251	Riachuelo
Estaciones de aguas superficiales en infraestructura.						
1	V-1	10	1.58	19500	9810	Vertedero

2	V-3	14.4	3.2	19790	9890	Vertedero
3	V-4	12.2	2.86	18570	9390	Vertedero
4	C-01	15	7.27	1589	794	Canal
5	C-02	15.5	6.72	668	337	Canal
6	C-03	12.9	7.52	427	211	Canal
7	TB-1	11.4	2.79	13180	6660	Tubería
8	TB-2	10.4	3.58	11040	5480	Tubería
9	TB-3A	11.4	2.27	12860	6490	Tubería
10	TB-3B	10.6	3.95	12160	6120	Tubería

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 8-2:

Parámetros fisicoquímicos en los piezómetros (marzo, 2022).

N°	Código	Parámetros Fisicoquímicos				N°	Código	Parámetros Fisicoquímicos			
		T	pH	CE	TDS			T	pH	CE	TDS
1	P-01	9.5	7.3	403	200	15	P-17	11.2	5.6	4410	2210
2	P-02	10	4.9	21650	10825	16	P-18	13	2.5	2225	1130
3	P-03	10.6	5.3	7540	3740	17	P-19	9.8	5.8	8000	3970
4	PM-	10.9	5.2	7570	3780	18	P3-B	9.9	6.2	3170	1580
5	PM-	10.4	4.2	13650	6840	19	P-09-1	-	-	-	-
6	P-04 A	10.8	7	1550	770	20	P-09-2	11.2	7.1	3460	1730
7	P-04-B	11	7	2000	1000	21	PZ-BQ	11.07	7.2	426	211
8	P-05	11	1.2	21800	10900	22	HG-01	12.5	2.3	44580	22340
9	P-06	10.2	6.8	4470	2240	23	HG-02	10.9	2.3	17750	9040
10	P-08	12.4	6.2	4370	2190	24	HG-03	10.2	5.9	7380	3700
11	P-12	10.1	7	741	369	25	HG-04	11.8	5.6	3459	1726
12	P-13	10.5	7.4	340	761	26	P-NN1	14.4	6.4	2510	1279
13	P-14	12.3	7.1	427	213	27	P-NN2	11.1	8.1	712	358
14	P-15	11.8	7.2	759	379	28	CAZ-	10.8	6.7	1066	531

Fuente: *Elaboración propia.*

Nota: (--) no registrado por reducido diámetro

Tabla 8-3:

Parámetros fisicoquímicos de fuentes de agua, campaña junio 2022.

Nº	Código	Parámetros Fisicoquímicos				Tipo
		T (°C)	pH	CE (μS/cm)	TDS	
Inventario de fuentes subterráneas.						
1	F-01		-	-	-	Filtración
2	F-02	10	8.03	430	220	Bocamina
3	F-03	10.2	8.3	460	240	Manantial
4	F-04	12	7.9	740	280	Bocamina
5	F-05	23.1	5.89	9860	5060	Filtración
Inventario fuentes superficiales naturales						
1	R-1	11.6	7.6	2880	1480	Río
2	R-2	11.9	7.6	1500	780	Río
3	R-3	13.1	8.7	1310	680	Río
4	RH-1	11.94	6.85	730	360	Riachuelo
5	L-1	12.6	2.62	9760	4870	Laguna
6	B-1	8.4	8.29	310	160	Bofedal
Estaciones de aguas superficiales en infraestructura.						
1	V-1	14.72	1.72	>20000	>10000	Vertedero
2	V-3	17.1	3.47	17370	8600	Vertedero
3	V-4	12.05	2.95	17430	8680	Vertedero
4	C-01	12	7.3	1770	880	Canal
5	C-02	12.8	7.5	730	370	Canal
6	C-03	10.4	8.19	440	230	Canal
7	C-04	12	7.9	740	280	Canal
8	TB-1	10.9	4.3	8510	4380	Tubería
9	TB-2	9.7	4.88	7600	3880	Tubería
10	TB-3A	10.4	3.08	8490	4350	Tubería
11	TB-3B	10.9	3.89	8530	4340	Tubería
12	TB-4	12.2	3.95	10710	5350	Tubería

Fuente: Elaboración propia.

Nota: (--) no registraron flujo

Tabla 8-4:

Parámetros fisicoquímicos de los piezómetros, campaña junio-julio, 2022

N°	Código	Parámetros Fisicoquímicos				N°	Código	Parámetros Fisicoquímicos			
		T (°C)	pH	CE (μS/cm)	TDS (ppm)			T (°C)	pH	CE (μS/cm)	TDS (ppm)
1	CAZ-CHAMP	10.2	6.2	1056	527	25	P-06	8.8	7.5	6000	3000

2	HG-01	12.6	4.5	20000	10000	26	P-13	9.5	5.6	430	230
3	P-NN1	12.4	1.2	4870	2550	27	P-14	8.5	7	460	230
4	GW-04A	11.4	6.7	3000	1550	28	P-15	10.5	6.7	990	490
5	GW-04B	9.2	6	5480	2850	29	P-17	-	-	-	-
6	P-04 A	11.4	6.8	1220	640	30	P-18	12	5.4	2350	1150
7	P-04-B	10.6	6.3	2300	1190	31	P3-B	13.1	6.8	2730	1430
8	P-19	13	5.4	2720	1400	32	PZ-BQ	9.3	7.8	500	250
9	P-09-1	-	-	-	-	33	HG-02	11.8	2.4	11960	6150
10	P-09-2	11.3	6	2830	1450	34	HG-03	11	6.3	7140	3560
11	GW-01A	12.8	6.2	1070	560	35	P-NN2	10	7.9	850	420
12	GW-01B	12.7	5.1	9610	4980	36	GW-03A	12.3	7.3	410	210
13	GW-02A	12.2	7.3	330	170	37	GW-03B	10.3	8.1	720	410
14	GW-02B	11.3	6.3	3450	1860	38	GW-05A	12.2	7.1	220	110
15	P-08	12.2	6.5	4680	2341	39	GW-05B	11.5	8.6	200	100
16	HG-04	10.9	5.4	5500	2750	40	GW-06A	12.1	7.3	940	480
17	GW-09	15.6	1.8	10710	5570	41	GW-06B	14.3	5.4	16170	8400
18	P-01	9.5	7.3	400	200	42	GW-07A	11.9	6.2	4230	2140
19	P-03	11.4	6.4	5660	2820	43	GW-07B	12.2	6.2	4730	2410
20	PM-06-08A	10.8	3.5	10530	5270	44	GW-08	12.7	8.1	570	290
21	PM-06-08B	10.9	3	15480	7710	45	GW-10	13.1	7.9	1460	740
22	P-12	9.8	5.3	880	450	46	GW-11A	10.6	7.8	780	400
23	P-02	10.6	5.1	20000	10000	47	GW-11B	11.1	7.5	990	500
24	P-05	11.1	5.9	16080	8040	48	GW-12	11.3	7.3	1570	800

Fuente: *Elaboración propia.*

Nota: (--) no registrado por reducido diámetro y escasa columna de agua

8.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es la facilidad del agua para transportar la electricidad y se relaciona directamente con el contenido total de sólidos disueltos (TDS), cuyos valores

dependen de su tiempo de residencia, abundancia y solubilidad de los minerales del medio geológico saturado.

Las aguas subterráneas periféricas al depósito de relaves Quiulacocha presentan valores bajos a moderados en filtraciones y manantiales naturales (216 a 990 $\mu\text{S/cm}$), mientras que en zonas influenciadas por litologías calcáreas (Fm. Casapalca) se observan incrementos moderados (311 a 725 $\mu\text{S/cm}$). En contraste, las filtraciones asociadas al depósito de desmonte Excélsior alcanzan valores elevados (hasta 9860 $\mu\text{S/cm}$), evidenciando procesos de oxidación de sulfuros y generación de drenaje ácido.

En el sistema de piezómetros instalados sobre relaves, la CE presenta valores muy elevados, entre 3170 y 44580 $\mu\text{S/cm}$ en época húmeda y hasta 20000 $\mu\text{S/cm}$ en época seca, reflejando aguas fuertemente mineralizadas con baja renovación. En la base del dique principal, los valores oscilan entre 2225 y 4410 $\mu\text{S/cm}$, mientras que en el dique flotante alcanzan hasta 4870 $\mu\text{S/cm}$. Entre el depósito de relaves y el DDM Excélsior se registran valores altos (4470 a 21800 $\mu\text{S/cm}$), asociados a influencia cruzada de aguas lixiviadas.

En el entorno del depósito de desmonte Excélsior, los valores fluctúan entre 1056 y 15480 $\mu\text{S/cm}$, con máximos puntuales asociados a áreas de mayor carga contaminante. En contraste, aguas naturales de la Fm. Casapalca y Grupo Excélsior mantienen valores bajos a moderados (340 a 990 $\mu\text{S/cm}$), evidenciando menor alteración hidroquímica.

En los puntos recientemente instrumentados, la CE varía entre 200 y 16,170 $\mu\text{S/cm}$, destacando el dique principal, el dique flotante y zonas cercanas al desmonte Excélsior como áreas de mayor concentración iónica.

En aguas superficiales, la laguna ácida del relave presenta el mayor valor (9760 $\mu\text{S/cm}$), mientras que la quebrada Golf muestra baja mineralización (510-730 $\mu\text{S/cm}$) y el río Ragra valores intermedios a altos (1251-2880 $\mu\text{S/cm}$). El bofedal registra baja conductividad (310 $\mu\text{S/cm}$), evidenciando condiciones naturales.

Finalmente, las infraestructuras hidráulicas reflejan fuerte contraste: canales de relaves y vertederos alcanzan valores extremos (18570 a >20000 $\mu\text{S/cm}$), mientras que otros canales periféricos se mantienen entre 427 y 1770 $\mu\text{S/cm}$. Las filtraciones del dique presentan valores elevados (7600 a 13180 $\mu\text{S/cm}$), confirmando influencia directa de aguas lixiviadas.

8.3. Potencial hidrógeno (pH)

El comportamiento del pH en el sistema hidrogeológico del depósito de relaves Quiulacocha evidencia una marcada variabilidad espacial asociada a la interacción entre aguas naturales, lixiviados de relaves y depósitos de desmonte.

En los bordes del depósito, las aguas subterráneas asociadas a formaciones naturales presentan condiciones neutras a ligeramente alcalinas, con valores entre 7.3 y 8.3 en manantiales y bocaminas, mientras que una filtración del depósito de desmontes Excélsior registra condiciones ligeramente ácidas ($\text{pH} \approx 5.89$), evidenciando influencia de procesos de oxidación.

En contraste, los piezómetros instalados sobre relaves muestran un sistema fuertemente heterogéneo, con pH que varía desde condiciones muy ácidas hasta ligeramente alcalinas (2.27 a 6.77), tanto en época húmeda como seca, reflejando procesos de generación de drenaje ácido de mina y baja capacidad de neutralización. En zonas del dique principal, los valores fluctúan entre 5.4 y 7.1, mientras que en el dique flotante se registran extremos de acidez (hasta pH 1.15), asociados a fuerte influencia de lixiviados.

Entre el depósito de relaves Quiulacocha y el depósito de desmonte Excélsior, los valores presentan el rango más amplio (1.2 a 7.5), evidenciando zonas de alta interacción hidroquímica, donde predominan condiciones ácidas en sectores puntuales como el piezómetro P-06. En el entorno del desmonte Excélsior, los valores oscilan entre 2.95 y 6.71, con mayor acidez en los piezómetros influenciados directamente por el material oxidado.

Los piezómetros ubicados en áreas con influencia de formaciones naturales del Grupo Excélsior y Fm. Casapalca muestran condiciones cercanas a la neutralidad (5.3 a 8.07), confirmando su carácter de fondo hidrogeoquímico no impactado.

En los puntos recientemente instalados, el pH varía entre 5.08 y 8.58, aunque se identifica un valor extremo de acidez (pH 1.81), asociado a influencia directa de depósitos de desmontes.

En aguas superficiales, la laguna del depósito de relaves presenta condiciones fuertemente ácidas ($\text{pH} \approx 2.62$), mientras que la quebrada Golf y el río Ragra mantienen condiciones neutras a ligeramente alcalinas (6.85 a 8.7), actuando como receptores con menor alteración relativa. El bofedal registra condiciones ligeramente alcalinas ($\text{pH} \approx 8.29$).

Finalmente, las infraestructuras hidráulicas reflejan contrastes extremos: los canales asociados a relaves y desmontes presentan pH fuertemente ácido (1.58 a 3.47), mientras que los canales de coronación no influenciados por lixiviados mantienen valores neutros a alcalinos (6.72 a 8.19), evidenciando control directo de la interacción agua–relave sobre la calidad química del sistema.

8.4. Temperatura

Entre las aguas subterráneas identificadas como manantial, filtración y bocaminas, resalta la filtración F-05 de mayor temperatura ubicada al sur del depósito de desmonte Excélsior. Esta

filtración registra una temperatura de 23.1 °C, posiblemente porque se producen reacciones exotérmicas dentro del sistema acuoso. Mientras que las demás fuentes ubicadas alrededor del depósito de relaves Quiulacocha registran temperaturas entre 9.03 y 11.7 °C para la temporada húmeda y entre 10 a 12.0 °C para la temporada seca, relacionadas con su altitud y su lento flujo. Los piezómetros, en general, registran temperaturas entre 9.5 y 14.4 °C para la temporada húmeda y entre 8.5 y 15.6 °C para la temporada seca.

Las aguas superficiales registran temperaturas entre 10.2 y 14.1 °C para la temporada húmeda y entre 8.4 y 13.1 °C para la temporada seca. De manera similar, las aguas de las infraestructuras hidráulicas (vertedero, canal y tubería) presentan temperaturas entre 10 a 15.5 °C para la temporada húmeda y entre 9.7 a 17.1 °C para la temporada seca.

8.5. Elementos mayoritarios

Entre los cationes más abundantes se tiene al magnesio (Mg), seguido por calcio (Ca) y, menos abundantes, sodio (Na) y potasio (K). Entre los aniones, el ión sulfato (SO_4^{2-}) representa el anión más abundante, seguido por el bicarbonato (HCO_3^-), y menos abundante el cloruro (Cl^-); se tiene muestreo de fuentes de agua solo para la temporada seca de julio (temporada seca) ver figura 8-1, en base al cual se realizará la presente redacción.

Figura 8-1:

Mapa de estaciones de muestreo

Las filtraciones lixiviadas del depósito de desmontes Excélsior en el punto de muestreo M-23 reportaron sulfatos de 24883.4 mg/l y cloruro 86.9 mg/l; entre los cationes, el magnesio de 2264.4 mg/l, el calcio entre 312.5 mg/l, el sodio de 23.2 mg/l y el potasio entre 13.0 mg/l.

Las aguas al noreste del depósito de desmonte Excélsior, muestra M-28 (vertedero V-1) y piezómetro M-29, reportaron respectivamente sulfato (25596.1 y 20014.6 mg/l) como la sal más abundante, seguido por el cloruro (34.6 y 41.2 mg/l) y menos abundante el bicarbonato (0.5 mg/l para ambos); entre los cationes, en orden de abundancia, se tiene magnesio (864.4 y 1216.3 mg/l), calcio (297.7 y 295.0 mg/l), potasio (25.6 y 0.08 mg/l) y sodio (20.9 y 67.0 mg/l).

Las aguas al norte del depósito de relaves Quiulacocha, muestras M-27, M-26, M-24, M-25 y M-22 (vertedero V-3), reportó sulfato (180.2 a 32832.3 mg/l) como la sal más abundante, seguido por el cloruro (10.5 a 96.2 mg/l) y menos abundante el bicarbonato (0.5 a 178.7 mg/l); dentro de los cationes, en orden de abundancia, se tiene magnesio (27.9 a 2365.6 mg/l), calcio (50.3 a 481.7 mg/l), potasio (5.2 a 13.6 mg/l) y sodio (15.0 a 91.8 mg/l).

Las aguas subterráneas del lado sureste del depósito de relaves Quiulacocha, registradas en los piezómetros M-21, M-20, M-19 y M-17, son agua subterránea procedente de conglomerados y areniscas de la Fm. Casapalca que reportaron: bicarbonato (75.2 a 390.6 mg/l), seguido por sulfato (16.9 a 89.5 mg/l) y cloruro (1.6 a 30.0 mg/l); dentro de los cationes en orden de abundancia: calcio (6.2 a 152.9 mg/l), sodio (8.4 a 116.1 mg/l), magnesio (2.9 a 15.2 mg/l) y potasio (1.6 a 5.8 mg/l).

Las muestras de los piezómetros M-10, M-15, M-14, M-16, M-13, M-11 y M-12 (vertedero V-4), ubicados en el sector del dique flotante, reportaron concentraciones de sulfato entre 9.8 y 30707.9 mg/l, siendo los más altos el vertedero V-4 y el piezómetro en el depósito de relaves; cloruro entre 1.9 y 119.0 mg/l; y de bicarbonato entre 0.5 y 1503 mg/l; y dentro de los

cationes reportaron calcio (9.0 a 427.5 mg/l), magnesio (4.7 a 2746.4 mg/l), sodio (9.7 a 541.7 mg/l) y potasio (0.05 a 15.3 mg/l).

Para los piezómetros del eje de dique y base del depósito de relaves Quiulacocha (M-01, M-03, M-04, M-05, M-06, M-07 y M-08) reportaron sulfatos entre 30.2 y 7474.5 mg/l, seguido por bicarbonato entre 0.5 y 362.0 mg/l, y cloruros entre 2.0 y 296.2 mg/l; posiblemente indicarían mezcla de aguas debido a la presencia de algunas trazas (Mn y Pb) existentes en las aguas de relave. Dentro de los cationes, en orden de abundancia, reportaron calcio (28.7 a 415.0 mg/l), magnesio (7.2 a 788.1 mg/l), sodio (14.1 a 73.2 mg/l) y potasio (2.4 a 8.2 mg/l). De manera puntual, M-02 (filtración del depósito de relaves) y M-09 (aguas del depósito de relaves) presentan aniones elevados con sulfatos entre 13561.6 y 23405.3 mg/l, seguido por cloruros entre 194.5 y 60.7 mg/l respectivamente y bicarbonato 0.5 mg/l; dentro de los cationes, en orden de abundancia, reportaron calcio (401.4 y 367.9 mg/l), magnesio (787.7 y 2116.4 mg/l), sodio (7.6 y 14.7 mg/l) y potasio (1.1 y 1.4 mg/l) respectivamente.

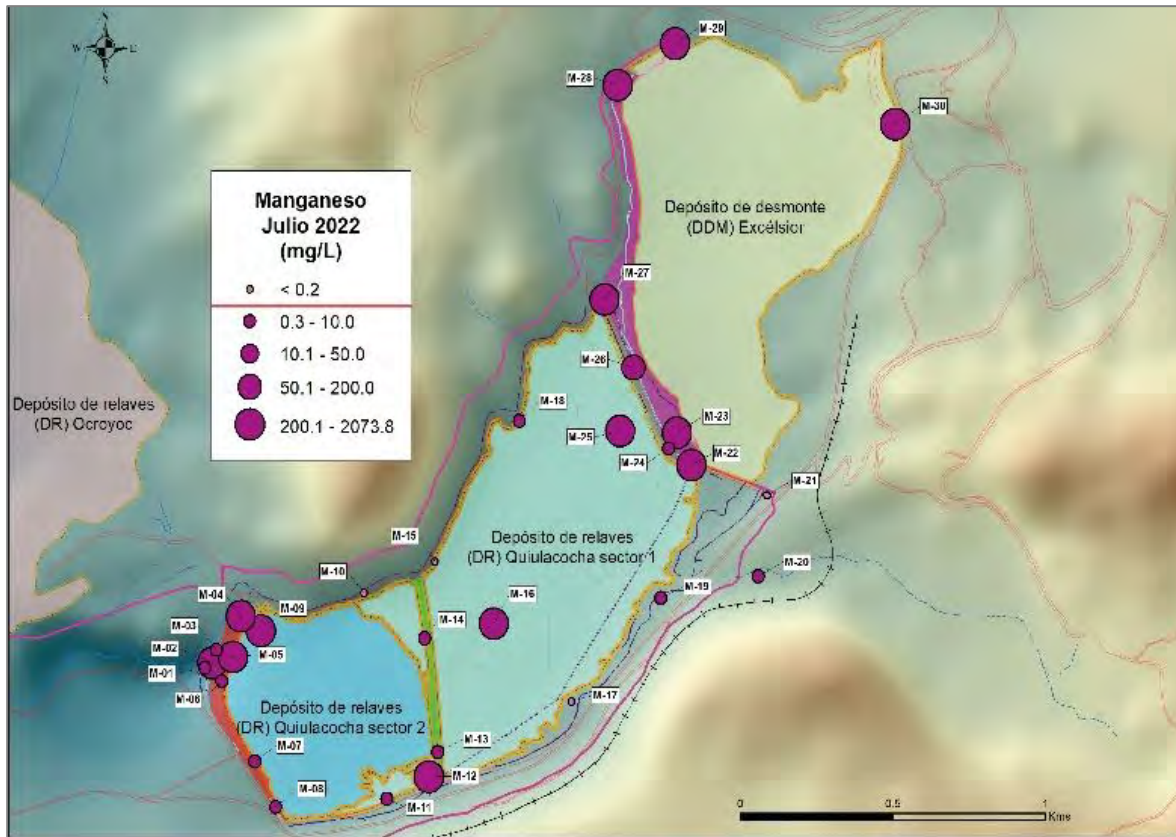
8.6. Elementos minoritarios (Trazas)

Para las muestras de agua de la relavera Quiulacocha y depósito de desmontes Excélsior, la mayoría reportaron excedencias en algunas trazas que superan el ECA III, las cuales se describen a continuación:

El **ión manganeso** reportó excedencia ECA III (0.2 mg/l) en la mayoría de las aguas de relave con valores que oscilaron entre 0.30 y 2,073.8 mg/l, como se ilustra en la Figura 8-2; a excepción de los piezómetros M-10, M-15, M-17 y M-21, que no reportaron trazas. La filtración del depósito de desmonte Excélsior reporta la mayor concentración de manganeso, seguida en aguas superficiales como las de vertederos y relaves.

Figura 8-2:

Distribución de concentración espacial manganeso, julio 2022



Fuente: *Elaboración propia.*

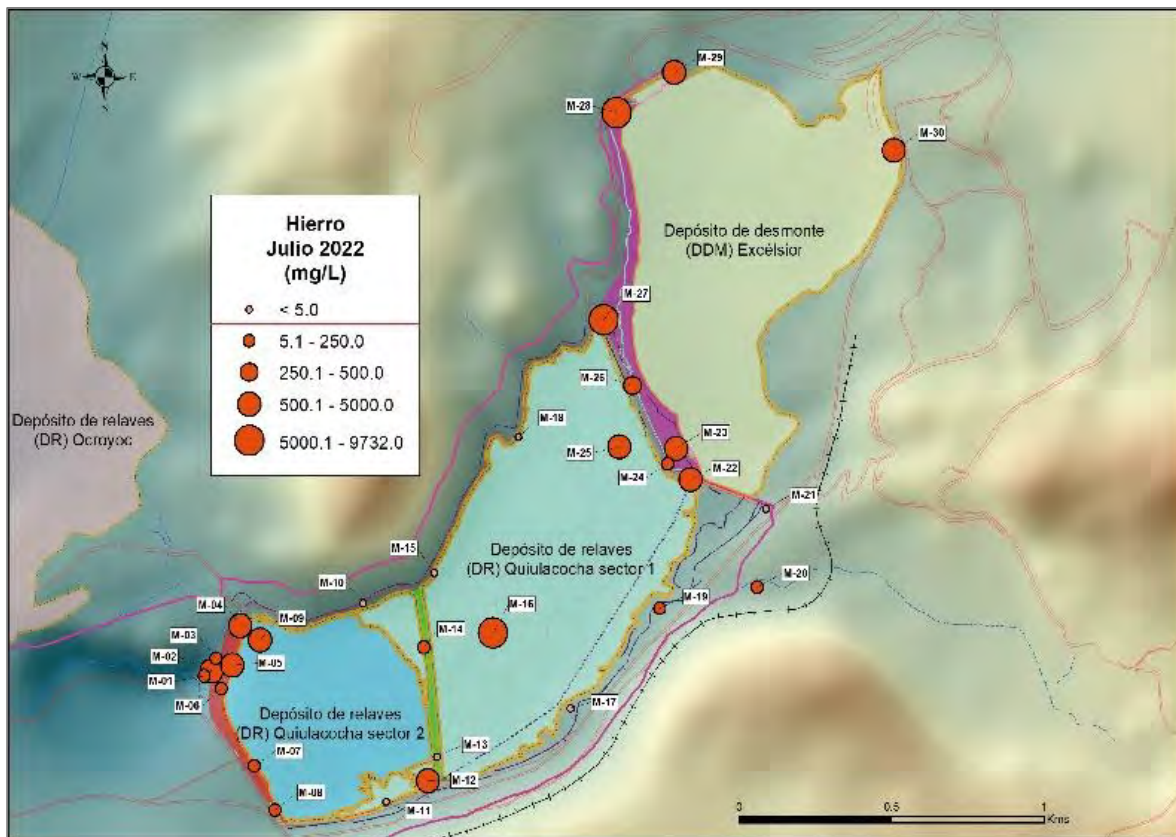
La presencia de este ión posiblemente sea debido a la lixiviación de sulfuro de óxidos, carbonatos y sulfuros de manganeso presentes en los desmontes y en el material de relave, los que en condiciones ácidas del medio acuoso se movilizan rápidamente.

De igual forma, el **ión hierro** reportó excedencia ECA III (5.0 mg/l), como muestra la figura 8-3, siendo las estaciones de la relavera (piezómetros); estas reportaron entre 5.8 y 9.732 mg/l; sin embargo, 7 piezómetros (M-10, M-11, M-13, M-15, M-17, M-18 y M-21) se encuentran dentro de los límites del ECA Cat-III. En tanto, filtración de la desmontera M-23 reporta hierro 2,938 mg/l. De igual manera, para aguas superficiales que discurren (vertederos, agua de relave y

agua de subdrenaje), presentan hierro entre 2,146 y 5,932 mg/l. Su presencia es debida a la lixiviación de sulfuros de hierro (pirita, arsenopirita), que se incorporan al medio acuático en condiciones ácidas.

Figura 8-3:

Distribución de concentración espacial hierro, julio 2022



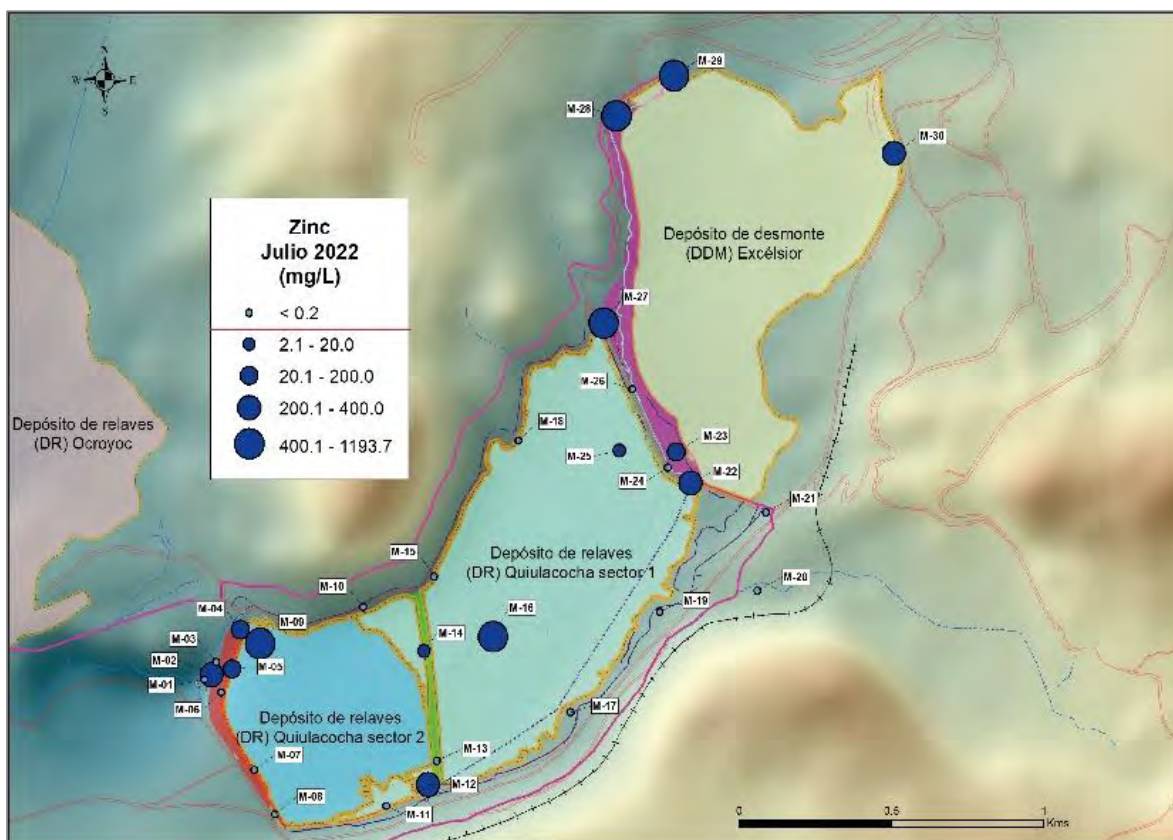
Fuente: *Elaboración propia.*

De igual forma, el **ión zinc** es excedente al ECA III (2.0 y 24 mg/l), como muestra la figura 8-4; los piezómetros con código de muestreo M-04, M-05, M-14, M-16, M-25, M-27, M-29 y M-30 reportaron entre 8.6 y 1193.7 mg/l, en tanto las aguas superficiales que discurren (vertederos, agua de relave y agua de subdrenaje) reportaron 221.1 a 815.1 mg/l. La filtración del DD Excelsior

con código de muestreo M-23 reportó 181.0 mg/l. Su presencia en las aguas subterráneas es debida a la lixiviación de la esfalerita (ZnS).

Figura 8-4:

Distribución de concentración espacial zinc, julio 2022



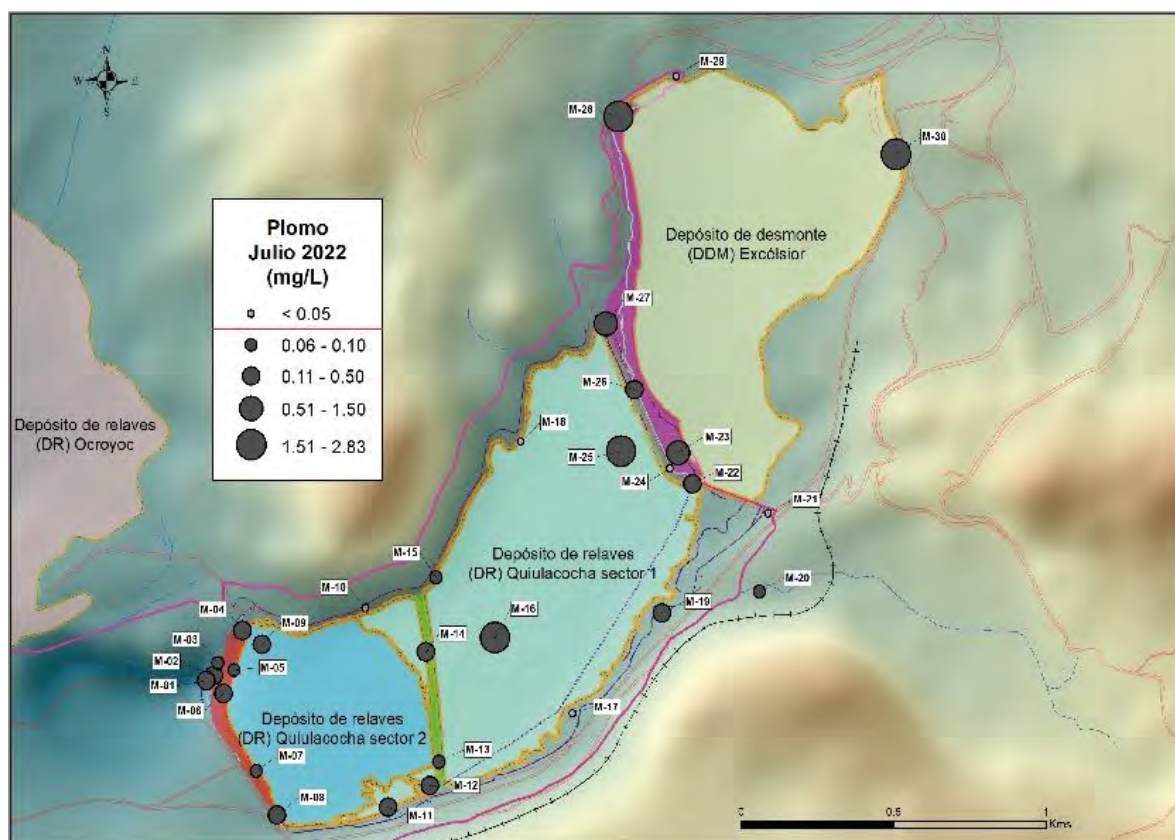
Fuente: *Elaboración propia.*

El **ión plomo** también reportó excedencia al ECA III (0.05 mg/l) mayormente de las muestras de agua analizadas, como se ilustra en la Figura 8-5; a excepción de los piezómetros con código de muestreo M-10, M-17, M-18, M-21, M-24 y M-29, no reportaron trazas de plomo, las excedencias en los demás piezómetros fluctuaron entre 0.052 y 2.8 mg/l. Por otro lado, en las aguas superficiales (vertederos, agua de relave y agua de subdrenaje) presento plomo entre 0.17

y 2.6 mg/l. La filtración del depósito de desmonte Excélsior con código de muestreo M-23 reportó 0.5 mg/l. Su presencia es debida a la lixiviación de los sulfuros de plomo (galena).

Figura 8-5:

Distribución de concentración espacial plomo, julio 2022.



Fuente: *Elaboración propia.*

Las trazas excedentes al ECA III se reportaron en las aguas subterráneas, principalmente en piezómetros; entre ellos (M-16, M-29 y M-30) tiene aluminio entre 90.4 y 133.3 mg/l. El cobalto en piezómetros (M-04, M-16, M-29 y M-30), 0.1 a 2.4 mg/l; el cromo (M-16 y M-30), 0.16 y 0.24 mg/l; el níquel (M-04, M-16, M-29 y M-30), entre 0.4 y 2.9 mg/l; y el arsénico (M-04, M-06, M-13, M-14, M-16, M-27, M-29, M-25, M-26, M-30 y M-20), entre 0.1 y >10 mg/l. El cadmio (M-13 y M-15) se registró en 11.6 y 2.5 mg/l; de igual forma, cobre (M-16, M-29 y M-

30) entre 8.4 a 58.1 mg/l, el mercurio puntualmente en el piezómetro M-30 se reportó 0.002 mg/l, y bario en el piezómetro M-13 se reportó 0.8 mg/l. La presencia de estas trazas es debida a la lixiviación de roca.

Por otro lado, las aguas superficiales (vertederos, agua de relave y agua de subdrenaje) muestreadas reportaron excedencias de aluminio en los puntos M-02, M-28 y M-09 entre 10.3 y 253.8 mg/l, arsénico de 0.2 a >10 mg/l, cadmio entre 0.18 y 2.13, cobalto entre 0.056 y 0.17 mg/l, cobre entre 0.23 y 68.3 mg/l, cromo puntualmente en M-28 (vertedero V-1) 0.28 mg/l, hierro entre 2146.0 y 5932.0 mg/l, níquel entre 0.2 y 0.39 mg/l, manganeso entre 622.6 y 1,406.1 mg/l, plomo entre 0.17 y 2.63 mg/l, y zinc entre 181.0 y 815.1 mg/l (ver anexo C).

8.7. Facies hidroquímicas

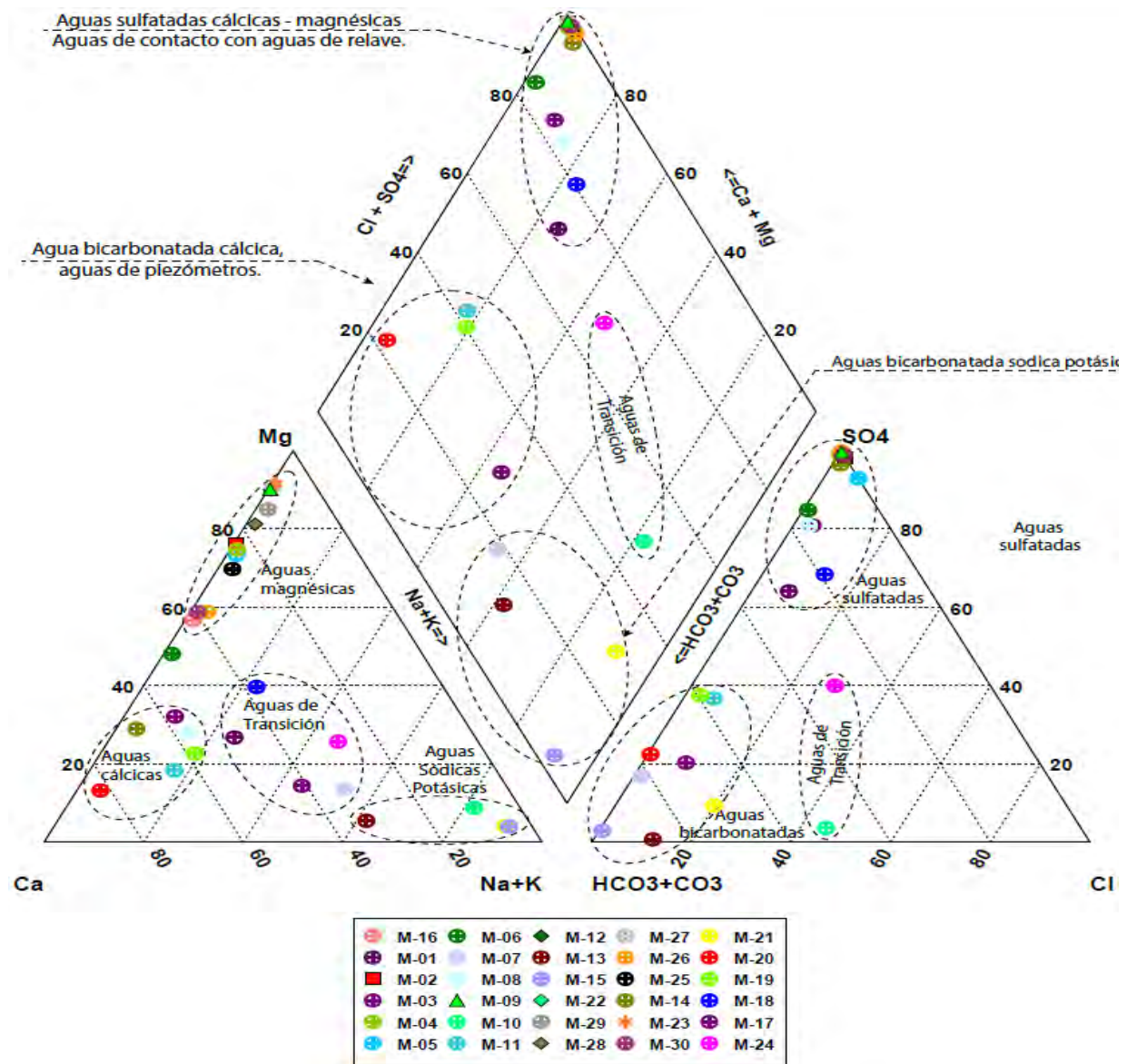
Los resultados de laboratorio fueron procesados y validados mediante el balance iónico (EBI) y representados en “diagramas de Piper y Stiff”, facilitando la interpretación y visualización de su composición química, así como su evolución temporal y espacial. En el área, las aguas subterráneas se diferencian en tres facies hidroquímicas, las que se presentan en el cuadro 7-5, y mostrado en la Figura 8-6. A continuación, se describen:

- La primera facie dominante es sulfatada magnésica cálcica (Mg-SO₄ y Ca-SO₄); dentro de este grupo se encuentran aguas de relave en el depósito de relaves (DR) Quiulacocha y el depósito de desmonte (DDS) Excélsior, los que aportan sales de sulfato. Dentro de este grupo se encuentran los piezómetros y filtraciones en contacto con el DDM y DR con grado de influencia por aguas lixiviadas, los que reportaron sulfato entre 399.3 y 32,832.3 mg/l, magnesio entre 42.2 y 2,746.4 mg/l.

- La segunda facie es bicarbonatada cálcica (Ca - HCO₃), pertenecen a esta facie agua de los conglomerados y areniscas de la Fm. Casapalca, las aguas subterráneas de las calizas del Chambará y los esquistos y filitas del grupo Excélsior. Las aguas subterráneas procedentes del depósito aluvial también pertenecen a este grupo. Las fuentes correspondientes a este grupo se reportaron a los piezómetros M-17, M-11, M-20 y M-19, que reportaron bicarbonato entre 75.21 y 390.6 mg/l, y calcio entre 17.1 y 152.9 mg/l.
- La tercera facie es bicarbonatada sódica (Na - HCO₃); pertenecen a esta facie agua de los conglomerados y areniscas de la Fm. Casapalca, las aguas subterráneas de las calizas del Chambará y las pizarras del Grupo Excélsior. Las fuentes correspondientes a este grupo se reportaron a los piezómetros M-07, M-10, M-13, M-15 y M-21, que reportaron bicarbonato entre 183.9 y 1503.0 mg/l, y calcio entre 6.2 y 249.6 mg/l.

