



INGENIERÍA DE FACTIBILIDAD DEL FTSF, WRF, ESTUDIOS GEOTECNICOS PARA CANTERAS, CIMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS Y TRABAJOS DE QA/QC DE LAS INVESTIGACIONES GEOTECNICAS DE CAMPO Y LÍNEA BASE HIDROGEOLÓGICA

FEASIBILITY ENGINEERING FTSF, WRF, GEOTECHNICAL STUDIES FOR BORROW PIT, FOUNDATION OF STRUCTURES AND QA/QC WORK OF GEOTECHNICAL FIELD INVESTIGATIONS AND HYDROGEOLOGICAL BASELINE

RESUMEN EJECUTIVO DEL ESTUDIO DE HIDROGEOLOGÍA / EXECUTIVE SUMMARY OF THE HYDROGEOLOGY STUDY

Preparado para / Prepare for:

ATICO MINING CORPORATION

LA PLATA PROJECT



Elaborado por:

SINCO INGENIERÍA & CONSTRUCCIÓN SAC

Informe.: SC-006-2021-100-RHG-01

Diciembre, 2021/ December, 2021

Estado de Revisión / Status review

Rev.	Fecha/Date	Descripción/Description	Elaborado/Prepared		Aprobado/Approved	
			Name Surname	Cargo/Role	Name Surname	Cargo/Role
A	16/08/2021	Emitido para revisión interna	G. Baca	Ingeniero Hidrogeólogo	A. García	Gerente de Proyectos
B	20/08/2021	Emitido para revisión del cliente	G. Baca	Ingeniero Hidrogeólogo	A. García	Gerente de Proyectos
0	23/12/2021	Emitido para revisión del cliente	G. Baca	Ingeniero Hidrogeólogo	A. García	Gerente de Proyectos

CONTENIDO

1	GENERALIDADES	10
1.1	INTRODUCCIÓN	10
1.2	OBJETIVOS	11
1.2.1	Objetivos Generales	11
1.2.2	Objetivos Específicos	11
1.3	METODOLOGÍA DE ESTUDIO	11
1.3.1	Revisión de Información	11
1.3.2	Trabajos de Campo	11
1.3.3	Trabajos de Gabinete	12
1.4	ALCANCE DEL ESTUDIO	12
2	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	13
2.1	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	13
2.1.1	Ubicación del Proyecto Minero La Plata	13
2.1.2	Ubicación del Área de Estudio Hidrogeológico	13
2.2	DESCRIPCIÓN HIDROGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	14
2.2.1	Área de Estudio	15
2.2.2	Subdivisión Unidad Hidrográfica Nivel 152959 Estero Alambique	17
2.2.3	Subdivisión Unidad Hidrográfica Nivel 152959 La Florida	17
2.2.4	Subdivisión Unidad Hidrográfica Nivel 152959 La Guatuzza Alta	18
2.2.5	Subdivisión Unidad Hidrográfica Nivel 152959 La Plata Media	18
2.3	CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	18
2.3.1	Parámetros de Forma	19
2.3.2	Parámetros de Relieve	20
2.3.3	Parámetros de la Red De Drenaje	22
2.4	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	23
2.4.1	Precipitación	23
2.4.2	Temperatura	24
2.4.3	Humedad Relativa	25
2.4.4	Evapotranspiración Potencial	26
2.5	CAUDALES MEDIOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	27
2.5.1	Puntos de Control	27
2.5.2	Resultados	29
2.6	CAUDAL BASE	29
2.6.1	Generalidades	29
2.6.2	Resultados	30
2.7	BALANCE HÍDRICO DEL ÁREA DE ESTUDIO	32

2.7.1	Generalidades.....	32
2.7.2	Precipitación.....	33
2.7.3	Evapotranspiración.....	34
2.7.4	Escurrimiento	35
2.7.5	Balance Hídrico Mensual.....	36
2.7.6	Balance Hídrico Anual.....	37
3	INVENTARIO DE RECURSOS HÍDRICOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	38
3.1	RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES.....	38
3.1.1	Subdivisión Estero Alambique	38
3.1.2	Subdivisión La Florida	41
3.1.3	Subdivisión La Plata Media	42
3.1.4	Subdivisión La Guatuzá Alta	43
3.2	RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS	44
3.2.1	Subdivisión Estero Alambique	45
3.2.2	Subdivisión La Florida	46
3.2.3	Subdivisión La Plata Media	47
3.2.4	Subdivisión La Guatuzá Alta	48
4	INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS.....	49
4.1	GEOFÍSICA	49
4.1.1	Generalidades.....	49
4.1.2	Refracción Sísmica	49
4.1.3	Tomografías Eléctricas.....	50
4.2	PERFORACIONES E INSTALACIÓN DE PIEZÓMETROS	53
4.3	LOGUEOS.....	54
4.4	PRUEBAS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	57
4.5	MEDICIONES DE NIVEL DE AGUA SUBTERRÁNEA	58
5	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	60
5.1	PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS.....	60
5.1.1	Conductividad Hidráulica.....	60
5.1.2	Porosidad	74
5.1.3	Coefficiente de Almacenamiento y Rendimiento Específico.....	75
5.2	GEOMETRÍA DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS.....	76
5.3	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	78
5.3.1	Definiciones	78
5.3.2	Clasificación Hidrogeológica.....	78
5.3.3	Unidades Hidrogeológicas	80
5.4	HIDRODINÁMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA	81
5.4.1	Niveles Freáticos y Niveles Piezométricos	81

5.4.2	Relación entre las Aguas Subterráneas y las Aguas Superficiales	84
6	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	86
6.1	MARCO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL	86
6.2	MARCO HIDROGEOLÓGICO LOCAL	90
6.2.1	Sistema Hidrogeológico	90
6.2.2	Fuentes de Recarga	90
6.2.3	Zonas de Recarga y Descarga	91
6.2.4	Sentido del Flujo Subterráneo	91
6.3	MODELO CONCEPTUAL EN ESTADO ACTUAL	91
6.4	INFLUENCIA DE LAS ACTIVIDADES MINERAS	92
7	MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO	101
7.1	DISEÑO DEL MODELO DE ACUÍFERO	101
7.1.1	Discretización del Sistema Acuífero	101
7.1.2	Número de Capas y Tipo de Acuífero	102
7.1.3	Condiciones de Frontera	103
7.1.4	Parámetros de Entrada del Modelo	104
7.2	MODELO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO	109
7.2.1	Resultados de la Calibración	109
7.2.2	Balance de Agua en Régimen Estacionario	115
7.3	MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO	117
7.3.1	Condiciones Iniciales	117
7.3.2	Resultados de la Calibración	117
7.3.3	Balance Hídrico Subterráneo en Régimen Transitorio	118
7.4	RUTA DE CONTAMINANTES	121
7.5	INFLUENCIA DEL DRENAJE EN LAS GALERÍAS PROYECTADAS	125
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	129
8.1	CONCLUSIONES	129
8.2	RECOMENDACIONES	132
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133

RELACIÓN DE CUADROS

Cuadro N° 01	Ubicación geográfica del Área de Estudio.....	13
Cuadro N° 02	Parámetros de forma de las subdivisiones del Área de Estudio	19
Cuadro N° 03	Parámetros de relieve de las subdivisiones del Área de Estudio	20
Cuadro N° 04	Parámetros de la red de drenaje de las subdivisiones del Área de Estudio	22
Cuadro N° 05	Precipitación total media mensual en el Área de Estudio	24
Cuadro N° 06	Precipitación total media anual en el Área de Estudio.....	24
Cuadro N° 07	Temperatura media mensual en el Área de Estudio	25
Cuadro N° 08	Temperatura media anual en el Área de Estudio	25
Cuadro N° 09	Humedad relativa media mensual en el Área de Estudio	25
Cuadro N° 010	Humedad relativa media anual en el Área de Estudio	26
Cuadro N° 011	Evapotranspiración potencial total media mensual en el Área de Estudio	27
Cuadro N° 012	Evaporación total media anual en el Área de Estudio	27
Cuadro N° 013	Ubicación geográfica de los puntos de control hidrológico para generación de caudales medios mensuales.....	28
Cuadro N° 014	Caudales medios mensuales en el Área de Estudio	29
Cuadro N° 015	Caudales medios anuales en el Área de Estudio.....	29
Cuadro N° 016	: Caudales base medios mensuales en el Área de Estudio	31
Cuadro N° 017	: Caudales base medios anuales en el Área de Estudio	31
Cuadro N° 018	: Precipitación total mensual en el Área de Estudio	33
Cuadro N° 019	Evapotranspiración potencial total media mensual en el Área de Estudio	34
Cuadro N° 020	Evapotranspiración de cultivo total media mensual en el Área de Estudio.	35
Cuadro N° 021	Escurrimiento mensual en el Área de Estudio.....	35
Cuadro N° 022	Balance hídrico mensual para año promedio en el Área de Estudio ...	36
Cuadro N° 023	Inventario de fuentes hídricas superficiales en la subdivisión Estero Alambique	38
Cuadro N° 024	Inventario de fuentes hídricas superficiales en la subdivisión La Florida	41
Cuadro N° 025	Inventario de fuentes hídricas superficiales en la subdivisión La Plata Media	42
Cuadro N° 026	Inventario de fuentes hídricas superficiales en la subdivisión La Guatuzá Alta	43
Cuadro N° 027	Inventario de fuentes hídricas subterráneas en la subdivisión Estero Alambique	46