Figura 8-6:

Diagramas Piper de agua subterránea y superficial del depósito de relaves Quiulacocha.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8-5:*Formula iónica para las aguas subterráneas*

Facie	Formula Iónica	Fuente
Sulfatada Magnésica	Mg-Ca - SO ₄	Aguas antiguas en contacto con rocas mineralizadas, aguas lixiviadas.
Cálcicas		
Bicarbonatada -	Ca – HCO ₃	Aguas naturales de acuífero fracturado Casapalca, Excélsior y Chambará.
Cálcica		
Bicarbonatada -	Na - HCO ₃	Aguas naturales de material cuaternario (lacustre y aluvial).
Sódica		

Fuente: *Elaboración propia.*

8.8. Concentración de carga másica

Se elaboró un diagrama de flujo con carga másica, la que se ilustra en la Figura 8-7. Fue elaborado para época seca (junio, 2022) en base al caudal y concentración de los principales elementos con carga iónica más importante, los que proceden desde el Stock Pile Pampa Seca y del depósito de desmonte Excélsior, los que contribuyen a evaluar la concentración de las aguas del depósito de relaves Quiulacocha. Estos se calcularon en base al caudal aforado en junio de 2022 y resultados de laboratorio de estaciones de muestreo en julio de 2022, los que toman en cuenta la abundancia en la concentración de los metales pesados más predominantes:

Sector Stock Pile Pampa Seca: El flujo somero no captado producto de las filtraciones, que migran hacia el depósito de relaves Quiulacocha, tiene un caudal de 0.2 l/s, pH 1.7 y una CE de > 20,000 µS/cm registrado en la estación de muestreo M-28, y su carga másica de Fe (5,932.0 mg/l), Mn (622.6 mg/l), Zn (639.6 mg/l), Al (253.8 mg/l), Cu (68.3 mg/l), As (> 10.0 mg/l), Pb (2.6 mg/l), Cd (1.8 mg/l), Ni (0.4 mg/l) y Co (0.17 mg/l). Las concentraciones altas de los metales corresponden a aguas lixiviadas producto de la filtración desde poza de acumulación.

Sector depósito de desmonte Excélsior: En este sector, los flujos someros procedentes de las filtraciones del depósito de desmonte son captados mediante canales, con dirección hacia el depósito de relaves Quiulacocha, con caudal de 6.3 l/s de flujo diseminado, con pH 5.9 y una CE de 9,860 $\mu\text{S}/\text{cm}$ correspondiente a aguas ligeramente ácidas, registrado en particular en la estación de muestreo M-23 con 0.8 l/s de caudal. Los metales traza más importantes de la filtración son: Fe (2.938 mg/l), Mn (1261.1 mg/l), Zn (181.0 mg/l), As (2.6 mg/l), Pb (0.5 mg/l), Cd (0.3 mg/l), Ni (0.2 mg/l) y Co (0.07 mg/l), los que son productos de la lixiviación de minerales del depósito; estos metales registraron menor concentración referente al Stock Pile Pampa Seca. Sin embargo, los piezómetros M-29 y M-30, lado norte del depósito de desmonte, registraron mayor concentración de metales, entre los principales Fe (3524 a 4158 mg/l), Mn (532 a 966.6 mg/l), Zn (295.8 a 1027.8 mg/l), Al (90.4 a 133.3 mg/l) y Cu (19.2 a 58.1 mg/l); con pH de 1.8 a 2.9 y una CE de 10,710 a 15,480 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

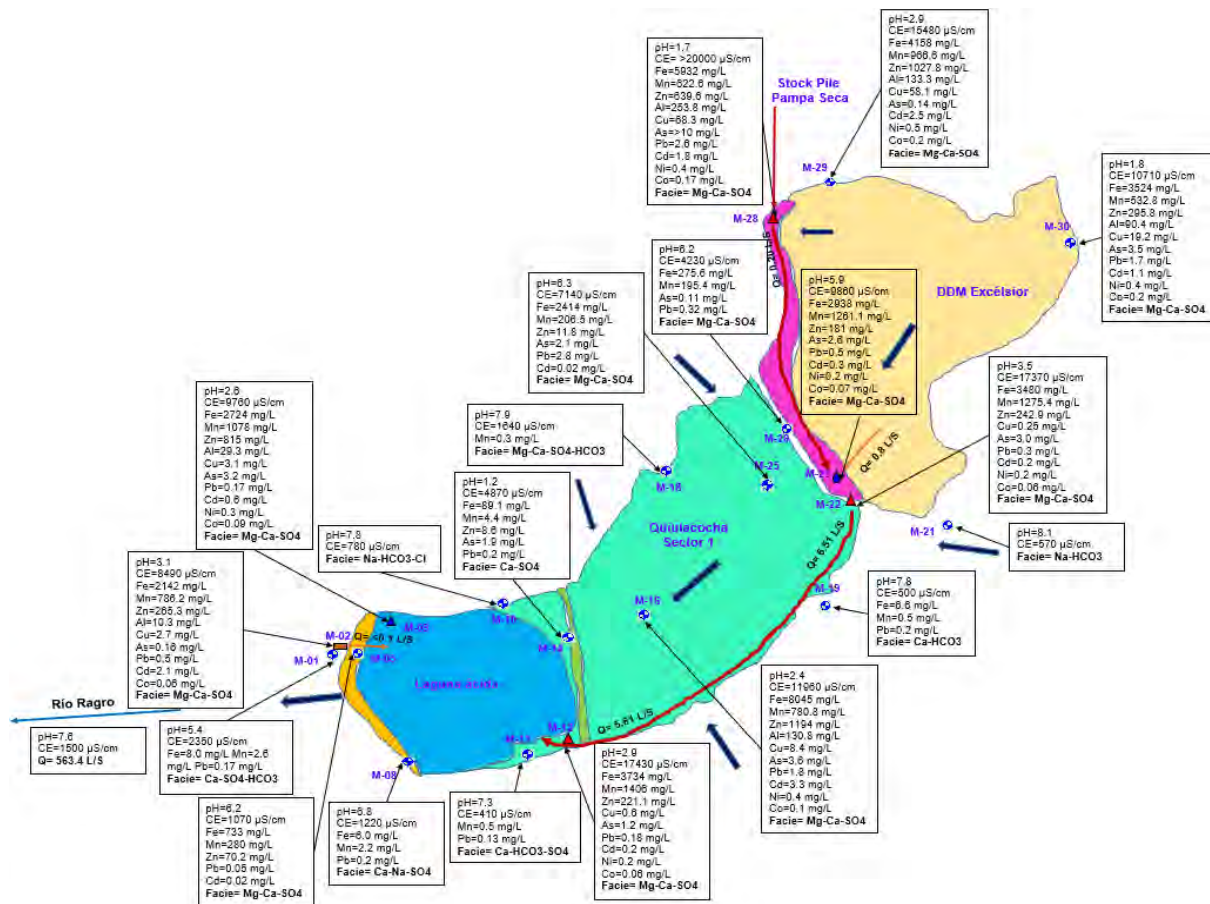
Sector depósito de relaves Quiulacocha: En este sector se acumulan los flujos provenientes del depósito de desmonte Excélsior y Stock Piles Pampa Seca, los que son captados mediante un canal de ingreso que registró 5.8 l/s (vertedero M-12 o V-4) y son aguas ácidas con un pH de 2.9 y CE de 17,430 $\mu\text{S}/\text{cm}$; con metales traza, entre los más abundantes están: Fe (3.734 mg/l), Mn (1.406 mg/l), Zn (221.1 mg/l), Cu (0.6 mg/l), As (1.2 mg/l), Pb (0.18 mg/l), Cd (0.2 mg/l), Ni (0.2 mg/l) y Co (0.06 mg/l). En tanto, la estación M-09, que corresponde a la laguna ácida, registró un pH de 2.6 y CE de 9,760 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con metales traza de Fe (2,724 mg/l), Mn (1,078 mg/l), Zn (815 mg/l), Al (29.3 mg/l), Cu (3.1 mg/l), As (3.2 mg/l), Pb (0.17 mg/l), Cd (0.6 mg/l), Ni (0.3 mg/l) y Co (0.09 mg/l).

Las aguas subterráneas que circulan por el depósito de relaves Quiulacocha, registradas en los piezómetros someros M-16, descargan a la laguna ácida, reporto pH ácido 2.4 y una CE entre

11,960 $\mu\text{S/cm}$, con metales traza de Fe (8,045 mg/l), Mn (780.8 mg/l), Zn (1194 mg/l), Al (130.8 mg/l), Cu (8.4 mg/l), As (3.6 mg/l), Pb (1.8 mg/l), Cd (3.3 mg/l), Ni (0.4 mg/l) y Co (0.1 mg/l). Siendo esta de mayor concentración de metales que las aguas ácidas que drenan a la laguna.

Figura 8-7:

Concentración carga másica depósito de relaves Quiulacocha, con aforo de Julio, 2022.



La figura 8-8 muestra el modelo hidrogeoquímico preliminar, el que fue elaborado en base a las investigaciones de campo y estudios hidrogeológicos precedentes, donde se utilizó para su interpretación los sondeos someros ejecutados, además de los resultados de laboratorio, el cual muestra facies de agua para cada unidad hidrogeológica, así como su contenido de sales

expresados en total de sólidos disueltos (TDS), también la presencia de trazas y sus posibles relaciones durante su flujo en el subsuelo del depósito de relaves Quiulacocha.

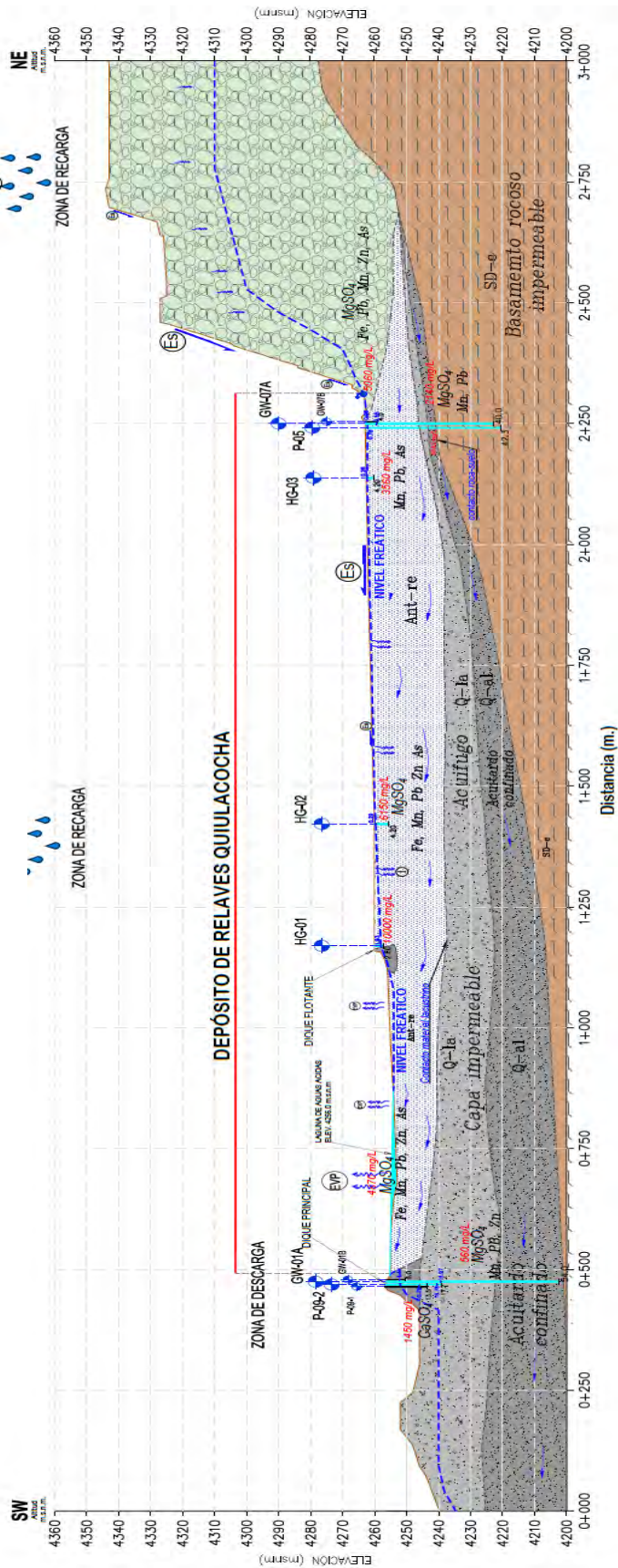
De acuerdo a los estudios geoquímicos realizados en 2022, se ha diferenciado tres (03) sectores (al pie del depósito de desmontes Excélsior, dique flotante y poza de subdrenaje) en el depósito de relaves, todas las aguas de tipo “sulfatada magnésica-cálcica”, las que se detallan a continuación:

- Sector 1. Relaves ubicados aguas arriba del dique flotante: Esta zona se caracteriza por poseer relaves ricos en Zn-Pb y poseer agua subterránea con sales disueltas con alta concentración en Fe, Mn y Zn.
- Sector 2. Relaves ubicados aguas abajo del dique flotante: Zona caracterizada por relaves ricos en Cu-As y por poseer espejo de agua ácida sobrenadante, rica en concentración de metales: Fe, Mn, Zn y As.
- Sector 3. Este sector está conformado por las filtraciones del Stock Pile Pampa Seca, que es rica en Fe Zn y Mn, y las aguas procedentes del depósito de desmonte Excélsior tienen aguas concentradas en Fe, Mn y Zn.

Sin embargo, debajo del depósito de relaves Quiulacocha, en el nivel profundo, las aguas subterráneas son “bicarbonatada cálcica”, provenientes de las filitas y pizarras de grupo Excélsior; aguas abajo del dique flotante, las aguas son de tipo “sulfatado cálcica”, posiblemente por ligera influencia del depósito de relaves, lo que indica una leve interconexión con las aguas de relave.

Figura 8-8:

Modelo hidrogeoquímico conceptual del depósito de relaves Quiulacocha



CAPÍTULO IX: MODELACIÓN NUMÉRICA SUBTERRÁNEA

El presente capítulo desarrolla la modelación numérica del flujo de agua subterránea en el área de estudio, con el objetivo de representar de manera cuantitativa el comportamiento hidrogeológico del sistema del depósito de relaves Quiulacocha. Esta etapa constituye la síntesis de la información hidrogeológica e hidroquímica previamente caracterizada, integrando la distribución de unidades hidrogeológicas, niveles piezométricos, parámetros hidráulicos y condiciones de recarga y descarga.

En este sentido, la modelación numérica permite cumplir directamente con el Objetivo Específico 4, al simular el flujo subterráneo y la posible migración de contaminantes dentro del área de influencia del depósito de relaves. Asimismo, contribuye al Objetivo Específico 3, al validar el modelo hidrogeológico conceptual mediante la representación matemática del sistema. Finalmente, los resultados obtenidos constituyen un insumo clave para el Objetivo Específico 5, al sustentar la evaluación de escenarios de cierre del depósito de relaves Quiulacocha.

De esta manera, el modelo numérico no solo permite simular el comportamiento del sistema hidrogeológico, sino también analizar la interacción entre el depósito de relaves y el medio subterráneo, estimando condiciones de flujo, gradientes hidráulicos y zonas potenciales de transporte de contaminantes, lo cual es fundamental para la toma de decisiones en el diseño del plan de cierre.

Asimismo, la modelación permite simular el flujo subterráneo, evaluar la interacción entre el depósito de relaves y el sistema hidrogeológico, y estimar escenarios de filtración y transporte de contaminantes, constituyendo una herramienta fundamental para la validación del modelo conceptual y el análisis de escenarios de cierre del depósito.

En conclusión, la modelación numérica del flujo subterráneo permite representar de manera cuantitativa el comportamiento hidrogeológico del sistema asociado al depósito de relaves Quiulacocha, integrando las condiciones hidráulicas, hidrogeológicas e hidroquímicas previamente caracterizadas. Los resultados obtenidos evidencian la interacción entre el depósito de relaves y el medio subterráneo, así como la distribución de gradientes hidráulicos y direcciones preferenciales de flujo dentro del sistema.

9.1. Elaboración del modelo numérico

Se elaboró un modelo numérico de flujo subterráneo para analizar el comportamiento hidrogeológico del área del depósito de relaves Quiulacocha y su zona de cierre. Este modelo se basa en el modelo hidrogeológico conceptual previamente desarrollado en el capítulo VII, el cual define los escenarios físicos y las condiciones del subsuelo en el área de estudio.

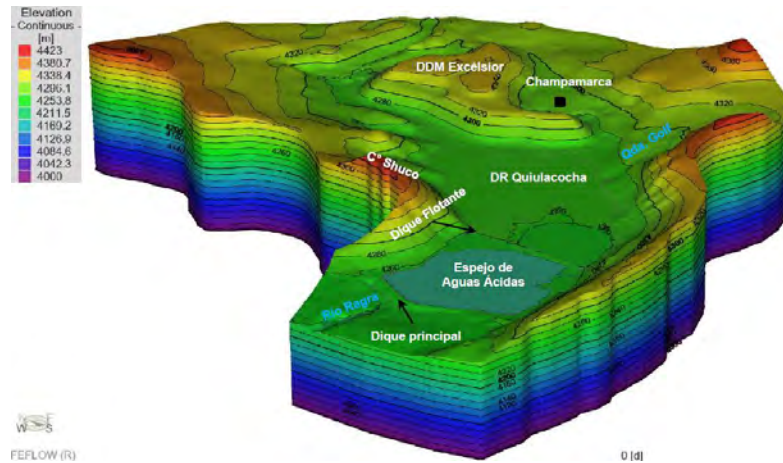
El modelo numérico se construyó utilizando el software FEFLOW 7.5, desarrollado por el Instituto WASY en Alemania (Diersch, 2005). Este software emplea ecuaciones de elementos finitos, lo que permite simular tanto el flujo de agua subterránea como el transporte de contaminantes en medios heterogéneos y tridimensionales. Su capacidad para modelar medios anisotrópicos y fracturados resulta crucial debido a la compleja geología de la zona. La malla del modelo es adaptable y ajusta su resolución para representar de manera precisa las características del subsuelo.

En el modelo, la capa superior representa la topografía del área, mientras que la base se establece a una altitud de 4000 msnm, ver figura 9-1. Este enfoque facilita la evaluación de la tasa de filtraciones y la posible convergencia de los flujos subterráneos en el área del depósito de

relaves, proporcionando una base sólida para el análisis y la toma de decisiones en el manejo del área.

Figura 9-1:

Construcción básica del modelo tridimensional.

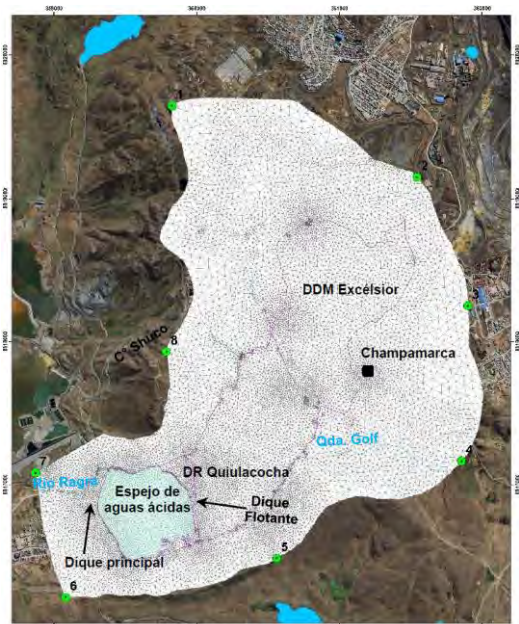


9.1.1. Dominio del modelo

El modelo se referenció en coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator WGS-84 Zona 18 Sur), restringiendo su dominio al máximo potencial de influencia hidráulica y direcciones de flujo de agua subterránea, que ocurrirá durante el cierre del depósito de relaves Quiulacocha, según la figura 9-2.

Figura 9-2:

Dominio del modelo



9.1.2. Hidroestratigrafía y parámetros del modelo

Para conceptualizar las capas geológicas, se revisó la geología cartografiada en campo, la que define la estratigrafía local del área modelada. Se conformaron diez (10) unidades estratigráficas discretizadas en 25 capas. Siguiendo el modelo hidrogeológico conceptual y la geología previamente definida, se generó el sólido con la topografía, seguido por los estratos que se construyeron desde abajo hacia la superficie en orden cronológico. (ver tabla 9-1 y figura 9-3.

Tabla 9-1:

Capas asignadas al dominio discretizado.

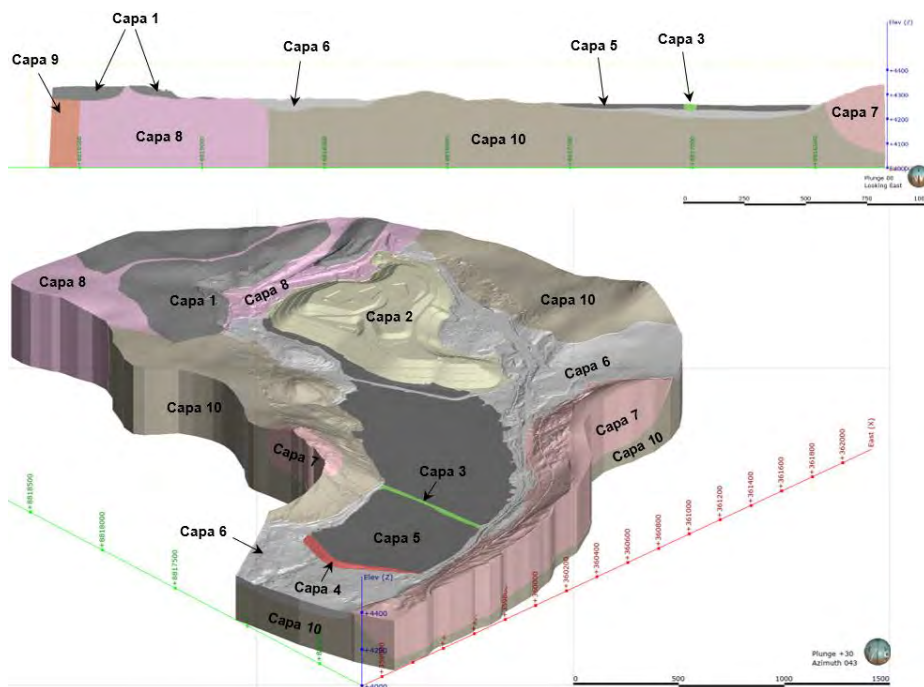
Capas	Litología	Descripción
Capa 1	Depósitos antrópicos (desmontes antiguos)	Material excedente de mina.
Capa 2	Depósitos antrópicos (DDM Excelsior)	Material excedente de mina.
Capa 3	Depósitos antrópicos (dique Flotante)	Gravas arcillosas con niveles de arcilla y limos con gravas.
Capa 4	Depósitos antrópicos (dique Principal)	Gravas arcillosas y limos con grava.

Capa 5	Depósitos antrópicos (relaves)	Compuesto de materiales limos arenosos y limos arcillosos saturados.
Capa 6	Depósitos Aluviales	Compuesto por materiales inconsolidados, gravas redondeadas, arenas arcillosas y lentes de arcillas.
Capa 7	Fm. Casapalca	Conglomerado calcáreo y arcilloso.
Capa 8	Intrusivo (monzonita, dacita, andesita)	Monzonita, dacita y andesita.
Capa 9	Volcánico Rumiallana	
Capa 10	Grupo Excelsior	Pizarras y filitas con alternancia de areniscas.

Fuente: *Elaboración propia.*

Figura 9-3:

Capas generadas para el modelo numérico.



9.1.3. Malla y discretización vertical

El área horizontal del modelo tiene extensión de 6.60 km², la malla elaborada para la calibración refleja las condiciones actuales, compuesta por 678,375 elementos triangulares

(prismas) y 357,890 nodos. El dominio se dividió en 25 layers y 26 slices, asignados a las 10 capas de las unidades estratigráficas ilustradas en la figura 2-4; los elementos por capas son 27,135 y 13,765 nodos por slices (ver tablas 9-2 y 9-3).

Tabla 9-2:

Características de la malla del modelo numérico

Ítems	Valores
Área (km ²)	6.60
Perímetro (km)	11.49
Tipo de elemento	Prismas triangulares
Elementos por malla	678,375
Nodos por malla	357,890
Elementos por layer	27,135
Nodos por slice	13,765
Número de layer	25
Número de slice	26

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 9-3:

Coordenadas de origen y geometría del dominio.

Coordenadas de origen	Valores
Este	356973.54
Norte	8815781.48
Ancho	3141.28
Largo	3494.94
Profundidad	423

Fuente: *Elaboración propia.*

9.1.4. Calidad de malla

La malla generada posee dos indicadores de la calidad, la que informa sobre la estabilidad y la distribución de ángulos en los triángulos de la malla, lo que no debe tener ángulos muy

obtusos, pues generaría problemas numéricos durante la simulación y la no convergencia; los ángulos deben estar próximos a 60° para una adecuada consistencia, ver tabla 9-4.

Tabla 9-4:

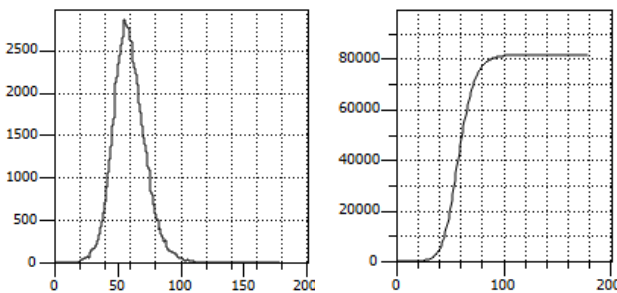
Características de la malla y valor de ajuste

Calidad de malla	Valores
Triángulos con ángulos obtusos	0.0% > 120°, 5.3% > 90°
Delaunay violating triangles	0.0%

Fuente: *Elaboración propia.*

Gráfico 9-1:

Calidad de la malla.



9.1.5. Condiciones de borde asignados

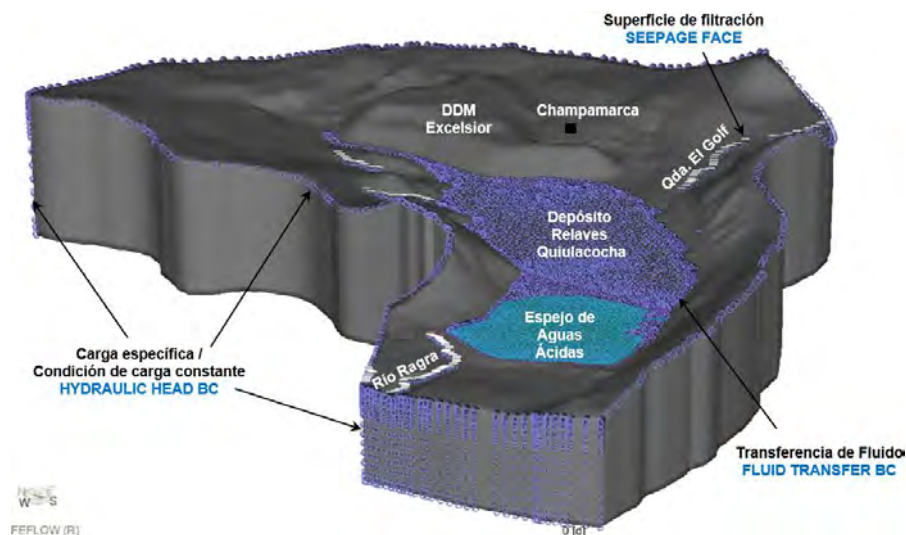
Se asignaron condiciones de borde de **carga específica fija (Hydraulic Head BC, tipo 1)** en los límites laterales del modelo (**Este y Oeste**), basadas en la distribución de la carga hidráulica del sistema subterráneo. Esta carga hidráulica se determinó utilizando el modelo de elevación digital del terreno y la conceptualización hidrogeológica del área de estudio. Estas condiciones de borde reflejan el nivel piezométrico, que representa la altura de la carga hidráulica del agua subterránea en cada nodo. De este modo, los límites del modelo se definen en función de la piezometría observada, permitiendo simular con precisión las entradas y salidas del sistema

hidrogeológico, asegurando que el comportamiento del sistema sea representado de manera fiel a las condiciones reales.

Para los cursos de agua permanentes, como el río Ragra y la quebrada El Golf, se definió una condición de borde tipo **superficie de filtración (seepage face)** sobre la superficie superior del modelo. Esta condición permite simular la interacción dinámica entre el nivel freático y el cauce, activándose únicamente cuando la carga hidráulica del acuífero supera la elevación del lecho del río, representando de manera más realista los procesos de descarga hacia el sistema fluvial. Además, esta misma condición de borde se asignó en casos específicos para representar el drenaje de agua desde el medio subterráneo hacia las aguas superficiales, simulando de manera efectiva el proceso de descarga de agua subterránea hacia otras áreas, como drenajes y cuerpos de agua superficiales.

Figura 9-4:

Condiciones de borde para el modelo 3D



9.1.6. Conductividad hidráulica

El rango de conductividades hidráulicas obtenidas en las investigaciones mediante sondeos, cuyos valores se ajustaron al modelo numérico, se resume en la tabla 9-5 y figura 9-5.

Figura 9-5:

Distribución espacial de la conductividad hidráulica.

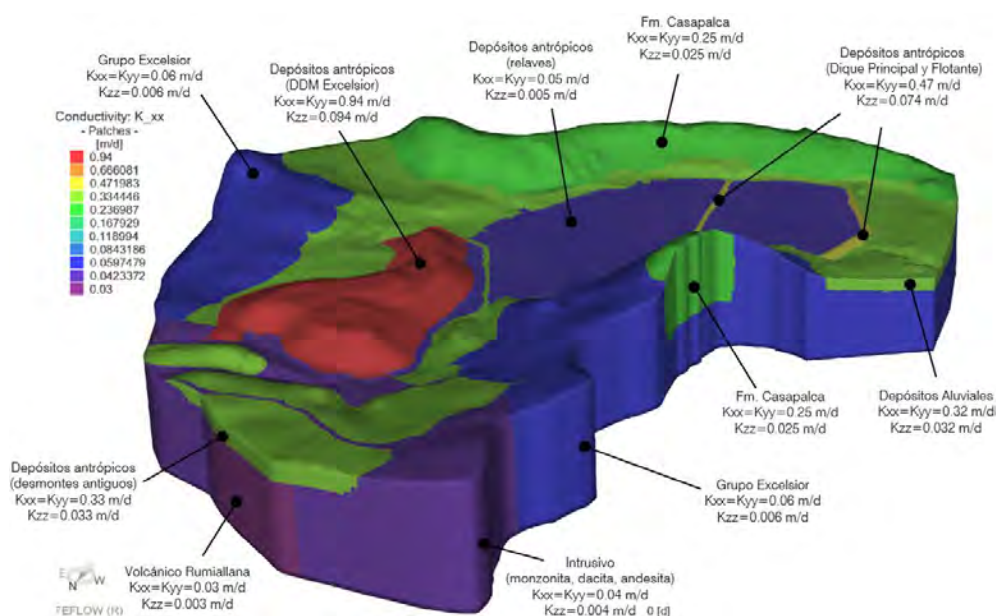


Tabla 9-5:

Conductividades hidráulicas calibradas.

N°	Material / Litología	k [cm/s]	k [m/d]	m/s* (k=10 ⁻⁴)	Kh/Kv	Dirección (°)
01	Depósitos antrópicos (desmontes antiguos)	3.78E-04	0.33	3.78E-02	1:10	0
02	Depósitos antrópicos (DDM Excelsior)	1.09E-03	0.94	1.09E-01	1:10	0
03	Depósitos antrópicos (Dique principal y flotante)	5.39E-04	0.47	5.39E-02	1:10	0
04	Depósitos antrópicos (relaves)	6.20E-05	0.05	6.20E-03	1:10	0

05	Depósitos Aluviales	3.66E-04	0.32	3.66E-02	1:10	0
06	Fm. Casapalca	2.89E-04	0.25	2.89E-02	1:10	0
07	Intrusivo (Monzonita, dacita, andesita)	4.51E-05	0.04	4.51E-03	1:10	0
08	Volcánico Rumiallana	3.78E-05	0.03	3.78E-03	1:10	0
09	Grupo Excelsior	6.37E-05	0.06	6.37E-03	1:10	0

Fuente: *Elaboración propia.*

9.1.7. Recarga asignada al modelo

Se emplearon condiciones de borde de **flujo específico** para asignar la recarga al sistema de flujo de agua subterránea, proveniente de las precipitaciones. Las tasas de recarga fueron distribuidas a lo largo del modelo de acuerdo con las unidades hidrogeológicas aflorantes en la superficie, tomando en cuenta la naturaleza de los materiales en superficie, la topografía, la geología y las variaciones en los niveles subterráneos. Además, se incorporaron las características hidráulicas calculadas para cada unidad hidrogeológica.

Las tasas de recarga asignadas varían entre 10.37 mm/año y 249.38 mm/año, según las características de cada unidad. Estas unidades hidrogeológicas y sus respectivas tasas de recarga fueron representadas en el modelo numérico, tal como se ilustra en la figura 9-6 y se muestra en la tabla 9-6.

Figura 9-6:

Distribución espacial de la recarga.

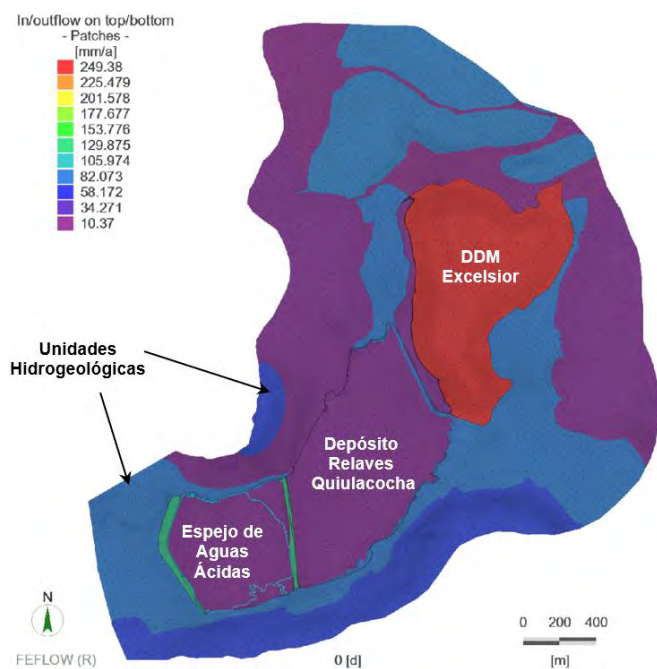


Tabla 9-6:

Valores de recarga asignado en el modelo numérico.

Unidades Hidrogeológicas	Recarga (mm/año)	Recarga (m/día)	Recarga *10 ⁻⁴ (m/día)
Desmontes antiguos	86.90	2.40E-04	2.4
Desmonte Excelsior	249.38	6.80E-04	6.8
Dique principal y flotante	123.87	3.40E-04	3.4
Relave	14.26	3.90E-05	0.4
Depósito Aluvial	84.00	2.30E-04	2.3
Fm. Casapalca	66.48	1.80E-04	1.8
Intrusivo (Monzonita, dacita, andesita)	10.37	2.80E-05	0.3
Grupo Excelsior	14.65	4.00E-05	0.4

Fuente: *Elaboración propia.*

9.2. Calibración del modelo numérico

La calibración del modelo numérico consistió en ajustar las tasas de recarga y las conductividades hidráulicas para que los resultados fueran compatibles con los niveles de

subterránea simulados, comparándolos con los datos de 34 fuentes de monitoreo (30 piezómetros, 2 bocaminas, 1 manantial y 1 filtración).

9.2.1. Calibración en régimen estacionario

La calibración en régimen estacionario consiste en resolver la ecuación de flujo sin considerar el factor tiempo, ajustando únicamente los parámetros de entrada, como conductividad hidráulica, recarga y flujo base. Este proceso valida el modelo hidrogeológico conceptual. Para verificar la precisión de la calibración, se compararon los resultados del modelo con los niveles de agua subterránea observados en 34 puntos de monitoreo (piezómetros y otras fuentes), como se detalla en la tabla 9-7.

Tabla 9-7:

Estadística de cargas hidráulicas observadas y calculadas.

N°	f _m measured head(msn)	f _c calculated head(msn)	Ri (f _m -f _c)	Ri	Ri ^2	Fuente	Código
1	4277	4278	-0.93	0.93	0.859	Piezómetro	CAZ- CHAMP
2	4242	4242	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	GW-01B
3	4249	4250	-0.56	0.56	0.309	Piezómetro	GW-02B
4	4256	4256	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	GW-03B
5	4257	4257	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	GW-04B
6	4262	4262	-0.22	0.22	0.047	Piezómetro	GW-06B
7	4264	4264	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	GW-07B
8	4267	4267	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	GW-08
9	4277	4278	-0.99	0.99	0.986	Piezómetro	GW-09
10	4263	4263	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	GW-10
11	4258	4259	-1.60	1.60	2.576	Piezómetro	GW-11B
12	4258	4258	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	HG-01
13	4260	4260	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	HG-02
14	4262	4262	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	HG-03
15	4264	4264	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	HG-04
16	4272	4272	0.09	0.09	0.008	Piezómetro	P-01
17	4264	4264	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	P-02

18	4272	4274	-1.31	1.31	1.704	Piezómetro	P-03
19	4255	4255	-0.25	0.25	0.065	Piezómetro	P-04-B
20	4263	4263	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	P-06
21	4241	4243	-1.77	1.77	3.125	Piezómetro	P-09-1
22	4287	4284	2.75	2.75	7.559	Piezómetro	P-12
23	4277	4277	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	P-14
24	4266	4266	0.10	0.10	0.011	Piezómetro	P-15
25	4240	4242	-1.67	1.67	2.790	Piezómetro	P-17
26	4240	4242	-1.80	1.80	3.257	Piezómetro	P-18
27	4258	4258	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	P-NN1
28	4272	4273	-1.10	1.10	1.207	Piezómetro	PM-06-
29	4262	4263	-1.35	1.35	1.821	Piezómetro	GW-05B
30	4260	4260	0.00	0.00	0.000	Piezómetro	P3-B
31	4282	4282	0.00	0.00	0.000	Bocamina	F-02
32	4279	4279	0.00	0.00	0.000	Bocamina	F-03
33	4282	4282	0.00	0.00	0.000	Manantial	F-04
34	4263	4263	0.00	0.00	0.000	Filtración	F-05
Diferencia	46.7	42.3					
Máximo	4286.7	4283.9	*	34	34	N	
Mínimo	4240.0	4241.7	**	16.4	26.32	Total	
Media absoluta				0.48			
Error medio cuadrático				0.88			
RMS Normalizado %				1.88			

Fuente: *Elaboración propia.*

Nota: * número de puntos de observación; ** Suma de residuos absolutos y residuos absolutos cuadrados

El error cuadrático medio (RMS) fue de 0.88, lo que indica una calibración eficaz en todo el modelo (RMS <10). Este valor se considera generalmente como un “**objetivo aceptable**” en la calibración de los modelos de agua subterránea.

Gráfico 9-2:

Diagrama de cargas observadas vs. calibradas del modelo.

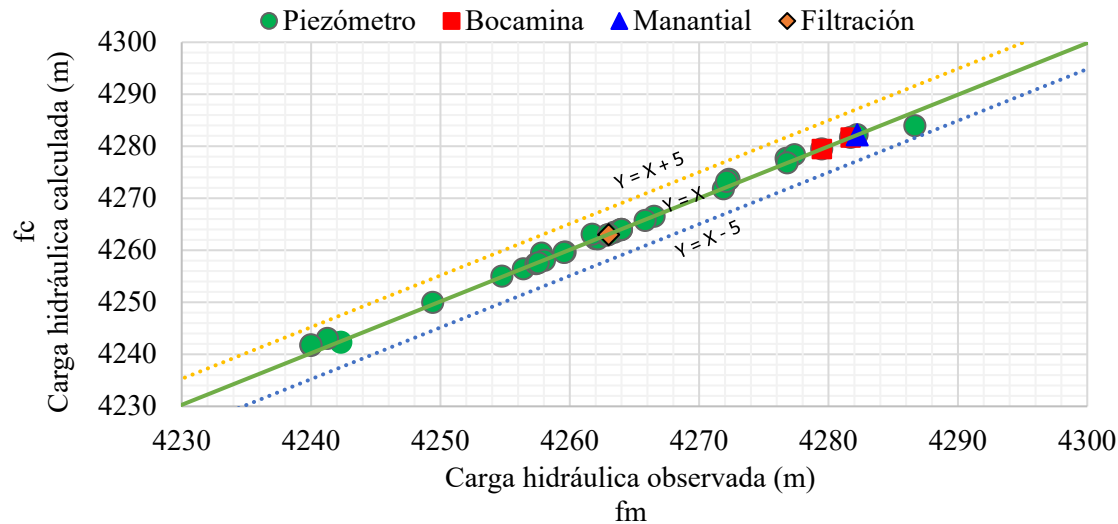
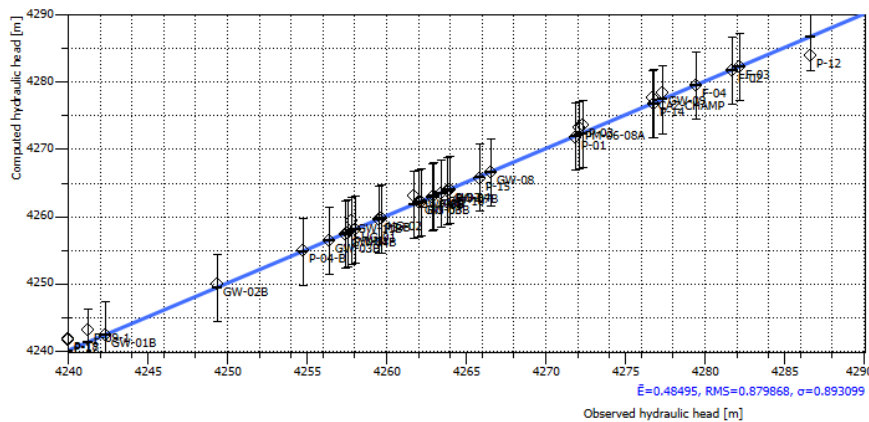


Gráfico 9-3:

Diagrama de cargas observadas vs. calibradas propios del modelo.



Según la recta de calibración mostrada en los gráficos 9-2 y 9-3, se presentan los valores analíticos de los 34 puntos de control indicados en la tabla 9-7. Para ajustar la calibración del modelo numérico, se utilizó el error cuadrático medio (RMS), que resultó en un valor de 0.88, lo cual es considerado aceptable para los cálculos al comparar la carga hidráulica observada con la calculada.

9.2.2. Niveles de agua subterránea simuladas

Las figuras 9-7 y 9-8 muestran los contornos de nivel de agua subterránea simulados por el modelo numérico calibrado en régimen estacionario, con cargas hidráulicas varían entre 4229 y 4390 m.s.n.m., ajustándose a las condiciones del terreno.

9.2.2.1. Flujo de agua subterránea simulada

Los flujos subterráneos se dirigen hacia el río Ragra, con menor velocidad en las margas de la Fm. Casapalca debido a su baja conductividad hidráulica (como se muestra en las figuras 9-7 y 9-8). A continuación, se describe la dinámica del flujo subterráneo simulado:

El modelo numérico se simuló en condición “**no saturada**”, utilizando la ecuación de Richards, ya que el depósito de relaves se encuentra en un terreno de baja permeabilidad y casi impermeable, con un nivel freático profundo y uno más superficial en los meses húmedos, limitado a la zona alterada y ligeramente fracturada del subsuelo.

El flujo subterráneo se simula con mayor velocidad en sedimentos con alta conductividad hidráulica (suelos antrópicos, aluviales y desmonte), y menor velocidad en las margas de la Fm. Casapalca, los intrusivos y los materiales volcánicos Rumiallana. Los flujos verticales son casi nulos en el basamento rocoso de baja permeabilidad debido a la disminución de la conductividad hidráulica con la profundidad.

Figura 9-7:

Niveles piezométricos simulados.

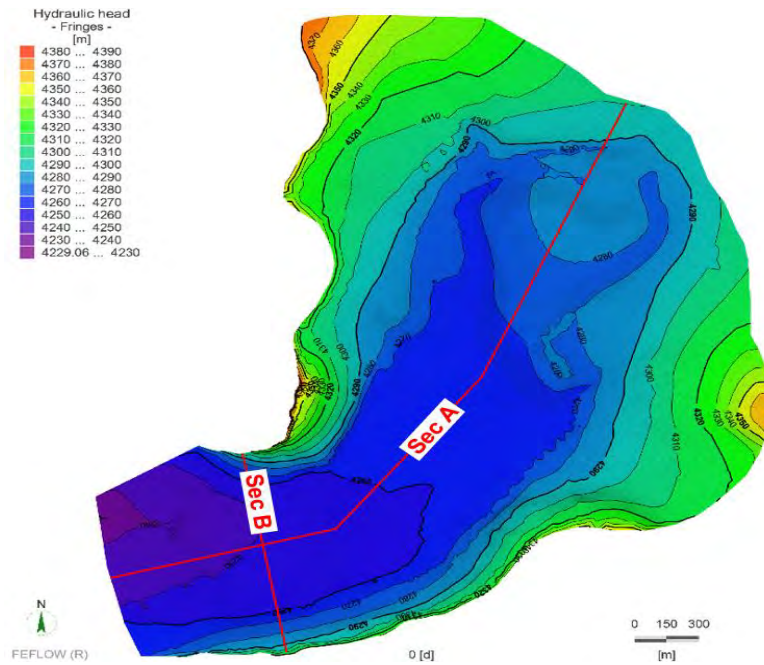
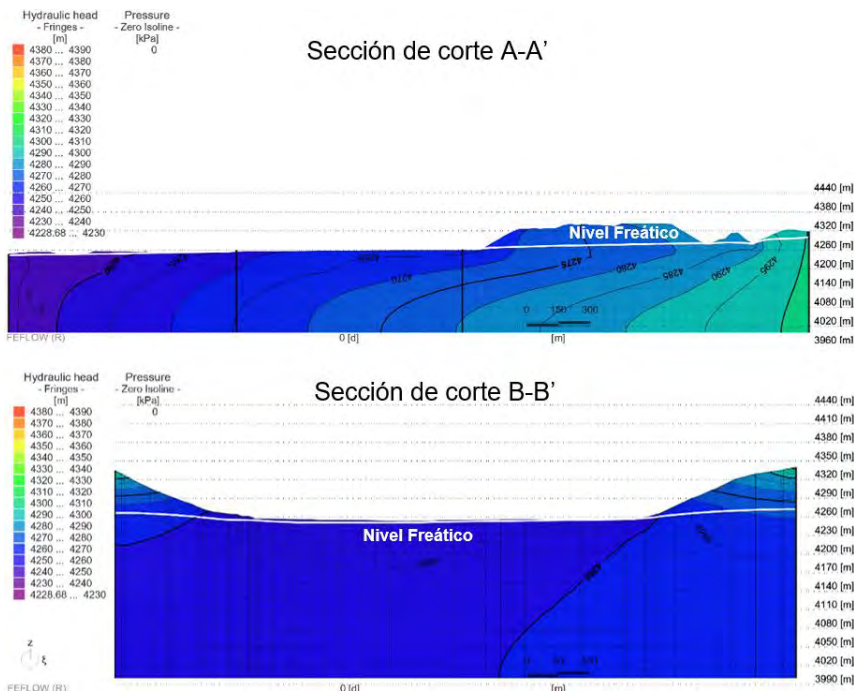


Figura 9-8:

Sección longitudinal (A) y transversal (B) con piezometría simulada en régimen estacionario.



9.2.3. Balance de masas

Un control complementario para validar la calibración del modelo en régimen estacionario es el error de balance de masa, que representa la diferencia entre las entradas y salidas de agua subterránea calculadas por el modelo. Según la tabla 9-8, el modelo calibrado presenta error de balance de masa menor a 0.1% de la recarga (14.60 l/s), lo que refleja la robustez y buena estabilidad del modelo numérico.

Tabla 9-8:

Balance de masa del modelo calibrado.

Variables	Tipo de flujo	Flujo de entrada (+)	Flujo de salida (-)	Flujo de entrada (+)	Flujo de salida (-)
		[m ³ /d]		[l/s]	
Condiciones de Borde	Dirichlet BCs - 1° orden	12466.00	13727.59	158.88	144.28
	Neumann BCs - 2° orden				
	Cauchy BCs - 3° orden	2.73E-04	3.50E-04	4.06E-06	3.16E-06
	Wells - 4° orden	--	--	--	--
Recarga	Distributed Sink (-) /source	1261.50	--	14.601	--
Almacenamiento	Storage capture (-)	--	--	--	--
	/Release (+)				
Déficit	Imbalance	0.0915	--	0.00106	--
Total, Entradas/ Salidas		13727.59	13727.59	158.88	158.88
Diferencia Entradas/ Salidas		0.00		0.00	

Fuente: *Elaboración propia.*

Nota: *No intervienen en el balance de masas.*

Al modelo numérico de flujo subterráneo se le asigna una recarga directa de 14.60 l/s (lámina media anual), mientras que los flujos laterales totales de entradas y salidas alcanzan un máximo de 158.88 l/s. El balance muestra un déficit o imbalance de 1.06E-03 l/s.

Los flujos de entrada y salida del sistema hidrogeológico se discretizan por zonas, con un aporte lateral total de 128.06 l/s y 12.30 l/s, drenaje de escorrentía del río Ragra de 3.02 l/s y 8.17 l/s, respectivamente, y un flujo de salida del drenaje profundo desde el depósito de relaves de 24.08 l/s. Estos valores se detallan en la tabla 9-9 y la figura 9-9.

Tabla 9-9:

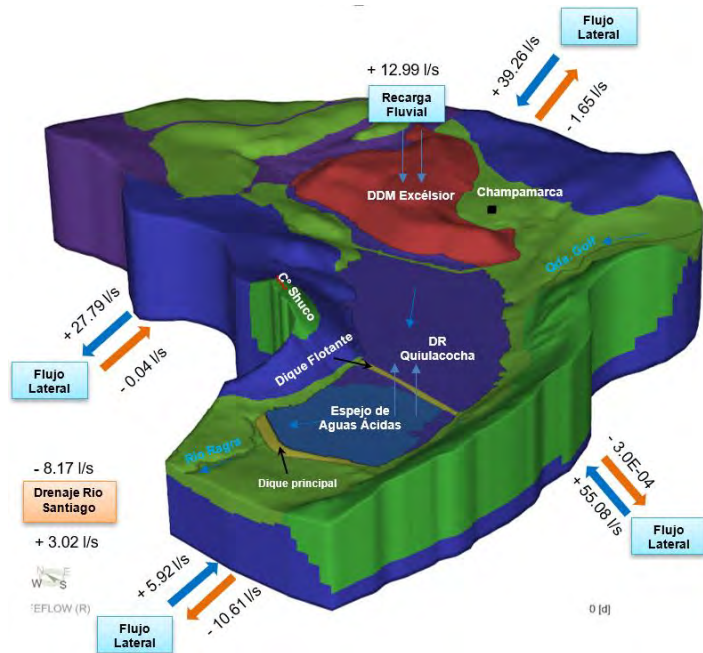
Balance de agua subterránea del modelo.

Zonas de aporte	Flujo de entrada	Flujo de salida
	(+ l/s)	(- l/s)
Flujo lateral N	39.26	1.65
Flujo lateral S	5.92	10.61
Flujo lateral W	27.79	0.04
Flujo lateral E	55.08	0.0003
Drenaje río Ragra	3.02	8.17
Flujo profundo	12.91	114.33
DR Quiulacocha	0.29	24.08
Recarga	14.6	--
Total	158.88	158.88

Fuente: Elaboración propia.

Figura 9-9:

Representación de la distribución de las aguas: entradas y salidas y flujos superficiales y subterráneos del sistema hidrogeológico.



9.2.4. Flujo y velocidad subterránea simulada

El flujo subterráneo está controlado por la litología y fracturas estructurales. Su velocidad es más baja en las rocas de la Fm. Casapalca, Grupo Excelsior e intrusivos debido a su baja conductividad hidráulica, y más alta en los depósitos aluviales. La dinámica de flujo simulado por el modelo se resume a continuación:

- El modelo simula flujos con mayor velocidad en los estratos aluviales y desmontes de mina.
- La velocidad de flujo en el basamento rocoso disminuye con la profundidad, litología y conductividad hidráulica, siendo en promedio $4.4\text{E-}05$ m/d y 0.41 m/d.
- El flujo en las condiciones actuales tiene una dirección preferente NE a SW como eje principal.

9.2.5. Pronósticos del modelo numérico de flujo subterráneo.

9.2.5.1. Caso base

Los resultados del modelo numérico de aguas subterráneas coinciden con las características del modelo hidrogeológico conceptual para la construcción del depósito de relaves Quiulacocha. Las tasas de filtración en el lecho rocoso subyacente son relativamente bajas, pero podrían incrementarse en los depósitos cuaternarios.

9.2.5.2. Análisis de sensibilidad

Se realizaron simulaciones en régimen estacionario utilizando datos de campo de marzo de 2022 para evaluar la respuesta del modelo a variaciones en los parámetros específicos y verificar su calibración para su uso como herramienta predictiva. Se simularon los siguientes escenarios de sensibilidad:

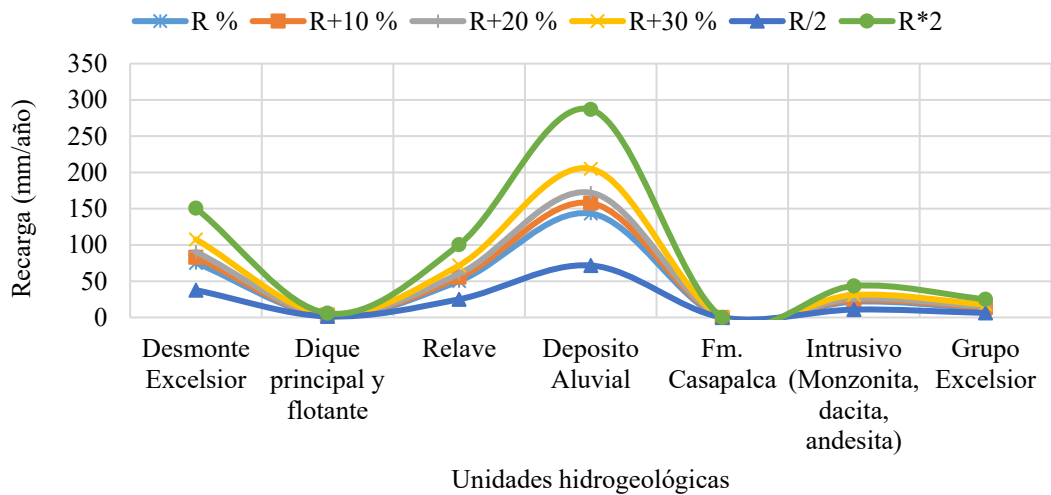
Caso I: Variaciones en la tasa de recarga.

- La tasa de recarga mostró poca variabilidad en el modelo numérico, ya que depende de las rocas de baja permeabilidad y de su área de aporte.
- Se simularon los siguientes escenarios: la recarga duplicada, reducida a la mitad, y aumentada en un 10%, 20% y 30%.

Las simulaciones indicaron que la recarga tiene poca influencia en el área; el RMS que osciló entre 0.89 y 0.88 en los diferentes escenarios.

Gráfico 9-4:

Variaciones de la recarga.



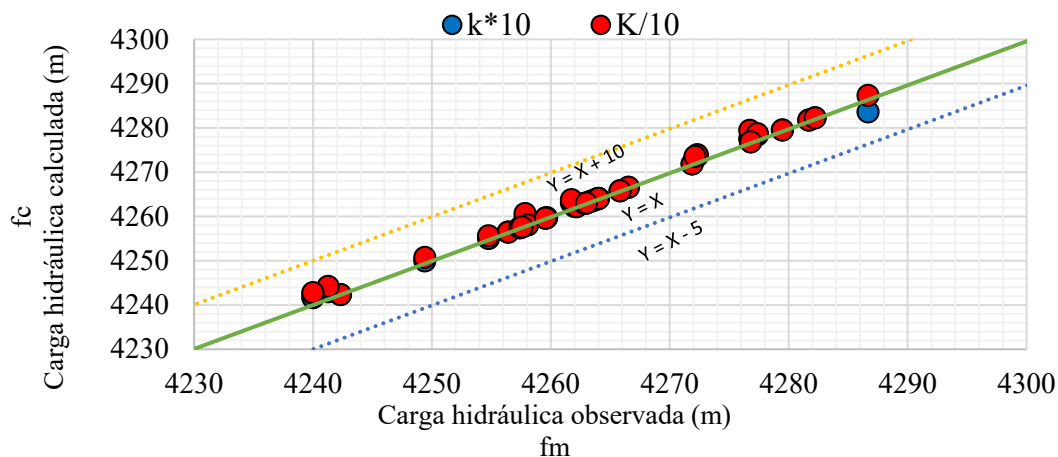
Caso II: Variaciones de las conductividades hidráulicas por orden de magnitud.

- Las corrientes de descarga hacia el río Ragra y las quebradas se vieron afectadas.
- El RMS varió entre 0.88 y 1.22 con la conductividad hidráulica modificada por 10 y entre 10, respectivamente.

El modelo muestra una alta sensibilidad a cambios en la conductividad hidráulica, especialmente cuando los factores cambian de un orden o más.

Gráfico 9-5:

Variaciones de las conductividades hidráulicas en un orden de magnitud.

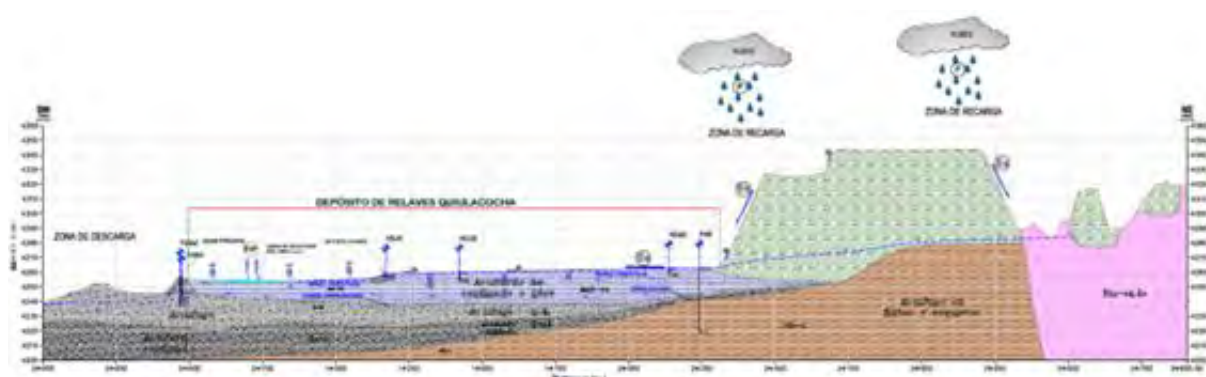


9.2.6. Filtraciones estimadas para el cierre del depósito de relaves Quiulacocha.

El modelo numérico se construyó según el diseño de WSP 2022, incorporando la geometría actual del depósito de relaves Quiulacocha para su simulación, la cual se presenta en la figura 9-10.

Figura 9-10:

Representación de la ingeniería del depósito de relaves en el modelo.



Fuente: WSP, 2022.

Las filtraciones del depósito de relaves Quiulacocha, en su condición actual, varían entre un caudal mínimo y máximo. Para la zona del dique principal, las filtraciones oscilan entre 0.9 y 3.0 l/s, similar a lo observado en campo, donde el caudal varía entre 0.6 l/s (época seca) y 2.4 l/s (época húmeda). En toda la base del depósito, el caudal podría alcanzar hasta 8.1 l/s. Estos datos se presentan en la tabla 9-10.

Tabla 9-10:

Filtraciones depósito de relaves Quiulacocha

Etapla del proyecto	Lugar	Predicción de filtraciones (l/s)		
		Mínimo	Promedio	Máximo
Actual	Dique principal	0.9	1.95	3.0
	DR Quiulacocha	2.4	5.24	8.1

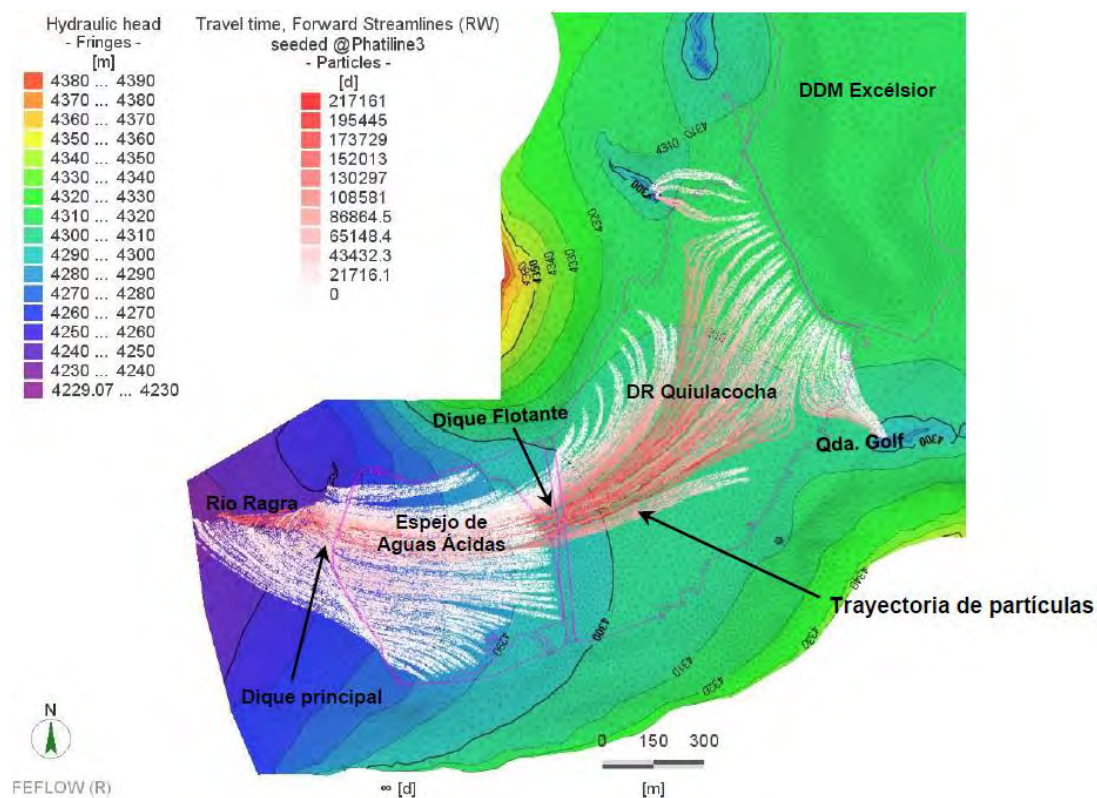
Fuente: *Elaboración propia.*

9.2.7. Trayectorias de flujo (Pathlines)

Las trayectorias de partículas representan las líneas de flujo subterráneo simuladas, trazadas dentro del depósito de relaves Quiulacocha. La figura 9-11 ilustra estas trayectorias, confirmando que las principales direcciones de flujo se dirigen hacia el río Ragra, en el escenario simulado.

Figura 9-11:

Pathlines para el área del depósito de relaves Quiulacocha.



9.2.8. Transporte de la pluma de contaminación

Se simuló el modelo de transporte de contaminantes en un escenario de 7300 días (20 años), considerando la concentración inicial de 0.17 mg/l del ion plomo en el depósito de relaves Quiulacocha. El modelo simula el comportamiento de la pluma de contaminación durante el cierre del depósito.

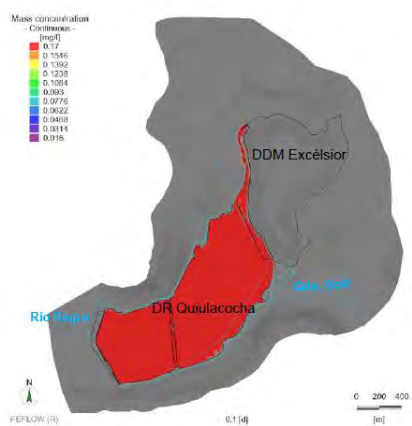
Se prevé que el riesgo de migración tendrá muy baja probabilidad de ocurrencia, debido a que la migración será muy lenta a largo plazo; ocurriendo principalmente durante la temporada húmeda cuando el terreno esté saturado. Se tomará medidas para evitar la migración mediante el control de aguas pluviales, tanto aguas arriba como en los laterales del sistema. Las escasas filtraciones iniciales serán drenadas hacia una poza colectora, donde se almacenarán y luego se enviará a la planta de tratamiento de aguas residuales industriales.

En la figura 9-12, se muestra la concentración del soluto en color rojo y el área sin concentración en color plomo. Se observa la salida del soluto desde el depósito de relaves Quiulacocha, con migración inicial a corto plazo (10 años) y mediano plazo (20 años), dirigiéndose hacia el drenaje del río Ragra y pequeñas quebradas.

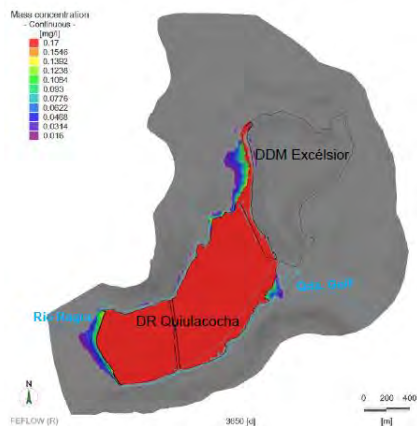
Figura 9-12:

Escenario de transporte de contaminantes (Pb).

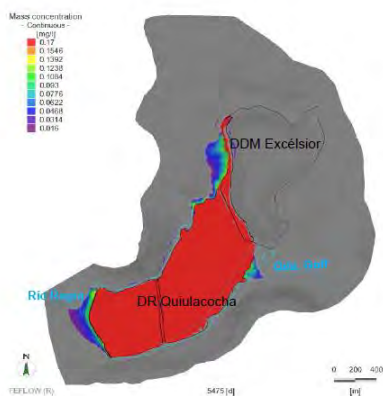
Comportamiento de concentración a los 0 días del inicio de su cierre



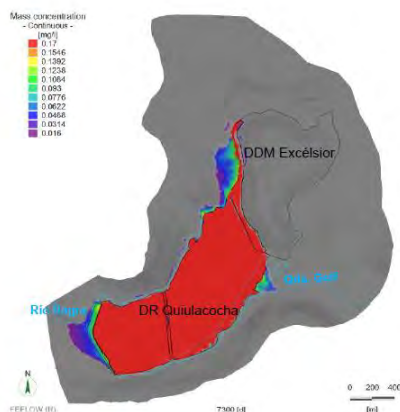
Comportamiento de concentración a los 3 650 (10 años) días del inicio de su cierre



Comportamiento de concentración a los 5 475 días (15 años) del inicio de su cierre



Comportamiento de concentración a los 7 300 días (20 años) del inicio de su cierre



CAPÍTULO X: PLAN DE CIERRE

En cumplimiento de la legislación ambiental vigente sobre el cierre de pasivos ambientales de la actividad minera, el presente capítulo desarrolla el plan de cierre del depósito de relaves Quiulacocha, conforme a los lineamientos establecidos en la normativa ambiental aplicable.

Este capítulo constituye el producto final de la investigación, sustentado en la integración de la información hidrológica, hidrogeológica, hidroquímica y de modelación numérica desarrollada en los capítulos anteriores.

Los resultados obtenidos permiten caracterizar el comportamiento integral del sistema en condiciones actuales y escenarios de postcierre, constituyendo la base técnica para la formulación del plan de cierre presentado en este capítulo. En este sentido, su desarrollo responde directamente al Objetivo Específico 5, orientado a la propuesta de un plan de cierre adecuado para el depósito de relaves Quiulacocha.

En conclusión, el plan de cierre del depósito de relaves Quiulacocha se sustenta en la integración de la información hidrológica, hidrogeológica, hidroquímica y de modelación numérica desarrollada en la presente investigación, lo que permite comprender el comportamiento actual del sistema y su evolución en escenarios de postcierre.

Este enfoque técnico permite establecer criterios de cierre orientados al control del flujo subterráneo, la reducción de la migración de contaminantes y la estabilización del sistema hidrogeológico, garantizando condiciones de sostenibilidad ambiental en el área de estudio.

10.1. Resumen de las condiciones actuales

El área del componente de cierre (depósito de relaves Quiulacocha) abarca aproximadamente 116 ha en superficie y contiene aproximadamente 79 mt de relaves con alto contenido de pirita dispuestos en dos sectores bien diferenciados según su contenido mineralógico y saturación, dividiéndose en dos (02) sectores separados mediante un dique flotante:

- Sector 1: relaves de plomo-zinc con nivel freático cercano a la superficie y
- Sector 2: relaves de cobre arsénico, sobresaturados con presencia de espejo de agua variable según temporada: seca o húmeda.

Durante el mes de junio del 2022 se realizaron las investigaciones de campo para el desarrollo de ensayos y estudios que complementen los estudios de ingeniería básica del depósito de relaves Quiulacocha. Se cubrieron los estudios de geotecnia/estabilidad física, hidrología e hidrogeología. A continuación, se presenta un breve resumen de los principales hallazgos para cada uno de estos aspectos.

El siguiente cuadro presenta un resumen de las principales características físicas de los relaves y del dique principal determinados en campo y extraído de estudios anteriores.

Tabla 10-1:*Resumen de resultados, caracterización geotécnica.*

Componente	Parámetro	Descripción
Vaso de DR Quiulacocha (relaves)	Características geotécnicas	Compuesta principalmente por limos de baja plasticidad.
		Humedad alta y compacidad suelta.
		Los relaves de ambos sectores muestran características físicas similares.
		Relaves ubicados aguas arriba del dique flotante presentan una capa delgada (0,10 m) de relaves secos y debajo de ellos los relaves presentan una consistencia blanda.
	Conductividad hidráulica	5.5 E-07 cm/s
Dique principal	Características geotécnicas	Conformados por depósitos de gravas arcillosas con arenas.
		Humedad alta y compacidad baja a media.
		Plasticidad baja a media, medianamente densa y con presencia de bolonería.
	Conductividad hidráulica	Grado de alteración notable en las zonas de filtración de aguas ácidas procedentes del vaso del depósito de relaves
		Dique: In situ 1.47E-03 a 7.852E-07 cm/s; laboratorio 2.4E-8 a 7.1E-07 cm/s
	Nivel medido de agua (m)	Fundación: 6.8E-10 cm/s
		Corona: 1.4 m
		Fundación: 2.8 y 1.3 m
Nivel de cimentación	Contrafuerte: 4.9 y 10.35 m	
	Estrato de arcilla de baja plasticidad (5 m) Estrato por gravas con arcilla y arena (20 m)	

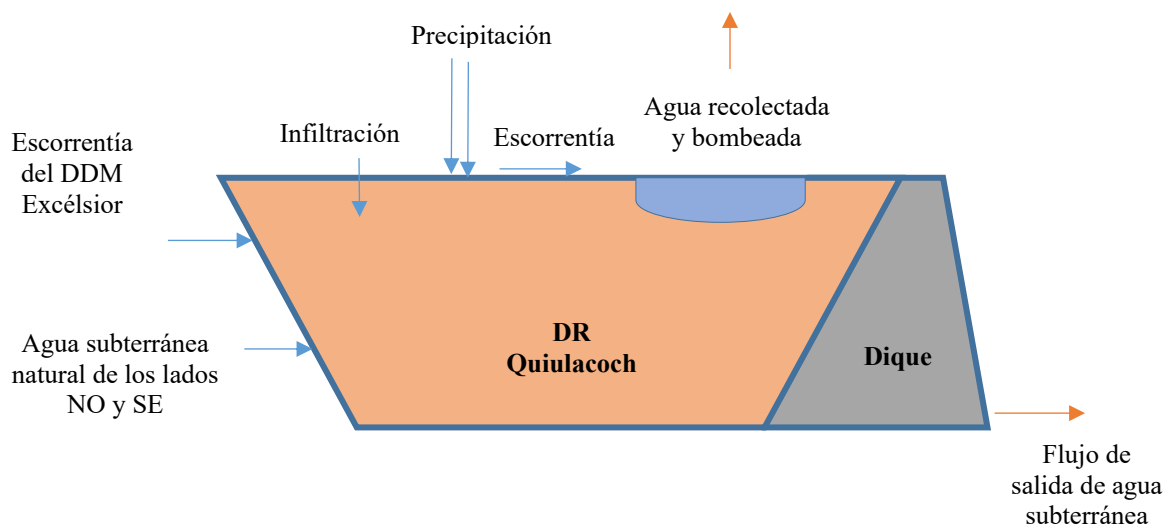
Fuente: Consorcio Yanamate 2022.

La construcción del depósito de relaves Quiulacocha fue realizada sobre una laguna que llevaba el mismo nombre, lo que originó la interrupción del curso natural de las aguas superficiales hacia ella, situación que generó una serie de medidas correctivas que formaron parte de los compromisos asumidos por parte de CENTROMIN a través del plan de adecuación y manejo ambiental (PAMA 1997), para la rehabilitación de dicho pasivo.

El sistema de manejo de aguas del depósito de relaves Quiulacocha incorpora una serie de entradas y salidas al sistema de aguas de contacto y de no contacto a través de infraestructuras como canales, vertederos, poza de infiltraciones y sistema de tratamiento y bombeo. En el siguiente esquema se presenta un resumen de las entradas y salidas para la condición actual del sistema.

Figura 10-1:

Esquema de ingresos y salidas de agua al depósito de relaves Quiulacocha, situación actual.



Tal como se aprecia en la ilustración anterior, los ingresos al sistema están dados predominantemente por los flujos de las filtraciones de aguas de contacto del depósito de desmonte Excélsior (actualmente en cierre por parte de AMSAC) y Pampa Seca (operada por

Cerro S.A.C) y las precipitaciones directas sobre los relaves del depósito de relaves Quiulacocha. Estas escorrentías son captadas por un conjunto de canales y vertederos que las dirigen por gravedad hacia el sector 2 del depósito de relaves Quiulacocha, aguas abajo del dique flotante, donde se acumula en una laguna de aguas ácidas de extensión variable según temporada (húmeda o seca) en contacto directo con el dique principal. Con la finalidad de manejar estos volúmenes de agua de manera que no haya reboses no controlados de mala calidad hacia el río Ragra, se vienen bombeando las aguas de la laguna para mantener un borde libre que va entre los 76 cm y 130 cm para las temporadas húmeda y seca, respectivamente.

Las filtraciones del noreste del depósito de relaves Quiulacocha, provenientes del depósito de desmonte Excélsior y stockpiles Pampa Seca, son canalizadas al Vertedero 1 (V-1). Este canal continúa por la zona de transportes de relaves, recibiendo más escorrentías del sur y oeste del depósito de desmonte Excélsior, que se recolectan en el Vertedero 2 (V-2). El Vertedero 3 (V-3) recibe las aguas del V-2 y algunas filtraciones menores del sector 1 del depósito de relaves Quiulacocha. En este sector, un canal central recoge las aguas superficiales y el caudal del V-3, que llega al sector 2, donde se conecta con el Vertedero 4 (V-4).

Además del sistema de manejo, existen dos canales laterales de concreto que bordean el depósito de relaves Quiulacocha y transportan aguas servidas y de contacto provenientes de la ciudad de Cerro de Pasco, actividades mineras aguas arriba y efluentes tratados del sector industrial. Uno se ubica en la margen derecha, desde la salida de Cerro de Pasco, y el otro en la margen izquierda, junto al depósito de desmonte Excélsior y el relave Quiulacocha. Finalmente, estas descargas acumuladas se vierten aguas abajo al río Ragra, que desemboca en el río San Juan.

10.2. Descripción de las alternativas de cierre propuestas

Se describen las dos (02) alternativas de cierre propuestas (ver tabla 10-2 y los planos 15.1 y 15.2 como alternativas con diseño conceptual; se detalla la memoria descriptiva de cada alternativa. Las alternativas fueron planteadas considerando que las filtraciones provenientes del depósito de desmonte Excélsior y stock piles de Pampa Seca serán completamente manejadas. Asimismo, se considera al sector de relaves transportados (sureste del depósito de relaves Quiulacocha) parte del sector 1.

Tabla 10-2:

Alternativas de cierre propuestas

Alternativa	Descripción
Alternativa 1	Sector 1: Aplicación de cobertura seca tipo I (cobertura para material generador de acidez) Sector 2: Aplicación de cobertura seca tipo I
Alternativa 2	Sector 1: Aplicación cobertura seca tipo I Sector 2: Aplicación de cobertura seca tipo I más construcción del humedal (base con cobertura tipo II) con columna de agua sector central (correspondiente al más bajo nivel topográfico del sector que además permite la optimización de los espesores de cobertura para nivelación de terreno con pendientes de drenaje adecuadas).

Fuente: WSP, 2022

Notas: Cobertura tipo I: Geotextil / Geomalla multitaxial/material granular (0.40 m) /

Geomembrana (VLDPE 1.5 mm) / Material orgánico (topsoil=0.20m)

Cobertura tipo II: Material granular (0.40 m) / material orgánico (topsoil=0.30m)

10.2.1. Alternativa 1 del plan de cierre

La alternativa 1 considera un escenario seco, colocando una cobertura completa sobre los dos (02) sectores. Esta cobertura permitirá la estabilización de la superficie y deberá tener las siguientes características: muy baja infiltración, aislamiento del material de relave del oxígeno del aire y base de especies vegetales de la zona. Preliminarmente, se deberán ejecutar trabajos para la evacuación de las aguas ácidas del sector 2.

10.2.1.1. Memoria descriptiva del plan de cierre alternativa 1

La alternativa consiste en aplicar un cierre seco en toda el área del depósito de relaves Quiulacocha (sectores 1 y 2), la cual reduce al máximo el porcentaje de infiltración de las aguas de escorrentía a los relaves en temporada húmeda, al mantener el área cubierta con la cobertura tipo I. El diseño de esta alternativa permite captar las aguas de no contacto en el canal de cierre proyectado, con una capacidad de descarga máxima de aproximadamente $3.7 \text{ m}^3/\text{s}$ (3700 l/s) al río Ragra, a través de un vertedero de descarga que atraviesa el dique de contención existente (dique principal).

Debido a la pendiente de 0.5% del canal, es requerido realizar un mejoramiento de la superficie de fundación a fin de evitar asentamientos que reduzcan o generen contrapendiente, originando áreas de acumulación de agua cercanas al dique de contención que pudiesen afectar su estabilidad física. Para ello se prevé realizar precargas acumulando material granular a lo largo del alineamiento del canal. La altura de dicha precarga y el tiempo dependerán de las características del relave. Por ello, se requieren mayores estudios geotécnicos (ensayos SPT) tanto en los Sectores 1 y 2 para poder evaluar con mayor grado de detalle los asentamientos esperados.

Las filtraciones de aguas ácidas registradas en el sector 2 al norte del dique flotante serán captadas por un sistema de subdrenaje compuesto por una tubería perforada tipo SP y sólida tipo S CPT de 150 mm (6”) de diámetro. Las aguas captadas serán conducidas por gravedad hasta la poza de aguas de infiltración existente ubicada aguas abajo del dique principal del depósito Quiulacocha, desde donde serán bombeadas para su tratamiento.

La configuración de la superficie de cierre ha sido diseñada acomodándose a la superficie del terreno actual (relaves) a fin de optimizar al máximo los volúmenes de relleno. Considerando los resultados de los estudios geotécnicos ha sido previsto efectuar un mejoramiento de la superficie de relave con la cobertura tipo I, a fin de poder transitar equipos ligeros de movimiento de tierra (volquetes, moto niveladora, cargador frontal, etc.) La cobertura Tipo I está compuesta por elementos geosintéticos de separación y refuerzo (Geotextil y geomalla multiaxial) que estarán apoyadas directamente sobre la superficie de relave, sobre este se colocará una capa de 0.4 m de material granular, la superficie final configurada a las pendientes de diseño será escarificada y colocada sobre esta la geomembrana VLDPE de 1.5 mm, finalmente sobre esta se colocará una capa de 0.20 m de espesor de material orgánico para su posterior sembrado y revegetación. Ver figura 10-2.

La construcción de las obras de cierre deberá ser realizada en épocas de estiaje dadas las dimensiones de las áreas a coberturar.

Figura 10-2:

Mapa de ingeniería Alternativa 1

10.2.1.2. Manejo de aguas alternativa 1

Como parte del proceso constructivo, deberá desarrollarse un plan de manejo de aguas superficiales, habilitando canales temporales para separar las aguas de no contacto con las aguas de contacto de mala calidad que deberán ser tratadas previa a su descarga al drenaje natural. Así mismo, se deberán construir pozas de sedimentación durante la construcción para las aguas de no contacto, como medidas de control de erosión y sedimentos.

Se implementará el canal de cierre, que colecta las aguas de escorrentía provenientes de los sectores 1 y 2. El canal atraviesa la parte central del sector 2 hasta el dique principal, desde donde se descarga directamente al área de drenaje natural que aporta al río Ragra.

Se mantendrá la poza de filtraciones para la colección de infiltraciones contenidas en el depósito de relaves Quiulacocha; estas aguas de contacto serán bombeadas hacia la planta de neutralización y después al depósito de relaves Ocroyoc hasta lograr la calidad adecuada para la descarga directa al ambiente.

10.2.1.3. Aspectos de interés alternativa 1

Las consideraciones y limitaciones asociadas a esta alternativa son las siguientes:

- El volumen de la cantidad de aguas ácidas a evacuar desde el sector 2 (preconstrucción de las medidas de cierre) ha sido estimado en función de la topografía original y actual y las imágenes satelitales históricas disponibles de manera libre. En ese sentido, para el diseño del proceso constructivo y la estimación de costos a nivel factibilidad y de detalle, se requiere realizar estudios de batimetría.