Cuadro N° 028	Inventario de fuentes hídricas subterráneas en la subdivisión La Florida ..	46
Cuadro N° 029	Inventario de fuentes hídricas subterráneas en la subdivisión La Plata media	47
Cuadro N° 030	Inventario de fuentes hídricas subterráneas en la subdivisión La Guatuzza Alta.	48
Cuadro N° 031	Líneas de Refracción Sísmica realizadas en el Área de Estudio.....	50
Cuadro N° 032	Líneas de Tomografía Eléctrica realizadas en el Área de Estudio.....	51
Cuadro N° 033	Relación de perforaciones realizadas en el Área de Estudio en el año 2021	53
Cuadro N° 034	Resumen del análisis de logueos	57
Cuadro N° 035	Resumen de las pruebas de conductividad hidráulica por perforación..	57
Cuadro N° 036	Resumen de las mediciones de niveles de agua en el periodo mayo-agosto 2021	58
Cuadro N° 037	Resumen de los valores de conductividad hidráulica por litología	64
Cuadro N° 038	Resumen de los valores de conductividad hidráulica por litología	68
Cuadro N° 039	Conductividad hidráulica efectiva para los depósitos cuaternarios y la dolerita.	73
Cuadro N° 040	Conductividad hidráulica efectiva para las formaciones geológicas del Área de Estudio – Estratos Superiores	73
Cuadro N° 041	Conductividad hidráulica efectiva para las formaciones geológicas del Área de Estudio – Estratos Inferiores	73
Cuadro N° 042	Porosidad efectiva estimada	75
Cuadro N° 043	Extensión de las unidades litológicas en superficie	76
Cuadro N° 044	Clasificación hidrogeológica según litología, conductividad hidráulica y transmisividad	80
Cuadro N° 045	Unidades utilizadas en el modelo	101
Cuadro N° 046	Conductividad hidráulica por unidades litológicas y estratos del modelo.	105
Cuadro N° 047	Parámetros de almacenamiento por capas	107
Cuadro N° 048	Balance hídrico en el área de modelamiento – Modelo de flujo en régimen estacionario	116
Cuadro N° 049	Balance hídrico del área de modelamiento en régimen transitorio – time 91 (setiembre-noviembre)	118
Cuadro N° 050	Balance hídrico en el área de modelamiento en régimen transitorio – time 181 (diciembre-febrero)	119
Cuadro N° 051	Balance hídrico en el área de modelamiento en régimen transitorio –	

time 273 (marzo-mayo)	119
Cuadro N° 052 Balance hídrico en el área de modelamiento en régimen transitorio – time 365 (junio-agosto)	120
Cuadro N° 053 Módulos de drenaje en las galerías proyectadas	126
Cuadro N° 054 Variaciones en el caudal base producto del drenaje de las galerías subterráneas para un año promedio	128

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura N° 01 Ubicación por provincias y parroquias de la zona del proyecto	13
Figura N° 02 Ubicación hidrográfica del área de estudio hidrogeológico	14
Figura N° 03 Ubicación hidrográfica local del Área de Estudio	15
Figura N° 04 Delimitación de subdivisiones en el área de estudio	16
Figura N° 05 Curvas hipsométricas estandarizadas	21
Figura N° 06 Perfiles longitudinales estandarizados de los cauces principales	22
Figura N° 07 Ubicación de puntos de generación de caudales medios mensuales en el Área de Estudio	28
Figura N° 08 Hidrograma de la quebrada La Plata	31
Figura N° 09 Balance hídrico mensual para el año promedio en el Área de Estudio ...	37
Figura N° 010 Inventario de fuentes hídricas superficiales en el Área de Estudio	39
Figura N° 011 Inventario de fuentes hídricas subterráneas en el Área de Estudio	45
Figura N° 012 Sección de tomografía geoeléctrica TMF-01 – Subdivisión Estero Alambique	52
Figura N° 013 Sección de tomografía geoeléctrica TMF-01 – Subdivisión Estero Alambique	52
Figura N° 014 Ubicación de piezómetros y perforaciones en el Área de Estudio	55
Figura N° 015 Esquema de los piezómetros tipo Casagrande instalados en el Área de Estudio.	56
Figura N° 016 Descenso del nivel freático en los piezómetros analizados	59
Figura N° 017 Distribución de pruebas realizadas por litología	61
Figura N° 018 Nivel de significancia de la prueba de normalidad para la conductividad hidráulica por litología	62
Figura N° 019 Box plot de la conductividad hidráulica por litología	63
Figura N° 020 Estimadores de la media de la conductividad hidráulica por litología	65
Figura N° 021 Relación conductividad hidráulica y profundidad para la arcilla inorgánica	66
Figura N° 022 Relación conductividad hidráulica y profundidad para los materiales cuaternarios	66
Figura N° 023 Relación conductividad hidráulica y profundidad para la dolerita	67

Figura N° 024	Relación conductividad hidráulica y profundidad para la dolerita.....	69
Figura N° 025	Análisis de homogeneidad entre la arcilla limosa y el limo	71
Figura N° 026	Diagrama de decisión DSS	72
Figura N° 027	Criterios de comparación entre FDP para la conductividad hidráulica de los depósitos cuaternarios	72
Figura N° 028	Criterios de comparación entre FDP para la conductividad hidráulica de la dolerita	73
Figura N° 029	Espesores de los depósitos cuaternarios en el Área de Estudio	77
Figura N° 030	Ordenes de magnitud de la conductividad hidráulica (m/d)	79
Figura N° 031	Clasificación de terrenos por su transmisividad (m ² /d)	79
Figura N° 032	Clasificación hidrogeológica de los ensayos realizados a los materiales cuaternarios y a la dolerita.....	79
Figura N° 01	Mapa de niveles freáticos del acuífero pobre superior	82
Figura N° 02	Mapa de niveles piezométricos del acuitardo inferior	83
Figura N° 03	Mapa de profundidad del nivel freático del acuífero superior.....	85
Figura N° 01	Mapa de hidrogeología regional.....	86
Figura N° 02	Sección de hidrogeología regional A-A	87
Figura N° 03	Sección de hidrogeología regional B-B	88
Figura N° 04	Sección de hidrogeología regional C-C.....	89
Figura N° 05	Plano de hidrogeología local.....	94
Figura N° 06	Sección de hidrogeología local A-A.....	95
Figura N° 07	Sección de hidrogeología local B-B.....	96
Figura N° 08	Sección de hidrogeología local C-C	97
Figura N° 09	Sección de hidrogeología local D-D.....	98
Figura N° 010	Sección de hidrogeología local E-E	99
Figura N° 011	Sección de hidrogeología local F-F.....	100
Figura N° 012	Discretización del sistema acuífero y componentes proyectados de la U.M. La Plata	102
Figura N° 013	Vista satelital del área del modelo y estratos modelados.	103
Figura N° 014	Condición de frontera del tipo river, drenes, carga general y recarga utilizados en el modelo numérico.....	104
Figura N° 015	Vista de la conductividad hidráulica asignada al primer estrato del modelo numérico (las zonas corresponden a las unidades litológicas)	105
Figura N° 016	Vista de la conductividad hidráulica asignada al modelo numérico en el estrato 5	106
Figura N° 017	Vista de la conductividad hidráulica asignada al modelo numérico en el estrato 9.	106
Figura N° 018	Cargas piezométricas iniciales utilizadas en las capas 1-8 del modelo	

numérico estacionario	108
Figura N° 019 Cargas piezométricas iniciales utilizadas en las capas 9-13 del modelo numérico estacionario	109
Figura N° 020 Cargas calculadas y observadas en piezómetros existentes (modelo en régimen estacionario)	110
Figura N° 021 Cargas piezométricas modeladas en la capa 1 del modelo numérico estacionario.	111
Figura N° 022 Cargas piezométricas modeladas en la capa 9 del modelo numérico estacionario	111
Figura N° 023 Cargas piezométricas modeladas en la capa 13 del modelo numérico estacionario.	112
Figura N° 024 Vista en planta de los niveles de agua subterránea modeladas en régimen estacionario	113
Figura N° 025 Sección transversal fila 107 (arriba) y fila 143 (abajo)	114
Figura N° 026 Sección transversal columna 60 (arriba) y fila 135 (abajo)	114
Figura N° 027 Balance de masas en régimen estacionario	116
Figura N° 028 Cargas calculadas y observadas en piezómetros existentes (modelo en régimen transitorio)	117
Figura N° 029 Variación trimestral del nivel freático para un año promedio.....	118
Figura N° 030 Balance de masas en régimen transitorio periodo abril-junio	121
Figura N° 031 Partículas asignadas al modelo de ruta de contaminantes, componentes proyectados	122
Figura N° 032 Simulación de movimiento de contaminantes para 30 días	123
Figura N° 033 Simulación de movimiento de contaminantes para 60 días	123
Figura N° 034 Simulación de movimiento de contaminantes para 180 días	124
Figura N° 035 Simulación de movimiento de contaminantes para 365 días	124
Figura N° 036 Simulación de movimiento de contaminantes para 1825 días	125
Figura N° 037 Variación del nivel piezométrico en la fila 146 en estado actual (arriba) y proyectado (abajo)	126
Figura N° 038 Abatimiento del nivel freático producto del drenaje de galerías	127
Figura N° 039 Abatimiento del nivel freático en zonas cercanas a la captación de agua existente	127

1 GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

SINCO Ingeniería y Construcción S.A.C. (en adelante SINCO) ha realizado los trabajos necesarios para cumplir los objetivos y términos de referencia, en cuanto al tema hidrogeológico, solicitados por el Cliente y por las Autoridades Competentes para los estudios de impacto ambiental. En el presente informe se presenta el “Estudio de Hidrogeología del Proyecto Minero La Plata”, el cual ha sido elaborado considerando las teorías, técnicas y modelos de uso cotidiano en la actualidad. El presente estudio servirá para identificar y comprender el comportamiento de las aguas subterráneas, verificando el estado actual de las aguas subterráneas, tanto en cantidad como en calidad, en base a la clasificación de las formaciones geológicas desde el punto de vista hidráulico, los resultados de ensayos hidrodinámicos, definición de las condiciones de borde y contorno, entre otros.

En el presente capítulo se presentan los objetivos, metodología, alcances y limitaciones del estudio. En el Capítulo 2 se analizó el área de estudio hidrogeológico desde el punto de vista hidrológico. En este capítulo se calcula la tasa de recarga preliminar del agua subterránea y los caudales base.

En el Capítulo 3 se presenta el inventario de recursos hídricos subterráneos y superficiales que se encuentran dentro del área de influencia del proyecto minero La Plata. En el capítulo 4 se presentan y analizan los resultados de las investigaciones geofísicas, perforaciones, de las pruebas hidrodinámicas y mediciones de niveles de agua realizadas en el área de estudio.

En el Capítulo 5 se caracteriza hidrogeológicamente el área de estudio, discutiéndose e interpretándose la información de los capítulos anteriores a profundidad para describir los parámetros hidrogeológicos, unidades hidrogeológicas e hidrodinámica del agua subterránea.

En el Capítulo 6 se describen los modelos conceptuales del área de estudio a nivel regional y local. A partir del modelo conceptual se desarrolló el modelo hidrogeológico matemático, con el software especializado Visual Modflow Flex, el cual se presenta en el Capítulo 7.

Finalmente, las conclusiones y recomendaciones del presente estudio se muestran en el Capítulo 8, y las referencias bibliográficas generales y específicas en el Capítulo 9.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Generales

- Elaboración del estudio de hidrogeología del proyecto minero La Plata con fines de línea base y diseño de componentes.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estimar la tasa de recarga preliminar del agua subterránea en el área de estudio.
- Estimar los caudales base en el área de estudio.
- Caracterizar geológicamente el área de estudio.
- Realizar el inventario de fuentes de agua subterráneas y superficiales.
- Caracterizar hidrogeológicamente el área de estudio.
- Elaborar el modelo hidrogeológico conceptual.
- Elaborar el modelo hidrogeológico numérico.

1.3 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Para el desarrollo del presente estudio se consideraron tres (03) fases de estudio, las cuales fueron la fase de revisión de información, de campo y de gabinete, las mismas que se describen a continuación:

1.3.1 Revisión de Información

Previo a la ejecución de los trabajos de campo se revisaron diversos estudios realizados en el área de interés, con la finalidad de recopilar y/o actualizar la información necesaria para los trabajos de campo. Los estudios que han sido tomados en cuenta son referenciados en el capítulo 9.

1.3.2 Trabajos de Campo

Los trabajos de campo desarrollados consistieron en las siguientes actividades:

- Visitas técnicas al área estudio para caracterización hidrológica.
- Mapeo geológico del área de estudio.
- Realizar el inventario de fuentes de aguas superficiales y subterráneas en época de estiaje y de lluvias.

- Trabajos de prospección geofísica.
- Trabajos de perforación.
- Ejecución de pruebas hidrodinámicas.
- Instalación de piezómetros.
- Mediciones de nivel de agua subterránea.

1.3.3 Trabajos de Gabinete

Durante los trabajos de gabinete se desarrollaron las siguientes actividades:

- Estimación de la tasa de recarga preliminar del agua subterránea en el área de estudio.
- Estimación de caudales base en el área de estudio.
- Caracterización geológica del área de estudio.
- Descripción del inventario de fuentes de agua subterráneas y superficiales.
- Análisis de las investigaciones hidrogeológicas de campo.
- Caracterización hidrogeológica del área de estudio.
- Elaboración del modelo hidrogeológico conceptual.
- Elaboración del modelo hidrogeológico numérico.
- Elaboración de informe.

1.4 ALCANCE DEL ESTUDIO

Los alcances del presente estudio consideran la interpretación de los trabajos de campo, estimación de la recarga y caudales base, caracterización geológica del área de estudio, análisis e interpretación de los logueos y pruebas hidrodinámicas realizadas en el área de estudio, caracterización hidrogeológica del área de estudio y elaboración de los modelos hidrogeológicos conceptual y numérico del área de estudio.

En consecuencia, el área de estudio abarca las subdivisiones La Florida y Estero Alambique, y partes de La Guatuzá y La Plata, que forman parte de la unidad hidrográfica nivel 6 152959, por lo que los resultados de los análisis realizados en el presente estudio no podrán extrapolarse a otras áreas.

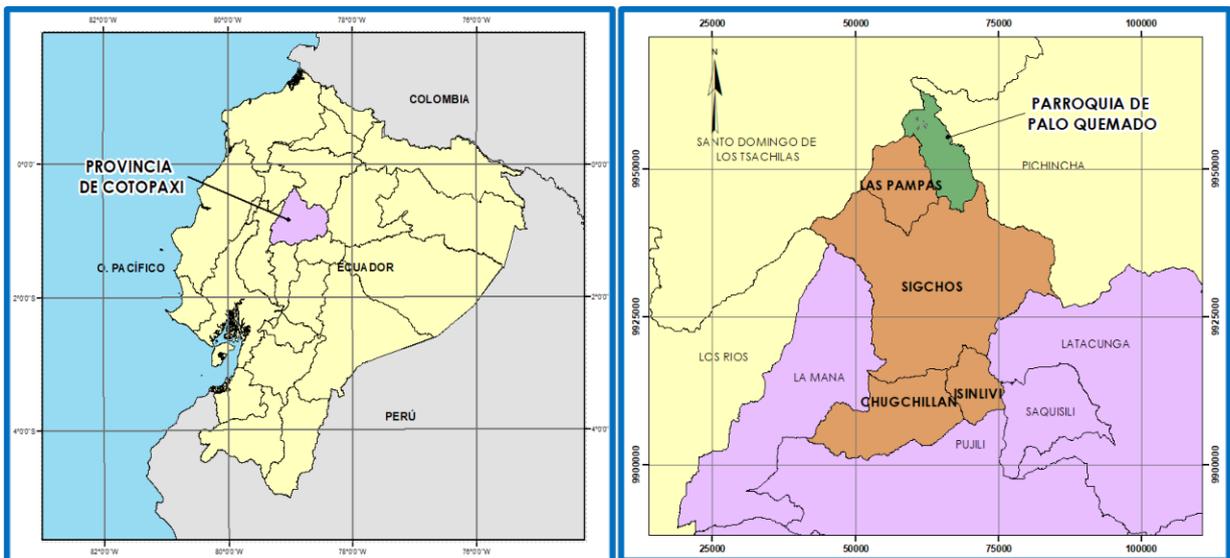
2 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1.1 Ubicación del Proyecto Minero La Plata

El proyecto minero La Plata se encuentra aledaño al centro poblado La Florida, en la parroquia de Palo Quemado, cantón de Sigchos, provincia de Cotopaxi y a una altitud que varía entre los 1390 msnm y 1455 msnm. Geográficamente se ubica en las siguientes coordenadas: 0° 23'28.82'' Latitud Sur y 78° 56' 3.88'' Longitud Oeste.

Figura N° 01 Ubicación por provincias y parroquias de la zona del proyecto



Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Ubicación del Área de Estudio Hidrogeológico

Para la presente investigación hidrogeológica se ha delimitado un área de estudio hidrogeológico (en adelante Área de Estudio), que sea representativa del área de influencia del proyecto minero La Plata, cubriendo las subdivisiones Estero Alambique, La Florida, La Guatuza Alta y La Plata Media de la Unidad Hidrográfica nivel 6 152959.

En el **Cuadro N°01** se muestran las coordenadas del centro geométrico del área de estudio.

Cuadro N° 01 Ubicación geográfica del Área de Estudio

Zona	Nombre	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM(1)	
		Latitud (°)	Longitud (°)	Este (m)	Norte (m)
Área de Estudio Hidrogeológico	La Plata	00°23'23.87"	78°56'12.00"	729 642	9 956 869

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

Fuente: Elaboración propia.

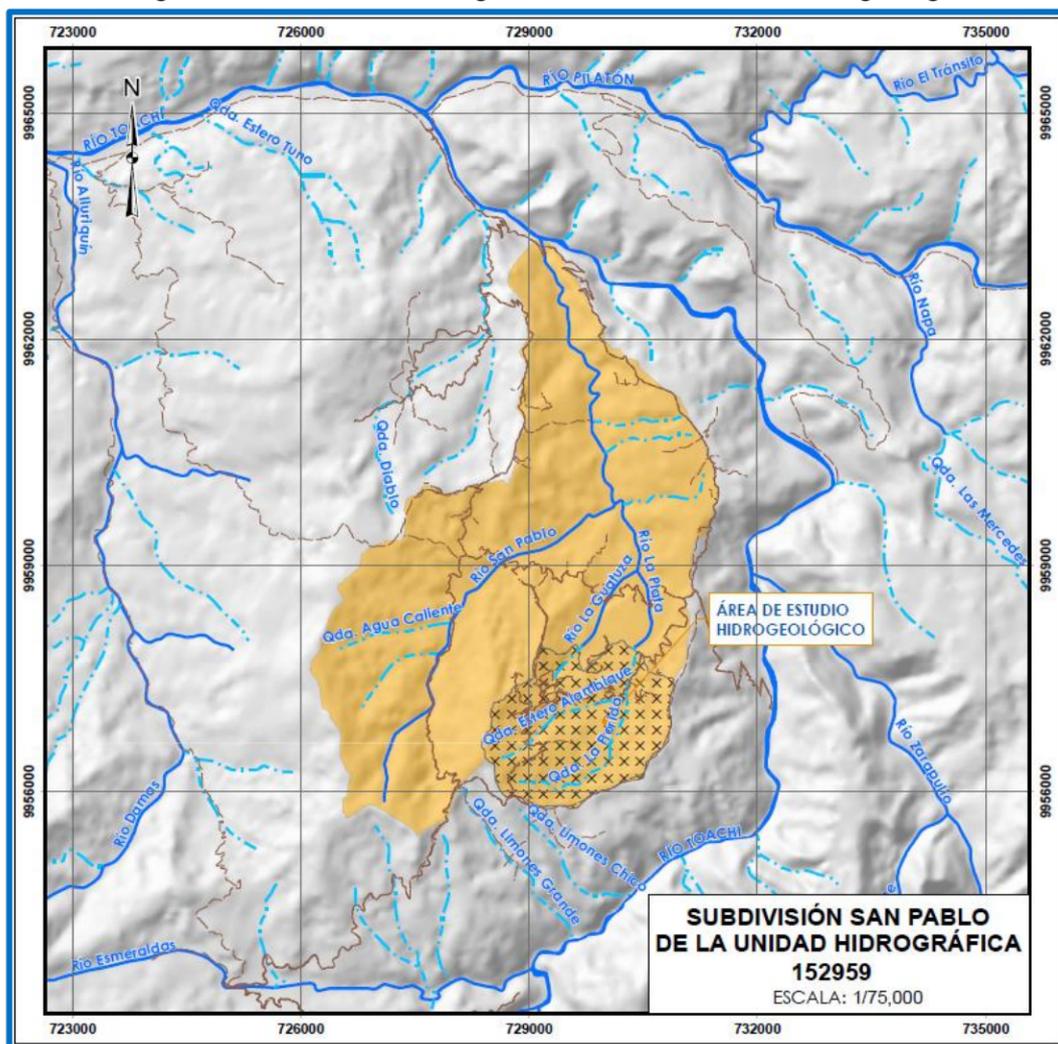
Hidrográficamente, el Área de Estudio se encuentra ubicada al sur de la subdivisión La Plata, que es parte de la unidad hidrográfica nivel 6 152959 del río San Pablo que descarga sus aguas hacia el río Toachi, quien al confluir con el río Pilatón, continua con nombre Toachi hasta desembocar al río Blanco por su margen izquierda. La región es montañosa con elevaciones que van desde 1430 msnm en la desembocadura hasta una altitud de 1630 msnm al suroeste, donde se originan las quebradas Estero Alambique, La Florida y La Guatuzá y, afluentes de la quebrada La Plata (Ver **Figuras N° 02 y 03**).