- No se puede eliminar la posibilidad de problemas en la construcción por asentamientos dentro de los relaves. Se requiere realización de pruebas de ensayo en campo SPT para estimar las áreas de potencial asentamiento en cada sector y de esta manera optimizar los espesores y volúmenes del material de cobertura.
- Para efectos del presente análisis, se considera una colección permanente de las filtraciones (agua de poro de mala calidad contenida en el depósito de relaves Quiulacocha) al pie del dique principal y su consiguiente bombeo y tratamiento activo. Para una estimación de los plazos de disminución de la colección de infiltraciones para este escenario de cierre, se requiere realizar un modelo hidrogeológico numérico.
- Se considera como medida de postcierre el tratamiento de las filtraciones del depósito de relaves Quiulacocha a largo plazo, hasta lograr la calidad adecuada para descarga directa al ambiente. Para el estimado de costos al valor presente se considera 30 años de tratamiento. Esto conforme a lo dispuesto en el Reglamento de Cierre de Minas establecido mediante D.S. n°. 033-2005-EM (artículo 63).

10.2.2. Alternativa 2 del plan de cierre

A diferencia de la alternativa 1, esta alternativa considera un escenario húmedo en el sector 2, formando un humedal en la parte central del sector 2, el cual deberá mantener una columna de 10 cm para el adecuado crecimiento de las especies y correcto funcionamiento del humedal. El resto del área del sector 2 considera la aplicación de una cobertura del tipo I. Preliminarmente, se deberán ejecutar trabajos para la evacuación de las aguas ácidas del sector 2.

10.2.2.1. Memoria descriptiva del plan de cierre alternativa 2

La alternativa de aplicar un cierre con humedal en el sector 2 del depósito de relaves Quiulacocha reduce los costos de inversión de capital y reduce progresivamente la generación de aguas ácidas en el área dispuesta como humedal. Esta alternativa considera utilizar dos (02) tipos de cobertura: tipo I aplicada en las áreas dispuestas como cierre seco (Sector 1 y parte del Sector 2) y tipo II aplicada en el área del humedal.

El diseño de esta alternativa permite captar una parte de las aguas de no contacto en el canal de cierre proyectado, hasta que la zona del humedal a través del tiempo garantice una adecuada calidad del agua y este caudal pueda ser añadido al canal de cierre, el cual ha sido diseñado para un caudal máximo de aproximadamente $3.7 \text{ m}^3/\text{s}$ (3700 l/s) al río Ragra, a través de un vertedero de descarga que atraviesa el dique de contención existente (dique principal).

Del mismo modo que la alternativa 1, la suave pendiente de 0.5% del canal requiere realizar un mejoramiento de la superficie de fundación a fin de evitar asentamientos que reduzcan o generen contrapendiente, originando áreas de acumulación de agua cercanas al dique principal que pudieran afectar su estabilidad física. Para ello se prevé realizar precargas acumulando material granular a lo largo del alineamiento del canal. La altura de dicha precarga y el tiempo dependerán de las características del relave. Son requeridos mayores estudios geotécnicos (ensayos SPT y DPL) tanto en los Sectores 1 y 2 para poder evaluar con mayor grado de detalle los asentamientos.

Las filtraciones de aguas ácidas registradas al norte del dique flotante serán captadas por un sistema de subdrenaje compuesto por una tubería perforada tipo SP y sólida tipo S CPT de 150 mm de diámetro. Las aguas captadas serán conducidas por gravedad hasta el humedal, donde permanecerán confinadas por medio de la construcción de una berma perimetral de 1.5 m de

altura, la cual será construida con material de baja permeabilidad “arcilla” revestida con geomembrana. La función de esta berma, es como se indica, brindar confinamiento a las aguas de contacto por el tiempo que sea necesario, es decir, hasta que el humedal mejore la calidad de las aguas y estas puedan ser descargadas al ambiente por el canal de cierre. Como medida de contingencia, ha sido considerado en el diseño de esta alternativa la instalación de un sistema de bombeo tipo barcaza flotante (Hy-Tran o similar) a fin de evitar rebose de las aguas de contacto hacia la zona de aguas de no contacto. Se supone el tratamiento de agua bombeada en la planta de neutralización.

La configuración de la superficie de cierre de esta alternativa ha sido diseñada acomodándose a la superficie del terreno actual (relaves) a fin de optimizar al máximo los volúmenes de relleno. Considerando los resultados de los estudios geotécnicos, ha sido previsto efectuar un mejoramiento de la superficie de relave con la cobertura tipo I, a fin de poder transitar equipos ligeros de movimiento de tierra (volquetes, motoniveladora, cargador frontal).

La cobertura tipo I está compuesta por elementos geosintéticos de separación y refuerzo (geotextil y geomalla multiaxial) que estarán apoyados directamente sobre la superficie de relave; sobre este se colocará 0,4 m de material granular, la superficie final configurada a las pendientes de diseño será escarificada y colocada sobre esta la geomembrana VLDPE de 1.5 mm; finalmente sobre esta se colocará 0,20 m de espesor de material orgánico para su posterior sembrado y revegetación.

En el área del humedal ha sido prevista la colocación de una cobertura tipo II que consiste en descargar de forma manual 0,30 m de material orgánico directamente sobre la superficie de relave. Debido a que el área destinada al humedal es mucho menor con respecto a toda el área del depósito, ha sido considerada la descarga manual, evitando el uso de equipos.

Para esta alternativa será necesario identificar una fuente de agua externa de calidad adecuada para mantener la columna de agua del humedal en temporada seca. Ver figura 9-3.

La construcción de las obras de cierre deberá ser realizada en época de estiaje dada las dimensiones de las áreas a coberturar.

Figura 10-3:

Mapa de ingeniería Alternativa 2

10.2.2.2. Manejo de aguas alternativa 2

El manejo de aguas de esta alternativa está asociado al manejo de las aguas provenientes de las escorrentías del sector 1 que se colectan y derivan al lado de una berma que rodea el área del humedal en el sector 2 y la derivan al canal de cierre sur que atraviesa el sector 2 para su descarga directa al área de drenaje natural que aporta al río Ragra.

Se mantendrá la poza para la colección de filtraciones desde el depósito de relaves Quiulacocha; estas aguas de contacto serán bombeadas hacia la planta de neutralización para su tratamiento hasta lograr la calidad adecuada para descarga directa al ambiente.

Adicionalmente, esta alternativa considera el manejo de las aguas de contacto en el humedal a través de un sumidero que colectará estas aguas en época húmeda para su bombeo hacia la planta de neutralización y su subsecuente tratamiento (hasta lograr estabilidad geoquímica). En temporada seca, se requerirá una fuente de agua de calidad adecuada para mantener la columna de agua y la condición de saturación en el humedal.

10.2.2.3. Aspectos de interés alternativa 2

Las consideraciones y limitaciones asociadas a esta alternativa son las siguientes:

- El volumen de la cantidad de aguas ácidas a evacuar desde el sector 2 (preconstrucción de las medidas de cierre) ha sido estimado en función de la topografía original y actual y las imágenes satelitales históricas disponibles de manera libre. En ese sentido, para el diseño del proceso constructivo y la estimación de costos a nivel factibilidad y de detalle, se requiere realizar estudios de batimetría.

- No se puede eliminar la posibilidad de problemas en la construcción por asentamientos dentro de los relaves. Se requiere realización de pruebas de ensayo en campo SPT para estimar las áreas de potencial asentamiento en cada sector y de esta manera optimizar los espesores y volúmenes del material de cobertura.
- Para efectos del presente análisis, se considera una colección permanente de las filtraciones (agua de poro de mala calidad contenida en el depósito de relaves) al pie del dique principal y su consiguiente bombeo y tratamiento activo. Para una estimación de los plazos de disminución de la colección de infiltraciones para este escenario de cierre, se requiere realizar un modelo hidrogeológico numérico.
- Se considera como medida de postcierre el tratamiento de las filtraciones del depósito de relaves Quiulacocha a largo plazo, hasta lograr la calidad adecuada para descarga directa al ambiente. Para el estimado de costos al valor presente se considera 30 años de tratamiento. Esto conforme a lo dispuesto en el Reglamento de Cierre de Minas establecido mediante D.S. n°. 033-2005-EM (artículo 63).
- Existe incertidumbre en el funcionamiento del humedal. Se requiere finalización de estudios de campo humedal (pruebas de barril en curso y construcción de sistema piloto pendiente) para determinar viabilidad de este tipo de tratamiento.
- Esta alternativa considera el manejo de las aguas de contacto en el humedal a través de un sumidero que coleccionará cantidades excesivas de estas aguas en la época húmeda para su bombeo hacia la planta de neutralización y su subsecuente tratamiento (hasta lograr la calidad adecuada para descarga directa al ambiente). Preliminarmente se considera tratamiento activo para 30 años.

- En temporada seca, se requerirá una fuente de agua de calidad adecuada para mantener la columna de agua y la condición de saturación en el humedal. En caso de solicitar el uso de las aguas servidas en los canales laterales del depósito de relaves Quiulacocha para el mantenimiento del humedal, este deberá ser previamente tratado (presencia actual de metales y carga orgánica), incrementando el costo de implementación y de postcierre (tratamiento). Además, este uso supone la tramitación de permisos sociales y legales que garanticen su sostenibilidad a largo plazo.

10.3. Actividades de cierre

En la tabla 10-3 se describen los criterios de cierre para cada alternativa de análisis considerada:

Tabla 10-3:

Resumen de actividades de cierre y postcierre.

Estabilidad	Medida	Descripción
Alternativa 1		
Estabilidad física	Reconfiguración del vaso depósito de relaves Quiulacocha.	Corte y relleno de reconfiguración de los sectores para dar una pendiente adecuada para el drenaje. Evitar una columna de agua que ejerza presión sobre el dique principal.
Estabilidad hidrológica	Implementación del canal de cierre. Sistema de drenaje de filtraciones	Se implementará el canal de cierre, que colecta las aguas de escorrentía provenientes de los sectores 1 y 2. El canal atraviesa la parte central del sector 2 hasta el dique principal, desde donde se descarga directamente al área de drenaje natural que aporta al río Ragra. La cobertura tipo I consiste en cinco (05) capas:
Estabilidad geoquímica	Sector 1 y 2: Cobertura tipo I	▪ Geotextil ▪ Geomalla multiaxial ▪ Material granular (0, 40 m) ▪ Geomembrana (VLDPE 1,5 mm) ▪ Material orgánico (topsoil=0.20m)
Post cierre	Tratamiento activo de las aguas de filtración (30 años).	Se mantendrá la poza de filtraciones para la colección de filtraciones desde el depósito de relaves Quiulacocha; estas aguas de contacto serán bombeadas hacia la Planta de Neutralización para su tratamiento.
Alternativa 2		
Estabilidad física	Reconfiguración del vaso (relleno) DR Quiulacocha	Corte y relleno de reconfiguración de los sectores para dar una pendiente adecuada para el drenaje. Evitar una columna de agua que ejerza presión sobre el dique principal.

Estabilidad hidrológica	Implementación de berma central y canal de derivación sur.	Manejo de las aguas provenientes de las escorrentías del sector 1 que se colectan y derivan a través de una berma que rodea el área del humedal en el sector 2 y la derivan al canal de cierre que atraviesa el sector 2 para su descarga directa al área de drenaje natural que aporta al río Ragra.
	Mantenimiento de sistema de drenaje de filtraciones.	Se mantendrá la poza de filtraciones para la colección de infiltraciones contenidas en el depósito de relaves; estas aguas de contacto serán bombeadas hacia la planta de neutralización para su tratamiento.
	Implementación de sistema de reposición de aguas de humedal en temporada seca desde fuente externa	Sistema de colección de las aguas de contacto en el humedal a través de un sumidero que colectará estas aguas en cantidades excesivas en época húmeda para su bombeo hacia la Planta de Neutralización y su subsecuente tratamiento (hasta lograr una calidad adecuada de descarga directa).
Estabilidad geoquímica	Sector 1 y sector 2 (área sin humedal): Cobertura tipo I.	Sistema de captación y bombeo de fuente de agua de calidad adecuada (desde fuente externa) para mantener la columna de agua y la condición de saturación en el humedal. La cobertura tipo I consiste en cinco (05) capas: ▪ Geotextil ▪ Geomalla multiaxial ▪ Material granular (0.40 m) ▪ Geomembrana (VLDPE 1.5 mm) ▪ Material orgánico (topsoil=0.20m)
	Sector 2 (área con humedal): Cobertura tipo II.	La cobertura tipo II consiste en dos (02) capas: ▪ Material granular (0.40 m) ▪ Material orgánico (topsoil=0.20m)

	Tratamiento activo de las aguas de filtración.	
Post cierre	Tratamiento activo de las aguas en cantidades excesivas de la poza de sumidero del humedal del sector 2.	Bombeo y tratamiento de aguas de contacto: infiltración desde la poza de infiltración al pie del dique principal; agua de contacto desde el humedal (sumidero).
	Reposición durante temporada seca del humedal del sector 2 (mantenimiento de 10 cm de columna de agua)	Bombeo de agua de reposición al humedal en época seca.

Fuente: Elaboración propia a partir de información del Consorcio Yanamate (2022).

10.4. Evaluación de alternativas

El análisis de alternativas se basó en la información existente sobre las condiciones actuales y las necesidades de estabilización a largo plazo del depósito de relaves Quiulacocha. Se abordaron aspectos clave como la estabilidad del dique principal, la contención y tratamiento de las aguas de contacto, el manejo de aguas para minimizar su ingreso al depósito y optimizar la separación del agua de no contacto, así como la eliminación de condiciones oxidantes en los sulfuros mediante la aplicación de cobertura o saturación superficial para aislarlos del oxígeno. Los resultados se presentan en las tablas 10-4 y 10-5, seguidos de una discusión detallada de cada aspecto analizado.

Tabla 10-4:

Resumen de evaluación de alternativa 1 para el cierre del depósito de relaves Quiulacocha

Alternativa	Descripción	Aspectos positivos	Aspectos negativos	Riesgos / incertidumbres
Alternativa 1	Sector 1: cobertura seca	Elimina riesgo de inestabilidad física del dique principal.	Mayores costos de implementación (asociados principalmente a volúmenes de corte/ relleno y cobertura para reconfiguración).	Riesgo de asentamientos por carga de cobertura.
	Sector 2: cobertura seca	Elimina la necesidad de tratamiento de aguas de contacto al interior del DR a largo plazo.	Menor requerimiento de mano de obra local, comparado con la otra alternativa. Tiempo de implementación mayor comparado con la otra alternativa	

Tabla 10-5:

Resumen de evaluación de alternativa 2 para el cierre del depósito de relaves Quiulacocha.

Alternativa	Descripción	Aspectos positivos	Aspectos negativos	Riesgos / incertidumbres
Alternativa 2	Sector 1: cobertura seca Sector 2: cobertura seca + humedal con columna de agua sector central	Elimina riesgo de	Necesidad de tratamiento de aguas de contacto	Incertidumbre respecto a la
		inestabilidad física	al interior del depósito de relaves Quiulacocha a	viabilidad de tratamiento
		del dique principal.	largo plazo.	por el humedal.
		Menores costos de	Necesidad de identificación y obtención de	Incertidumbre sobre la
		implementación	permisos de uso de agua de reposición para	fuelle de agua de
		(asociados	mantenimiento de humedal en temporada seca.	reposición en temporada
		principalmente a	Garantizar los mecanismos de operación y	seca.
		volúmenes de corte/	mantenimiento de la infraestructura de	Incertidumbre sobre
		relleno y cobertura	abastecimiento de agua de reposición a largo	estimación de plazos de
		para	plazo.	llegar a una calidad
		reconformación.	Alto mantenimiento de especies al interior del	adecuada para la descarga
		Requerimiento de	humedal durante los primeros años del post	directa de las aguas de
		mano de obra local.	cierre.	contacto

Fuente: Elaboración propia

Para cada alternativa se valoró cualitativamente desde un punto de vista hidrogeológico, en base a la complejidad de manejo de aguas al cierre y postcierre, con la finalidad de minimizar potenciales riesgos de afectación a cuerpos de agua naturales. De esta manera, la alternativa 1 es la recomendada.

Al tratarse de una cobertura seca, para la alternativa 1, se elimina la necesidad de bombeo y tratamiento (hasta llegar a una calidad adecuada para la descarga directa) de las aguas de contacto al interior del vaso del depósito de relaves. Las infraestructuras de manejo de agua corresponden a canales para el manejo de aguas de precipitación (aguas de no contacto) y su descarga aguas abajo del depósito de relaves. A diferencia de la alternativa 2, la cual considera un humedal en el sector 2 (en la zona de mayor profundidad topográfica), el cual requiere cantidades de reposición de agua en época seca para su adecuado funcionamiento y mantenimiento de las especies. Para la alternativa 2 se requerirá la identificación, tramitación de los permisos sociales y legales, así como el potencial tratamiento de estas aguas de acuerdo a los requerimientos de operatividad/mantenimiento del humedal. Adicionalmente, las alternativas consideran la filtración del agua hacia la poza de filtraciones y su bombeo para tratamiento hasta llegar a una calidad adecuada para su vertimiento directo al ambiente.

Sin embargo, existen incertidumbres en los diseños debido a la falta de estudios geotécnicos, geoquímicos, sociales, legales y económicos, necesarios para validar la viabilidad de las alternativas, especialmente la alternativa 2, que requiere pruebas piloto del humedal. Además, se recomienda evaluar la estabilidad de la cobertura y la complejidad constructiva en un medio saturado, como los relaves, ya que hay incertidumbre sobre los asentamientos que ocurrirían al aplicar la cobertura, siendo mayor el riesgo en la alternativa 1.

CAPÍTULO XI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente capítulo desarrolla la discusión de resultados de la investigación en función de los objetivos específicos planteados, integrando la interpretación técnica de los resultados obtenidos, la validación de las hipótesis y la comparación con antecedentes nacionales e internacionales, con el fin de sustentar la evaluación hidrogeológica, hidroquímica y la propuesta del plan de cierre del depósito de relaves Quiulacocha.

En conclusión, la discusión de resultados permite integrar e interpretar de manera global la información hidrogeológica, hidroquímica y de modelación numérica del área de estudio, validando las hipótesis planteadas y evidenciando la coherencia entre los resultados obtenidos y los objetivos específicos de la investigación. Asimismo, se confirma la influencia de las condiciones geológicas, hidráulicas y geoquímicas en el comportamiento del sistema, sustentando la evaluación integral del depósito de relaves Quiulacocha y la propuesta del plan de cierre.

11.1. Discusión de los resultados del objetivo específico 1

Objetivo específico 1: Caracterizar las unidades hidrogeológicas y geológicas en el área de influencia del depósito de relaves Quiulacocha.

Se identificaron múltiples unidades hidrogeológicas en el área de estudio, destacando depósitos no consolidados (relaves y desmontes), materiales aluviales y coluviales, así como un basamento rocoso de baja permeabilidad constituido por filitas y pizarras. El sistema presenta contrastes hidrogeológicos marcados entre medios permeables superficiales y un basamento de comportamiento acuífugo.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el comportamiento del sistema está controlado por la heterogeneidad litológica. Los materiales no consolidados actúan como zonas preferenciales de

almacenamiento y circulación somera, mientras que el basamento rocoso limita la migración vertical del flujo subterráneo. La conductividad hidráulica baja observada en el basamento confirma su función como barrera hidráulica parcial, condicionando la dinámica del sistema hacia flujos laterales preferenciales.

Se valida la hipótesis planteada, ya que las unidades hidrogeológicas y geológicas efectivamente controlan el flujo subterráneo y condicionan la migración de contaminantes en el área de influencia del depósito de relaves Quiulacocha.

Estos resultados son consistentes con CESEL (2011), que identificó control hidrogeológico por materiales fracturados y depósitos no consolidados en sistemas mineros similares. Asimismo, GWI (2007) reporta que la presencia de basamento rocoso de baja permeabilidad limita la migración vertical del flujo, lo cual coincide directamente con los hallazgos del presente estudio.

11.2. Discusión de los resultados del objetivo específico 2

Objetivo específico 1: Determinar las características hidroquímicas de las aguas subterráneas y superficiales asociadas al depósito de relaves Quiulacocha.

Las aguas del sistema presentan características asociadas a drenaje ácido de mina (DAM), con presencia de baja alcalinidad, altos contenidos de sulfatos y elevadas concentraciones de metales disueltos como Fe, Mn, Zn y As. Se identificaron facies hidroquímicas diferenciadas: sulfatadas ácidas, bicarbonatadas cálcicas y mixtas.

El comportamiento hidrogeoquímico evidencia procesos de oxidación de sulfuros metálicos, principalmente pirita, generando condiciones de acidez sostenida. La evolución geoquímica del sistema está controlada por reacciones de oxidación-reducción, disolución mineral

y procesos de lixiviación, lo que incrementa la movilidad de metales pesados. La diferenciación de facies indica la coexistencia de fuentes naturales y antropogénicas de recarga química.

Se confirma la hipótesis, ya que las aguas en contacto con el sistema relave-desmonte presentan alteraciones hidroquímicas significativas que incrementan la migración de contaminantes.

Johnson et al. (2000) y Parviainen (2009) reportan condiciones similares de drenaje ácido con liberación de metales pesados en depósitos sulfurados. A nivel nacional, Alanya (2022) confirma la eficiencia de procesos de neutralización en sistemas con alta carga metálica, lo que respalda la caracterización hidroquímica obtenida en este estudio.

11.3. Discusión de los resultados del objetivo específico 3

Objetivo específico 3: Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual del sistema del depósito de relaves Quiulacocha.

El modelo conceptual define un sistema hidrogeológico controlado por flujo subterráneo preferencial en dirección NE–SO hacia el río Ragra, con presencia de niveles someros y profundos parcialmente confinados. El sistema se comporta como un medio de baja conductividad hidráulica con predominancia de acuítardos.

El modelo conceptual evidencia una estructura hidrogeológica estratificada, donde el flujo está gobernado por gradientes hidráulicos bajos y por la conectividad hidráulica entre unidades no consolidadas. La presencia de niveles semiconfinados reduce la velocidad de migración contaminante, generando un sistema de transporte advectivo lento.

Se valida la hipótesis, dado que el modelo conceptual representa adecuadamente el funcionamiento hidráulico del depósito y permite comprender la interacción entre unidades geológicas y flujo subterráneo.

Golder (2010) y Geo-Logic (2014) coinciden en la identificación del río Ragra como principal receptor del sistema hidrogeológico regional, validando la dirección de flujo obtenida. Asimismo, Freeze & Cherry (teoría hidrogeológica aplicada) respaldan el comportamiento acuitado de medios de baja permeabilidad.

11.4. Discusión de los resultados del objetivo específico 4

Objetivo específico 4: Aplicar la modelación numérica para calcular los flujos subterráneos y la migración de contaminantes.

El modelo numérico calibrado alcanzó valores aceptables de ajuste ($RMS = 0.88$), evidenciando confiabilidad en la simulación del flujo subterráneo. Se estimaron flujos entre 8.1 y 24.6 L/s según escenarios climáticos, y una migración progresiva de contaminantes a largo plazo (≈ 20 años), con el manganeso como trazador principal.

El sistema muestra comportamiento transitorio condicionado por variaciones estacionales de recarga. La baja conductividad hidráulica limita la velocidad de transporte advectivo, mientras que la dispersión hidrodinámica controla la expansión del frente contaminante. El modelo confirma una tendencia de migración lenta pero persistente hacia zonas receptoras.

Se valida la hipótesis, ya que la modelación numérica permite identificar zonas críticas de migración de contaminantes y cuantificar el flujo subterráneo en el sistema.

Geo-Logic (2014) y GWI (2007) reportan rangos de flujo similares en la misma zona de estudio, confirmando la consistencia del modelo. Asimismo, Golder (2010) señala migración lenta

de contaminantes bajo condiciones de baja permeabilidad, lo cual coincide con los resultados obtenidos.

11.5. Discusión de los resultados del objetivo específico 5

Objetivo específico 5: Proponer un plan de cierre adecuado para el depósito de relaves Quiulacocha basado en los resultados hidrogeológicos e hidroquímicos.

La integración de resultados hidrogeológicos, hidroquímicos y de modelación numérica permite establecer que la alternativa de cierre más adecuada es la cobertura seca, debido a su capacidad para reducir infiltración, minimizar generación de drenaje ácido y disminuir movilidad de contaminantes.

La cobertura seca actúa como barrera hidráulica superficial, reduciendo la recarga meteórica al sistema y disminuyendo significativamente los procesos de oxidación de sulfuros. Desde el punto de vista de ingeniería de cierre, esta alternativa reduce la necesidad de sistemas activos de tratamiento, favoreciendo la estabilidad geoquímica a largo plazo.

Se valida la hipótesis, ya que la integración de resultados permite sustentar técnicamente la selección de una alternativa de cierre ambientalmente segura y sostenible.

Centromin Perú (2006) y Ledesma (2018) respaldan la implementación de coberturas secas como solución efectiva en depósitos de relaves con problemas de drenaje ácido. Asimismo, experiencias internacionales como ICMM recomiendan estrategias de encapsulamiento como medidas de cierre pasivo de alta confiabilidad.

CONCLUSIONES

A partir de la evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre, se concluye lo siguiente:

1. Se identificaron siete unidades hidrogeológicas en el área de influencia del depósito de relaves Quiulacocha, destacando el basamento rocoso conformado por filitas y pizarras del Grupo Excélsior, el cual presenta una conductividad hidráulica media de 0.1 a 0.5 m/d y actúa como acuífugo a profundidad. Asimismo, se determinó que las principales vías de flujo subterráneo corresponden a las fracturas del basamento y a los depósitos superficiales no consolidados, los cuales controlan el movimiento del agua subterránea y la potencial migración de contaminantes en el área de estudio.

2. El análisis hidroquímico permitió determinar que las aguas asociadas a la laguna Quiulacocha presentan características de drenaje ácido de mina y elevadas concentraciones de metales disueltos, cuyo origen se encuentra principalmente relacionado con el depósito de desmontes Excélsior y, en menor proporción, con los aportes provenientes de la zona de Pampa Seca. Asimismo, se identificaron tres facies hidroquímicas predominantes: la primera sulfatada magnésica cálcica, asociada a las aguas lixiviadas del depósito de relaves Quiulacocha y depósitos de desmontes Excelsior; la segunda bicarbonatada cálcica, vinculada al acuífero calcáreo y al basamento rocoso; y la tercera bicarbonatada sódica, representativa de las aguas naturales del subsuelo. La predominancia de sulfatos, magnesio, hierro y manganeso, así como las excedencias registradas respecto a los estándares de calidad ambiental para agua (ECA categoría III), evidencian una alteración significativa de la calidad de las agua superficiales y subterráneas en el área de estudio.

3. El modelo hidrogeológico conceptual permitió identificar al depósito de relaves Quiulacocha como un medio “poroso no consolidado” de baja conductividad hidráulica, calificado como “acuitardo”, con flujos de agua subterránea lentos y escasos en la zona saturada de los relaves. Existe otro nivel profundo semiconfinado a confinado, el que se encuentra aislado del sistema superficial de relave. Los flujos de agua subterránea se dirigen preferentemente en sentido NE-SO hacia el río Ragra, que actúa como el principal colector. En la parte alta del área, el gradiente hidráulico es de 0.1 a 0.2, mientras que en la zona de relavera es bajo, con un gradiente de 0.01, lo que concuerda con la topografía plana. El análisis de los flujos observados en las estaciones V-3 y V-4 entre 2014 y 2022, registrado por AMSAC, mostró picos en los caudales durante las precipitaciones, con un caudal de 35.6 l/s en la temporada húmeda (febrero) y 8.3 l/s en la temporada seca (agosto). El balance hídrico subterráneo para un año promedio muestra un caudal de 15.30 l/s, mientras que para un año húmedo es de 24.6 l/s y para un año seco de 8.1 l/s. Se observó un aumento en los flujos en junio y julio de 2021 y 2022 en la estación V-3, posiblemente debido a las obras de cierre del depósito de desmontes Excélsior. Estos resultados validan el modelo hidrogeológico conceptual propuesto y permiten comprender el comportamiento hidráulico del sistema.

4. La modelación numérica hidrogeológica fue calibrada satisfactoriamente, alcanzando un valor de RMS de 0.88, valor que evidencia una adecuada representación de las condiciones hidrogeológicas del área de estudio para la simulación de flujo subterráneo y transporte de contaminantes. Las filtraciones estimadas para el dique y el vaso indican filtraciones entre 8.1 l/s y 24.6 l/s, considerando el peor escenario, la época húmeda. Los niveles piezométricos en el área del depósito de relaves Quiulacocha fluctuarán entre 4229 y 4390 msnm y que los flujos subterráneos convergen predominantemente hacia el río Ragra, principal colector hidráulico del

sistema. La modelación numérica del transporte de contaminantes, considerando una concentración inicial de manganeso de 0.17 mg/L y un periodo de simulación de 7300 días (20 años), permitió identificar una migración lenta y progresiva del contaminante desde el depósito de relaves Quiulacocha hacia el río Ragra. En este sentido, dicho cauce constituye el principal receptor potencial de contaminación y representa la zona de mayor riesgo ambiental, confirmando la utilidad de la modelación numérica para la identificación de áreas vulnerables a la migración de contaminantes.

5. La integración de los resultados hidrogeológicos, hidroquímicos y de modelación numérica permitió determinar que la cobertura seca constituye la alternativa de cierre más adecuada para el depósito de relaves Quiulacocha, al minimizar la generación de drenaje ácido de mina, reducir la migración de contaminantes, eliminar la necesidad de bombeo y tratamiento permanente y favorecer la estabilidad física e hidrológica del sistema a largo plazo.

RECOMENDACIONES

Realizar estudios geotécnicos detallados para validar la estabilidad física de la alternativa de cierre mediante cobertura seca propuesta para el depósito de relaves Quiulacocha, garantizando su desempeño y seguridad a largo plazo.

Desarrollar modelaciones numéricas complementarias que incorporen escenarios de cierre y postcierre, con el fin de evaluar la evolución de los niveles freáticos, las filtraciones y la migración potencial de contaminantes bajo diferentes condiciones de manejo.

Continuar con el monitoreo hidrogeológico e hidroquímico mediante el control periódico de niveles piezométricos, caudales de filtración y calidad de agua superficial y subterránea, a fin de verificar el comportamiento del sistema y la efectividad de las medidas de cierre implementadas.

Evaluar la factibilidad técnica de implementar sistemas de drenaje complementarios, tales como drenes subsuperficiales o perforaciones horizontales en zonas saturadas del depósito, con el objetivo de reducir el nivel freático y controlar las filtraciones.

Evaluar alternativas de tratamiento para las aguas de contacto y drenaje ácido de mina, orientadas a reducir las concentraciones de metales disueltos y minimizar los impactos sobre la calidad de las aguas superficiales y subterráneas del área de influencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alanya. (2022). Tratamiento de drenaje ácido de mina por método pasivo con roca caliza de la relavera Quiulacocha en Cerro de Pasco.
- Banco Mundial y Ministerio de Energía y Minas del Perú. (s.f.). Informe de asistencia técnica para la gestión ambiental del sector minero en el Perú. Lima, Perú.
- B.B.S. Singhal, & R.P. Gupta. (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks (2nd ed.). Indian Institute of Technology Roorkee.
- Centromin Perú S.A. (2006). Elaboración del plan de cierre de pasivos ambientales mineros Excélsior y Quiulacocha.
- CESEL S.A. (2011). Ingeniería de detalle para el abandono del depósito de desmontes Excélsior-Cerro de Pasco. Activos Mineros S.A.C.
- CEPAL. (2020). Rodríguez, C., & Julca, D. Gestión del cierre de minas en el Perú: estudio técnico-legal sobre el alcance de la legislación peruana en el cierre de operaciones mineras (LC/TS.2020/118). Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). Hidrología subterránea (2nd ed.). Ediciones Omega.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). Physical and chemical hydrogeology (2nd ed.). Wiley.
- Dold, B., Wade, C., Fontboté, L. (2008). Water management for acid mine drainage control at the polymetallic Zn-Pb-(Ag-Bi-Cu) deposit Cerro de Pasco, Peru, Journal of Geochemical Exploration.

- Ego-Aguirre, & Smuda. (2010). Evaluación conceptual del flujo de las aguas de los depósitos Excélsior, Quiulacocha y las Pilas de Minerales.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall.
- Gamboa, J., et al. (2021). Evaluación hidrogeológica e hidroquímica de sistemas de relaves mineros.
- Golder Associates (2010). Estudio de prefactibilidad física y química del depósito de relaves Quiulacocha.
- Geo-Logic, (2014). Estudio para identificar fuentes de ingreso de aguas subterráneas y determinación de la participación de EA Cerro S.A.C. y Activos Mineros S.A.C. en el tratamiento de las mismas.
- Ground Water International S.A.C. (2007). Investigación hidrogeológica de la mina subterránea y de las facilidades superficiales de la U.M. Cerro de Pasco.
- Hidroandes Consultores S.A.C. (2013). Evaluación hidroquímica y balance de aguas de mina UEA Cerro de Pasco. Volcan Compañía Minera S.A.A.
- Hydroenergía, (2008). Estudio hidrogeológico en los depósitos de relaves de Quiulacocha y de desmontes de Excélsior.
- INGEMMET. (2011). Mapa geológico del cuadrángulo de Cerro de Pasco, escala 1:50 000
- IRIDIAN Environmental Analysis & Solutions. (2006). Effects on element mobility by the construction of a wetland on the marine shore porphyry copper tailings deposit, Bahía de Ite, Peru.

- Johnson, D. B., et al. (2000). The hydrogeochemistry of the Nickel Rim Mine Tailings Impoundment, Sudbury, Ontario.
- Ledesma. (2018). Propuesta de tratamiento del depósito de relaves de Quiulacocha-Pasco para su remediación ambiental, basada en experiencias exitosas en empresas mineras.
- Mendoza. (2019). Plan de cierre de relaveras auríferas de la planta de beneficio minera Española S.A.
- Ministerio de Agricultura. (2009). Informe técnico sobre recursos hídricos o gestión de cuencas en el Perú. Lima, Perú.
- Mora Palomino, G. L. (2019). Evaluación del relave minero y su tratamiento en la planta beneficio MVC - 2011-II.
- O. Aduvire, 2006. Drenaje Acido de Mina Generación y tratamiento”, Instituto geológico y minero de España, Madrid, Pág. 140.
- Parviainen. (2009). Tailings mineralogy and geochemistry at the abandoned Haveri Au-Cu Mine, SW Finland.
- Pulido Bosch. (2014). Principios de hidrogeología kárstica. Universidad de Almería.
- Perú, Ministerio de Energía y Minas. (2006). Guía para la elaboración de planes de cierre de minas. Lima, Perú.
- Roscoe Moss Company. (1990). Handbook of ground water development. United States of America.
- Sandoval. (2020). Assessment of tailings ponds by electrical and hydrochemical techniques.

Smuda, J., & Dold, B. (2006). Mineralogical and geochemical study of element mobility at the sulfide-rich Excélsior waste rock dump, Cerro de Pasco, Peru.

Smuda, J., Dold, B., Friese, K., Morgenstern, P., & Glaesser. (2007). Mineralogical and geochemical study of element mobility at the sulfide-rich Excélsior waste rock dump. *Journal of Geochemical Exploration*.

Water Management Consultants. (2004). Proyecto de remediación ambiental de pasivos mineros del río San Juan – Embalse Upamayo.

Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). Mine water: Hydrology, pollution, remediation. Springer.

Zeballos. (2019). Cierre de una presa de relaves mineros por encapsulamiento del material contaminante en Espinar.