Como se puede apreciar en la **Figura N° 02** el Área de Estudio se encuentra rodeado por los ríos Toachi, San Pablo, Damas y Esmeraldas. En la **Figura N°03** se puede apreciar que el área de estudio se encuentra formada por las quebradas Estero Alambique, La Florida, Guatuzá y La Plata.

2.2 DESCRIPCIÓN HIDROGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

A continuación, se describen las características hidrográficas de las delimitaciones que conforman el Área de Estudio.

Figura N° 02 Ubicación hidrográfica del área de estudio hidrogeológico



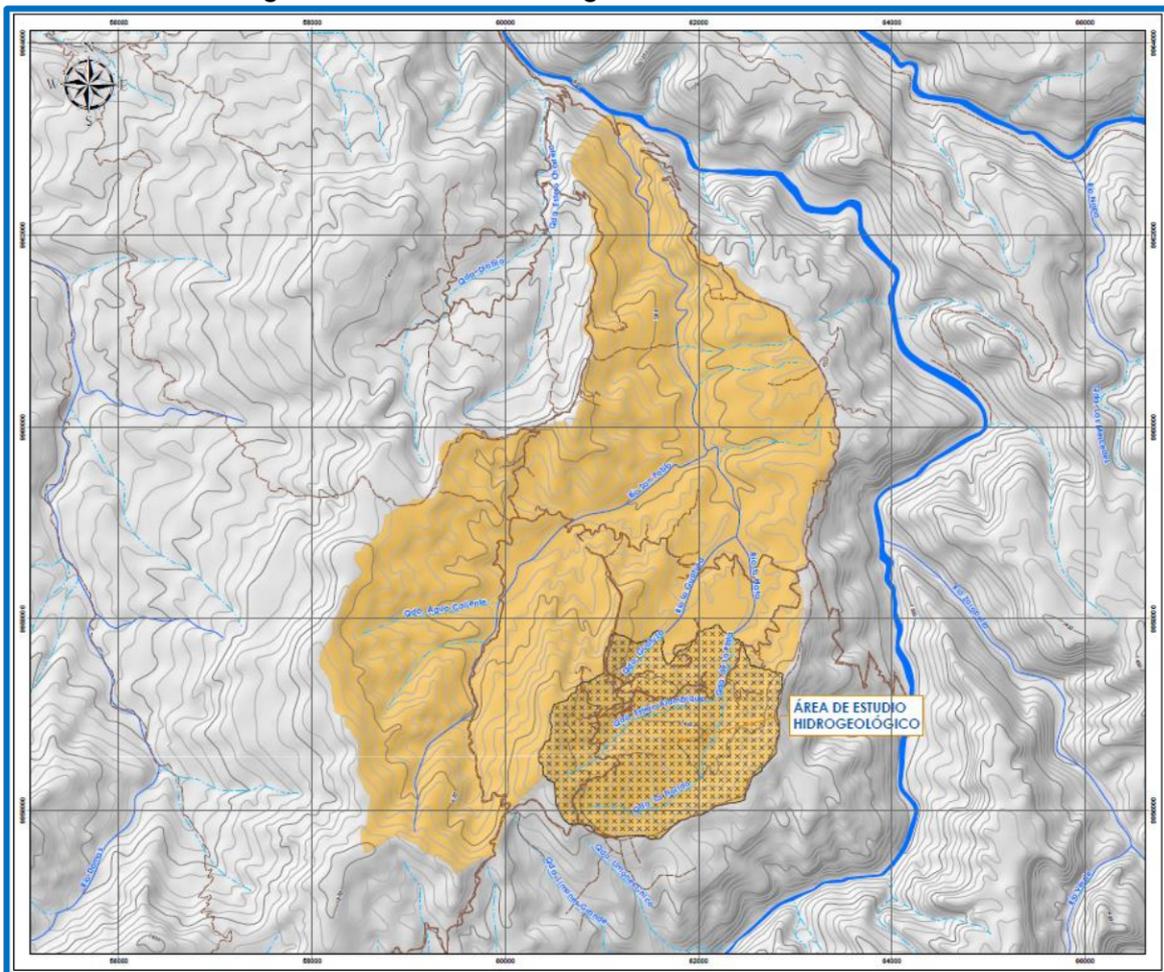
Fuente: Elaboración propia.

2.2.1 Área de Estudio

El Área de Estudio se encuentra ubicado dentro de las coordenadas UTM (Datum WGS 84 – Zona 17M) 728 379 E – 730 920 E y 9 955 729 N – 9 958 008 N. Abarca una extensión de 3.89 km² y su perímetro es de 9.02 km. La altitud máxima es de 4904.50 msnm, la mínima es de 4084.74 msnm y su altitud media es de 4452.25 msnm.

Para un mejor análisis el Área de Estudio ha sido dividida en las subdivisiones Estero Alambique, La Florida, La Guatuzza Alta y La Plata Media (véase la **Figura N°04**).

Figura N° 03 Ubicación hidrográfica local del Área de Estudio



Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Subdivisión Unidad Hidrográfica Nivel 152959 Estero Alambique

La subdivisión Estero Alambique se encuentra ubicada dentro de las coordenadas UTM (Datum WGS 84 – Zona 17M) 728 379 E – 730 314 E y 9 956 345 N – 9 957 401 N. Abarca una extensión de 1.08 km² y su perímetro es de 5.43 km. La altitud máxima es de 1746.01 msnm, la mínima es de 1306.47 msnm y su altitud media es de 1501.046 msnm. Para mayor detalle véase la **Figura N°04**.

La quebrada Estero Alambique nace en la parte oeste del Área de Estudio, con un recorrido mayoritario con dirección suroeste-noreste de 2.31 km de longitud, hasta su confluencia con la quebrada La Florida, formando la quebrada La Plata. Limita con las subdivisiones La Guatuzá por el norte, La Florida por sur, por el noreste La Plata y por el oeste con la subdivisión del río San Pablo.

En esta subdivisión se ubican varios de los componentes del proyecto minero entre los que destacan las galerías subterráneas (al oeste), las escombreras N° 1 y 2 y parte de la planta de procesos en la parte media de la misma.

2.2.3 Subdivisión Unidad Hidrográfica Nivel 152959 La Florida

La subdivisión La Florida se encuentra ubicada dentro de las coordenadas UTM (Datum WGS 84 – Zona 17M) 728 468 E – 730 630 E y 9 955 729 N – 9 957 339 N. Abarca una extensión de 1.60 km² y su perímetro es de 6.60 km. La altitud máxima es de 1742.43 msnm, la mínima es de 1306.47 msnm y su altitud media es de 1479.18 msnm. Para mayor detalle véase la **Figura N°04**.

La quebrada la Florida nace en la parte suroeste del Área de Estudio, con un recorrido inicial con dirección oeste-este, para luego cambiar a suroeste-noreste (totalizando 3.34 km), hasta su confluencia con la quebrada La Florida, formando la quebrada La Plata. Limita con las subdivisiones Estero Alambique por el norte, La Plata por el este y diversas subdivisiones menores afluentes del río Toachi por el sur y el oeste.

En esta subdivisión se ubican varios de los componentes del proyecto minero entre los que destacan el depósito de relaves filtrados (parte central norte), la estación auxiliar de transferencia temporal y parte de la planta de procesos.

2.2.4 Subdivisión Unidad Hidrográfica Nivel 152959 La Guatuzza Alta

La subdivisión La Guatuzza Alta se encuentra ubicada dentro de las coordenadas UTM (Datum WGS 84 – Zona 17M) 728 673 E – 729 708 E y 9 975 159 N – 9 957 952 N. Abarca una extensión de 0.43 km² y su perímetro es de 3.30 km. La altitud máxima es de 1645.75 msnm, la mínima es de 1304.90 msnm y su altitud media es de 1440.19 msnm. Para mayor detalle véase la **Figura N°04**.

La quebrada Guatuzza nace en la parte noroeste del Área de Estudio, con un recorrido de dirección suroeste-noreste de 1.19 km, hasta el punto de cierre determinado para el presente estudio (el punto de cierre real se encuentra más al noreste, en la confluencia con la quebrada La Plata, véase la **Figura N°03**). Limita con las subdivisiones Estero Alambique por el sur, La Plata por el este y diversas subdivisiones menores afluentes del río San Pablo por el norte y oeste.