Cusco, junio del 2026

ANEXOS

ANEXO A: MONITOREO DE FUENTES

ANEXO B: REGISTRO DE SONDEOS Y PRUEBAS HIDRÁULICAS

ANEXO C: DATOS HIDROQUÍMICOS



Tabla A-1
Inventario de Fuentes - Marzo 2022
Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

N°	Código	Coord. UTM (WGS84 Z18S)		Cota (msnm)	Fecha	Hora	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	TDS (ppm)	EH (mVpH)	OD (ppm)	Caudal (l/s)	Ubicación	Tipo	Observaciones
		Este	Norte													
Inventario de fuentes subterráneas.																
1	F-01	359972	8817265	4283	21/03/2022	16:30	9.03	7.4	216	106	-16	--	0.2	Pampa Seca	Filtración	Filtración de rocas filitas Grupo Excélsior.
2	F-02	360535	8816755	4301	22/03/2022	10:04	10.6	7.3	311	155	-12	--	0.46	Quiulacocha	Bocamina	Flujo de agua en conglomerado calcáreo, Fm Casapalca, surgente de antigua bocamina cerrada con válvula , agua transparente.
3	F-03	360500	8816701	4296	22/03/2022	10:15	11.4	7.42	344	172	-19	--	0.33	Quiulacocha	Manantial	Flujo de agua subterránea conglomerado calcáreo, Fm Casapalca, manantial captado, color transparente.
4	F-04	360628	8816905	4290	22/03/2022	06:00	11.7	7.35	725	362	-15	--	0.3	Quiulacocha	Bocamina	Flujo de agua en conglomerado calcáreo, Fm Casapalca, surgente de antigua bocamina, Fm Casapalca , color transparente.
Inventario fuentes superficiales naturales																
1	R-1	357380	8816524	4221	22/03/2022	15:00	14.1	7.65	2207	1108	-31	--	2490.4	Qda. Ragra	Río	Aforo realizado cerca de la entrada a Yuraqhuanca.
2	R-2	359034	8816948	4243	22/03/2022	15:53	13.1	7.36	1251	625	-16	--	1529.5	Qda. Ragra	Río	Cuerpo receptor proveniente de ambas márgenes relavera de Quiulacocha, aguas residuales Cerro de Pasco y filtraciones Excélsior y Pampa Seca.
3	R-3	359236	8816971	4277	23/03/2022	12:10	13.7	7.48	1428	717	-22	--	282.3	Qda. Ragra	Río	Cuerpo receptor proveniente de ambas márgenes relavera de Quiulacocha, aguas residuales Cerro de Pasco y filtraciones Excélsior y Pampa Seca, a pocos metros de la poza del eje principal.
4	RH-1	361064	8817232	4304	22/03/2022	08:51	10.2	7.44	510	251	-17	--	158.3	Qda. Golf	Riachuelo	Agua ligeramente amarillenta.
Estaciones de aguas superficiales en infraestructura.																
1	V-1	360592	8818703	4287	22/03/2022	11:04	10	1.58	19500	9810	--	--	0.45	Excélsior	Vertedero	Vertedero de V-1, se ubica en Excélsior, agua de relave color amarillenta.
2	V-3	360835	8817550	4276	21/03/2022	18:02	14.4	3.2	19790	9890	--	--	6.9	Quiulacocha	Vertedero	Vertedero V-3, se ubica en la relavera Quiulacocha. Vertimiento de agua superficial y filtraciones del depósito de desmonte Excélsior, agua color amarillenta.
3	V-4	359974	8816603	4163	21/03/2022	10:53	12.2	2.86	18570	9390	--	--	26.0	Dique flotante	Vertedero	Vertedero de relave V-4, se ubica en la margen izquierda del dique flotante de Quiulacocha.
4	C-01	360285	8817908	4284	21/03/2022	16:00	15	7.27	1589	794	-10	--	434.1	Pampa Seca	Canal	Vertimiento de aguas del Sector de Pampa Seca, agua ligeramente amarillenta.
5	C-02	359674	8816476	4272	22/03/2022	14:11	15.5	6.72	668	337	21	--	349.7	Quiulacocha	Canal	Canal al extremo Sur de Quiulacocha.
6	C-03	358128	8816654	4228	22/03/2022	15:35	12.9	7.52	427	211	-24	--	31.3	Qda. Ragra	Canal	Canal dirigido a la quebrada Ragra, agua transparente canalizado.
7	TB-1	359258	8816957	4148	23/03/2022	16:38	11.4	2.79	13180	6660	--	--	1.53	Dique Principal	Tubería	Poza de la estación de bombeo-operaciones Quiulacocha, Pasco. Tubería de subdrenaje
8	TB-2	359254	8816943	4148	23/03/2022	16:50	10.4	3.58	11040	5480	--	--	0.53	Dique Principal	Tubería	Poza de la estación de bombeo Quiulacocha, Pasco. Filtración de subdrenaje
9	TB-3A	359264	8816948	4147	23/03/2022	17:02	11.4	2.27	12860	6490	--	--	0.35	Dique Principal	Tubería	Poza de la estación de bombeo Quiulacocha, Pasco. Filtración del dique
10	TB-3B	359264	8816948	4147	23/03/2022	17:12	10.6	3.95	12160	6120	--	--	0.22	Dique Principal	Tubería	Poza de la estación de bombeo Quiulacocha, Pasco. Filtración del dique



Tabla A-2
Inventario de Fuentes - Junio 2022
Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

N°	Código	Coord. UTM (WGS84 Z18S)		Cota (msnm)	Fecha	Hora	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	TDS (ppm)	Eh (mVpH)	OD (ppm)	Caudal (l/s)	Ubicación	Tipo	Observaciones
		Este	Norte													
Inventario de fuentes subterráneas.																
1	F-01	359972	8817265	4283	18/06/2022	08:25		-	-	-	-	-	-	Pampa Seca	Filtración	Filtración de rocas filitas Grupo Excélsior. - Actualmente Seco
2	F-02	360535	8816755	4301	19/06/2022	11:00	10	8.03	430	220	-	-	0.1	Quiulacocha	Bocamina	Flujo de agua en conglomerado calcáreo, Fm Casapalca, surgente de antigua bocamina cerrada con válvula , agua transparente.
3	F-03	360500	8816701	4296	19/06/2022	11:15	10.2	8.3	460	240	-	-	0.1	Quiulacocha	Manantial	Flujo de agua subterránea en congloemrado calcareo, Fm Casapalca manantial captado, color transparente.
4	F-04	360628	8816905	4290	19/06/2022	11:20	12	7.9	740	280	-	-	0.1	Quiulacocha	Bocamina	Flujo de agua en conglomerado calcáreo, Fm Casapalca, surgente de antigua bocamina, Fm Casapalca , color transparente.
5	F-05	360787	8817647	4269	25/06/2022	14:20	23.1	5.89	9860	5060	-	-	0.8	Quiulacocha	Filtración	Flitración del depósito de desmonte Excélsior.
Inventario fuentes superficiales naturales																
1	R-1	357380	8816524	4221	19/06/2022	09:00	11.6	7.6	2880	1480	-	-	1335.87	Qda. Ragra	Río	Aforo realizado cerca de la entrada a Yuraqhuanca.
2	R-2	359034	8816948	4243	19/06/2022	10:00	11.9	7.6	1500	780	-	-	563.39	Qda. Ragra	Río	Cuerpo receptor proveniente de ambas márgenes relavera de Quiulacocha, aguas residuales Cerro de Pasco y filtraciones Excélsior y Pampa Seca.
3	R-3	359236	8816971	4277	25/06/2022	10:38	13.1	8.7	1310	680	-	-	559.07	Qda. Ragra	Río	Cuerpo receptor proveniente de ambas márgenes relavera de Quiulacocha, aguas residuales Cerro de Pasco y filtraciones Excélsior y Pampa Seca.
4	RH-1	361064	8817232	4304	18/06/2022	10:20	11.94	6.85	730	360	-	-	2.5	Qda. Golf	Riachuelo	Agua ligeramente amarillenta.
5	L-1	359322	8816925	4256	19/06/2022	11:55	12.6	2.62	9760	4870	-	-	-	Quiulacocha	Laguna	Agua de Laguna
6	B-1	359147	8816854	4253	19/06/2022	10:26	8.4	8.29	310	160	-	-	-	Quiulacocha	Bofedal	Agua de Bofedal, agua ligeramente amarillenta
Estaciones de aguas superficiales en infraestructura.																
1	V-1	360592	8818703	4287	18/06/2022	09:29	14.72	1.72	>20000	>10000	-	-	0.2	Excélsior	Vertedero	Vertedero de V-1, se ubica en Excélsior, agua de relave color amarillenta.
2	V-3	360835	8817550	4276	18/06/2022	09:54	17.1	3.47	17370	8600	-	-	6.51	Quiulacocha	Vertedero	Vertedero V-3, se ubica en la relavera Quiulacocha. Vertimiento de agua superficial y filtraciones del depósito de desmonte Excélsior, agua color amarillenta.
3	V-4	359974	8816603	4163	18/06/2022	10:30	12.05	2.95	17430	8680	-	-	5.81	Dique flotante	Vertedero	Vertedero de relave V-4, se ubica en la margen izquierda del dique flotante de Quiulacocha.
4	C-01	360285	8817908	4284	18/06/2022	08:37	12	7.3	1770	880	-	-	1.04	Pampa Seca	Canal	Vertimiento de aguas del Sector de Pampa Seca, agua ligeramente amarillenta.
5	C-02	359674	8816476	4272	18/06/2022	11:12	12.8	7.5	730	370	-	-	74.05	Quiulacocha	Canal	Canal al extremo Sur de Quiulacocha.
6	C-03	358128	8816654	4228	19/06/2022	09:42	10.4	8.19	440	230	-	-	23.89	Qda. Ragra	Canal	Canal dirigido a la quebrada Ragra, agua transparente canalizado.
7	C-04	359175	8816894	4253	19/06/2022	10:37	12	7.9	740	280	-	-	4.83	Quiulacocha	Canal	Verde Pardoso agua de Canal
8	TB-1	359258	8816957	4148	25/06/2022	09:35	10.9	4.3	8510	4380	-	-	0.27	Dique Principal	Tubería	Poza de la estación de bombeo-operaciones Quiulacocha, Pasco. Tubería de subdrenaje
9	TB-2	359254	8816943	4148	25/06/2022	09:52	9.7	4.88	7600	3880	-	-	0.18	Dique Principal	Tubería	Poza de la estación de bombeo Quiulacocha, Pasco. Filtración de subdrenaje
10	TB-3A	359264	8816948	4147	25/06/2022	09:58	10.4	3.08	8490	4350	-	-	0.03	Dique Principal	Tubería	Poza de la estación de bombeo Quiulacocha, Pasco. Filtración del dique
11	TB-3B	359264	8816948	4147	25/06/2022	10:15	10.9	3.89	8530	4340	-	-	0.10	Dique Principal	Tubería	Poza de la estación de bombeo Quiulacocha, Pasco. Filtración del dique
12	TB-4	359328	8816935	4256	19/06/2022	11:50	12.2	3.95	10710	5350	-	-	3.05	Dique Principal	Tubería	Agua de recirculación proveniente de Poza de bombeo Quiulacocha



Tabla A-3
Monitoreo de piezómetros existentes - Marzo 2022
Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

N°	Código	Coord. WGS84 Z18S			Prof. (mbnt)	Fecha	Hora	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	TDS (ppm)	Eh (mV)	N.A. (mbnt)	Stick up	N.E. (mbnt)	N.P. (msnm)	Ubicación	Estado	Observaciones
		Este	Norte	Cota (msnm)															
1	P-01	360415	8818278	4282.76	15.7	21/03/2022	17:33	9.5	7.28	403	200	-10	0.48	0.66	0.18	4282.6	Pampa Seca	Operativo	Piezometro en bofedal al NE de Quiulacocha y 250 m de la planta de Oxidos de Volcan, presenta agua cristalina.
2	P-02	360550	8818052	4276.792	20.8	23/03/2022	14:43	10	4.91	21650	10825	95	0.82	0.6	0.22	4276.6	Quiulacocha	Operativo	Agua color amarillenta y presencia de particulas, piezometro único. Presenta escasa columna de agua.
3	P-03	360780	8818836	4294.82	19.0	23/03/2022	14:30	10.6	5.3	7540	3740	30	3.5	0.65	2.85	4292.0	Pampa Seca	Operativo	Ubicada al 6 m de la carretera, frente al campamento de Pampa Seca y el desmonte de Excélsior, agua amarillenta
4	PM-06-08A	360780	8818832	4294.33	10.1	23/03/2022	14:35	10.9	5.22	7570	3780	111	4.38	1.14	3.24	4291.1	Pampa Seca	Operativo	Frente al campamento Pampa Seca, agua amarillenta. Piezómetros mellizos someros con bomba wattera.
5	PM-06-08B	360781	8818830	4294.38	22.7	23/03/2022	14:35	10.4	4.15	13650	6840	135	4.5	1.17	3.33	4291.1	Pampa Seca	Operativo	Frente al campamento de Pampa Seca, agua amarillenta. Piezómetros mellizos someros con bomba wattera.
6	P-04 A	359472	8816510	4271.561	44.7	23/03/2022	16:05	10.8	6.95	1550	770	20	3.25	0.21	3.04	4268.5	Dique principal	Operativo	Ubicada en el eje del dique de Quilacocha, la coloracion de agua es cristalina.
7	P-04-B	359472	8816510	4271.561	10.6	23/03/2022	15:58	11	7.01	2000	1000	13.5	3.26	0.2	3.06	4268.5	Dique principal	Operativo	Ubicada en el eje del dique de Quilacocha, la coloración de agua es cristalina.
8	P-05	360713	8817702	4273.977	42.3	23/03/2022	14:50	11	1.18	21800	10900	75	1.44	0.55	0.89	4273.1	Quiulacocha	Operativo	Piezómetro al pie de carretera, agua ligeramente amarillenta, piezometro único.
9	P-06	360928	8817462	4279.212	12.8	23/03/2022	15:56	10.2	6.75	4470	2240	11	Surgente	0.62	0.0	4279.2	Quiulacocha	Operativo	Zona de bofedal, nivel del agua al ras del stick up, agua incolora, sin presencia de flujo, piezometro unico.
10	P-08	361502	8818463	4306.16	21.4	25/03/2022	14:00	12.4	6.19	4370	2190	13	6.11	0.51	5.6	4300.6	Excélsior	Operativo	Ubicada a 1 metros de una quebrada y 7 m de la carretera a Quiulacocha, tiene bomba wattera averiada.
11	P-12	361055	8817212	4300.829	7.7	22/03/2022	08:36	10.1	6.96	741	369	6	0.32	0.5	0.18	4300.6	Qda. Golf	Operativo	Se encuentra al SE de Quiulacocha, a 10 metros se observa un riachuelo, color de agua cristalina.
12	P-13	360780	8817208	4276.477	16.7	22/03/2022	10:46	10.5	7.41	340	761	-18	Surgente	0.5	0.0	4276.5	Quiulacocha	Operativo	Piezometro surgente, agua transparente, dificulta la extracción de muestra por uniones a 1.5 y 10 m.
13	P-14	360241	8817931	4294.535	11.0	21/03/2022	15:40	12.3	7.07	427	213	1	0.33	0.6	0.27	4294.3	Quiulacocha	Operativo	Ubicada cerca de la quebrada Pampa Seca, se aprecia un riachuelo al lado derecho, alrededor exitenen bofedales.
14	P-15	360313	8817886	4278.864	15.8	21/03/2022	15:22	11.8	7.18	759	379	-4	0.38	0.4	0.02	4278.8	Quiulacocha	Operativo	Al borde la relavera Quiulacocha, agua ligeramente amarillenta, piezómetro unico. Presenta escasa columna de agua lo que dificulta la extracción de muestras.
15	P-17	359231	8816914	4255.755	4.3	23/03/2022	11:32	11.2	5.58	4410	2210	-	3.9	0.43	3.47	4252.3	Quiulacocha	Operativo	A 20 m de la poza proximo a la estacion meteorologica, presenta escasa columna de agua.
16	P-18	359240	8816933	4257.156	8.1	23/03/2022	11:20	13	2.53	2225	1130	-25	6.57	0.28	6.29	4250.9	Quiulacocha	Operativo	Ubicada a 20 m de la poza cerca a la estacion meteorologica, presenta 20 cm de columna de agua
17	P-19	359359	8817090	4271.442	61.5	23/03/2022	17:26	9.8	5.82	8000	3970	75	17.4	0.75	16.65	4254.8	Dique principal	Operativo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble, se midio parametros del tubo de mayor diametro.
18	P3-B	360079	8817135	4275.278	5.7	23/03/2022	18:11	9.9	6.15	3170	1580	-	1.72	0.7	1.02	4274.3	Quiulacocha	Operativo	Se encuentra en la relavera, agua ligeramente amarillenta, sin presencia de particulas.
19	P-09-1	359295	8816891	4270.62	13.5	23/03/2022	10:15	-	-	-	-	-	10.06	0.31	9.75	4260.9	Dique principal	Operativo	Próximo la estación meteorológica de Quiulacocha, no se midió parametros por el reducido diametro del piezómetro
20	P-09-2	359295	8816891	4270.62	17.7	23/03/2022	10:11	11.2	7.08	3460	1730	-23	15.88	0.34	15.54	4255.1	Dique principal	Operativo	Ubicada a lado de la estacion meteorologica de Quilacocha - Pasco , la coloracion del agua es cristalina
21	PZ-BQ	360735	8817144	4290.802	43.3	22/03/2022	09:17	11.07	7.24	426	211	-18	6.69	0.6	6.09	4284.7	Quiulacocha	Operativo	Color de agua incolora sin presencia de particulas.
22	HG-01	359995	8816931	4275.522	2.8	25/03/2022	15:44	12.5	2.27	44580	22340	118	1.98	0.36	1.62	4273.9	Dique flotante	Operativo	Ubicada en la parte central del dique de la relavera Quiulacocha, el color de agua roja parduzca
23	HG-02	360188	8817067	4275.205	4.2	23/03/2022	18:25	10.9	2.28	17750	9040	145	0.93	0.66	0.27	4274.9	Quiulacocha	Operativo	Al centro de la relavera Quiulacocha, agua amarilla rojiza, paralelo a los piezómetros HG-01 Y HG-03.
24	HG-03	360601	8817652	4282.764	2.5	23/03/2022	15:11	10.2	5.9	7380	3700	32	0.45	0.22	0.23	4282.5	Quiulacocha	Operativo	Ubicada a 15 m de la carretera Pampa Seca, al frente de Excélsior, agua de relave cristalina.
25	HG-04	360609	8818166	4276.655	2.3	22/03/2022	10:42	11.8	5.58	3459	1726	82	0.6	0.41	0.19	4276.5	Excélsior	Operativo	Color de agua cristalina sin presencia de particulas, ubicada en zona de relave
26	P-NN1	359960	8817023	4286.787	19.6	21/03/2022	11:30	14.4	6.4	2510	1279	37	Surgente	0.6	0	4286.8	Dique flotante	Operativo	El nivel surgente, con 0.1 l/s. Piezometro surgente con acumulación de sedimentos de relave.
27	P-NN2	359994	8817257	4278.072	54.3	21/03/2022	16:22	11.1	8.07	712	358	-54	0.02	0.75	0.73	4277.3	Quiulacocha	Operativo	Ubicada a 80 m del dique de flotante, su columna de agua es alta, agua cristalina sin particulas.
28	CAZ-CHAMP	361185	8817760	4285.97	3.2	22/03/2022	16:45	10.8	6.71	1066	531	20	1.03	0.6	0.43	4285.5	Champamarca	Operativo	Ubicada al oeste de la comunidad de Champamarca cercana a una vivienda, color de agua cristalina.

mbnt Metros bajo nivel de terreno

msnm Metros sobre nivel del mar

N.A. Nivele de agua

N.P. Nivel piezométrico



Tabla A-4
Monitoreo de piezómetros existentes - Junio y Julio 2022
Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

N°	Código	Coord. WGS84 Z18S			Prof. (mbnt)	Fecha	Hora	T (°C)	pH	CE (μS/cm)	TDS (ppm)	N.A. (mbnt)	Stick up	N.E. (mbnt)	N.P. (msnm)	Ubicación	Estado	Observaciones
		Este	Norte	Cota (msnm)														
1	CAZ-CHAMP	361185	8817760	4285.97	3.2	6/06/2022	10:30	10.2	6.15	1056	527	1.07	0.6	0.47	4285.5	Champamarca	Operativo	Ubicada al oeste de la comunidad de Champamarca cercana a una vivienda, color de agua cristalina.
2	HG-01	359995	8816931	4275.52	2.8	5/06/2022	10:04	12.6	4.46	20000	10000	2.29	0.36	1.93	4273.6	Dique flotante	Operativo	Ubicada en la parte central del dique de la relavera Quiulacocha, el color de agua roja parduzca
3	P-NN1	359960	8817023	4286.79	19.6	5/06/2022	10:40	12.4	1.15	4870	2550	Surgente	0.6	0	4286.8	Dique flotante	Operativo	El nivel surgente, con 0.1 l/s. Piezometro surgente con acumulación de sedimentos de relave.
4	GW-04A	360004	8816678	4259.12	60.0	10/07/2022	08:50	11.4	6.71	3000	1550	4.0	0.4	3.6	4255.5	Dique flotante	Operativo	Ubicada en el lado izquierdo del dique flotante de la relavera Quiulacocha, agua incolora.
5	GW-04B	360004	8816678	4259.12	9.0	10/07/2022	09:00	9.2	5.95	5480	2850	2.3	0.4	1.87	4257.2	Dique flotante	Operativo	Ubicada en el lado izquierdo del dique flotante de la relavera Quiulacocha, agua gris con presencia de partículas finas.
6	P-04 A	359472	8816510	4271.56	44.7	3/06/2022	14:07	11.4	6.76	1220	640	4.04	0.21	3.83	4267.7	Dique principal	Operativo	Ubicada en el eje del dique de Quilacocha, la coloracion de agua es cristalina.
7	P-04-B	359472	8816510	4271.56	10.6	5/06/2022	14:12	10.6	6.33	2300	1190	4.09	0.2	3.89	4267.7	Dique principal	Operativo	Ubicada en el eje del dique de Quilacocha, la coloración de agua es cristalina.
8	P-19	359359	8817090	4271.44	61.5	4/06/2022	16:48	13	5.4	2720	1400	17.9	0.75	17.15	4254.3	Dique principal	Operativo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble, se midio parametros del tubo de mayor diametro.
9	P-09-1	359295	8816891	4270.62	13.5	3/06/2022	17:00	-	-	-	-	11.09	0.31	10.78	4259.8	Dique principal	Operativo	Próximo la estación meteorológica de Quiulacocha, no se midió parametros por el reducido diametro del piezómetro
10	P-09-2	359295	8816891	4270.62	17.7	3/06/2022	17:00	11.3	5.96	2830	1450	16.78	0.34	16.44	4254.2	Dique principal	Operativo	Ubicada a lado de la estacion meteorologica de Quilacocha - Pasco , la coloracion del agua es cristalina
11	GW-01A	359332	8816965	4257.04	54.0	10/07/2022	13:21	12.8	6.18	1070	560	17.5	0.5	16.97	4240.1	Dique principal	Operativo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble,
12	GW-01B	359332	8816965	4257.04	6.0	10/07/2022	13:31	12.7	5.08	9610	4980	4.9	0.5	4.41	4252.6	Dique principal	Operativo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble,
13	GW-02A	359404	8816649	4257.43	60.0	8/07/2022	11:00	12.2	7.33	330	170	6.4	0.5	5.85	4251.6	Dique principal	Operativo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble,
14	GW-02B	359404	8816649	4257.43	6.5	9/07/2022	12:00	11.3	6.33	3450	1860	4.8	0.5	4.32	4253.1	Dique principal	Operativo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble,
15	P-08	361502	8818463	4306.16	21.4	6/06/2022	12:00	12.2	6.5	4680	2341	6.63	0.51	5.6	4300.6	Excélsior	Operativo	Ubicada a 1 metros de una quebrada y 7 m de la carretera a Quiulacocha, tiene bomba watterra averiada.
16	HG-04	360609	8818166	4276.66	2.3	5/06/2022	10:30	10.9	5.44	5500	2750	0.64	0.41	0.23	4276.4	Excélsior	Operativo	Color de agua cristalina sin presencia de partículas, ubicada en zona de relave
17	GW-09	361503	8818585	4310.76	55.0	10/07/2022	14:06	15.6	1.81	10710	5570	10.7	0.7	10.04	4300.7	Excélsior	Operativo	Se encuentra atrás de Excelsior, a unos metros de uan quebrada de aguas residuales, Agua de amarillenta color de oxido
18	P-01	360415	8818278	4282.76	15.7	5/06/2022	09:30	9.5	7.28	400	200	0.68	0.66	0.02	4282.7	Pampa Seca	Operativo	Piezometro en bofedal al NE de Quiulacocha y 250 m de la planta de Oxidos de Volcan, presenta agua cristalina.
19	P-03	360780	8818836	4294.82	19.0	5/06/2022	10:45	11.4	6.44	5660	2820	3.77	0.65	3.12	4291.7	Pampa Seca	Operativo	Ubicada al 6 m de la carretera, frente al campamento de Pampa Seca y el desmonte de Excélsior, agua amarillenta
20	PM-06-08A	360780	8818832	4294.33	10.1	5/06/2022	11:05	10.8	3.51	10530	5270	4.48	1.14	3.34	4291.0	Pampa Seca	Operativo	Frente al campamento Pampa Seca, agua amarillenta. Piezometros mellizos someros con bomba watterra.
21	PM-06-08B	360781	8818830	4294.38	22.7	5/06/2022	11:00	10.9	2.95	15480	7710	4.6	1.17	3.43	4291.0	Pampa Seca	Operativo	Frente al campamento de Pampa Seca, agua amarillenta. Piezometros mellizos someros con bomba watterra.
22	P-12	361055	8817212	4300.83	7.7	5/06/2022	08:27	9.8	5.31	880	450	0.37	0.5	0.13	4300.7	Qda. Golf	Operativo	Se encuentra al SE de Quiulacocha, a 10 metros se observa un riachuelo, color de agua cristalina.
23	P-02	360550	8818052	4276.79	20.8	5/06/2022	10:13	10.6	5.1	20000	10000	0.94	0.6	0.34	4276.5	Quiulacocha	Operativo	Agua color amarillenta y presencia de partículas, piezometro único. Presenta escasa columna de agua.
24	P-05	360713	8817702	4273.98	42.3	5/06/2022	09:24	11.1	5.86	16080	8040	1.35	0.55	0.8	4273.2	Quiulacocha	Operativo	Piezómetro al pie de carretera, agua ligeramente amarillenta, piezometro único.
25	P-06	360928	8817462	4279.21	12.8	5/06/2022	08:50	8.8	7.51	6000	3000	0.46	0.62	0.0	4279.2	Quiulacocha	Operativo	Zona de bofedal, nivel del agua al ras del stick up, agua incolora, sin presencia de flujo, piezometro unico.
26	P-13	360780	8817208	4276.48	16.7	5/06/2022	09:00	9.5	5.62	430	230	Surgente	0.5	0.0	4276.5	Quiulacocha	Operativo	Piezometro surgente, agua transparente, dificulta la extracción de muestra por uniones a 1.5 y 10 m.
27	P-14	360241	8817931	4294.54	11.0	5/06/2022	11:27	8.5	7.02	460	230	0.4	0.6	0.2	4294.3	Quiulacocha	Operativo	Ubicada cerca de la quebrada Pampa Seca, se aprecia un riachuelo al lado derecho, alrededor exitenen bofedales.
28	P-15	360313	8817886	4278.86	15.8	5/06/2022	11:16	10.5	6.67	990	490	0.89	0.4	0.49	4278.4	Quiulacocha	Operativo	Al borde la relavera Quiulacocha, agua ligeramente amarillenta, piezómetro unico. Presenta escasa columna de agua lo que dificulta la extracción de muestras.



Tabla A-4
Monitoreo de piezómetros existentes - Junio y Julio 2022
Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

N°	Código	Coord. WGS84 Z18S			Prof. (mbnt)	Fecha	Hora	T (°C)	pH	CE (μS/cm)	TDS (ppm)	N.A. (mbnt)	Stick up	N.E. (mbnt)	N.P. (msnm)	Ubicación	Estado	Observaciones
		Este	Norte	Cota (msnm)														
29	P-17	359231	8816914	4255.76	4.3	4/06/2022	17:10	-	-	-	-	Seco	0.43	4.3	4251.5	Quiulacocha	Operativo	A 20 m de la poza proximo a la estacion meteorologica, presenta escasa columna de agua.
30	P-18	359240	8816933	4257.16	8.1	4/06/2022	17:05	12	5.43	2350	1150	7.03	0.28	6.75	4250.4	Quiulacocha	Operativo	Ubicada a 20 m de la poza cerca a la estacion meteorologica, presenta 20 cm de columna de agua
31	P3-B	360079	8817135	4275.28	5.7	5/06/2022	11:34	13.1	6.77	2730	1430	1.51	0.7	0.81	4274.5	Quiulacocha	Operativo	Se encuentra en la relavera, agua ligeramente amarillenta, sin presencia de particulas.
32	PZ-BQ	360735	8817144	4290.8	43.3	5/06/2022	08:08	9.3	7.75	500	250	7.02	0.6	6.42	4284.4	Quiulacocha	Operativo	Color de agua incolora sin presencia de particulas.
33	HG-02	360188	8817067	4275.21	4.2	5/06/2022	11:34	11.8	2.44	11960	6150	0.95	0.66	0.29	4274.9	Quiulacocha	Operativo	Al centro de la relavera Quiulacocha, agua amarilla rojiza, paralelo a los piezometros HG-01 Y HG-03.
34	HG-03	360601	8817652	4282.76	2.5	5/06/2022	09:52	11	6.25	7140	3560	0.48	0.22	0.26	4282.5	Quiulacocha	Operativo	Ubicada a 15 m de la carretera Pampa Seca, al frente de Excélsior, agua de relave cristalina.
35	P-NN2	359994	8817257	4278.07	54.3	5/06/2022	11:42	10	7.89	850	420	1.22	0.75	0.47	4277.6	Quiulacocha	Operativo	Ubicada a 80 m del dique de flotante, su columna de agua es alta, agua cristalina sin particulas.
36	GW-03A	359836	8816535	4257.13	42.0	10/07/2022	08:10	12.3	7.34	410	210	3.5	0.4	3.11	4254.0	Quiulacocha	Operativo	Agua ligeramente amarillenta color de oxido, piezometro doble,
37	GW-03B	359836	8816535	4257.13	12.8	10/07/2022	08:18	10.3	8.13	720	410	2.3	0.4	1.91	4255.2	Quiulacocha	Operativo	Agua ligeramente cristalina, piezometro doble,
38	GW-05A	360440	8816830	4263.66	30.0	10/07/2022	11:03	12.2	7.11	220	110	5.2	0.5	4.72	4258.9	Quiulacocha	Operativo	Agua incolora , sin presencia de particulas finas, se encuentra en material de relleno.
39	GW-05B	360440	8816830	4263.66	14.1	10/07/2022	11:10	11.5	8.58	200	100	3.3	0.5	2.81	4260.8	Quiulacocha	Operativo	Agua incolora , sin presencia de particulas finas, se encuentra en material de relleno.
40	GW-06A	360759	8817599	4265.47	36.0	10/07/2022	12:00	12.1	7.33	940	480	6.2	0.5	5.72	4259.7	Quiulacocha	Operativo	Piezómetro al pie de Excelsior, en la carreterra, agua ligeramente amarillenta.
41	GW-06B	360759	8817599	4265.47	5.0	10/07/2022	12:10	14.3	5.36	16170	8400	0.8	0.5	0.27	4265.2	Quiulacocha	Operativo	Piezómetro al pie de Excelsior, en la carreterra, agua ligeramente amarillenta.
42	GW-07A	360644	8817846	4263.91	40.0	10/07/2022	14:50	11.9	6.24	4230	2140	4.1	0.5	3.55	4260.4	Quiulacocha	Operativo	Piezómetro al pie de Excelsior, al N de Quiulacocha, agua turbia color negruzca.
43	GW-07B	360644	8817846	4263.91	4.0	10/07/2022	14:40	12.2	6.23	4730	2410	0.8	0.5	0.26	4263.7	Quiulacocha	Operativo	Piezómetro al pie de Excelsior, al N de Quiulacocha, agua turbia color negruzca con ligeros sedimentos suspendidos.
44	GW-08	361082	8817458	4295.33	53.0	10/07/2022	11:20	12.7	8.14	570	290	12.1	0.7	11.38	4283.9	Quiulacocha	Operativo	Se encuenta al NE de Quiulacocha, agua ligeramente marron con particulas finas.
45	GW-10	360271	8817683	4264.74	40.0	10/07/2022	12:27	13.1	7.9	1460	740	2.0	0.5	1.54	4263.2	Quiulacocha	Operativo	Se encuentra al N de Quiulacocha, agua cristalina con particulas finas.
46	GW-11A	359762	8817161	4263.58	50.0	10/07/2022	10:14	10.6	7.8	780	400	1.8	0.5	1.26	4262.3	Quiulacocha	Operativo	Se encuentra al N de Quiulacocha cercano al dique flotante, agua ligeramente turbia color gris blanquecina.
47	GW-11B	359762	8817161	4263.58	14.0	10/07/2022	10:20	11.1	7.5	990	500	4.2	0.5	3.65	4259.9	Quiulacocha	Operativo	Se encuentra al N de Quiulacocha cercano al dique flotante, agua ligeramente turbia.
48	GW-12	359279	8816987	4246.76	50.0	10/07/2022	17:30	11.3	7.3	1570	800	7.4	0.4	7	4239.8	Quiulacocha	Operativo	Se encuentra cercano a la poza de recirculación del dique principal, agua ligeramente amarillenta con sedimentos suspendidos.

mbnt Metros bajo nivel de terreno

msnm Metros sobre nivel del mar

N.A. Nivele de agua

N.P. Nivel piezométrico



Tabla A-5
Monitoreo de piezómetros existentes - Enero 2023
Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

N°	Código	Coord. WGS84 Z18S			Prof. (mbnt)	Fecha	Hora	T (°C)	pH	CE (μS/cm)	TDS (ppm)	N.A. (mbnt)	Stick up	N.E. (mbnt)	N.P. (msnm)	Ubicación	Estado	Observaciones
		Este	Norte	Cota (msnm)														
1	CAZ-CHAMP	361185	8817760	4285.97	3.2	-	-	-	-	-	-	-	0.6	-	-	Champamarca	Operativo	Ubicada al oeste de la comunidad de Champamarca cercana a una vivienda, color de agua cristalina.
2	HG-01	359995	8816931	4275.52	2.8	24/01/2023	11:40	-	-	-	-	2.35	0.36	1.99	4273.5	Dique flotante	Operativo	Ubicada en la parte central del dique de la relavera Quiulacocha, el color de agua roja parduzca
3	P-NN1	359960	8817023	4286.79	19.6	24/01/2023	11:50	-	-	-	-	Surgente	0.6	0	4286.8	Dique flotante	Operativo	El nivel surgente, con 0.1 l/s. Piezometro surgente con acumulación de sedimentos de relave.
4	GW-04A	360004	8816678	4259.12	60.0	24/01/2023	11:00	13.2	6.8	2320	1180	4.0	0.4	3.56	4255.6	Dique flotante	Operativo	Ubicada en el lado izquierdo del dique flotante de la relavera Quiulacocha, agua incolora.
5	GW-04B	360004	8816678	4259.12	9.0	24/01/2023	11:00	11.6	6.58	4130	2090	2.2	0.4	1.75	4257.4	Dique flotante	Operativo	Ubicada en el lado izquierdo del dique flotante de la relavera Quiulacocha, agua gris con presencia de partículas finas.
6	P-04 A	359472	8816510	4271.56	44.7	23/01/2023	12:40	11.08	7.42	750	340	4.01	0.21	3.8	4267.8	Dique principal	Operativo	Ubicada en el eje del dique de Quilacocha, la coloracion de agua es cristalina.
7	P-04-B	359472	8816510	4271.56	10.6	23/01/2023	12:40	-	-	-	-	4.01	0.2	3.81	4267.8	Dique principal	Operativo	Ubicada en el eje del dique de Quilacocha, la coloración de agua es cristalina.
8	P-19	359359	8817090	4271.44	61.5	23/01/2023	09:45	13.3	5.72	5040	2570	18.125	0.75	17.375	4254.1	Dique principal	Operativo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble, se midio parametros del tubo de mayor diametro.
9	P-09-1	359295	8816891	4270.62	13.5	-	-	-	-	-	-	-	0.31	-	-	Dique principal	Operativo	Próximo la estación meteorológica de Quiulacocha, no se midió parametros por el reducido diametro del piezómetro
10	P-09-2	359295	8816891	4270.62	17.7	23/01/2023	09:45	13.1	6.55	2670	1340	17.265	0.34	16.925	4253.7	Dique principal	Operativo	Ubicada a lado de la estacion meteorologica de Quilacocha - Pasco , la coloracion del agua es cristalina
11	GW-01A	359332	8816965	4257.04	54.0	24/01/2023	08:57	14.1	5.68	6580	3340	17.5	0.5	16.97	4240.1	Dique principal	Operativo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble,
12	GW-01B	359332	8816965	4257.04	6.0	24/01/2023	08:57	13.6	5.5	6500	3300	4.9	0.5	4.41	4252.6	Dique principal	Operativo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble,
13	GW-02A	359404	8816649	4257.43	60.0	24/01/2023	10:59	13.6	6.94	720	360	6.4	0.5	5.85	4251.6	Dique principal	Operativo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble,
14	GW-02B	359404	8816649	4257.43	6.5	24/01/2023	10:59	15	5.48	6550	3330	4.8	0.5	4.32	4253.1	Dique principal	Operativo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble,
15	P-08	361502	8818463	4306.16	21.4	-	-	-	-	-	-	-	0.51	-	-	Excélsior	Operativo	Ubicada a 1 metros de una quebrada y 7 m de la carretera a Quiulacocha, tiene bomba wattera averiada.
16	HG-04	360609	8818166	4276.66	2.3	-	-	-	-	-	-	-	0.41	-	-	Excélsior	Operativo	Color de agua cristalina sin presencia de partículas, ubicada en zona de relave
17	GW-09	361503	8818585	4310.76	55.0	24/01/2023	16:25	15.6	2.65	7370	3760	11.0	0.7	10.34	4300.4	Excélsior	Operativo	Se encuentra atrás de Excelsior, a unos metros de uan quebrada de aguas residuales, Agua de amarillenta color de oxido
18	P-01	360415	8818278	4282.76	15.7	-	-	-	-	-	-	-	0.66	-	-	Pampa Seca	Operativo	Piezometro en bofedal al NE de Quiulacocha y 250 m de la planta de Oxidos de Volcan, presenta agua cristalina.
19	P-03	360780	8818836	4294.82	19.0	25/01/2023	-	-	-	-	-	4.04	0.65	3.39	4291.4	Pampa Seca	Operativo	Ubicada al 6 m de la carretera, frente al campamento de Pampa Seca y el desmonte de Excélsior, agua amarillenta
20	PM-06-08A	360780	8818832	4294.33	10.1	-	-	-	-	-	-	-	1.14	-	-	Pampa Seca	Operativo	Frente al campamento Pampa Seca, agua amarillenta. Piezometros mellizos someros con bomba wattera.
21	PM-06-08B	360781	8818830	4294.38	22.7	25/01/2023	09:00	11.9	3	8580	4390	-	1.17	-	-	Pampa Seca	Operativo	Frente al campamento de Pampa Seca, agua amarillenta. Piezometros mellizos someros con bomba wattera.
22	P-12	361055	8817212	4300.83	7.7	25/01/2023	11:20	10	6.4	760	380	0.35	0.5	0.15	4300.7	Qda. Golf	Operativo	Se encuentra al SE de Quiulacocha, a 10 metros se observa un riachuelo, color de agua cristalina.
23	P-02	360550	8818052	4276.79	20.8	25/01/2023	10:15	12.1	4.98	11630	5910	0.945	0.6	0.345	4276.4	Quiulacocha	Operativo	Agua color amarillenta y presencia de partículas, piezometro único. Presenta escasa columna de agua.
24	P-05	360713	8817702	4273.98	42.3	-	-	-	-	-	-	-	0.55	-	-	Quiulacocha	Operativo	Piezómetro al pie de carretera, agua ligeramente amarillenta, piezometro único.
25	P-06	360928	8817462	4279.21	12.8	-	-	-	-	-	-	-	0.62	-	-	Quiulacocha	Operativo	Zona de bofedal, nivel del agua al ras del stick up, agua incolora, sin presencia de flujo, piezometro unico.
26	P-13	360780	8817208	4276.48	16.7	-	-	-	-	-	-	-	0.5	-	-	Quiulacocha	Operativo	Piezometro surgente, agua transparente, dificulta la extracción de muestra por uniones a 1.5 y 10 m.
27	P-14	360241	8817931	4294.54	11.0	-	-	-	-	-	-	-	0.6	-	-	Quiulacocha	Operativo	Ubicada cerca de la quebrada Pampa Seca, se aprecia un riachuelo al lado derecho, alrededor existen bofedales.
28	P-15	360313	8817886	4278.86	15.8	-	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	Quiulacocha	Operativo	Al borde la relavera Quiulacocha, agua ligeramente amarillenta, piezómetro unico. Presenta escasa columna de agua lo que dificulta la extracción de muestras.



Tabla A-5
Monitoreo de piezómetros existentes - Enero 2023
Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

N°	Código	Coord. WGS84 Z18S			Prof. (mbnt)	Fecha	Hora	T (°C)	pH	CE (μS/cm)	TDS (ppm)	N.A. (mbnt)	Stick up	N.E. (mbnt)	N.P. (msnm)	Ubicación	Estado	Observaciones
		Este	Norte	Cota (msnm)														
29	P-17	359231	8816914	4255.76	4.3	-	-	-	-	-	-	-	0.43	-	-	Quiulacocha	Operativo	A 20 m de la poza proximo a la estacion meteorologica, presenta escasa columna de agua.
30	P-18	359240	8816933	4257.16	8.1	23/01/2023	10:05	13.3	6.93	1890	960	7.12	0.28	6.84	4250.3	Quiulacocha	Operativo	Ubicada a 20 m de la poza cerca a la estacion meteorologica, presenta 20 cm de columna de agua
31	P3-B	360079	8817135	4275.28	5.7	-	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	Quiulacocha	Operativo	Se encuentra en la relavera, agua ligeramente amarillenta, sin presencia de particulas.
32	PZ-BQ	360735	8817144	4290.8	43.3	25/01/2023	11:05	12.8	6.21	380	190	7.55	0.6	6.95	4283.9	Quiulacocha	Operativo	Color de agua incolora sin presencia de particulas.
33	HG-02	360188	8817067	4275.21	4.2	23/01/2023	13:10	15.5	2.05	11740	5990	-	0.66	-	-	Quiulacocha	Operativo	Al centro de la relavera Quiulacocha, agua amarilla rojiza, paralelo a los piezometros HG-01 Y HG-03.
34	HG-03	360601	8817652	4282.76	2.5	25/01/2023	09:30	11.7	4.44	6010	3380	2.45	0.22	2.23	4280.5	Quiulacocha	Operativo	Ubicada a 15 m de la carretera Pampa Seca, al frente de Excelsior, agua de relave cristalina.
35	P-NN2	359994	8817257	4278.07	54.3	23/01/2023	12:50	14.4	8.4	871	430	-	0.75	-	-	Quiulacocha	Operativo	Ubicada a 80 m del dique de flotante, su columna de agua es alta, agua cristalina sin particulas.
36	GW-03A	359836	8816535	4257.13	42.0	24/01/2023	10:30	11.6	7.27	450	200	0.97	0.4	0.57	4256.6	Quiulacocha	Operativo	Agua ligeramente amarillenta color de oxido, piezometro doble,
37	GW-03B	359836	8816535	4257.13	12.8	24/01/2023	10:30	11.5	8.8	650	330	0.97	0.4	0.57	4256.6	Quiulacocha	Operativo	Agua ligeramente cristalina, piezometro doble,
38	GW-05A	360440	8816830	4263.66	30.0	24/01/2023	16:00	10.6	6.46	280	140	1.23	0.5	0.73	4262.9	Quiulacocha	Operativo	Agua incolora , sin presencia de particulas finas, se encuentra en material de relleno.
39	GW-05B	360440	8816830	4263.66	14.1	24/01/2023	16:00	11.5	5.7	620	310	1.54	0.5	1.04	4262.6	Quiulacocha	Operativo	Agua incolora , sin presencia de particulas finas, se encuentra en material de relleno.
40	GW-06A	360759	8817599	4265.47	36.0	24/01/2023	14:20	13.4	6.46	960	490	0.64	0.5	0.14	4265.3	Quiulacocha	Operativo	Piezómetro al pie de Excelsior, en la carretera, agua ligeramente amarillenta.
41	GW-06B	360759	8817599	4265.47	5.0	24/01/2023	14:20	12.4	5.24	9760	4970	0.78	0.5	0.28	4265.2	Quiulacocha	Operativo	Piezómetro al pie de Excelsior, en la carretera, agua ligeramente amarillenta.
42	GW-07A	360644	8817846	4263.91	40.0	24/01/2023	14:40	12.6	3.4	3810	1960	1.02	0.5	0.52	4263.4	Quiulacocha	Operativo	Piezómetro al pie de Excelsior, al N de Quiulacocha, agua turbia color negruzca.
43	GW-07B	360644	8817846	4263.91	4.0	24/01/2023	14:40	14.02	5.04	7860	3910	0.78	0.5	0.28	4263.6	Quiulacocha	Operativo	Piezómetro al pie de Excelsior, al N de Quiulacocha, agua turbia color negruzca con ligeros sedimentos suspendidos.
44	GW-08	361082	8817458	4295.33	53.0	24/01/2023	14:00	12.8	7.6	836	418	7.57	0.7	6.87	4288.5	Quiulacocha	Operativo	Se encuenta al NE de Quiulacocha, agua ligeramente marron con particulas finas.
45	GW-10	360271	8817683	4264.74	40.0	24/01/2023	15:30	11.4	7.04	1400	700	1.72	0.5	1.22	4263.5	Quiulacocha	Operativo	Se encuentra al N de Quiulacocha, agua cristalina con particulas finas.
46	GW-11A	359762	8817161	4263.58	50.0	24/01/2023	15:20	10.8	7.03	460	230	Surgente	0.5	0	4263.6	Quiulacocha	Operativo	Se encuentra al N de Quiulacocha cercano al dique flotante, agua ligeramente turbia color gris blanquecina.
47	GW-11B	359762	8817161	4263.58	14.0	24/01/2023	15:20	10.8	6.72	500	250	3.71	0.5	3.21	4260.4	Quiulacocha	Operativo	Se encuentra al N de Quiulacocha cercano al dique flotante, agua ligeramente turbia.
48	GW-12	359279	8816987	4246.76	50.0	24/01/2023	12:00	10.8	6.13	1450	740	7.76	0.4	7.36	4239.4	Quiulacocha	Operativo	Se encuentra cercano a la poza de recirculación del dique principal, agua ligeramente amarillenta con sedimentos suspendidos.

mbnt Metros bajo nivel de terreno

msnm Metros sobre nivel del mar

N.A. Nivele de agua

N.P. Nivel piezométrico



Tabla A-6
Balance hídrico climático Años promedio (mm)

Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

Parámetros	set	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	Anual
temp	4.9	5.4	5.8	5.7	5.6	5.5	5.5	5.4	5.3	4.5	4.1	4.4	5.2
i	0.97	1.12	1.25	1.22	1.19	1.16	1.16	1.12	1.09	0.85	0.74	0.82	12.7
ETP sin corr	42	45	47	46	46	45	45	45	44	39	37	39	519
nº dias mes	30	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	365.3
nº horas luz	12.3	12.3	12.1	12	11.9	11.8	11.7	12	12	12.2	12.3	12.4	12.1
ETP corr.	42.7	47.3	47.4	47.9	46.9	41.9	45.6	44.6	45.5	39.9	38.9	41.2	529.9
p	63.3	113.8	129.7	144.0	166.4	164.9	163.6	89.6	50.0	27.1	18.6	32.1	1163
ETR	42.7	47.3	47.4	47.9	46.9	41.9	45.6	44.6	45.5	39.9	38.9	41.2	530
Déficit	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Reserva	20.6	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	37.2	16.9	7.8	482.5
Excedentes	0.0	37.1	82.3	96.1	119.5	123.0	118.0	45.0	4.5	0.0	0.0	0.0	625.4

$$a = 0.7 \quad i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad I = \sum i \quad e_c = f \cdot e$$

$$ETP = 16 (10T/I)^a$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$$

$$\text{Tasa de reserva} = 50.0$$

E = Evapotranspiración mensual en mm por mes de 30 días y 12 horas de duración

t = temperatura media mensual en °C

I = Índice térmico anual

i = Índice térmico mensual

a = Exponente que varía con el índice anual de calor de la localidad

e_c = Evapotranspiración mensual corregida en mm

f = Factor de corrección de acuerdo al mes y la latitud de la localidad que determinan las horas sol.