En esta subdivisión se ubica una de las salidas de las galerías existentes en el área de estudio.

2.2.5 Subdivisión Unidad Hidrográfica Nivel 152959 La Plata Media

La subdivisión La Plata Media se encuentra ubicada dentro de las coordenadas UTM (Datum WGS 84 – Zona 17M) 729 559 E – 730 916 E y 9 956 513 N – 9 958 015 N. Abarca una extensión de 0.79 km² y su perímetro es de 5.21 km. La altitud máxima es de 1541.67 msnm, la mínima es de 1274.72 msnm y su altitud media es de 1371.53 msnm. Para mayor detalle véase la **Figura N°04**.

La quebrada La Plata nace de la confluencia entre las quebradas Estero Alambique y La Florida, con un recorrido de dirección sur-norte de 0.74 km, hasta el punto de cierre determinado para el presente estudio (el punto de cierre real se encuentra más al noroeste, en la confluencia con el río San Pablo, véase la **Figura N°03**). Limita con las subdivisiones Estero Alambique por el oeste, La Florida por el suroeste y diversas subdivisiones menores afluentes del río Toachi por el este.

2.3 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

“Las características físicas de una cuenca desempeñan un papel esencial en el estudio y comportamiento de parte de los componentes del ciclo hidrológico, tales como la evaporación, infiltración, flujo superficial, entre otros. Las principales características físicas que se consideran en investigaciones hidrológicas son las concernientes a la cuenca, a la red de drenaje y al cauce o río principal”. (Díaz, Mamado, Iturbe, Esteller, & Reyna, 1999).

2.3.1 Parámetros de Forma

“La forma de la cuenca interviene de manera importante en las características del hidrograma de descarga de un río, particularmente en los eventos de avenidas máximas. En general, cuencas de igual área, pero de diferente forma generan hidrogramas diferentes” (Díaz, Mamado, Iturbe, Esteller, & Reyna, 1999).

Para determinar la forma de una cuenca se utilizan los parámetros que se describen en el **Cuadro N° 02**.

Cuadro N° 02 Parámetros de forma de las subdivisiones del Área de Estudio

Parámetro	Subdivisiones de la Unidad Hidrográfica Nivel 6 152959			
	Estero Alambique	La Florida	La Guatuzá Alta	La Plata Media
Área (km ²)	1.08	1.60	0.43	0.79
Perímetro (km)	5.43	6.60	3.30	5.21
Longitud cauce principal Lc (km)	2.31	3.34	1.19	0.74
Longitud máxima de la cuenca Lm (km)	2.09	2.17	1.19	1.56
Longitud Máxima Desagüe Lb (km)	2.09	2.63	1.21	1.38
Ancho máximo de la cuenca Am (km)	0.85	1.04	0.64	1.23
Ancho promedio de la cuenca W (km)	0.52	0.61	0.35	0.57
Índice de compacidad Kc	1.48	1.47	1.42	1.65
Factor de forma Ff	0.25	0.23	0.29	0.41
Longitud mayor del rectángulo equivalente L	2.23	2.71	1.33	2.25
Longitud menor del rectángulo equivalente l	0.48	0.59	0.32	0.35
Radio de elongación Re	0.51	0.43	0.62	1.36
Radio de circularidad Rc	0.46	0.46	0.49	0.37

Fuente: Elaboración propia.

En la subdivisión La Florida la longitud del cauce principal es superior a la longitud máxima de la cuenca y la de desagüe, lo que indica una sinuosidad mayor a la de las otras delimitaciones; lo cual también se puede apreciar en el factor de elongación. La forma de las subdivisiones en su mayoría es oval oblonga (una pera alargada), y en el caso de la U.H. La Plata Media es rectangular, de acuerdo al índice de compacidad. Según el factor de forma las delimitaciones son alargadas salvo La Plata que es asimétrica.

2.3.2 Parámetros de Relieve

Las variables de relieve son estudiadas en primer lugar por ser consideradas las de mayor importancia, de tal modo que, por ejemplo, la pendiente, tiene influencia directa en el tipo de drenaje, forma de los canales, velocidad y tipo de escorrentía, potencial erosivo o de carga de las corrientes, formas de modelado resultantes, características de la infiltración, depósitos en los lechos, etc., aspectos todos ellos de gran importancia en el sistema de la cuenca de drenaje.

Para determinar el relieve de una cuenca se utilizan los parámetros que se describen en el **Cuadro N° 03**.

Cuadro N° 03 Parámetros de relieve de las subdivisiones del Área de Estudio

Parámetro	Subdivisiones de la Unidad Hidrográfica Nivel 6 152959			
	Estero Alambique	La Florida	La Guatuza Alta	La Plata Media
Altitud máxima (msnm)	1746.01	1742.43	1645.75	1541.67
Altitud máxima cauce principal (msnm)	1637.50	1632.80	1537.90	1306.47
Altitud mínima (msnm)	1306.47	1306.47	1304.90	1274.72
Altitud media hipsométrica (msnm)	1490.60	1472.14	1427.74	1363.69
Altitud media MDT (msnm)	1501.46	1479.18	1440.19	1371.53
Altitud de frecuencia media (msnm)	1480-1500	1460-1480	1420-1440	1360-1380
Altitud más frecuente (msnm)	1420-1440	1440-1460	1380-1400	1320-1340
Pendiente cuenca (%)	51.52	46.97	56.87	49.34
Pendiente cauce principal (%)	14.35	9.77	19.58	4.29
Índice de pendiente de cuenca I_p	0.43	0.36	0.47	0.32
Índice de pendiente global I_g	147.95	100.95	175.92	80.03
Coefficiente de masividad C_m	1396.04	925.27	3367.86	1733.98
Coefficiente orográfico C_o	2.10	1.37	4.85	2.38

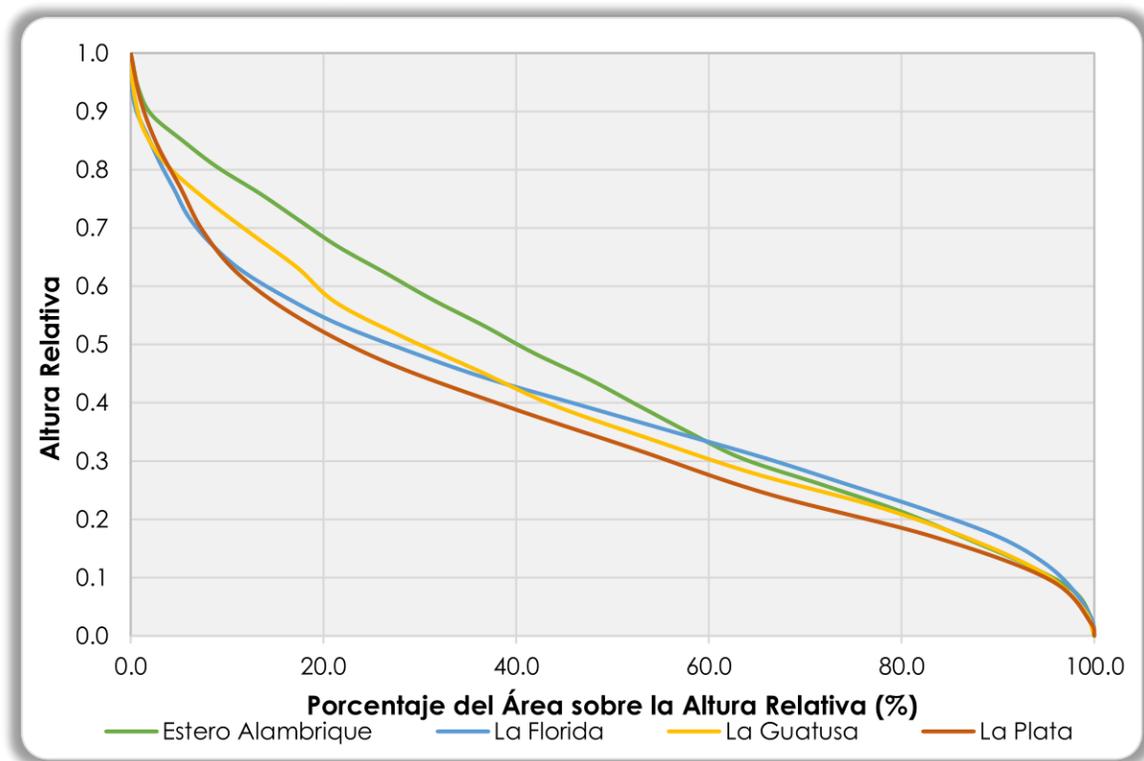
Fuente: Elaboración propia.

El punto más alto del Área de Estudio se encuentra en la subdivisión Estero Alambique y el más bajo en La Plata Media. Las pendientes de las subdivisiones varían entre 46.97% para La Florida y 56.87 para La Guatuza Alta, clasificándose el relieve como fuerte a muy fuerte; en todos los casos las pendientes de los cauces son mucho menores. Los valores del coeficiente orográfico nos indican que las subdivisiones presentan erosión media/baja.