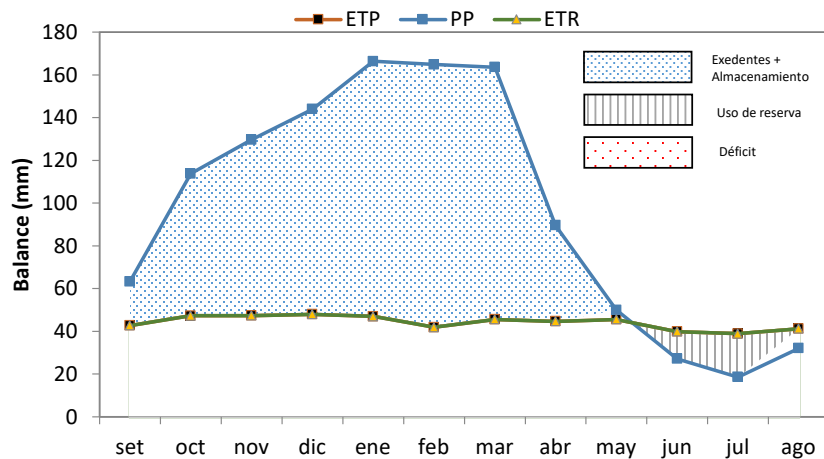




Tabla A-7

Caudales mensuales de vertederos y precipitación promedio multianual

Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

Vertedero V-4

Años	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
2014									19.6	20.0	19.1	21.8	20.0
2015	41.2	26.3	37.7	30.3	31.7	20.2	13.4	11.9	17.1	11.8	32.1	15.2	24.6
2016		41.7	24.5	32.3	19.1	11.7	10.1	8.2	9.4	9.5	7.3	10.3	13.1
2017	24.2	14.3	23.1	24.1	19.2	16.2	11.3	4.8		14.4	17.9	15.1	16.6
2018	26.8	26.9	31.3	18.2	11.2								22.7
2019													
2020													
2021				36.4	15.6	10.9	8.6	8.6	9.8	14.1	39.6	28.0	19.1
2022	23.9	52.2	37.1	35.3	12.9		13.4						34.2
Promedio	28.0	35.6	33.2	31.0	17.8	13.9	10.6	8.3	12.3	14.4	26.4	21.2	21.1

Vertedero V-3

Años	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
2014									12.2	13.9	15.1	17.5	14.6
2015	21.3	20.3	21.7	22.2	21.1	19.3	15.8	15.1	12.8	12.3	14.8	17.3	18.1
2016		29.6	24.6	24.9	19.1	16.3	12.2	8.8	7.4	6.7	6.5	8.0	12.2
2017	11.1	12.2	14.8	16.6	16.0	13.8	10.1	4.3		5.3	11.6	12.4	11.3
2018	16.3	20.3	24.5	13.6	9.5								16.7
2019													
2020													
2021				17.2	16.4	13.5	59.0	9.6	6.5	7.7	10.8	13.7	16.3
2022	12.7	15.8	15.1	15.8	15.0		65.7						22.2
Promedio	15.6	17.4	19.2	17.9	16.1	15.6	29.6	9.1	9.4	8.8	11.2	12.9	15.2

Resumen promedio de caudales Vs. precipitación

Años	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Anual
V-3	15.6	17.4	19.2	17.9	16.1	15.6	29.6	9.1	9.4	8.8	11.2	12.9	15.2
V-4	28.0	35.6	33.2	31.0	17.8	13.9	10.6	8.3	12.3	14.4	26.4	21.2	21.1
Lluvia	166.4	164.9	163.6	89.6	50.0	27.1	18.6	32.1	63.3	113.8	129.7	144.0	1163.1

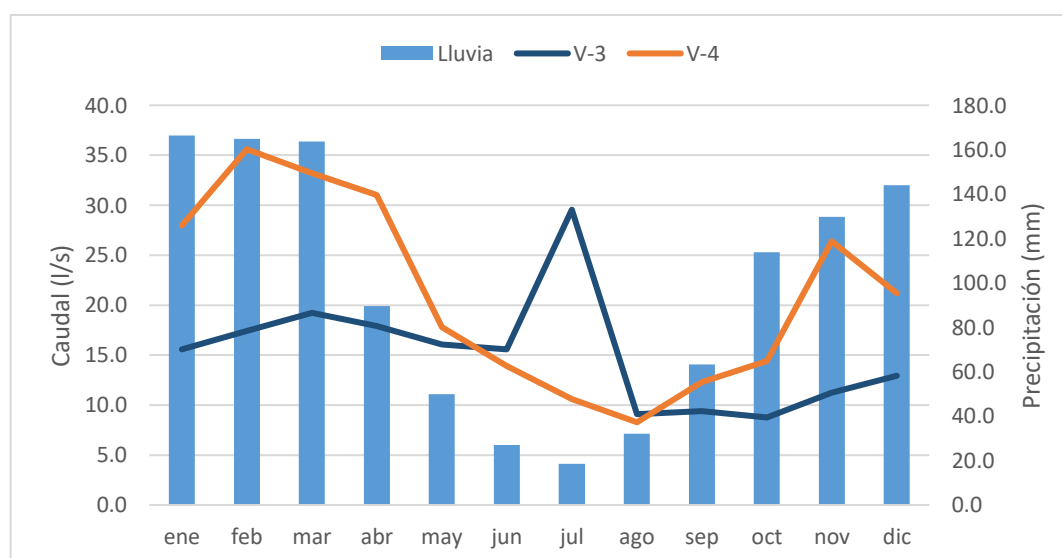




Tabla B-1
Resumen de Pruebas Hidráulicas
Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

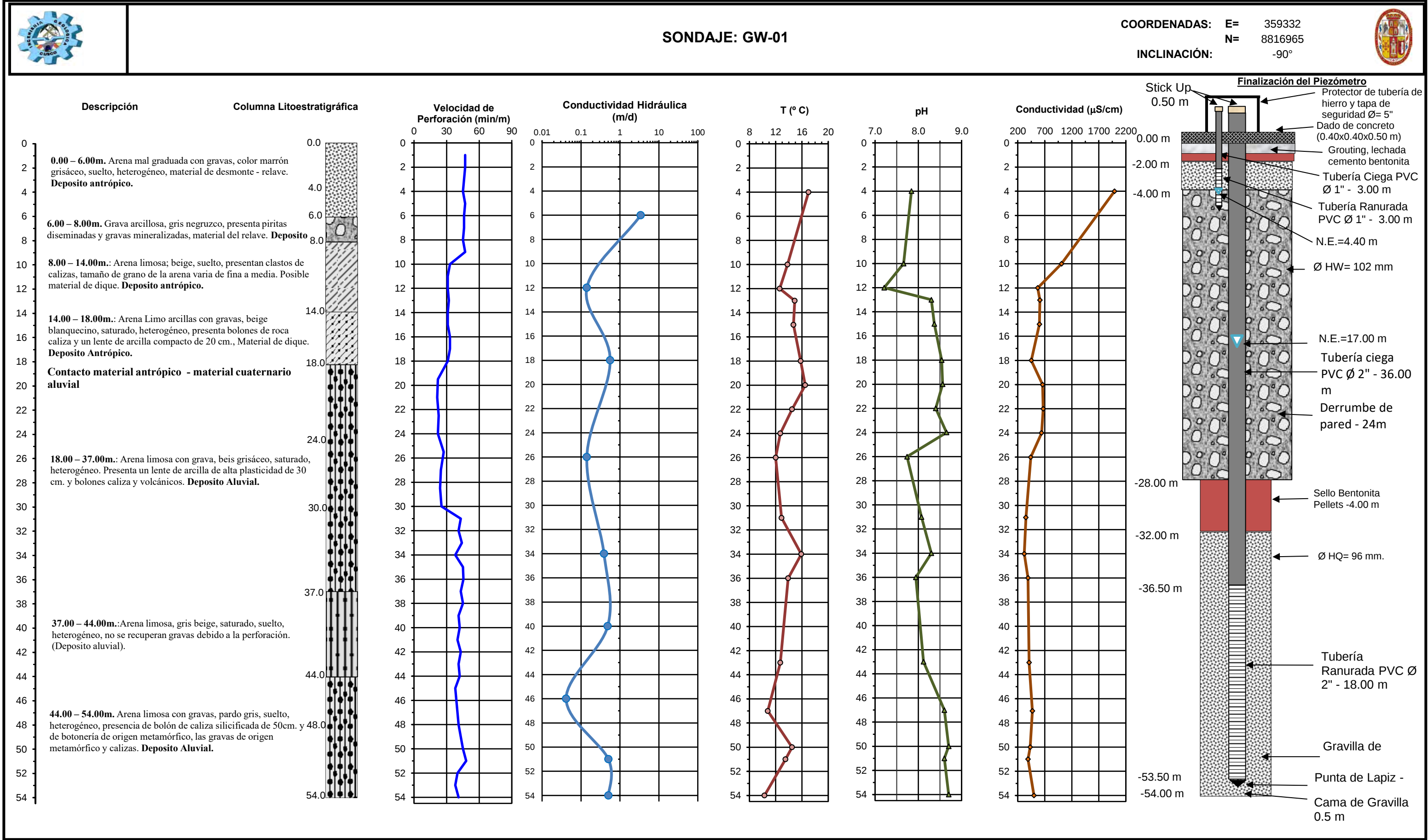
Nº	Sondaje	Coordenadas WGS 84		Ensayo	Tramo prueba		Conductividad Hidráulica			Unidad	Formacion
		Este	Norte		De	A	k (m/d)	k (m/s)	k (cm/s)		
1	GW-01	359332	8816965	LCV-1	3.0	6.0	0.28	7.5E-08	7.5E-06	Arena limosa	Depósito Antrópico
2	GW-01	359332	8816965	LCV-2	9.0	12.0	0.14	1.6E-06	1.6E-04	Arena limosa	Depósito Antrópico
3	GW-01	359332	8816965	R-3	15.0	18.0	0.56	6.5E-06	6.5E-04	Limo arcillas con gravas	Depósito Antrópico
4	GW-01	359332	8816965	LCV-4	23.0	26.0	0.14	1.6E-06	1.6E-04	Arena limoarcillosa	Depósito aluvial
5	GW-01	359332	8816965	LCV-5	31.0	34.0	0.39	4.5E-06	4.5E-04	Arena limoarcillosa	Depósito aluvial
6	GW-01	359332	8816965	LCV-6	37.0	40.0	0.48	5.6E-06	1.5E-03	Arena Limosa (SM)	Depósito aluvial
7	GW-01	359332	8816965	LCV-7	43.0	46.0	0.04	4.8E-07	2.0E-03	Arena Limosa (SM)	Depósito aluvial
8	GW-01	359332	8816965	LCV-8	48.0	51.0	0.12	1.4E-06	1.4E-04	Arena limosa (SM)	Depósito aluvial
9	GW-01	359332	8816965	LCV-9	53.0	54.0	0.75	8.7E-06	8.7E-04	Arena limosa con gravas	Depósito aluvial
10	GW-02	359404	8816649	LCV-1	0.0	6.0	0.37	4.3E-06	4.3E-04	Gravas limoarcillosas	Depósito Antrópico
11	GW-02	359404	8816649	LCV-2	6.0	9.0	0.25	2.9E-06	2.9E-04	Arcilla limosa con gravas	Depósito Antrópico
12	GW-02	359404	8816649	LCV-3	12.0	15.0	1.55	1.8E-05	1.8E-03	Arena con gravas	Depósito Antrópico
13	GW-02	359404	8816649	R-4	18.0	21.0	0.16	1.8E-06	1.8E-04	Arena limoarcillosa (SM)	Depósito Antrópico
14	GW-02	359404	8816649	R-5	26.0	29.0	1.60	1.9E-05	1.9E-03	Arena con gravas	Depósitos Aluviales
15	GW-02	359404	8816649	R-6	34.0	37.0	0.15	1.8E-06	1.8E-04	Arenas limoarcillosas con gravas	Depósitos Aluviales
16	GW-02	359404	8816649	R-7	42.0	45.0	0.36	4.2E-06	4.2E-04	Arenas limosas	Depósitos Aluviales
17	GW-02	359404	8816649	LCV-8	48.0	51.0	0.21	2.4E-06	2.4E-04	Roca esquisto	Grupo Excelsior
18	GW-02	359404	8816649	LCV-9	51.0	53.0	0.17	2.0E-06	2.0E-04	Roca esquisto	Grupo Excelsior
19	GW-02	359404	8816649	R-10	54.0	57.0	0.47	5.5E-06	5.5E-04	Roca esquisto	Grupo Excelsior
20	GW-02	359404	8816649	R-11	57.0	60.0	0.39	4.5E-06	4.5E-04	Roca esquisto	Grupo Excelsior
21	GW-03	359836	8816535	R-01	6.0	9.0	0.56	6.5E-06	6.5E-04	Arena Limosa (SM) Relave	Deposito Antropico
22	GW-03	359836	8816535	R-02	13.0	16.0	0.93	1.1E-05	1.1E-03	Arena Limosa (SM) Relave	Deposito Antropico
23	GW-03	359836	8816535	R-03	19.0	22.0	0.62	7.2E-06	7.2E-04	Limo Arenoso (ML) Relave	Deposito Antropico
24	GW-03	359836	8816535	R-04	25.0	28.0	0.39	4.5E-06	4.5E-04	Grava arenosa limosa (GM)	Deposito Lacustre
25	GW-03	359836	8816535	R-05	31.0	34.0	0.18	2.1E-06	2.1E-04	Esquisto	Grupo Excelsior
26	GW-03	359836	8816535	R-06	39.0	42.0	0.18	2.1E-06	2.1E-04	Esquisto	Grupo Excelsior
27	GW-04	360004	8816678	LCV - 01	11.0	16.0	0.23	2.6E-06	2.6E-04	Limo arenoso (ML) Relave	Deposito Antropico
28	GW-04	360004	8816678	LCV - 02	21.0	24.0	0.27	3.1E-06	3.1E-04	Arcilla gravosa (CH) Relave	Deposito Antropico
29	GW-04	360004	8816678	R-03	29.0	32.0	0.68	7.9E-06	7.9E-04	Arcilla limo arenosa (CL) Relave	Deposito Antropico
30	GW-04	360004	8816678	R-04	35.0	38.0	0.08	9.3E-07	9.3E-05	Grava arenosa limosa (GM)	Deposio Lacustre
31	GW-04	360004	8816678	R-05	42.0	45.0	1.95	2.3E-05	2.3E-03	Limo arcilla (MH)	Deposio Lacustre
32	GW-04	360004	8816678	R-06	48.0	51.0	0.44	5.1E-06	5.1E-04	Grava arena limosa (GM)	Deposio Lacustre
33	GW-04	360004	8816678	R-07	55.0	60.0	0.21	2.4E-06	2.4E-04	Esquisto	Grupo Excelsior
34	GW-04	360004	8816678	LCV - 08	55.0	60.0	0.51	5.9E-06	5.9E-04	Esquisto	Grupo Excelsior
35	GW-05	360440	8816830	LCV - 01	4.0	7.0	0.28	3.3E-06	3.3E-04	Grava arenosa arcillosa (GC)	Deposito Lacustre
36	GW-05	360440	8816830	LCV - 02	9.0	12.0	0.13	1.5E-06	1.5E-04	Grava arenosa arcillosa (GC)	Deposito Lacustre
37	GW-05	360440	8816830	R-03	15.0	18.0	0.15	1.7E-06	1.7E-04	Grava arenosa arcillosa (GC)	Deposito Lacustre
38	GW-05	360440	8816830	R-04	20.0	21.0	0.63	7.3E-06	7.3E-04	Esquisto	Grupo Excelsior
39	GW-05	360440	8816830	R-05	21.0	24.0	0.11	1.3E-06	1.3E-04	Esquisto	Grupo Excelsior
40	GW-05	360440	8816830	R-06	26.5	27.0	0.64	7.4E-06	7.4E-04	Esquisto	Grupo Excelsior
41	GW-05	360440	8816830	R-07	27.0	30.0	0.13	1.5E-06	1.5E-04	Esquisto	Grupo Excelsior
42	GW-06	360759	8817599	LCV - 01	3.0	6.0	0.78	9.0E-06	9.0E-04	Arena arcillosa (SC)	Deposito antrópico
43	GW-06	360759	8817599	R-02	9.0	12.0	0.15	1.7E-06	1.7E-04	Arena arcillosa (SC)	Deposito antrópico
44	GW-06	360759	8817599	R-03	15.0	18.0	0.15	1.7E-06	1.7E-04	Esquisto (Poco Fracturado)	Grupo Excelsior
45	GW-06	360759	8817599	R-04	20.3	21.0	0.50	5.8E-06	5.8E-04	Esquisto (Poco Fracturado)	Grupo Excelsior
46	GW-06	360759	8817599	R-05	23.0	24.0	0.24	2.8E-06	2.8E-04	Esquisto (Poco Fracturado)	Grupo Excelsior
47	GW-06	360759	8817599	R-06	26.0	27.0	0.48	5.6E-06	4.7E-04	Esquisto (Poco Fracturado)	Grupo Excelsior
48	GW-06	360759	8817599	R-07	27.0	30.0	0.04	4.8E-07	1.4E-04	Esquisto (Poco Fracturado)	Grupo Excelsior
49	GW-06	360759	8817599	R-08	32.6	33.0	0.58	6.8E-06	6.8E-04	Esquisto (Poco Fracturado)	Grupo Excelsior
50	GW-06	360759	8817599	R-09	35.1	36.0	0.29	3.3E-06	3.3E-04	Esquisto (Poco Fracturado)	Grupo Excelsior
51	GW-07	360644	8817846	R-01	3.0	6.0	0.15	1.7E-06	1.7E-04	Arena arcillosa (SC) Relave	Deposito antrópico
52	GW-07	360644	8817846	LCV - 02	9.0	12.0	0.43	5.0E-06	5.0E-04	Arena arcillosa (SC) Relave	Deposito antrópico
53	GW-07	360644	8817846	R-03	9.0	12.0	0.10	1.1E-06	1.1E-04	Arena arcillosa (SC) Relave	Deposito antrópico
54	GW-07	360644	8817846	R-04	15.0	18.0	0.15	1.8E-06	1.8E-04	Arena arcillosa (SC) Relave	Deposito antrópico
55	GW-07	360644	8817846	R-05	21.0	24.0	0.16	1.9E-06	1.9E-04	Grava arenosa arcillosa (GC)	Deposito antrópico
56	GW-07	360644	8817846	R-06	29.0	30.0	0.27	3.2E-06	3.2E-04	Esquisto (Poco fracturado)	Grupo Excelsior
57	GW-07	360644	8817846	R-07	32.5	33.0	0.48	5.6E-06	2.0E-04	Esquisto (Poco fracturado)	Grupo Excelsior
58	GW-07	360644	8817846	R-08	35.4	36.0	0.04	4.8E-07	2.6E-04	Esquisto (Poco fracturado)	Grupo Excelsior
59	GW-07	360644	8817846	R-09	39.0	40.0	0.20	2.3E-06	2.3E-04	Esquisto (Poco fracturado)	Grupo Excelsior
60	GW-08	361082	8817458	LCV - 01	3.0	6.0	0.18	2.0E-06	2.0E-04	Arena limosa (SM)	Deposito antrópico
61	GW-08	361082	8817458	R-02	9.0	12.0	0.10	1.2E-06	1.2E-04	Arenas limosas (SM)	Deposito antrópico
62	GW-08	361082	8817458	R-03	15.0	18.0	0.44	5.1E-06	5.1E-04	Arenas limosas (SM)	Deposito antrópico
63	GW-08	361082	8817458	LCV - 04	21.0	24.0	0.46	5.3E-06	5.3E-04	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
64	GW-08	361082	8817458	R-05	26.5	27.0	0.56	6.5E-06	6.5E-04	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
65	GW-08	361082	8817458	R-06	29.0	30.0	0.69	7.9E-06	7.9E-04	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
66	GW-08	361082	8817458	R-07	32.5	33.0	0.48	5.6E-06	1.1E-03	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
67	GW-08	361082	8817458	R-08	35.4	36.0	0.04	4.8E-07	9.7E-04	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
68	GW-08	361082	8817458	R-09	39.0	40.0	0.87	1.0E-05	1.0E-03	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
69	GW-08	361082	8817458	R-10	41.2	42.0	0.96	1.1E-05	1.1E-03	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior



Tabla B-1
Resumen de Pruebas Hidráulicas
Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

N°	Sondaje	Coordenadas WGS 84		Ensayo	Tramo prueba		Conductividad Hidráulica			Unidad	Formacion
		Este	Norte		De	A	k (m/d)	k (m/s)	k (cm/s)		
70	GW-08	361082	8817458	R-11	47.3	48.0	1.95	2.3E-05	2.3E-03	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
71	GW-08	361082	8817458	R-12	50.4	51.0	1.95	2.3E-05	2.3E-03	Esquisto (Poco Fracturado)	Grupo Excelsior
72	GW-08	361082	8817458	R-13	52.3	53.0	1.95	2.3E-05	2.3E-03	Esquisto (Poco Fracturado)	Grupo Excelsior
73	GW-09	361503	8818585	LCV - 01	6.0	9.0	0.30	3.5E-06	3.5E-04	Arena limosa con gravas	Depósito Antrópico
74	GW-09	361503	8818585	LCV - 02	12.0	15.0	0.72	#¡REF!	#¡REF!	Bloques de roca, boloneria	Depósito Antrópico
75	GW-09	361503	8818585	LCV - 03	18.0	21.0	0.19	2.2E-06	2.2E-04	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
76	GW-09	361503	8818585	LCV - 04	23.0	24.0	1.33	1.5E-05	1.5E-03	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
77	GW-09	361503	8818585	LCC - 05	24.0	27.0	0.23	2.6E-06	2.6E-04	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
78	GW-09	361503	8818585	R-06	29.0	30.0	0.23	2.7E-06	2.7E-04	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
79	GW-09	361503	8818585	LCV - 07	32.0	33.0	1.91	2.2E-05	2.2E-03	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
80	GW-09	361503	8818585	LCV - 08	35.0	36.0	2.95	3.4E-05	3.4E-03	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
81	GW-09	361503	8818585	LCC- 09	36.0	39.0	0.16	1.8E-06	1.8E-04	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
82	GW-09	361503	8818585	LCC- 10	40.0	45.0	0.12	1.4E-06	1.4E-04	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
83	GW-09	361503	8818585	LCV - 11	48.0	49.0	0.57	6.6E-06	6.6E-04	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
84	GW-09	361503	8818585	LCV - 12	51.0	52.0	0.36	4.2E-06	4.2E-04	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
85	GW-09	361503	8818585	LCV - 13	54.0	55.0	2.08	2.4E-05	2.4E-03	Esquisto (Fracturado)	Grupo Excelsior
86	GW-10	360271	8817683	LCV - 01	3.0	6.0	0.38	4.4E-06	4.4E-04	Esquisto (Alterado)	Grupo Excelsior
87	GW-10	360271	8817683	R - 02	8.0	9.0	1.95	2.3E-05	2.3E-03	Esquisto poco fracturado	Grupo Excelsior
88	GW-10	360271	8817683	R - 03	11.0	12.0	1.95	2.3E-05	2.3E-03	Esquisto poco fracturado	Grupo Excelsior
89	GW-10	360271	8817683	R - 04	14.0	15.0	1.95	2.3E-05	2.3E-03	Esquisto poco fracturado	Grupo Excelsior
90	GW-10	360271	8817683	R - 05	17.0	18.0	1.22	1.4E-05	1.4E-03	Esquisto poco fracturado	Grupo Excelsior
91	GW-10	360271	8817683	R - 06	20.0	21.0	1.07	1.2E-05	1.2E-03	Esquisto poco fracturado	Grupo Excelsior
92	GW-10	360271	8817683	R - 07	23.0	24.0	0.74	8.6E-06	8.6E-04	Esquisto poco fracturado	Grupo Excelsior
93	GW-10	360271	8817683	R - 08	26.0	27.0	0.71	8.2E-06	8.2E-04	Esquisto poco fracturado	Grupo Excelsior
94	GW-10	360271	8817683	R - 09	29.0	30.0	0.60	6.9E-06	6.9E-04	Esquisto poco fracturado	Grupo Excelsior
95	GW-10	360271	8817683	R - 10	34.5	35.0	0.93	1.1E-05	1.1E-03	Esquisto poco fracturado	Grupo Excelsior
96	GW-10	360271	8817683	R - 11	39.0	40.0	0.64	7.5E-06	7.5E-04	Esquisto poco fracturado	Grupo Excelsior
97	GW-10	360271	8817683	Lugeón-12	25.0	30.0	0.01	1.7E-07	1.7E-05	Esquisto poco fracturado	Grupo Excelsior
98	GW-10	360271	8817683	Lugeón-13	35.0	40.0	0.03	3.6E-07	3.6E-05	Esquisto poco fracturado	Grupo Excelsior
99	GW-11	359762	8817161	LCV - 01	3.0	6.0	0.80	9.3E-06	9.3E-04	Grava arenosa arcillosa (GC)	Depósito Antrópico
100	GW-11	359762	8817161	R - 02	9.0	12.0	0.47	5.5E-06	5.5E-04	Grava arenosa arcillosa (GC)	Deposito antrópico.
101	GW-11	359762	8817161	R - 03	15.0	18.0	0.21	2.4E-06	2.4E-04	Esquisto (Muy Fracturado)	Grupo Excelsior
102	GW-11	359762	8817161	R - 04	20.3	21.0	0.25	2.9E-06	2.9E-04	Esquisto (Muy Fracturado)	Grupo Excelsior
103	GW-11	359762	8817161	R - 05	23.4	24.0	0.41	4.7E-06	4.7E-04	Esquisto (Muy Fracturado)	Grupo Excelsior
104	GW-11	359762	8817161	R - 06	26.5	27.0	0.00	2.1E-05	2.1E-03	Esquisto (Muy Fracturado)	Grupo Excelsior
105	GW-11	359762	8817161	R - 07	29.5	30.0	0.48	5.6E-06	1.5E-03	Esquisto (Muy Fracturado)	Grupo Excelsior
106	GW-11	359762	8817161	R - 08	32.5	33.0	0.04	4.8E-07	7.6E-04	Esquisto (Muy Fracturado)	Grupo Excelsior
107	GW-11	359762	8817161	R - 09	35.2	36.0	0.61	7.0E-06	7.0E-04	Esquisto (Muy Fracturado)	Grupo Excelsior
108	GW-11	359762	8817161	R - 10	38.5	39.0	0.63	7.3E-06	7.3E-04	Esquisto (Muy Fracturado)	Grupo Excelsior
109	GW-11	359762	8817161	R - 11	41.4	42.0	0.45	5.2E-06	5.2E-04	Esquisto (Muy Fracturado)	Grupo Excelsior
110	GW-11	359762	8817161	LCV - 12	44.4	45.0	1.00	1.2E-05	1.2E-03	Esquisto (Muy Fracturado)	Grupo Excelsior
111	GW-11	359762	8817161	R - 13	47.4	48.0	0.56	6.5E-06	6.5E-04	Esquisto (Muy Fracturado)	Grupo Excelsior
112	GW-11	359762	8817161	R - 14	49.0	50.0	0.12	1.4E-06	1.4E-04	Esquisto (Muy Fracturado)	Grupo Excelsior
113	GW-12	359279	8816987	LCV - 01	5.0	6.0	0.64	7.4E-06	7.4E-04	Arcilla con grava	Depósito Lacustre
114	GW-12	359279	8816987	LCV - 02	9.0	12.0	0.19	2.2E-06	2.2E-04	Arcilla con grava	Depósito Lacustre
115	GW-12	359279	8816987	R - 03	15.0	18.0	0.23	2.7E-06	2.7E-04	Grava arenosa con arcilla	Deposito Aluvial
116	GW-12	359279	8816987	R - 04	21.0	24.0	0.52	6.0E-06	6.0E-04	Grava areno arcillosa	Deposito Aluvial
117	GW-12	359279	8816987	R - 05	27.0	30.0	1.95	2.3E-05	2.3E-03	Grava areno arcillosa	Deposito Aluvial
118	GW-12	359279	8816987	R - 06	31.0	34.0	0.48	5.6E-06	1.6E-03	Grava areno arcillosa	Deposito Aluvial
119	GW-12	359279	8816987	LCV - 07	37.0	40.0	0.04	4.8E-07	1.5E-03	Grava areno arcillosa	Deposito Aluvial
120	GW-12	359279	8816987	R - 08	43.0	46.0	1.48	1.7E-05	1.7E-03	Grava areno arcillosa	Deposito Aluvial
121	GW-12	359279	8816987	R - 09	47.0	48.0	1.95	2.3E-05	2.3E-03	Esquisto	Grupo Excelsior
122	GW-12	359279	8816987	LCV - 10	48.0	49.0	1.26	1.5E-05	1.5E-03	Esquisto	Grupo Excelsior
123	GW-12	359279	8816987	R - 11	49.0	50.0	1.95	2.3E-05	2.3E-03	Esquisto	Grupo Excelsior

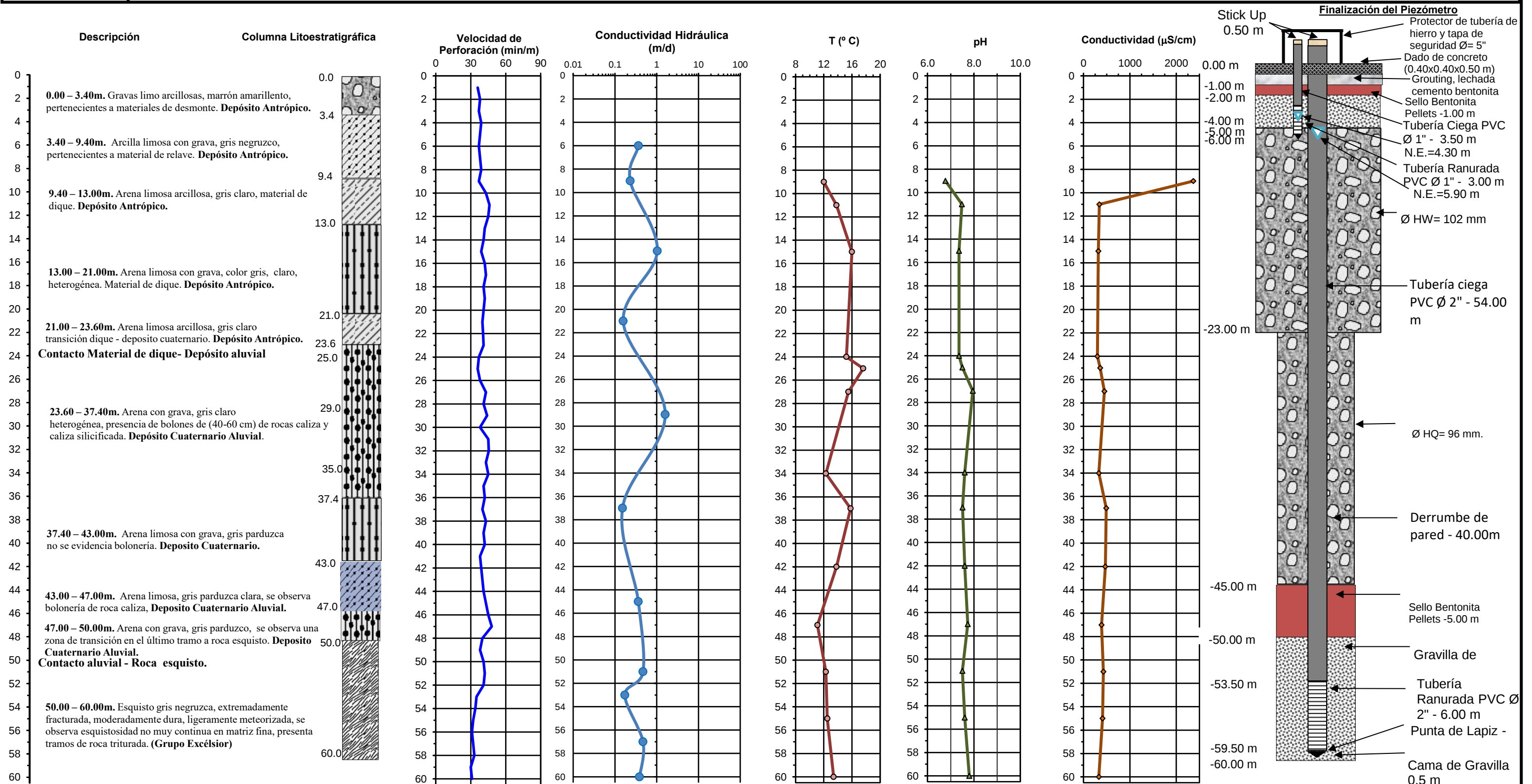
Gráfico B-1; Resumen de perforaciones hidrogeológicas





SONDAJE: GW-02

COORDENADAS: E= 359404
N= 8816649
INCLINACIÓN: -90°



Tipos de Roca/Litología

- Arena con grava
- Arcilla limosa



- Grava limo arcillosa
- Arena limosa con grava



- Arena limosa
- Arena limoso arcilloso



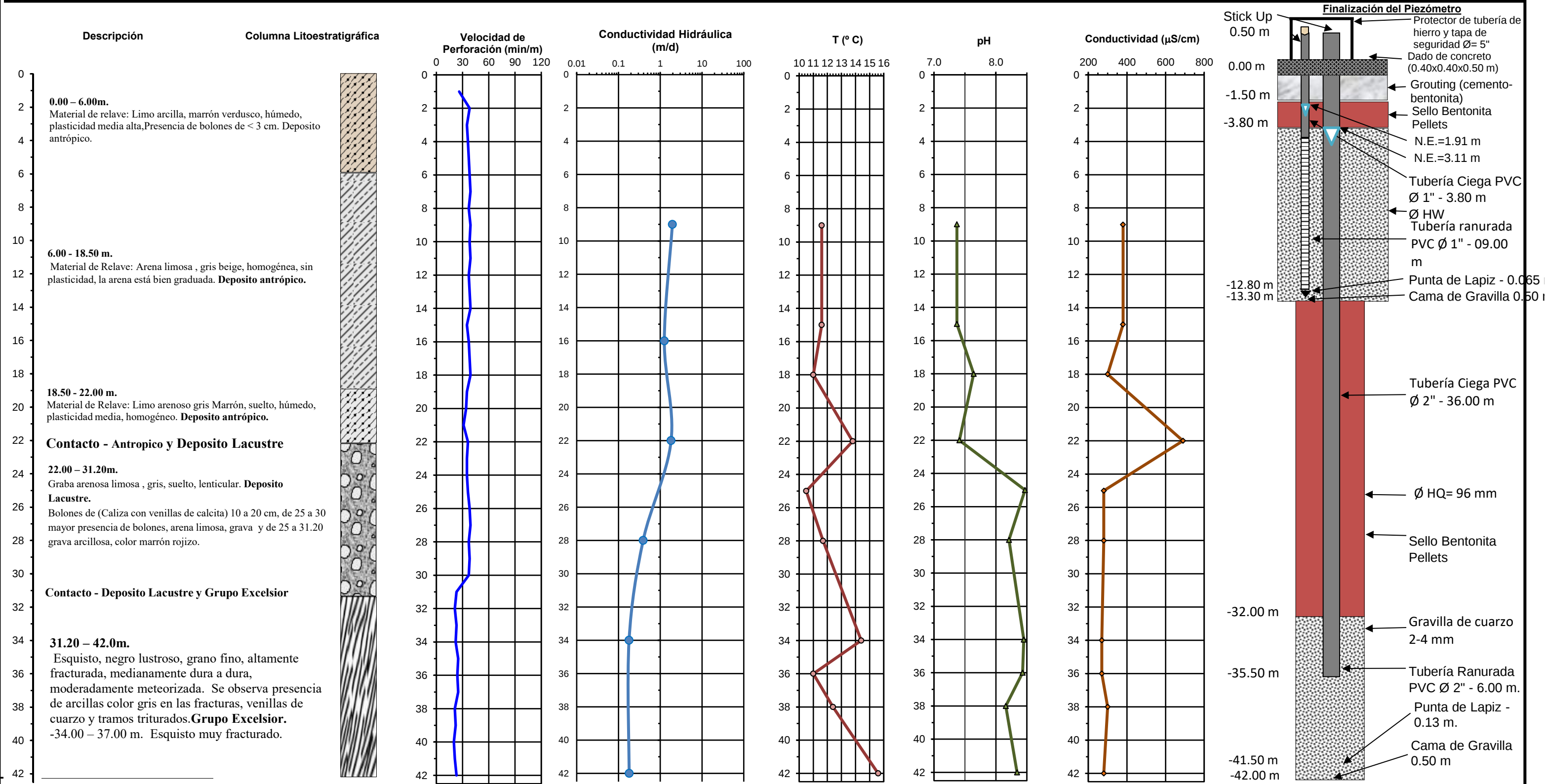
- Roca esquisto





SONDAJE: GW-03

COORDENADAS: E= 359836
N= 8816535
INCLINACIÓN: -90°



Tipos de Roca/Litología

- Limo arcilla



- Grava Arenosa limosa



- Arena Limosa



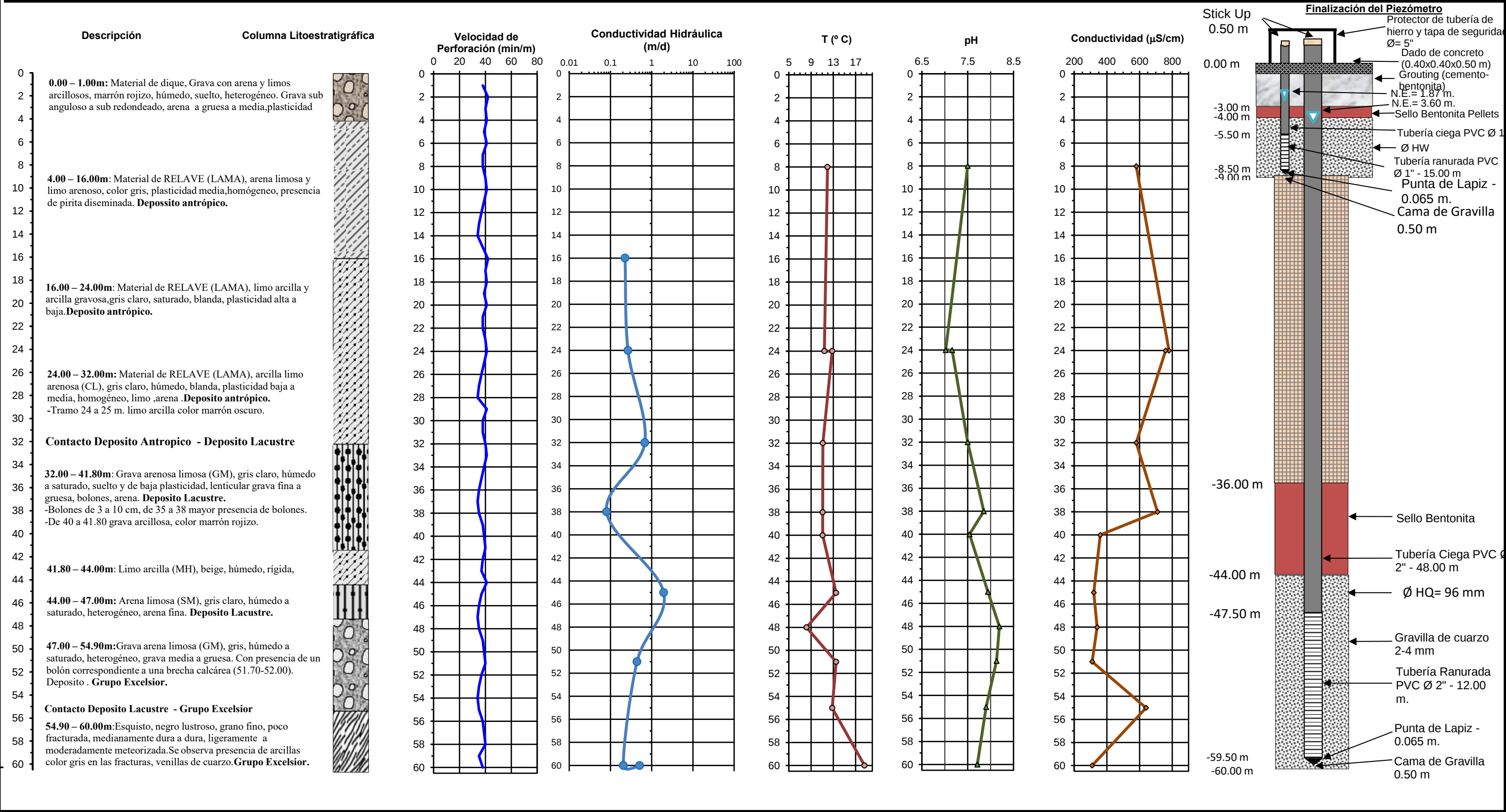
- Esquisto





SONDAJE: GW-04

COORDENADAS: E= 360004
N= 8816678
INCLINACIÓN: -90°



Tipos de Roca/Litología

- Grava Arenosa limosa
- Limo arcilla



- Grava Arenosa
- Grava Arenosa limosa



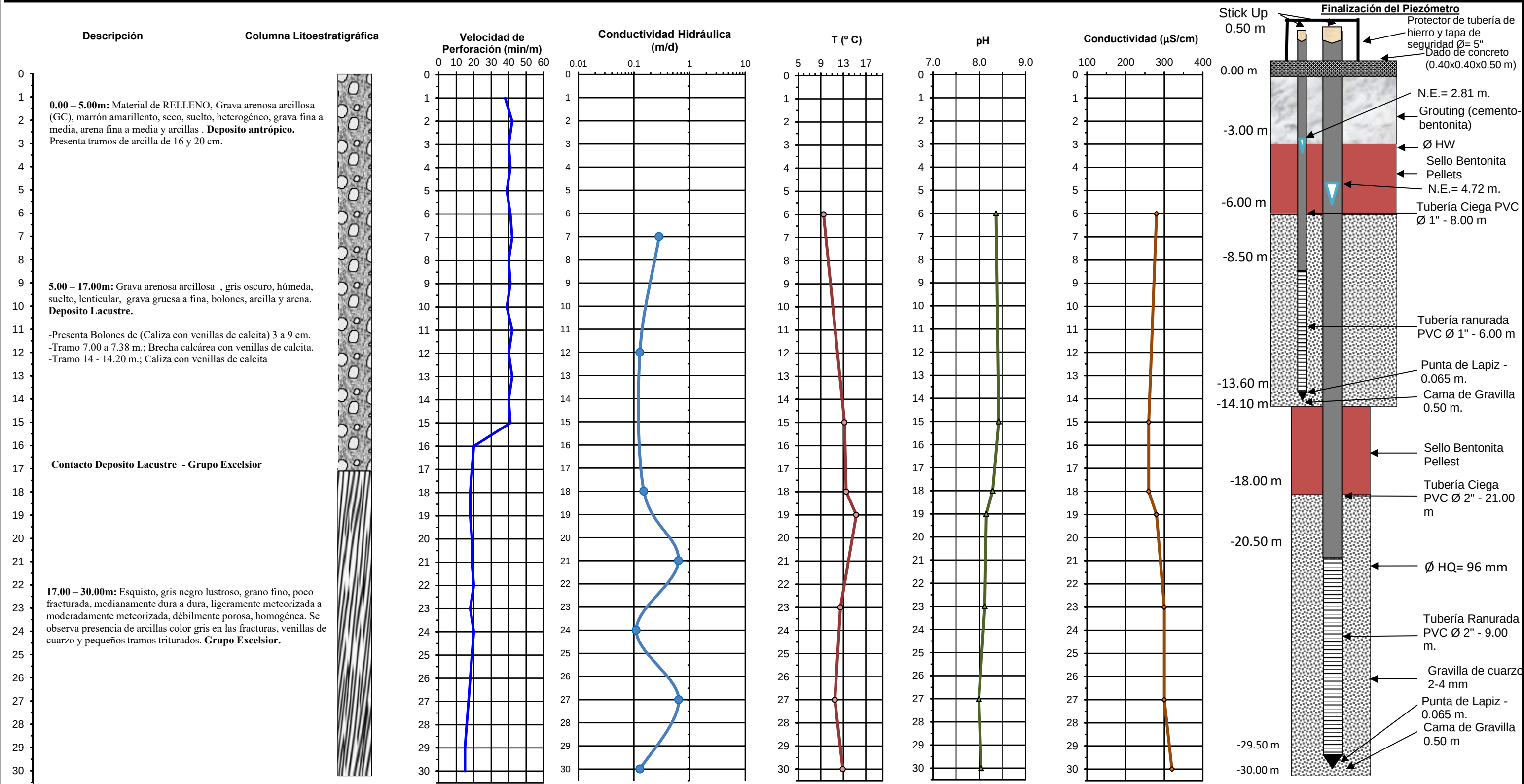
- Limo arenoso
- Esquisto





SONDAJE: GW-05

COORDENADAS: E= 360440
N= 8816830
INCLINACIÓN: -90°



Tipos de Roca/Litología

- Grava Arenosa limosa



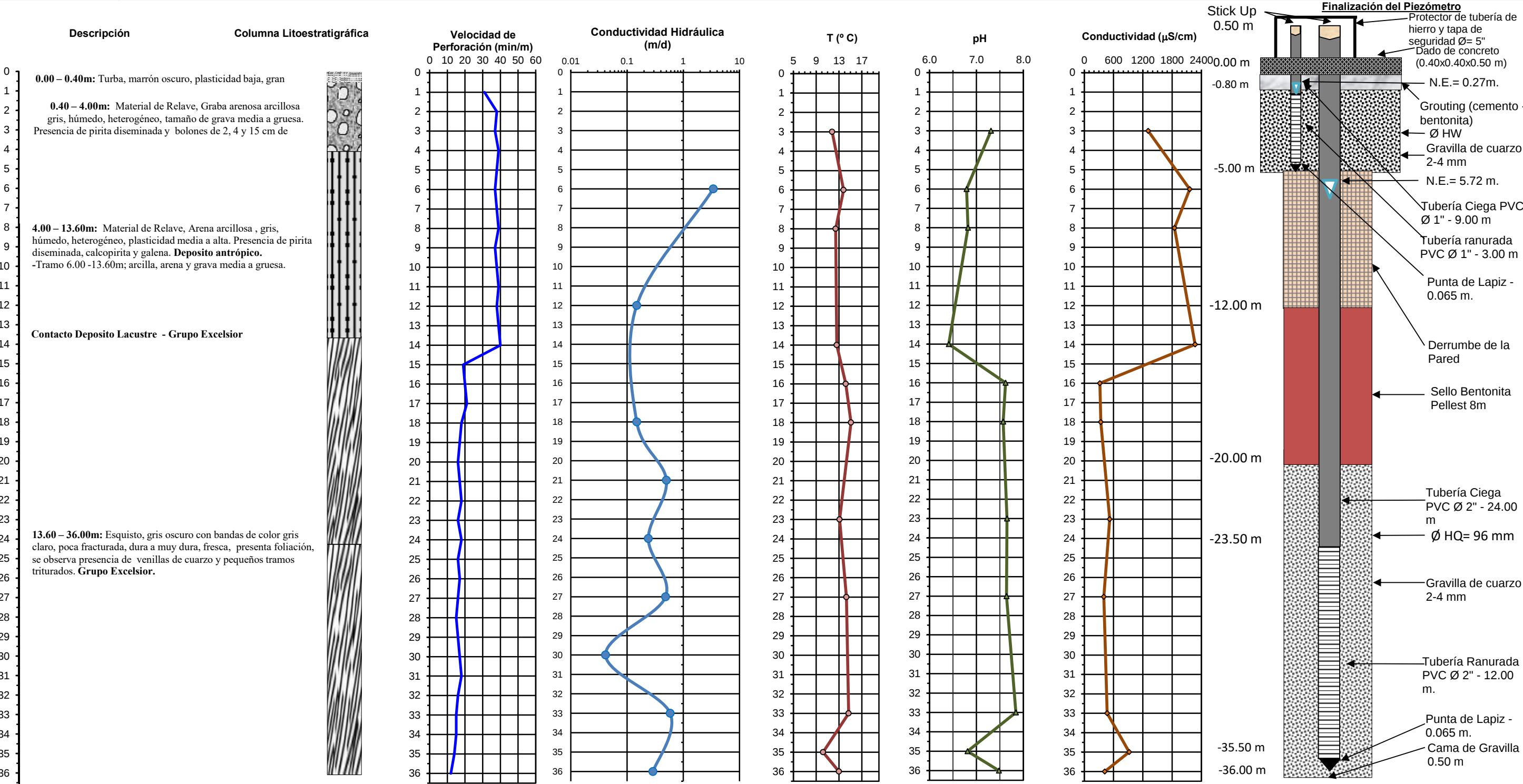
- Esquisto





SONDAJE: GW-06

COORDENADAS: E= 360759
N= 8817599
INCLINACIÓN: -90°



Tipos de Roca/Litología

- Turba



- Grava Arenosa limosa



- Arena arcillosa



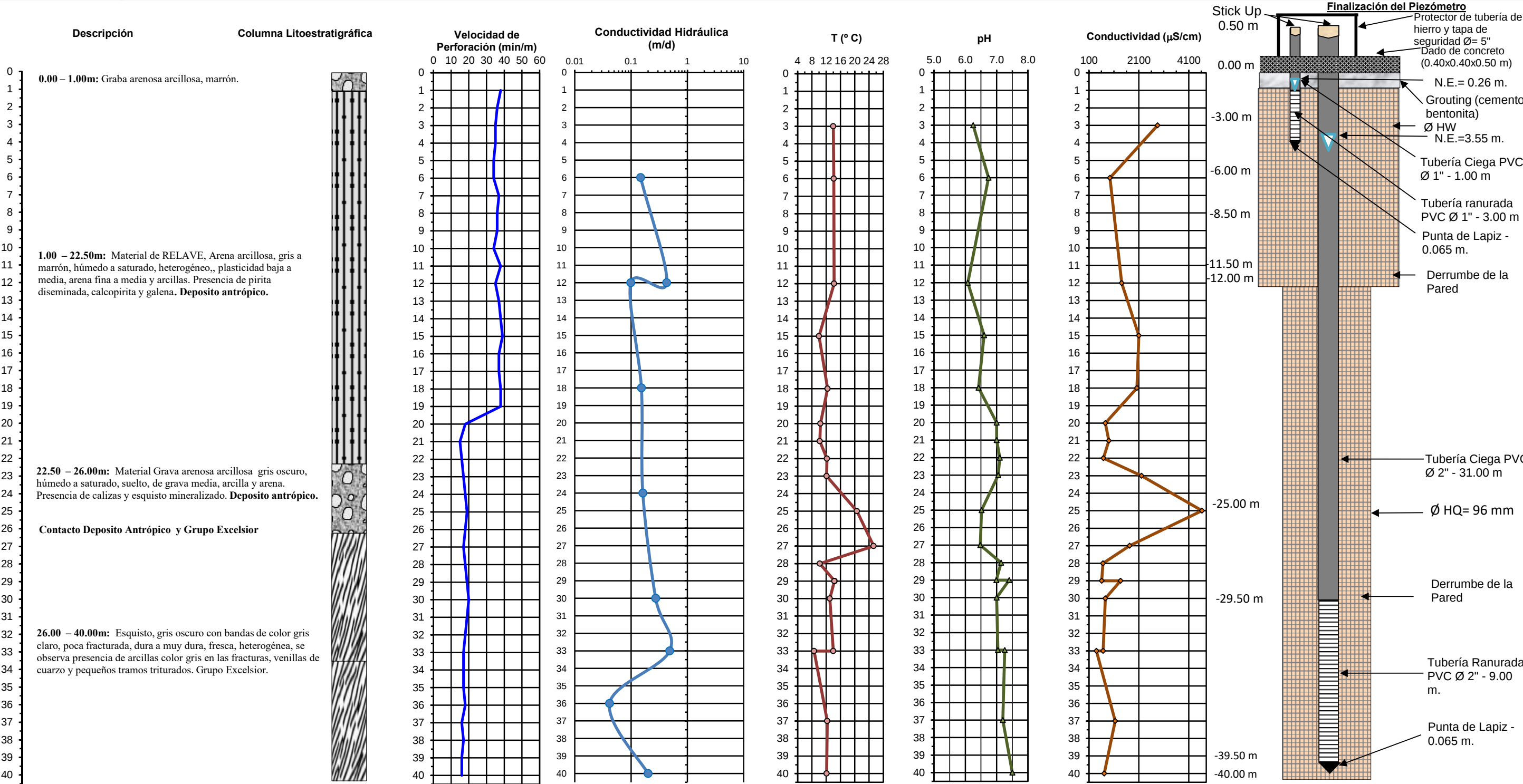
- Esquisto





SONDAJE: GW-07

COORDENADAS: E= 360644
N= 8817846
INCLINACIÓN: -90°



Tipos de Roca/Litología

- Grava Arenosa limosa



- Arena arcillosa



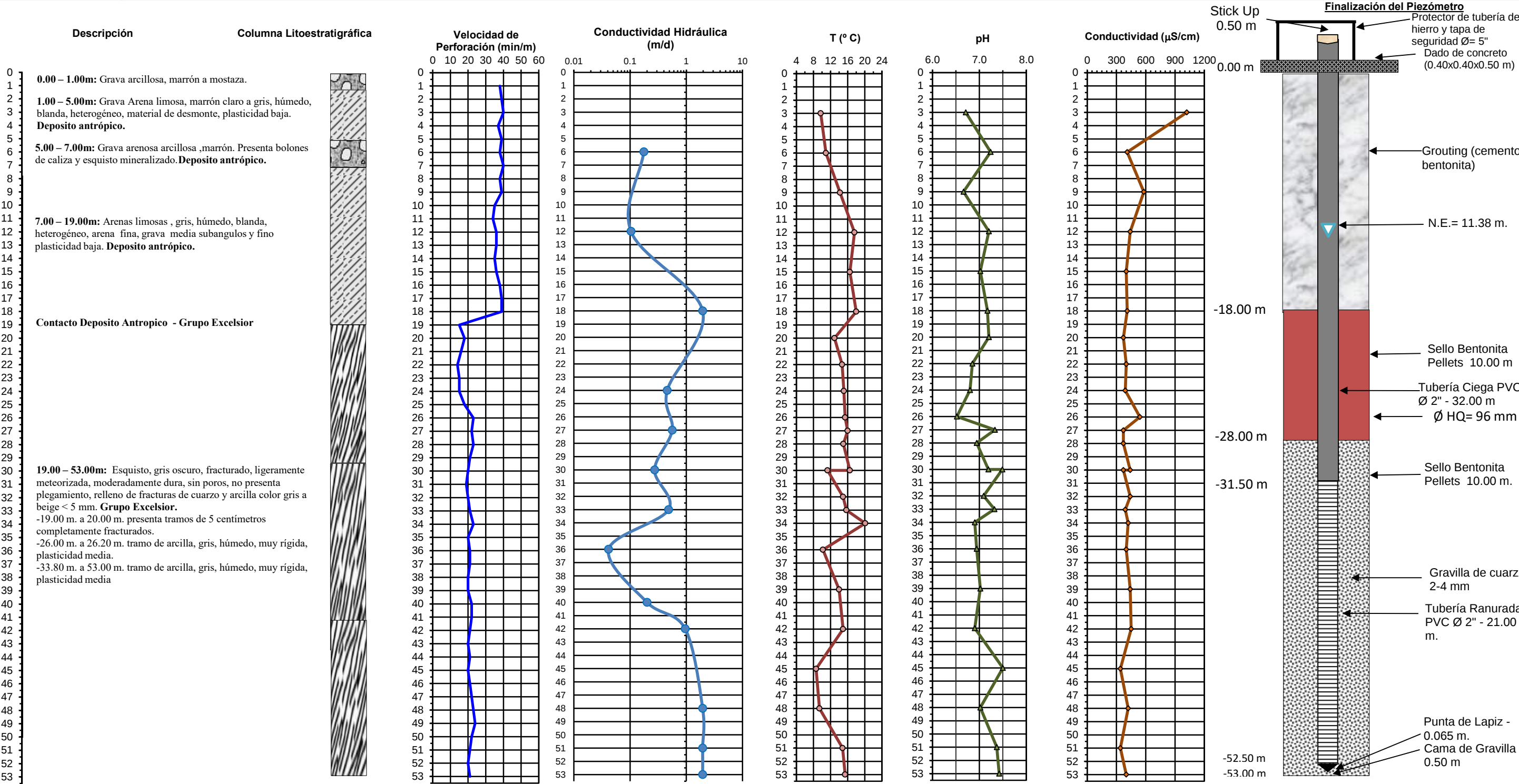
- Esquisto





SONDAJE: GW-08

COORDENADAS: E= 361082
N= 8817458
INCLINACIÓN: -90°



Tipos de Roca/Litología

- Grava Arenosa limosa



- Arena arcillosa



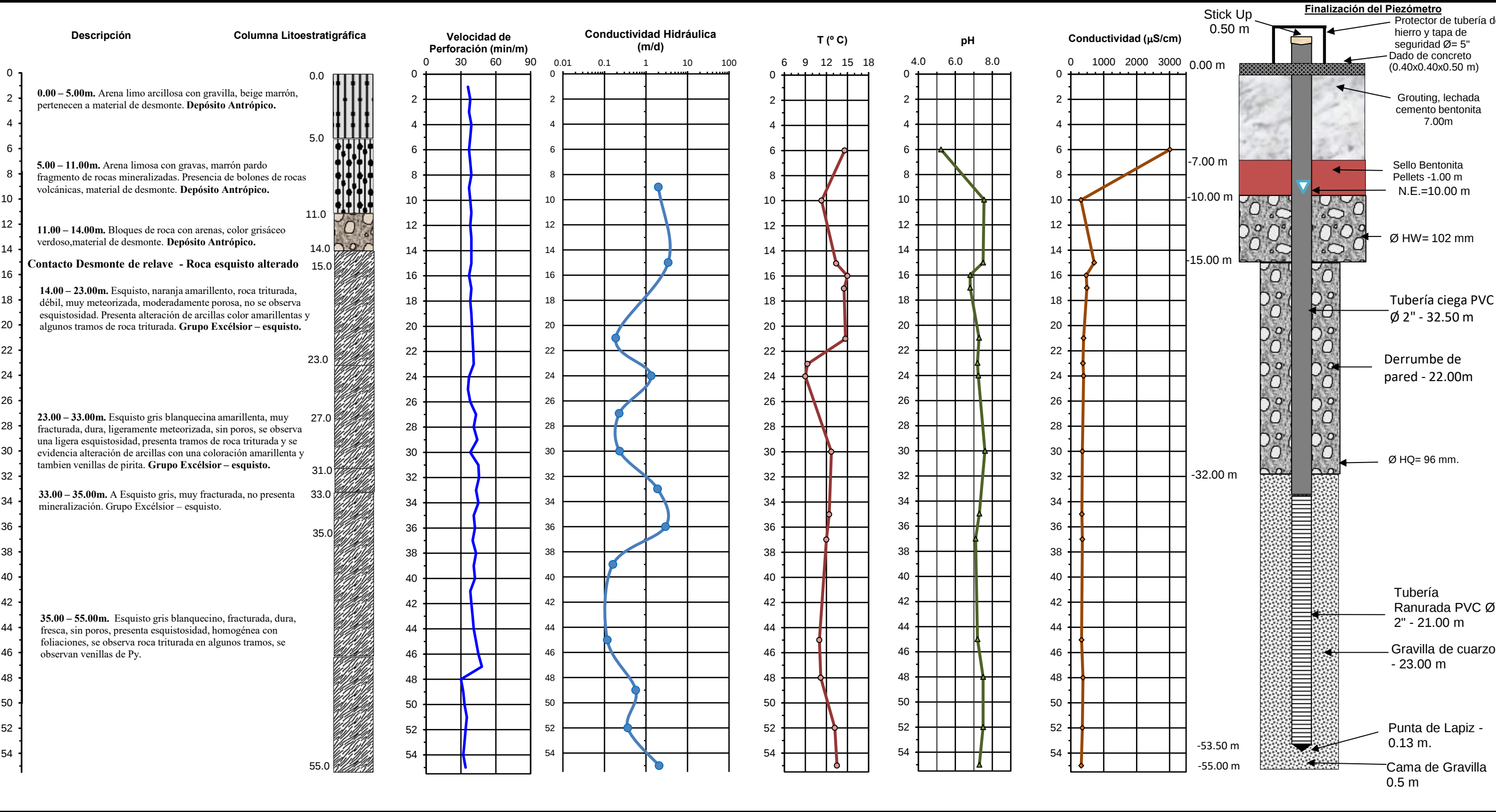
- Esquistos





SONDAJE: GW-09

COORDENADAS: E= 359404
N= 8816649
INCLINACIÓN: -90°



Tipos de Roca/Litología

- Arena limosa con grava



- Bloques de roca



- Arena limo arcillosa con gravilla



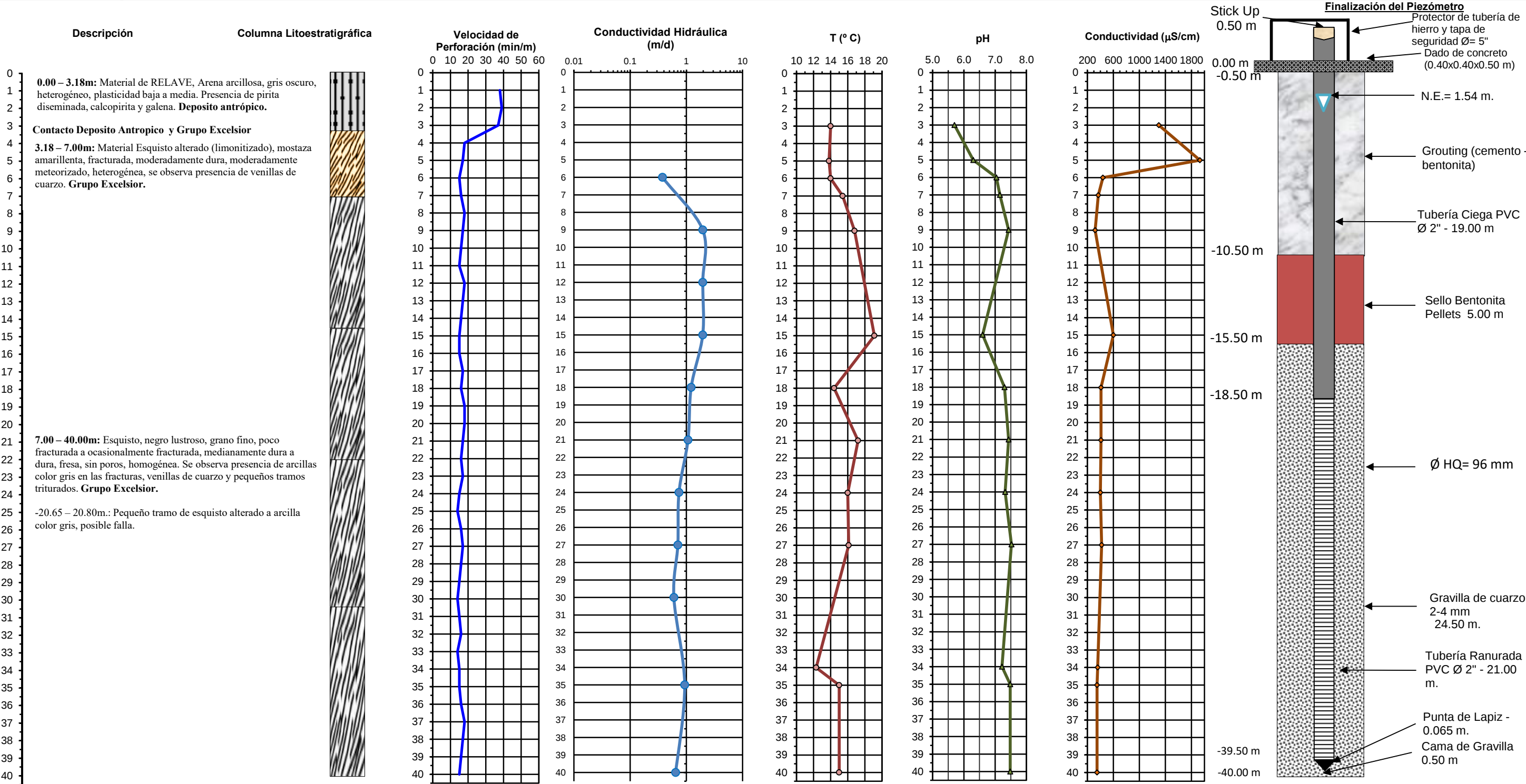
- Roca esquistó





SONDAJE: GW-10

COORDENADAS: E= 360271
N= 8817683
INCLINACIÓN: -90°



Tipos de Roca/Litología

- Arena arcillosa



- Esquisto

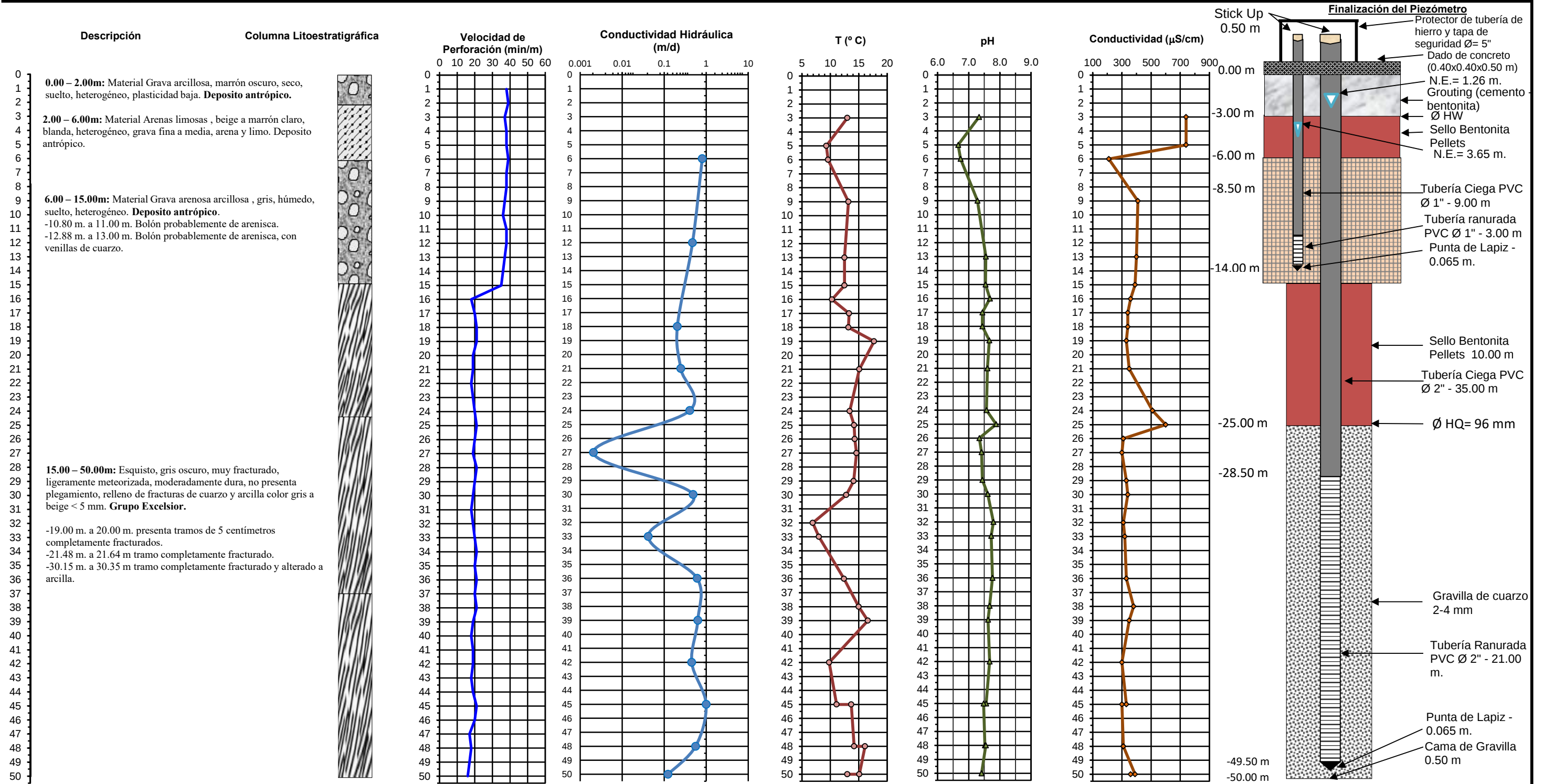


- Esquisto alterado





COORDENADAS: E= 359762
N= 8817161
INCLINACIÓN: -90°



Tipos de Roca/Litología

- Grava Arenosa limosa



- *Arena limosa*



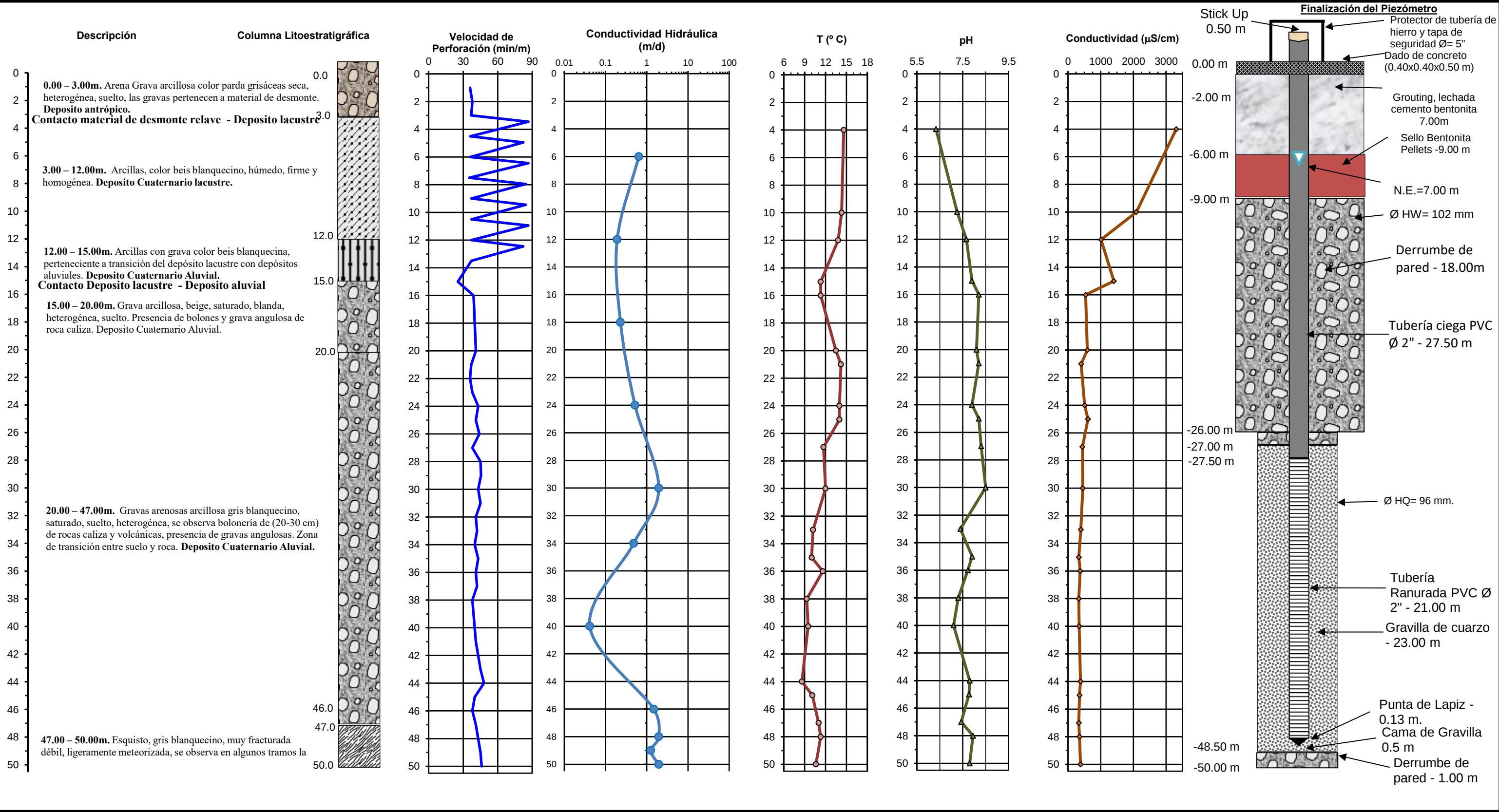
- Esquisto





SONDAJE: GW-12

COORDENADAS: E= 359279
N= 8816987
INCLINACIÓN: -90°



Tipos de Roca/Litología

- Arena gravosa
- Arcillas



- Grava arcillosa
- Grava Arenosa



- Limo arenoso, Arcilla
- Arcillas con grava



- Roca esquisto





Tabla C-1
Muestreo de aguas superficiales y subterráneas - Julio 2022
Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

N°	Código	Referencia	Coordenadas UTM (WGS 84)			Fecha	Hora	Parámetros fisicoquímicos Multiparametro				Caudal (l/s)	Prof. (m)	N.A. (mbnt)	Stick up (m)	N.E. (mbnt)	N.P. (mbnt)	Tipo	Ubicación	Clasificación	Observaciones
			Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)			T° (°C)	pH	CE (µS/cm)	TDS (ppm)										
1	M-01	P-18	359240	8816933	4257	2022-07-09	18:40	12	5.43	2350	1150	-	8.05	7.03	0.27	6.76	4250.4	Piezómetro	Dique principal	Subterráneo	Ubicada a 20 m de la poza cerca a la estacion meteorologica, presenta 20 cm de columna de agua
2	M- 03	GW-12	359279	8816987	4247	2022-07-09	17:40	11.3	7.3	1570	800	-	50.00	7.4	0.4	7	4239.76	Piezómetro	Dique principal	Subterráneo	Se encuentra cercano a la poza de recirculación del dique principal, agua ligeramente amarillenta con sedimentos suspendidos.
3	M- 04	P-19	359359	8817090	4271	2022-07-09	16:42	13	5.4	2720	1400	-	61.52	17.9	0.5	17.4	4254.04	Piezómetro	Dique principal	Subterráneo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble, se midio parametros del tubo de mayor diametro.
4	M- 05	GW-01	359332	8816965	4257	2022-07-09	14:23	12.8	6.18	1070	560	-	54.00	17.47	0.5	16.97	4240.07	Piezómetro	Dique principal	Subterráneo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble,
5	M- 06	P-09-02	359295	8816891	4271	2022-07-09	17:14	11.3	5.96	2830	1450	-	17.70	16.78	0.3	16.48	4254.14	Piezómetro	Excélsior	Subterráneo	Ubicada a lado de la estacion meteorologica de Quilacocha - Pasco , la coloracion del agua es cristalina
6	M- 07	GW-02	359404	8816649	4257	2022-07-09	18:24	12.2	7.33	330	170	-	60.00	6.35	0.5	5.85	4251.58	Piezómetro	Dique principal	Subterráneo	Cerca a la caseta de seguridad, agua incolora, piezometro doble,
7	M- 08	P-04 A	359472	8816510	4272	2022-07-09	19:00	11.4	6.76	1220	640	-	44.67	4.04	0.2	3.84	4267.72	Piezómetro	Quiulacocha	Subterráneo	Ubicada en el eje del dique de Quilacocha, la coloracion de agua es cristalina.
8	M- 10	GW-11	359762	8817161	4264	2022-07-10	10:28	10.6	7.8	780	400	-	50.00	1.76	0.5	1.26	4262.32	Piezómetro	Quiulacocha	Subterráneo	Se encuentra al N de Quiulacocha cercano al dique flotante, agua ligeramente turbia color gris blanquecina.
9	M- 11	GW-03	359836	8816535	4257	2022-07-10	08:25	12.3	7.34	410	210	-	42.00	3.51	0.4	3.11	4254.02	Piezómetro	Quiulacocha	Subterráneo	Agua ligeramente amarillenta color de oxido, piezometro doble,
10	M- 13	GW-04	360004	8816678	4259	2022-07-10	08:50	11.4	6.71	3000	1550	-	60.00	4	0.4	3.6	4255.52	Piezómetro	Dique flotante	Subterráneo	Ubicada en el lado izquierdo del dique flotante de la relavera Quiulacocha, agua incolora.
11	M- 14	P-NN1	359960	8817023	4287	2022-07-10	10:51	12.4	1.15	4870	2550	-	19.63	Surgente	0.6	0	4286.79	Piezómetro	Dique flotante	Subterráneo	El nivel surgente, con 0.1 l/s. Piezometro surgente con acumulación de sedimentos de relave.
12	M- 15	P-NN2	359994	8817257	4278	2022-07-10	12:13	10	7.89	850	420	-	54.30	1.22	0.54	0.68	4277.39	Piezómetro	Quiulacocha	Subterráneo	Ubicada a 80 m del dique de flotante, su columna de agua es alta, agua cristalina sin particulas.
13	M- 16	HG-02	360188	8817067	4275	2022-07-10	12:01	11.8	2.44	11960	6150	-	4.23	0.95	0.65	0.3	4274.91	Piezómetro	Quiulacocha	Subterráneo	Al centro de la relavera Quiulacocha, agua amarilla rojiza, paralelo a los piezometros HG-01 Y HG-03.
14	M- 17	GW-05	360440	8816830	4264	2022-07-10	09:57	12.2	7.11	220	110	-	30.00	5.22	0.5	4.72	4258.94	Piezómetro	Quiulacocha	Subterráneo	Agua incolora , sin presencia de particulas finas, se encuentra en material de relleno.
15	M- 18	GW-10	360271	8817683	4265	2022-07-10	12:30	13.1	7.9	1460	740	-	40.00	2.04	0.5	1.54	4263.2	Piezómetro	Quiulacocha	Subterráneo	Se encuentra al N de Quiulacocha, agua cristalina con particulas finas.
16	M- 19	PZ-BQ	360735	8817144	4291	2022-07-10	11:15	9.3	7.75	500	250	-	43.25	7.02	0.58	6.44	4284.36	Piezómetro	Quiulacocha	Subterráneo	Color de agua incolora sin presencia de particulas.
17	M- 20	P-12	361055	8817212	4301	2022-07-10	15:15	9.8	5.31	880	450	-	7.67	0.37	0.5	0.13	4300.7	Piezómetro	Qda. Golf	Subterráneo	Se encuentra al SE de Quiulacocha, a 10 metros se observa un riachuelo, color de agua cristalina.
18	M- 21	GW-08	361082	8817458	4295	2022-07-10	11:45	12.7	8.14	570	290	-	53.00	12.08	0.7	11.38	4283.95	Piezómetro	Quiulacocha	Subterráneo	Se encuenta al NE de Quiulacocha, agua ligeramente marron con particulas finas.
19	M- 24	GW-06	360759	8817599	4265	2022-07-10	12:05	12.1	7.33	940	480	-	36.00	6.22	0.5	5.72	4259.75	Piezómetro	Excélsior	Subterráneo	Piezómetro al pie de Excelsior, en la carretera, agua ligeramente amarillenta.
20	M- 25	HG-03	360601	8817652	4283	2022-07-10	12:25	11	6.25	7140	3560	-	2.45	0.48	0.24	0.24	4282.52	Piezómetro	Quiulacocha	Subterráneo	Ubicada a 15 m de la carretera Pampa Seca, al frente de Excélsior, agua de relave cristalina.
21	M- 26	GW-07	360644	8817846	4264	2022-07-10	14:52	11.9	6.24	4230	2140	-	40.00	4.05	0.5	3.55	4260.36	Piezómetro	Excélsior	Subterráneo	Piezómetro al pie de Excelsior, al N de Quiulacocha, agua turbia color negruzca.
22	M- 27	P-02	360550	8818052	4277	2022-07-10	16:25	10.6	5.1	20000	10000	-	20.80	0.94	0.59	0.35	4276.44	Piezómetro	Quiulacocha	Subterráneo	Agua color amarillenta y presencia de particulas, piezometro único. Presenta escasa columna de agua.
23	M- 29	PM-06-08B	360781	8818830	4294	2022-07-10	16:38	10.9	2.95	15480	7710	-	22.65	4.6	1.17	3.43	4290.95	Piezómetro	Pampa Seca	Subterráneo	Frente al campamento de Pampa Seca, agua amarillenta. Piezometros mellizos someros con bomba wattera.
24	M- 30	GW-09	361503	8818585	4311	2022-07-10	14:40	15.6	1.81	10710	5570	-	55.00	10.74	0.7	10.04	4300.72	Piezómetro	Excélsior	Subterráneo	Se encuentra atrás de Excelsior, a unos metros de uan quebrada de aguas residuales, Agua de amarillenta color de oxido
25	M-02	TB-3A	359264	8816948	4147	2022-07-08	16:10	10.4	3.08	8490	4350	0.03	-	-	-	-	-	Subdrenaje	Dique Principal	Subterráneo	Poza de la estación de bombeo Quiulacocha, Pasco. Filtración del dique
26	M- 09	L-1	359423	8817046	4256	2022-07-10	15:45	12.6	2.62	9760	4870	-	-	-	-	-	-	Laguna	Quiulacocha	Superficial	Agua de Laguna
27	M-12	V-4	359974	8816603	4163	2022-07-08	16:30	12.05	2.95	17430	8680	5.81	-	-	-	-	-	Vertedero	Dique flotante	Superficial	Vertedero de relave V-4, se ubica en la margen izquierda del dique flotante de Quiulacocha.
28	M-22	V-3	360835	8817550	4276	2022-07-08	17:30	17.1	3.47	17370	8600	6.5064	-	-	-	-	-	Vertedero	Quiulacocha	Superficial	Vertedero V-3, se ubica en la relavera Quiulacocha. Vertimiento de agua superficial y filtraciones del depósito de desmonte Excélsior, agua color amarillenta.
29	M-23	F-5	360787	8817647	4269	2022-07-10	14:25	23.1	5.89	9860	5060	0.8	-	-	-	-	-	Filtración	Excélsior	Subterráneo	Filtración del depositito de desmonte Excelsior. Color transparente.
30	M-28	V-1	360592	8818703	4287	2022-07-08	17:18	14.72	1.72	>20000	>10000	0.2	-	-	-	-	-	Vertedero	Excélsior	Superficial	Vertedero de V-1, se ubica en Excélsior, agua de relave color amarillenta.