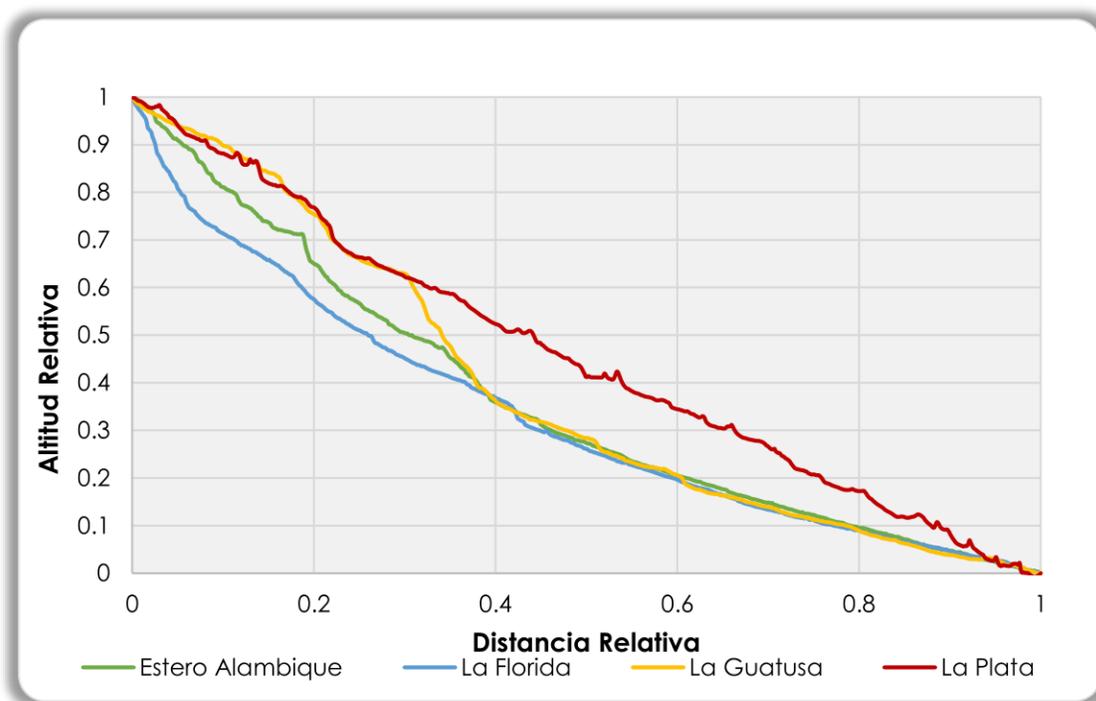
En la **Figura N°05** se muestran las curvas hipsométricas adimensionales de las subdivisiones analizadas, notándose que Estero Alambique se encuentra en un estado de madurez con actividad erosiva media, y el resto en estado de transición a la vejez y hacia una actividad erosiva baja.

En la **Figura N°06** se aprecian los perfiles longitudinales de los cauces principales, notándose que en las nacientes de las quebradas Estero Alambique, La Florida y La Guatuzá presentan mayor pendiente, que en sus partes medias y bajas (destaca la pendiente de la quebrada La Guatuzá en el tramo correspondiente al 30-40% de su longitud); a partir del 40% de recorrido las pendientes de las quebradas se uniformizan. El tramo analizado de la quebrada La Plata presenta una pendiente uniforme.

Figura N° 05 Curvas hipsométricas estandarizadas



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 06 Perfiles longitudinales estandarizados de los cauces principales


Fuente: Elaboración propia.

2.3.3 Parámetros de la Red De Drenaje

Para analizar la red de drenaje de una cuenca se utilizan los parámetros que se describen en el **Cuadro N°04**.

Cuadro N° 04 Parámetros de la red de drenaje de las subdivisiones del Área de Estudio

Parámetro	Subdivisiones de la Unidad Hidrográfica Nivel 6 152959			
	Estero Alambique	La Florida	La Guatusa Alfa	La Plata Media
Longitud total de cauces (km)	4.85	8.84	2.49	3.70
Orden de corriente	3	4	3	4
Número de cauces de Orden 1	8	21	8	7
Número de cauces de Orden 2	2	8	2	1
Número de cauces de Orden 3	1	2	1	-
Número de cauces de Orden 4	-	1	-	1
Razón de bifurcación Rb	3.00	2.88	3.00	4.00
Densidad de drenaje Dd	4.51	5.53	5.81	4.68

Parámetro	Subdivisiones de la Unidad Hidrográfica Nivel 6 152959			
	Estero Alambique	La Florida	La Guatuzá Alta	La Plata Media
Coeficiente de estabilidad C	0.22	0.18	0.17	0.21
Coeficiente de torrencialidad Ct	33.51	72.66	108.72	41.42

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de la razón de bifurcación nos indica que las subdivisiones presentan un relieve medio con poca influencia del entorno geológico en la forma del drenaje. Las delimitaciones presentan valores medios de densidad de drenaje, lo que se corresponde con un buen drenaje y tasas de infiltración medias.

2.4 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Las características climatológicas del área de estudio están determinadas por la variación de los principales parámetros meteorológicos, como precipitación, evapotranspiración, temperatura y humedad relativa, los cuales varían localmente en función de la ubicación geográfica y altitud.

La caracterización climática se detalla en el Estudio de Hidrología del Proyecto Minero La Plata.

2.4.1 Precipitación

El área de estudio se ubica en una zona en la cual las precipitaciones ocurren con mayor frecuencia en las estaciones de verano (entre los meses de enero y abril), precipitando en este periodo en promedio el 61.9% del total anual, correspondiendo los restantes meses del año hidrológico, de mayo a diciembre, el 38.1% de la precipitación.

2.4.1.1 Precipitación Total Media Mensual

El régimen pluviométrico se distribuye en tres épocas, la de estiaje, de transición y la de lluvias. La época de lluvias se produce entre los meses de enero y abril, llegando a su pico en el mes de marzo. La época de transición se considera que ocurre en los meses de mayo-junio y entre octubre-diciembre. Finalmente, la época de estiaje se da entre los meses de julio y setiembre, siendo el mes de agosto el más seco.

En el **Cuadro N°05** se muestran los valores medios mensuales para el área de estudio hidrogeológico.

Cuadro N° 05 Precipitación total media mensual en el Área de Estudio

Zona	Precipitación Total Media Mensual (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Área de Estudio	339.2	371.2	406.1	396.5	237.0	107.8	54.2	48.4	76.5	106.3	104.2	196.1

Fuente: Elaboración propia.

2.4.1.2 Precipitación Total Media Anual

La precipitación total media anual en el Área de Estudio es de 2443.5 mm, tal como se puede apreciar en el **Cuadro N° 06**.

Cuadro N° 06 Precipitación total media anual en el Área de Estudio

Zona	Coordenadas UTM ⁽¹⁾ Centro Geométrico		Altitud Media (msnm)	Precipitación Total Media Anual (mm)
	Este	Norte		
Área de Estudio	729 642	9 956 869	1459.18	2443.5

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2 Temperatura

Mediante la temperatura se expresa numéricamente el efecto que en los cuerpos produce el calor originado por el balance entre la radiación recibida y la emitida. Interesa especialmente, la temperatura del aire en las inmediaciones de la superficie terrestre. El aire se calienta o se enfría a partir del suelo por distintos métodos de transmisión y por los cambios de estado físico del agua atmosférica. La variación de temperatura sigue dos ciclos principales; el ciclo diario que presenta una forma sinusoidal con un máximo y un mínimo muy acusados y el ciclo anual que referido a temperaturas medias diarias presenta también forma sinusoidal.

2.4.2.1 Temperatura Media Mensual

En general se tiene que el mes más frío es el de diciembre y el más caluroso el de mayo. Cabe resaltar que las diferencias son pequeñas entre las medias mensuales siendo sus resultados los que se indican en el **Cuadro N° 07**.

El Área de Estudio presenta temperaturas medias mensuales que varían entre 18.3 °C en el mes de diciembre y 19.0 °C en el mes de mayo.

Cuadro N° 07 Temperatura media mensual en el Área de Estudio

Zona	Temperatura Media Mensual (°C)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Área de Estudio	18.4	18.4	18.8	18.9	19.0	18.7	18.4	18.5	18.5	18.6	18.7	18.3

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2.2 Temperatura Media Anual

En el **Cuadro N° 08** se presentan los valores medios anuales de los parámetros de temperatura media, mínima y máxima para el Área de Estudio.

Cuadro N° 08 Temperatura media anual en el Área de Estudio

Zona	Coordenadas UTM ⁽¹⁾ Centro Geométrico		Altitud Media (msnm)	Temperatura Media Anual (°C)
	Este	Norte		
Área de Estudio	729 642	9 956 869	1459.18	18.6

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

Fuente: Elaboración propia.

2.4.3 Humedad Relativa

Uno de los gases que compone la mezcla llamada aire, es el vapor de agua y su presencia se denomina humedad. La humedad atmosférica es el elemento esencial en el ciclo hidrológico, pues es fuente de las precipitaciones e influye notablemente en la evapotranspiración.

2.4.3.1 Humedad Relativa Media Mensual

La humedad relativa tiene sus máximos valores entre los meses de enero y abril coincidiendo con las mayores precipitaciones que se dan en el lugar. Los meses de mayo a diciembre son los meses con menores valores de humedad relativa coincidiendo con los meses más secos.

En el **Cuadro N°09** se presentan los valores de humedad relativa media mensual para el Área de Estudio.

Cuadro N° 09 Humedad relativa media mensual en el Área de Estudio

Zona	Humedad Relativa Media Mensual (%)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Área de Estudio	93.5	92.9	92.6	92.8	91.9	90.6	89.0	88.6	89.8	90.2	89.5	92.1

Fuente: Elaboración propia.

La humedad relativa media mensual en el área de estudio varía entre 88.6% en el mes de agosto y 93.5% en el mes de enero.

2.4.3.2 Humedad Relativa Media Anual

En el **Cuadro N°010** se presentan los valores de humedad relativa media anual para el Área de Estudio.

Cuadro N° 010 Humedad relativa media anual en el Área de Estudio

Zona	Coordenadas UTM ⁽¹⁾ Centro Geométrico		Altitud (msnm)	Humedad Relativa Media Anual (%)
	Este	Norte		
Área de Estudio	729 642	9 956 869	1459.18	91.1

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

Fuente: Elaboración propia.