Tabla C-2
Cálculos químicos de aguas subterráneas y superficiales - Julio 2022
Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

Parámetro	Analito	Unidades	M-02	M-12	M-28	M-22	M-05	M-04	M-06	M-03	M-07	M-01	M-08	M-11	M-13	M-17	M-19		
			2022-07-08	2022-07-08	2022-07-08	2022-07-08	2022-07-09	2022-07-09	2022-07-09	2022-07-09	2022-07-09	2022-07-09	2022-07-09	2022-07-09	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	
			16:10	16:30	17:18	17:30	14:23	16:42	17:14	17:40	18:24	18:40	19:00	08:25	08:50	09:57	11:15		
Parámetros Físico químicos			TB-3A	V-4	V-1	V-3	GW-01	P-19	P-09-02	GW-12	GW-02	P-18	P-04 A	GW-03	GW-04	GW-05	PZ-BQ		
Conductividad Especifica	CE	uS/cm	8490.0	17430.0	>20000	17370.0	1070.0	2720.0	2830.0	1570.0	330.0	2350.0	1220.0	410.0	3000.0	220.0	500.0		
PH	pH		3.1	3.0	1.7	3.5	6.2	5.4	6.0	7.3	7.3	5.4	6.8	7.3	6.7	7.1	7.8		
Solidos Totales Disueltos	STD	mg/L	4350.0	8680.0	>10000	8600.0	560.0	1400.0	1450.0	800.0	170.0	1150.0	640.0	210.0	1550.0	110.0	250.0		
ELEMENTOS MAYORITARIOS																			
Cationes																			
Calcio	Ca	mg/L	401.4	427.5	297.7	407.1	288.8	415.0	414.5	230.2	28.7	132.0	140.0	58.1	249.6	17.1	64.5		
Magnesio	Mg	mg/L	787.7	2746.4	864.4	2365.6	522.0	788.1	240.6	77.8	7.2	44.3	42.2	10.0	25.3	3.6	15.2		
Sodio	Na	mg/L	7.6	27.7	20.9	24.5	24.4	24.4	14.1	45.7	52.2	73.2	38.1	16.0	541.7	20.4	22.8		
Potasio	K	mg/L	1.1	7.4	25.6	12.7	2.5	6.3	3.0	2.5	2.4	8.2	8.2	2.7	6.0	1.6	2.1		
Silicio	Si	mg/L	0.00	0.00	28.12	11.62	8.68	0.00	0.00	0.00	5.17	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00		
Hierro	Fe	mg/L	2072.00	3664.00	5931.00	3120.00	732.60	552.60	18.46	11.82	2.41	5.68	5.83	0.90	0.05	0.46	3.73		
Zinc	Zn	mg/L	264.94	213.32	131.66	219.14	70.09	121.21	1.81	1.07	0.45	0.72	0.67	0.13	0.07	0.05	0.34		
Estroncio	Sr	mg/L	0.9722	2.0442	1.4776	1.8692	1.4391	1.3838	1.5801	1.1417	0.1135	0.6837	0.70	0.2730	1.0013	0.1341	0.2146		
Manganeso	Mn	mg/L	752.10	1404.12	622.46	1250.44	276.81	827.16	9.15	6.50	1.74	2.50	2.10	0.48	0.60	0.15	0.44		
Aluminio	Al	mg/L	9.1210	3.6130	178.1220	1.4810	0.1100	0.8900	0.6500	1.1250	0.3020	0.2700	0.27	0.2510	0.0210	0.0430	0.2550		
Cobre	Cu	mg/L	2.3820	0.6046	50.8140	0.2107	0.0043	0.0093	0.0543	0.0080	0.0062	0.0189	0.03	0.0029	0.0011	0.0019	0.0173		
Aniones																			
Bicarbonatos	HCO ₃	mg/L	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	52.6	362.0	169.2	186.4	224.7	130.9	159.5	1503.0	75.2	167.9		
Carbonatos	CO ₃	mg/L	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Cloruros	Cl	mg/L	194.5	68.1	34.6	90.4	296.2	7.7	14.9	25.1	2.0	34.6	15.2	9.9	119.0	5.4	4.9		
Sulfatos	SO ₄	mg/L	13561.6	30707.9	25596.1	24958.2	5281.6	7474.5	1703.6	708.4	30.2	399.3	519.4	80.7	9.8	16.9	83.4		
Silicato	SiO3	mg/L	51.3	48.3	76.2	31.5	23.5	45.4	34.1	31.3	14.0	15.5	17.0	18.9	48.6	13.7	30.5		
Dureza Calcio= 2.497Ca			CaCO3	mg/L	1002.2	1067.4	743.5	1016.6	721.1	1036.3	1035.1	574.8	71.6	329.5	349.6	145.0	623.2	42.7	161.2
Dureza Magnesio= 4.115Mg			CaCO3	mg/L	3241.4	11301.4	3556.9	9734.4	2147.9	3243.1	990.1	320.0	29.5	182.4	173.5	41.2	104.0	15.0	62.5
Dureza Temporal			CaCO3	mg/L	4243.6	12368.8	4300.4	10751.1	2869.0	4279.4	2025.2	894.9	101.2	511.9	523.1	186.1	727.2	57.6	223.7
MILIEQUIVALENTES POR LITRO																			
Calcio	Ca	meq/l	20.07	21.37	14.89	20.36	14.44	20.75	20.73	11.51	1.43	6.60	7.00	2.90	12.48	0.85	3.23		
Magnesio	Mg	meq/l	64.78	225.86	71.08	194.54	42.93	64.81	19.79	6.40	0.59	3.65	3.47	0.82	2.08	0.30	1.25		
Sodio	Na	meq/l	0.33	1.20	0.91	1.07	1.06	1.06	0.61	1.98	2.27	3.18	1.66	0.70	23.55	0.89	0.99		
Potasio	K	meq/l	0.03	0.19	0.66	0.33	0.06	0.16	0.08	0.07	0.06	0.21	0.21	0.07	0.15	0.04	0.05		
Silicio	Si	mg/L	0.00																
Hierro	Fe	meq/l	111.2782	196.7777	318.5285	167.5618	39.3448	29.6778	0.9915	0.6348	0.1295	0.3049	0.3133	0.0484	0.0026	0.0245	0.2004		
Zinc	Zn	meq/l	8.1047	6.5255	4.0275	6.7035	2.1442	3.7079	0.0553	0.0327	0.0138	0.0221	0.0204	0.0039	0.0023	0.0015	0.0104		
Estroncio	Sr	meq/l	0.0222	0.0467	0.0337	0.0427	0.0328	0.0316	0.0361	0.0261	0.0026	0.0156	0.0159	0.0062	0.0229	0.0031	0.0049		
Manganeso	Mn	mg/L	27.3989	51.1519	22.6761	45.5534	10.0842	30.1333	0.3334	0.2368	0.0634	0.0909	0.0766	0.0176	0.0220	0.0056	0.0162		
Aluminio	Al	mg/L	1.0142	0.4017	19.8060	0.1647	0.0122	0.0990	0.0723	0.1251	0.0336	0.0300	0.0305	0.0279	0.0023	0.0048	0.0284		
Cobre	Cu	meq/l	0.07491	0.01901	1.59792	0.00663	0.00014	0.00029	0.00171	0.00025	0.00019	0.00059	0.00080	0.00009	0.00003	0.00006	0.00054		
SUMATORIA CATIONES				233.10	503.55	454.21	436.32	110.11	150.43	42.70	21.01	4.60	14.10	12.79	4.59	38.32	2.12	5.78	
Bicarbonatos	HCO ₃	meq/l	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.86	5.93	2.77	3.06	3.68	2.15	2.61	24.64	1.23	2.75		
Carbonatos	CO ₃	meq/l	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Cloruros	Cl	meq/l	5.48	1.92	0.98	2.55	8.34	0.22	0.42	0.71	0.06	0.98	0.43	0.28	3.35	0.15	0.14		
Sulfatos	SO ₄	meq/l	282.53	639.75	533.25	519.96	110.03	155.72	35.49	14.76	0.63	8.32	10.82	1.68	0.20	0.35	1.74		
Silicato	SiO3	meq/l	1.35	1.27	2.00	0.83	0.62	1.19	0.89	0.82	0.37	0.41	0.45	0.50	1.28	0.36	0.80		
SUMATORIA ANIONES				289.37	642.94	536.24	523.35	119.00	157.99	42.74	19.06	4.11	13.38	13.84	5.07	29.47	2.10	5.43	
ERROR ADMISIBLE		Ecat-Ean	56.27	139.40	82.03	87.02	8.89	7.56	0.04	-1.95	-0.49	-0.72	1.05	0.48	-8.84	-0.02	-0.35		
		-15 Ecat+Ean	522.47	1146.49	990.45	959.67	229.11	308.42	85.44	40.07	8.71	27.48	26.63	9.67	67.79	4.22	11.21		
		15 ERROR	10.8	12.2	8.3	9.1	3.9	2.4	0.1	-4.9	-5.6	-2.6	3.9	4.9	-13.0	-0.5	-3.1		
Admisibilidad			Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi		
Tipo de Agua			Mg-SO4	Mg-SO4	Mg-SO4	Mg-SO4	Mg-SO4	Mg-SO4	Ca-SO4	Ca-SO4	Na- HCO3	Ca-SO4	Ca-SO4	Ca- HCO3	Na- HCO3	Na- HCO3	Ca- HCO3		



Tabla C-2
Cálculos químicos de aguas subterráneas y superficiales - Julio 2022
Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

Parámetro	Analito	Unidades	M-10	M-14	M-21	M-16	M-15	M-24	M-27	M-29	M-18	M-25	M-23	M-26	M-30	M-20	M-09	
			2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10	2022-07-10
			10:28	10:51	11:45	12:01	12:13	12:05	16:25	16:38	12:30	12:25	14:25	14:52	14:40	15:15	15:45	
Parámetros Físico químicos			GW-11	P-NN1	GW-08	HG-02	P-NN2	GW-06	P-02	PM-06-08B	GW-10	HG-03	F-5	GW-07	GW-09	P-12	L-1	
Conductividad Especifica	CE	uS/cm	780.0	4870.0	570.0	11960.0	850.0	940.0	20000.0	15480.0	1460.0	7140.0	9860.0	4230.0	10710.0	880.0	9760.0	
PH	pH		7.8	1.2	8.1	2.4	7.9	7.3	5.1	3.0	7.9	6.3	5.9	6.2	1.8	5.3	2.6	
Sólidos Totales Disueltos	STD	mg/L	400.0	2550.0	290.0	6150.0	420.0	480.0	10000.0	7710.0	740.0	3560.0	5060.0	2140.0	5570.0	450.0	4870.0	
ELEMENTOS MAYORITARIOS																		
Cationes																		
Calcio	Ca	mg/L	14.4	413.0	6.2	224.1	9.0	50.3	360.1	295.1	132.9	327.8	312.5	481.7	291.5	152.9	367.9	
Magnesio	Mg	mg/L	8.3	108.4	2.9	185.1	4.7	27.9	2340.3	1216.3	85.4	509.0	2264.4	455.3	261.8	14.9	2116.4	
Sodio	Na	mg/L	144.0	20.1	116.1	9.7	201.9	91.8	15.0	67.0	81.2	34.1	23.2	44.2	11.2	8.4	14.7	
Potasio	K	mg/L	5.6	15.3	5.8	0.0	3.7	5.2	13.6	0.1	20.5	11.1	13.0	7.5	1.8	3.0	1.4	
Silicio	Si	mg/L	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	
Hierro	Fe	mg/L	0.97	82.83	0.45	8045.00	1.21	16.11	9730.00	4054.00	0.57	2413.00	2932.00	275.50	3508.00	10.52	2721.80	
Zinc	Zn	mg/L	0.03	2.45	0.05	217.20	0.06	1.27	644.18	211.17	0.04	1.57	174.34	1.16	76.71	0.23	140.22	
Estroncio	Sr	mg/L	0.0987	9.6655	0.0319	1.4450	0.0512	0.2152	2.3867	4.4814	0.4007	4.4604	1.7272	2.0830	2.4006	0.3578	1.5536	
Manganeso	Mn	mg/L	0.05	1.28	0.05	780.83	0.19	1.22	2073.50	944.12	0.30	206.42	1260.08	195.84	511.38	0.88	1072.48	
Aluminio	Al	mg/L	0.2370	0.0090	0.1700	95.2180	0.0450	0.5770	0.7800	93.8530	0.0510	0.3290	0.9260	0.1500	89.5030	0.2030	17.4890	
Cobre	Cu	mg/L	0.0049	0.0012	0.0042	6.0089	0.0029	0.0210	0.0031	41.7351	0.0023	0.0322	0.0017	0.0310	18.1329	0.0065	2.0918	
Aniones																		
Bicarbonatos	HCO ₃	mg/L	224.8	48.1	183.9	0.5	485.9	178.7	0.5	0.5	200.3	0.5	0.5	0.5	0.5	390.6	0.5	
Carbonatos	CO ₃	mg/L	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cloruros	Cl	mg/L	115.5	26.1	30.0	34.1	1.9	96.2	87.7	41.2	76.9	74.6	86.9	10.5	108.8	1.8	60.7	
Sulfatos	SO ₄	mg/L	12.6	2005.4	19.2	22438.5	11.6	180.2	32832.3	20014.6	566.5	7658.1	24883.4	4144.9	13343.1	89.5	23405.3	
Silicato	SiO3	mg/L	17.0	11.5	15.1	35.5	16.1	27.4	55.3	77.9	31.2	15.1	44.1	14.8	80.3	14.7	49.4	
Dureza Calcio= 2.497Ca	CaCO3	mg/L	36.0	1031.3	15.4	559.6	22.5	125.6	899.2	736.8	331.7	818.5	780.4	1202.9	727.8	381.7	918.6	
Dureza Magnesio= 4.115Mg	CaCO3	mg/L	34.3	446.2	12.0	761.7	19.4	114.8	9630.3	5005.1	351.3	2094.5	9318.0	1873.5	1077.1	61.3	8709.0	
Dureza Temporal	CaCO3	mg/L	70.4	1477.5	27.3	1321.3	41.9	240.3	10529.5	5741.9	683.0	2913.0	10098.4	3076.4	1804.9	443.0	9627.6	
MILIEQUIVALENTES POR LITRO																		
Calcio	Ca	meq/l	0.72	20.65	0.31	11.21	0.45	2.51	18.01	14.75	6.64	16.39	15.63	24.09	14.57	7.64	18.39	
Magnesio	Mg	meq/l	0.69	8.92	0.24	15.22	0.39	2.29	192.46	100.02	7.02	41.86	186.22	37.44	21.53	1.23	174.05	
Sodio	Na	meq/l	6.26	0.87	5.05	0.42	8.78	3.99	0.65	2.91	3.53	1.48	1.01	1.92	0.49	0.37	0.64	
Potasio	K	meq/l	0.14	0.39	0.15	0.00	0.09	0.13	0.35	0.00	0.53	0.29	0.33	0.19	0.05	0.08	0.04	
Silicio	Si	mg/L																
Hierro	Fe	meq/l	0.0520	4.4485	0.0244	432.0623	0.0651	0.8649	522.5564	217.7229	0.0306	129.5918	157.4651	14.7959	188.3996	0.5652	146.1762	
Zinc	Zn	meq/l	0.0008	0.0749	0.0016	6.6443	0.0019	0.0387	19.7056	6.4598	0.0011	0.0480	5.3332	0.0356	2.3465	0.0071	4.2893	
Estroncio	Sr	meq/l	0.0023	0.2206	0.0007	0.0330	0.0012	0.0049	0.0545	0.1023	0.0091	0.1018	0.0394	0.0475	0.0548	0.0082	0.0355	
Manganeso	Mn	mg/L	0.0019	0.0465	0.0017	28.4455	0.0068	0.0443	75.5373	34.3942	0.0109	7.5199	45.9046	7.1344	18.6295	0.0321	39.0703	
Aluminio	Al	mg/L	0.0264	0.0010	0.0189	10.5876	0.0050	0.0642	0.0867	10.4358	0.0057	0.0366	0.1030	0.0167	9.9521	0.0226	1.9447	
Cobre	Cu	meq/l	0.00015	0.00004	0.00013	0.18896	0.00009	0.00066	0.00010	1.31242	0.00007	0.00101	0.00005	0.00097	0.57022	0.00020	0.06578	
SUMATORIA CATIONES			7.90	35.63	5.79	504.81	9.79	9.95	829.40	388.12	17.78	197.31	412.03	85.67	256.59	9.95	384.70	
Bicarbonatos	HCO ₃	meq/l	3.69	0.79	3.01	0.01	7.97	2.93	0.01	0.01	3.28	0.01	0.01	0.01	0.01	6.40	0.01	
Carbonatos	CO ₃	meq/l	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Cloruros	Cl	meq/l	3.25	0.74	0.84	0.96	0.05	2.71	2.47	1.16	2.17	2.10	2.45	0.30	3.07	0.05	1.71	
Sulfatos	SO ₄	meq/l	0.26	41.78	0.40	467.47	0.24	3.75	684.01	416.97	11.80	159.54	518.40	86.35	277.98	1.87	487.61	
Silicato	SiO3	meq/l	0.45	0.30	0.40	0.93	0.42	0.72	1.45	2.05	0.82	0.40	1.16	0.39	2.11	0.39	1.30	
SUMATORIA ANIONES			7.65	43.60	4.66	469.37	8.69	10.11	687.94	420.19	18.07	162.05	522.02	87.05	283.17	8.71	490.63	
ERROR ADMISIBLE		Ecat-Ean	-0.25	7.98	-1.14	-35.44	-1.10	0.16	-141.47	32.07	0.30	-35.26	109.99	1.37	26.58	-1.24	105.93	
	-15	Ecat+Ean	15.54	79.23	10.45	974.18	18.48	20.07	1517.34	808.31	35.85	359.37	934.05	172.72	539.75	18.65	875.32	
	15	ERROR	-1.6	10.1	-10.9	-3.6	-6.0	0.8	-9.3	4.0	0.8	-9.8	11.8	0.8	4.9	-6.6	12.1	
Admisibilidad			Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	Admi	
Tipo de Agua			Na- HCO3	Ca-SO4	Na- HCO3	Mg-SO4	Na- HCO3	Na-SO4	Mg-SO4	Mg-SO4	Mg-SO4	Mg-SO4	Mg-SO4	Mg-SO4	Mg-SO4	Ca- HCO3	Mg-SO4	



Tabla C-3

Calidad de las aguas superficiales y subterráneas ECA-Cat. III, Julio 2022

Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

Parámetro	Unidad	LMP DS 010- 2010	Calidad de Agua		Poza	Vertedero	Vertedero	Vertedero	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	
			ECA		M-02	M-12	M-28	M-22	M-05	M-04	M-06	M-03	M-07	M-01	M-08	M-11	M-13	M-17	M-19
					TB-3A	V-4	V-1	V-3	GW-01	P-19	P-09-02	GW-12	GW-02	P-18	P-04 A	GW-03	GW-04	GW-05	PZ-BQ
			Cat III-D1	Cat III-D2	2022-07-08 16:10	2022-07-08 16:30	2022-07-08 17:18	2022-07-08 17:30	2022-07-09 14:23	2022-07-09 16:42	2022-07-09 17:14	2022-07-09 17:40	2022-07-09 18:24	2022-07-09 18:40	2022-07-09 19:00	2022-07-10 08:25	2022-07-10 08:50	2022-07-10 09:57	2022-07-10 11:15
Parámetros Físico químicos																			
Conductividad Eléctrica	uS/cm		2500	5000	8490	17430	>20000	17370	1070	2720	2830	1570	330	2350	1220	410	3000	220	500
Peache PH		6-9	6.5 - 8.5	6.5 - 8.4	3.08	2.95	1.72	3.47	6.18	5.4	5.96	7.3	7.33	5.43	6.76	7.34	6.71	7.11	7.75
Sólidos Totales Disueltos	mg/L		-	-	4350	8680	>10000	8600	560	1400	1450	800	170	1150	640	210	1550	110	250
Sólidos Totales Suspendidos	mg/L		-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aniones Mayoritarios																			
Bicarbonato			518	**	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	52.61	362	169.2	186.4	224.7	130.9	159.5	1503	75.21	167.9
Carbonato			-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
Cloruro	mg/L		500	**	194.5	68.1	34.6	90.4	296.2	7.7	14.9	25.1	2.0	34.6	15.234	9.924	119.0353	5.386	4.945
Sulfato	mg/L		1000	1000	13561.6	30707.9	25596.1	24958.2	5281.6	7474.5	1703.6	708.4	30.2	399.3	519.377	80.6729	9.823	16.944	83.438
Cationes Mayoritarios																			
Calcio	mg/L		-	-	405.6	436.4	322.4	465.3	304.6	425.8	423.658	230.352	29.628	138.372	140.582	58.16	254.573	19.089	65.783
Magnesio	mg/L		**	250	788.1	2766.4	864.5	2403.2	530.5	813.14	250.351	78.222	7.841	44.533	43.765	10.642	26.961	3.707	15.817
Sodio	mg/L		-	-	7.9	28.3	31.0	26.9	24.8	24.424	14.204	46.547	53.06	74.08	75.218	16.024	551.173	20.37	23.182
Potasio	mg/L		-	-	1.3	7.7	33.3	13.8	2.6	6.3	3.3	2.8	2.8	8.4	8.232	2.837	6.109	1.591	2.357
Aniones Traza																			
Fluoruros	mg/L		1	**	2.686	2.242	2.841	2.45	1.78	2.3985	0.044	0.092	0.255	0.286	0.192	0.224	0.0904	0.212	0.209
Bromuros	mg/L		-	-	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.5952	0.015	0.015
Nutrientes																			
Nitrógeno Nitrato + Nitrógeno Nitrito	mg/L		100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nitrógeno Nitrito	mg/L		10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metales Totales																			
Aluminio	mg/L		5	5	10.2590	4.1160	253.7680	1.8060	0.4620	1.1250	1.3360	2.3700	1.8910	0.9050	0.485	0.252	0.426	0.072	1.231
Antimonio	mg/L		-	-	0.0156	0.0025	0.6922	0.0059	0.0029	0.0019	0.0047	0.0247	0.0035	0.0038	0.0039	0.0078	0.0281	0.0033	0.0035
Arsénico	mg/L	0.1	0.1	0.2	0.1566	1.1567	5.0000	2.9887	0.0211	0.1480	0.1530	0.0491	0.0143	0.0213	0.02836	0.01743	0.10206	0.0185	0.0252
Bario	mg/L		0.7	**	0.0038	0.0048	0.0080	0.0087	0.0386	0.0241	0.0340	0.1119	0.0785	0.0386	0.04025	0.08043	0.84454	0.04457	0.04968
Berilio	mg/L		0.1	0.1	0.0020	0.0022	0.0146	0.0013	0.0001	0.0016	0.0002	0.0003	0.0001	0.0001	0.00004	0.00022	0.00005	0.00004	0.00008
Bismuto	mg/L		-	-	0.0001	0.0007	0.8476	0.0012	0.0008	0.0005	0.0017	0.0010	0.0009	0.0030	0.002631	0.00022	0.001206	0.0002	0.002652
Boro	mg/L		1	5	0.0500	0.1047	0.1673	0.1018	0.1575	0.0668	0.0305	0.3190	0.6982	0.3084	0.3158	0.0966	11.5577	0.1827	0.2669
Cadmio	mg/L	0.05	0.01	0.05	2.1301	0.2106	1.8013	0.1819	0.0200	0.0276	0.0175	0.0015	0.0004	0.0033	0.00336	0.00058	0.00032	0.00009	0.00099
Cobalto	mg/L		0.05	1	0.0598	0.0588	0.1652	0.0561	0.0468	2.4146	0.0200	0.0055	0.0069	0.0067	0.004613	0.000981	0.00484	0.000366	0.002333
Cobre	mg/L		0.2	0.5	2.6548	0.6235	68.2596	0.2483	0.0081	0.0117	0.0921	0.0102	0.0072	0.0262	0.0268	0.0032	0.0093	0.0019	0.0222
Cromo	mg/L	0.1	0.1	1	0.0016	0.0026	0.2849	0.0038	0.0010	0.0068	0.0047	0.0039	0.0030	0.0035	0.0019	0.0007	0.0008	0.0001	0.0043
Estaño	mg/L		-	-	0.0002	0.0002	0.0431	0.0002	0.0002	0.0005	0.0008	0.0002	0.0002	0.0011	0.0011	0.0009	0.0006	0.0002	0.0053
Estroncio	mg/L		-	-	1.0176	2.1301	1.4858	2.0275	1.7002	1.3984	1.6836	1.1446	0.1144	0.6879	0.70019	0.27893	1.01242	0.13561	0.218
Fósforo	mg/L		-	-	0.0300	0.0850	36.9680	0.0610	0.0290	0.0880	0.1890	0.1510	0.0520	0.0770	0.062	0.665	0.047	0.045	0.099
Hierro	mg/L	2	5	**	2146.00	3734.00	5932.00	3480.00	733.20	564.40	23.82	13.91	5.84	7.91	5.97	0.90255	1.29883	0.49967	6.63383
Litio	mg/L		2.5	2.5	0.1250	0.2497	0.3308	0.2439	0.0755	0.2438	0.0346	0.0418	0.0481	0.0510	0.05094	0.02437	0.67507	0.01145	0.07236
Manganeso	mg/L		0.2	0.2	786.2000	1406.1200	622.5600	1275.3600	280.0200	844.5400	9.2457	6.5631	1.8395	2.5698	2.216427	0.485014	0.608395	0.15996	0.448393
Mercurio	mg/L	0.002	0.001	0.01	0.00008	0.00001	0.00007	0.00001	0.00001	0.00004	0.00009	0.00004	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00003	0.00011
Molibdeno	mg/L		-	-	0.0000	0.0000	0.0063	0.0001	0.0011	0.0038	0.0008	0.0021	0.0148	0.0113	0.01075	0.00815	0.01982	0.01166	0.00181
Niquel	mg/L		0.2	1	0.1978	0.2215	0.3921	0.2117	0.0504	2.8909	0.0266	0.0101	0.0108	0.0120	0.0088	0.00283	0.01597	0.00118	0.00586
Plata	mg/L		-	-	0.0000	0.0002	0.0019	0.0002	0.0014	0.0004	0.0018	0.0025	0.0009	0.0012	0.00104	0.00016	0.00052	0.00014	0.00085
Plomo	mg/L	0.2	0.05	0.05	0.4544	0.1823	2.6251	0.2783	0.0519	0.4140	0.2690	0.0723	0.0640	0.1730	0.2301	0.1285	0.0589	0.0084	0.2115
Selenio	mg/L		0.02	0.05	0.0001	0.0001	0.0014	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Silicio	mg/L		-	-	27.2240	18.5740	31.1340	18.9870	10.1180	18.6480	14.9440	16.1630	8.0310	7.5050	6.315	7.127	18.446	5.192	14.925
Talio	mg/L		-	-	0.0535	0.1084	0.5372	0.1529	0.0046	0.0021	0.0037	0.0019	0.0006	0.0017	0.00167	0.0007	0.00115	0.00078	0.00044
Titanio	mg/L		-	-	0.0007	0.0017	0.9083	0.0019	0.0109	0.0139	0.0220	0.0556	0.0163	0.0359	0.0182	0.00531	0.00861	0.00083	0.0633
Uranio	mg/L		-	-	0.0226	0.0096	0.1369	0.0074	0.0015	0.0016	0.0055	0.0014	0.0008	0.0006	0.000602	0.00256	0.000841	0.000631	0.000288
Vanadio	mg/L		-	-	0.0047	0.0088	0.6588	0.0054	0.0010	0.0016	0.0026	0.0044	0.0036	0.0022	0.0014	0.00813	0.00163	0.0006	0.00262
Zinc	mg/L	1.5	2	24	265.2940	221.1043	639.5677	242.8662	70.2332	133.1433	1.9503	1.1375	0.4674	0.7231	0.66956	0.12842	0.09127	0.05003	0.34061

Estándar Calidad de Agua Nacional (ECA) . Aprobado por D.S. N° 004-2017-MINAM

(**) Parámetro no aplica para esta Subcategoría.

LMP: Límite Máximo Permisible.

Cat.III-D1: Riego de vegetales

Cat.III-D2: Bebida de animales

	Excede el ECA-Categoría III-D1
	Excede el ECA-Categoría III-D2
	Excede el ECA-Categoría III-D1 y D2



Tabla C-3
Calidad de las aguas superficiales y subterráneas ECA-Cat. III, Julio 2022
Evaluación hidrogeológica e hidroquímica del depósito de relaves Quiulacocha con fines de plan de cierre

Parámetro	Unidad	LMP	Calidad de Agua		Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Filtración	Piezómetro	Piezómetro	Piezómetro	Laguna	
			DS 010- 2010	ECA		M-10	M-14	M-21	M-16	M-15	M-24	M-27	M-29	M-18	M-25	M-23	M-26	M-30	M-20	M-09
						GW-11	P-NN1	GW-08	HG-02	P-NN2	GW-06	P-02	PM-06-08B	GW-10	HG-03	F-5	GW-07	GW-09	P-12	L-1
				Cat III-D1	Cat III-D2	2022-07-10 10:28	2022-07-10 10:51	2022-07-10 11:45	2022-07-10 12:01	2022-07-10 12:13	2022-07-10 12:05	2022-07-10 16:25	2022-07-10 16:38	2022-07-10 12:30	2022-07-10 12:25	2022-07-10 14:25	2022-07-10 14:52	2022-07-10 14:40	2022-07-10 15:15	2022-07-10 15:45
Parámetros Físico químicos																				
Conductividad Eléctrica	uS/cm		2500	5000	780	4870	570	11960	850	940	20000	15480	1460	7140	9860	4230	10710	880	9760	
Peache PH		6-9	6.5 - 8.5	6.5 - 8.4	7.8	1.15	8.14	2.44	7.89	7.33	5.1	2.95	7.9	6.25	5.89	6.24	1.81	5.31	2.62	
Sólidos Totales Disueltos	mg/L		-	-	400	2550	290	6150	420	480	10000	7710	740	3560	5060	2140	5570	450	4870	
Sólidos Totales Suspendidos	mg/L		-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Aniones Mayoritarios																				
Bicarbonato			518	**	224.8	48.07	183.9	0.5	485.9	178.7	0.5	0.5	200.3	0.5	0.5	0.5	0.5	390.6	0.5	
Carbonato			-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cloruro	mg/L		500	**	115.45	26.107	29.952	34.087	1.931	96.206	87.7375	41.2098	76.869	74.619	86.869	10.539	108.824	1.753	60.68	
Sulfato	mg/L		1000	1000	12.57	2005.415	19.17	22438.457	11.631	180.21	32832.3031	20014.6466	566.528	7658.103	24883.365	4144.934	13343.134	89.54	23405.267	
Cationes Mayoritarios																				
Calcio	mg/L		-	-	14.525	479.121	6.161	255.874	9.172	50.787	425.914	314.528	134.479	408.251	373.961	488.494	338.503	153.924	424.18	
Magnesio	mg/L		**	250	8.729	124.287	2.96	271.95	4.924	28.558	2341.3	1245.38	86.974	509.98	2269.4	455.39	336.255	14.914	2117.4	
Sodio	mg/L		-	-	146.65	22.757	118.253	14.469	204.723	92.618	27.218	98.539	82.01	48.67	24.275	44.244	14.427	8.534	25.76	
Potasio	mg/L		-	-	5.828	16.207	6.059	0.278	3.694	5.365	21.467	0.153	20.689	14.093	13.408	7.641	1.798	3.509	2.431	
Aniones Traza																				
Fluoruros	mg/L		1	**	0.129	0.255	0.666	2.782	1.008	0.341	11.2215	2.5273	0.08	0.015	9.36	0.936	2.443	0.075	2.336	
Bromuros	mg/L		-	-	0.243	0.015	0.122	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	
Nutrientes																				
Nitrógeno Nitrato + Nitrógeno Nitrito	mg/L		100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Nitrógeno Nitrito	mg/L		10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Metales Totales																				
Aluminio	mg/L		5	5	0.659	0.022	0.407	130.839	0.137	0.587	1.74	133.284	0.078	0.566	0.959	0.235	90.363	2.137	29.309	
Antimonio	mg/L		-	-	0.0006	0.008	0.0028	0.0599	0.0043	0.0013	0.0043	0.0048	0.0004	0.0444	0.0122	0.0156	0.1137	0.0057	0.0056	
Arsénico	mg/L	0.1	0.1	0.2	0.00321	1.93346	0.0066	3.62288	0.0146	0.01545	>10	0.13889	0.00136	2.12141	2.61809	0.10839	3.50384	0.13369	3.19543	
Bario	mg/L		0.7	**	0.09757	0.01623	0.01005	0.02987	0.07501	0.01924	0.03065	0.00126	0.07841	0.02102	0.01003	0.01865	0.0301	0.11253	0.00441	
Berilio	mg/L		0.1	0.1	0.00022	0.000005	0.00019	0.0136	0.00002	0.00014	0.00209	0.01984	0.000005	0.000005	0.00163	0.000005	0.00894	0.00031	0.00537	
Bismuto	mg/L		-	-	0.001166	0.002072	0.0005	0.026922	0.000406	0.0007	0.002575	0.003734	0.000265	0.011119	0.000416	0.002403	0.017363	0.002006	0.003774	
Boro	mg/L		1	5	0.9613	0.0546	0.6759	0.0439	2.4962	0.3013	0.142	0.0714	0.1614	0.0843	0.0923	0.1792	0.0675	0.0894	0.1179	
Cadmio	mg/L	0.05	0.01	0.05	0.0001	0.00302	0.00018	3.34366	0.00024	0.00563	0.18924	2.48416	0.00032	0.0155	0.25577	0.00201	1.08757	0.00075	0.6172	
Cobalto	mg/L		0.05	1	0.000884	0.001212	0.000522	0.105189	0.000443	0.001093	0.01253	0.16752	0.001956	0.001022	0.068826	0.012945	0.164324	0.001276	0.087015	
Cobre	mg/L		0.2	0.5	0.005	0.0022	0.0043	8.4369	0.0038	0.0225	0.0139	58.1362	0.0026	0.0628	0.0017	0.0358	19.1751	0.0123	3.1058	
Cromo	mg/L	0.1	0.1	1	0.0011	0.0003	0.0005	0.1654	0.0005	0.001	0.0049	0.0595	0.0013	0.0027	0.0001	0.0009	0.2435	0.0039	0.0264	
Estaño	mg/L		-	-	0.0008	0.0002	0.0005	0.0076	0.0002	0.0009	0.0201	0.0009	0.0005	0.0022	0.0002	0.0008	0.0074	0.0447	0.0013	
Estroncio	mg/L		-	-	0.09998	10.289	0.03248	1.62296	0.05269	0.21978	2.4793	4.85891	0.40198	5.29428	1.74827	2.10996	2.86559	0.35829	1.72642	
Fósforo	mg/L		-	-	0.135	0.028	0.219	0.873	0.051	0.062	0.095	0.394	0.017	0.196	0.013	0.036	2.831	0.353	0.828	
Hierro	mg/L	2	5	**	1.98666	89.05905	0.59728	8045	1.28858	17.63114	9732	4158	0.57235	2414	2938	275.6	3524	12.60897	2724.8	
Litio	mg/L		2.5	2.5	0.14001	0.02606	0.03758	0.10891	0.22353	0.05802	0.27039	0.35574	0.10064	0.24734	0.21071	0.0976	0.16142	0.03021	0.2376	
Manganeso	mg/L		0.2	0.2	0.053355	4.414732	0.048967	780.83	0.190019	1.327779	2073.8	966.56	0.302293	206.52	1261.08	195.94	532.8	0.882693	1078.48	
Mercurio	mg/L	0.002	0.001	0.01	0.00003	0.00001	0.00009	0.00008	0.00006	0.00001	0.00001	0.00003	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00006	0.00005	
Molibdeno	mg/L		-	-	0.00551	0.00284	0.0138	0.00079	0.00196	0.00509	0.00022	0.00093	0.0064	0.01543	0.00008	0.011	0.03127	0.00206	0.00023	
Niquel	mg/L		0.2	1	0.00202	0.00907	0.0015	0.41803	0.00214	0.00289	0.04093	0.46402	0.00303	0.00422	0.23446	0.04987	0.43418	0.00337	0.30756	
Plata	mg/L		-	-	0.00252	0.00218	0.00118	0.00875	0.00082	0.00067	0.00074	0.00133	0.00034	0.00245	0.00003	0.00085	0.01706	0.00066	0.00229	
Plomo	mg/L	0.2	0.05	0.05	0.0078	0.1995	0.0168	1.8143	0.0789	0.0323	0.9438	0.015	0.0086	2.8265	0.5358	0.3154	1.7281	0.097	0.1662	
Selenio	mg/L		0.02	0.05	0.0001	0.0001	0.0002	0.0014	0.0001	0.0001	0.0001	0.0009	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0028	0.0001	0.0014	
Silicio	mg/L		-	-	6.629	4.96	5.69	15.681	5.96	10.27	25.87	30.753	11.525	8.07	17.281	5.796	35.271	11.073	21.511	
Talio	mg/L		-	-	0.00048	0.07983	0.00036	0.01005	0.00022	0.00019	0.02905	0.00783	0.00012	0.00817	0.17251	0.00114	0.03063	0.00088	0.05493	
Titanio	mg/L		-	-	0.00442	0.00123	0.00464	0.0081	0.00437	0.00401	0.03408	0.00317	0.00302	0.00388	0.00046	0.00745	0.04027	0.08125	0.00592	
Uranio	mg/L		-	-	0.000449	0.00494	0.000367	0.305734	0.000835	0.000789	0.001161	0.163497	0.000261	0.004576	0.010475	0.001762	0.062175	0.000457	0.039156	
Vanadio	mg/L		-	-	0.00224	0.00039	0.00348	0.17935	0.00188	0.00154	0.00316	0.12496	0.00031	0.00405	0.00124	0.00085	0.09683	0.00465	0.0408	
Zinc	mg/L	1.5	2	24	0.02731	8.61618	0.055	1193.72825	0.06434	1.36961	657.93921	1027.76478	0.03643	11.76867	180.99776	1.27277	295.8223	0.23168	815.11109	

Estándar Calidad de Agua Nacional (ECA) . Aprobado por D.S. N° 004-2017-MINAM
(**) Parámetro no aplica para esta Subcategoría.
LMP: Límite Máximo Permisible.
Cat.III-D1: Riego de vegetales
Cat.III-D2: Bebida de animales

	Excede el ECA-Categoría III-D1
	Excede el ECA-Categoría III-D2
	Excede el ECA-Categoría III-D1 y D2