2.4.4 Evapotranspiración Potencial

Goyal y Gonzales (s/f) manifiestan que la evapotranspiración es la combinación de los procesos de evaporación y transpiración, definiéndose la evaporación como el proceso físico mediante el cual el agua se convierte a su forma gaseosa. Definen así mismo a la transpiración como aquel proceso mediante el cual el agua fluye desde el suelo hacia la atmósfera a través del tejido de la planta. Las principales fuentes de la evapotranspiración del agua a la atmósfera son los cuerpos hídricos, suelos y vegetación.

“La transpiración es básicamente un proceso de evaporación. El agua se evapora dentro de las hojas y el vapor resultante se difunde hacia el exterior a través de las estomas. En esta evaporación del agua se produce un gradiente de energía el cual causa el movimiento del agua dentro y a través de las estomas de la planta. Las estomas de la mayor parte de las plantas verdes permanecen abiertas durante el día y cerradas en la noche. Si el suelo está muy seco las estomas permanecerán cerradas durante el día para que la pérdida del agua sea más lenta”. (Goyal & Gonzáles, s/f)

“La evapotranspiración potencial es la pérdida de agua de una superficie cubierta completamente de vegetación. La evapotranspiración de una cosecha es determinada por los procesos meteorológicos. El cierre de las estomas y la reducción en transpiración usualmente son importantes sólo bajo condiciones de escasez de agua o condiciones de estrés de la planta. La evapotranspiración dependerá de tres factores: (1) vegetación, (2) disponibilidad de agua en el suelo y (3) comportamiento de las estomas”. (Goyal & Gonzáles, s/f).

2.4.4.1 Evapotranspiración Total Media Mensual

La evapotranspiración se calculó con el método de Penman-Monteith, en general las menores tasas de evapotranspiración potencial se presentan en el mes de febrero y las mayores en octubre y abril.

En el **Cuadro N°011** se presentan los valores de evaporación potencial total media mensual para el Área de Estudio.

Cuadro N° 011 Evapotranspiración potencial total media mensual en el Área de Estudio

Zona	Evapotranspiración Potencial Total Media Mensual (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Área de Estudio	71.1	64.9	78.5	80.7	76.7	73.2	77.0	79.4	76.8	80.7	76.0	76.6

Fuente: Elaboración propia.

2.4.4.2 Evapotranspiración Total Media Anual

La evapotranspiración total media anual en el Área de Estudio es de 911.6 mm y el promedio mensual es de 76.0 mm. En el **Cuadro N°012** se presentan los valores de evaporación total media anual para el Área de Estudio.

Cuadro N° 012 Evaporación total media anual en el Área de Estudio

Zona	Coordenadas UTM ⁽¹⁾ Centro Geométrico		Altitud (msnm)	Evaporación Total Media Anual (mm)
	Este	Norte		
Área de Estudio	729 642	9 956 869	1459.18	911.6

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

Fuente: Elaboración propia.

2.5 CAUDALES MEDIOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Se generaron los caudales medios en los tramos de interés de las quebradas que se encuentran en el área de estudio hidrogeológico mediante el modelo WEAP (para mayor detalle véase el Estudio de Hidrología del Proyecto Minero La Plata).

2.5.1 Puntos de Control

En la **Figura N°07** y en el **Cuadro N°013** se muestran los puntos donde se calcularon los caudales medios mensuales. Los puntos PC-01a y PC-01b se encuentran muy próximos y representan los caudales de las quebradas Estero Alambique y La Florida. El punto PC-02 representa el caudal que discurre por la quebrada La Plata y el PC-04 a la quebrada La Guatuzá.

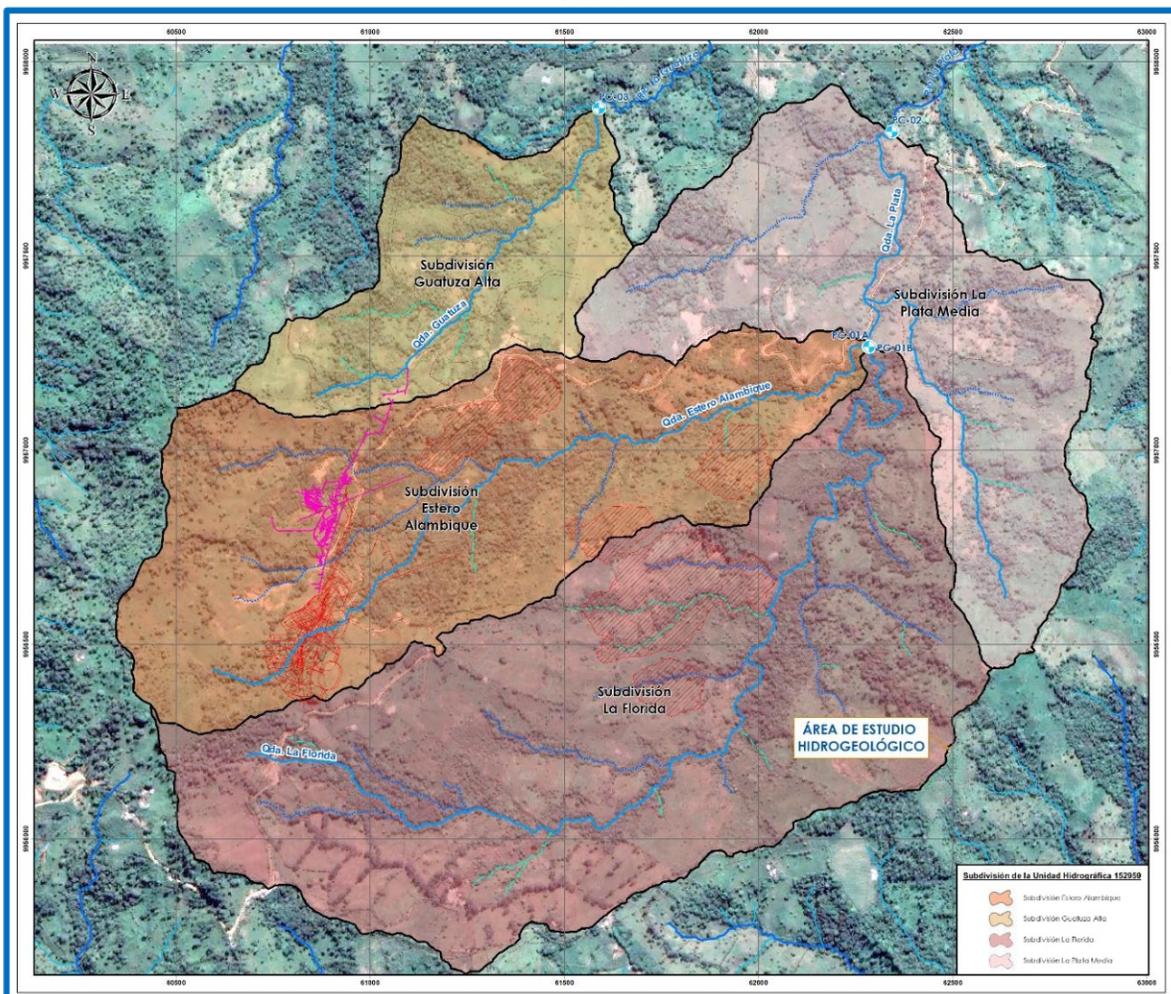
Cuadro N° 013 Ubicación geográfica de los puntos de control hidrológico para generación de caudales medios mensuales

Punto de Generación de Caudales	Cuerpo Hídrico	Coordenadas UTM ⁽¹⁾ Centro Geométrico		Altitud (msnm)
		Este	Norte	
PC-01A	Estero Alambique	730 314	9 957 339	1306.47
PC-01B	La Florida	730 315	9 957 339	1306.47
PC-02	La Plata	730 375	9 957 892	1274.72
PC-03	La Guatuzá	729 622	9 957 952	1304.90

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 07 Ubicación de puntos de generación de caudales medios mensuales en el Área de Estudio



Fuente: Elaboración propia.

2.5.2 Resultados

En el **Cuadro N°014** se presentan los caudales medios mensuales en los puntos de generación de caudales y en el **Cuadro N°015** se muestra el caudal medio anual para el Área de Estudio. Los caudales tienen su valor medio mínimo en junio y la media máxima en abril; en general se puede observar una época de mayor caudal entre los meses de enero y abril, los meses de diciembre y mayo son meses de transición, y entre junio y noviembre ocurren los valores más bajos.

Cuadro N° 014 Caudales medios mensuales en el Área de Estudio

Punto de Generación de Caudales	Caudal Medio Mensual (m ³ /s)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PC-01a	0.101	0.135	0.138	0.144	0.088	0.052	0.035	0.031	0.032	0.036	0.038	0.052
PC-01b	0.128	0.172	0.176	0.183	0.112	0.067	0.045	0.039	0.040	0.045	0.048	0.066
PC-02	0.299	0.400	0.410	0.428	0.262	0.155	0.105	0.091	0.094	0.106	0.111	0.154
PC-03	0.037	0.050	0.051	0.053	0.032	0.019	0.013	0.011	0.012	0.013	0.014	0.019

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 015 Caudales medios anuales en el Área de Estudio

Punto de Generación de Caudales	Área Drenaje (km ²)	Altitud Media (msnm)	Precipitación Total Media Anual (mm)	Caudal Medio Anual (m ³ /s)	Caudal Medio Anual (l/s)	Rendimiento Medio Anual (l/s/km ²)
PC-01a	1.08	1501.46	2443.5	0.074	73.6	68.15
PC-01b	1.60	1479.18	2443.5	0.093	93.4	58.38
PC-02	3.47	1461.52	2443.5	0.218	218.0	62.82
PC-03	0.43	1440.19	2443.5	0.027	27.0	62.83

Fuente: Elaboración propia.

La quebrada Estero Alambique cuenta con el mayor rendimiento medio anual (68.15 l/s/km²) seguido de las quebradas Guatuzá (62.83 l/s/km²) y La Florida (58.38 l/s/km²). La quebrada La Plata (que drena las aguas de las quebradas Estero Alambique y La Florida) en el punto PC-02 presenta un rendimiento medio anual de 62.82 l/s/km².

2.6 CAUDAL BASE

2.6.1 Generalidades

Simplificando el ciclo hidrológico, podemos dividir la escorrentía en, escorrentía directa, la cual se genera como respuesta a eventos de lluvia o fusión de hielo, y en escorrentía diferida, que viene a ser el agua infiltrada que recarga y circula a través de los acuíferos (especialmente los más someros), descargando con cierto retardo (dependiente de las

características hidrogeológicas e hidráulicas del área de estudio) en los cuerpos de agua tales como lagos, ríos, quebradas y/o en el mar.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente el caudal base o flujo base, es el flujo de respuesta más lenta y continuada, y en la mayoría de los casos, procedente del almacenamiento subterráneo.

El agua superficial y el agua subterránea no son elementos aislados de un sistema hidrológico, sino que interactúan en una gran variedad de situaciones fisiográficas y climáticas diversas. Para entender las relaciones agua subterránea-agua superficial hay que tener en cuenta el ambiente hidrogeológico según la definición de Toth (1963 y 1970) y considerar el alcance y situación del sistema hidrogeológico objeto de estudio.

“El agua después de un evento como la precipitación o el deshielo, se suma al agua superficial y contribuye a aumentar el caudal de un río. En este caudal se puede diferenciar entonces el caudal del evento (event flow), el caudal directo (direct flow), el caudal de tormenta (storm flow) y/o el caudal rápido (quick flow) los cuales configuran la escorrentía directa y la escorrentía hipodérmica de la cuenca. La escorrentía subterránea se relaciona con el caudal de base (base flow) la cual entra al caudal del río de manera persistente y continua en el tiempo”. (AMPHOS, 2008)

Diversos métodos se han desarrollado con la finalidad de calcular el caudal base, entre las más usadas se pueden mencionar las técnicas gráficas de separación de hidrogramas, modelos hidrológicos, métodos químicos y filtros digitales.

Los caudales base se estimaron mediante el modelo de generación de caudales WEAP presentado en el Estudio de Hidrología del Proyecto Minero La Plata.

2.6.2 Resultados

En el **Cuadro N°016** se presentan los valores promedio a nivel mensual de los caudales base generados en el Área de Estudio. En el mencionado cuadro se puede observar que el caudal base medio mensual presenta sus mayores valores en junio y los menores en diciembre.

En el cuadro **Cuadro N°017** se puede observar que el rendimiento medio anual en cuanto al caudal base varía entre 18.90 l/s/km² y 22.12 l/s/km² en las quebradas La Florida y Estero Alambique respectivamente. El caudal base medio anual representa el 32.4 % del caudal medio anual, lo cual evidencia la influencia del medio subterráneo en la descarga de las quebradas del Área de Estudio.

Cuadro N° 016 : Caudales base medios mensuales en el Área de Estudio

Punto de Generación de Caudales	Caudal Base Medio Mensual (m ³ /s)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PC-01a	0.020	0.024	0.024	0.027	0.027	0.028	0.026	0.025	0.023	0.021	0.021	0.020
PC-01b	0.026	0.030	0.030	0.034	0.034	0.036	0.033	0.031	0.030	0.027	0.027	0.025
PC-02	0.060	0.071	0.071	0.079	0.080	0.083	0.078	0.072	0.069	0.063	0.062	0.059
PC-03	0.007	0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.010	0.009	0.009	0.008	0.008	0.007

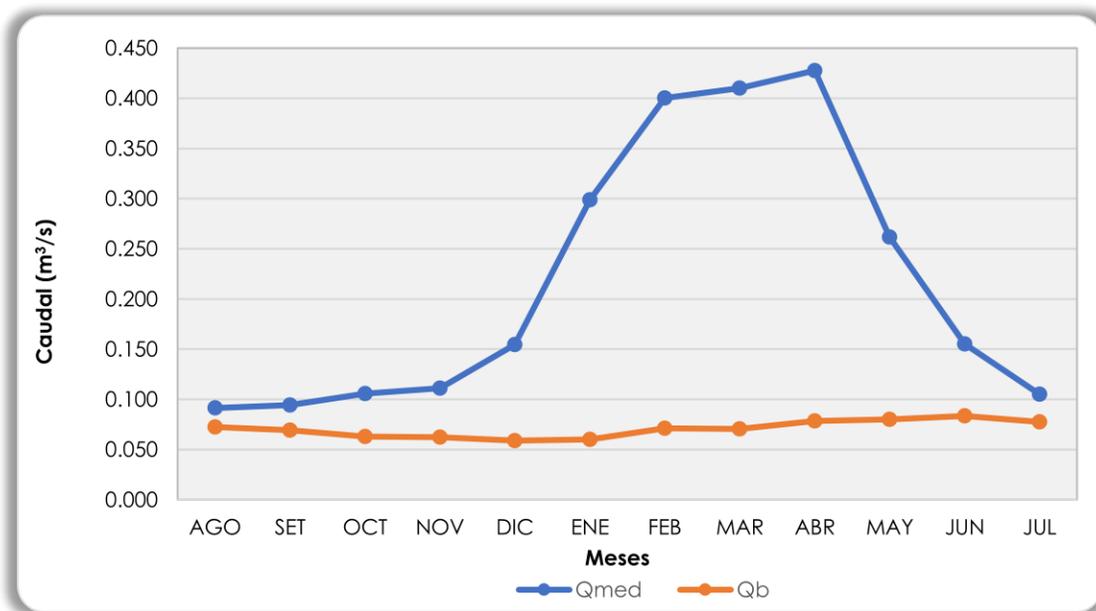
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 017 : Caudales base medios anuales en el Área de Estudio

Punto de Generación de Caudales	Área Drenaje (km ²)	Altitud Media (msnm)	Precipitación Total Media Anual (mm)	Caudal Base Medio Anual (m ³ /s)	Caudal Base Medio Anual (l/s)	Rendimiento Medio Anual (l/s/km ²)
PC-01 ^a	1.08	1501.46	2443.5	0.024	23.9	22.12
PC-01b	1.60	1479.18	2443.5	0.030	30.2	18.90
PC-02	3.47	1461.52	2443.5	0.071	70.6	20.35
PC-03	0.43	1440.19	2443.5	0.009	8.7	20.34

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura N°08** se muestra el hidrograma de la quebrada La Plata en el punto PC-02, en el cual se puede apreciar, el caudal base medio mensual y el caudal medio mensual. Como se puede observar en la mencionada figura el caudal base es mayor en proporción respecto al caudal medio en los meses de estiaje, disminuyendo paulatinamente hasta enero, para luego incrementar su valor hasta su máximo en el mes de agosto.

Figura N° 08 Hidrograma de la quebrada La Plata


Fuente: Elaboración propia.

2.7 BALANCE HÍDRICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.7.1 Generalidades

El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de la continuidad. Esta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada (UNESCO, 1971).

En general, la técnica del balance hídrico implica mediciones de ambos aspectos, almacenamientos y flujos del agua; sin embargo, algunas mediciones se eliminan en función del volumen y período de tiempo utilizados para el cálculo del balance (UNESCO, 1971).

La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona o cuenca natural (tal como la cuenca de un río) o cualquier masa de agua, indica los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada en la zona o masa de agua. En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación (P), en forma de lluvia o nieve, realmente recibida en la superficie del suelo, y las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde fuera (E_{si} y E_{ui}). Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua (ETR) y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada (E_{so} y E_{uo}). Cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada (ΔS) aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye (UNESCO, 1971).

Por tanto, el balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo, en su forma más general, vendrá representado por la siguiente ecuación:

$$P + E_{si} + E_{ui} - ETR - E_{so} - E_{uo} - \Delta S = 0 \dots (2.1)$$

El objetivo principal del presente balance es el de cuantificar las infiltraciones (recarga) que se presentarán en el Área de Estudio. La infiltración puede ser superficial y/o profunda dependiendo de los materiales que conformen el terreno natural. El valor de E_{ui} y E_{uo} se considera despreciable por ser muy pequeño y difícil de estimar. Para el caso del balance mensual se consideró la retención del suelo subsuperficial y de volúmenes grandes de agua (lagunas, reservorios, etc.) igual al valor calculado en la metodología de Lutz Schölz.

Finalmente, la ecuación del balance hídrico para el presente proyecto queda de la siguiente manera:

$$P = I + ETR + E_{so} - E_{si} \pm \Delta S_t \dots (2.2)$$

Donde:

P : Precipitación mensual en mm/mes

I : Infiltración mensual en mm/mes

ETR : Evapotranspiración real mensual en mm/mes

E_{si} : Ecurrimiento de ingreso mensual en mm/mes

E_{so} : Ecurrimiento de salida mensual en mm/mes

ΔS_t : Almacenamiento total mensual en mm/mes

Cabe mencionar que el balance hídrico se analizó para tres escenarios climáticos, año promedio, año seco y año húmedo.

2.7.2 Precipitación

El régimen pluviométrico se distribuye en tres épocas, la de estiaje, de transición y la de lluvias. La época de lluvias se produce entre los meses de enero y abril, llegando a su pico en el mes de marzo. La época de transición se considera que ocurre en los meses de mayo-junio y entre octubre-diciembre. Finalmente, la época de estiaje se da entre los meses de julio y setiembre, siendo el mes de agosto el más seco.

En el **Cuadro N°018** se muestran los valores medios mensuales de la precipitación total utilizada en el balance hídrico.

Cuadro N° 018 : Precipitación total mensual en el Área de Estudio

Tipo	Precipitación Total Mensual (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	339.2	371.2	406.1	396.5	237.0	107.8	54.2	48.4	76.5	106.3	104.2	196.1
Máximo	640.2	592.7	641.9	682.2	418.6	303.0	140.8	298.9	274.4	444.8	382.9	539.4
Mínimo	86.0	169.6	207.8	187.0	56.3	39.6	5.8	1.4	13.4	9.8	6.4	70.8

Fuente: Elaboración propia.

2.7.3 Evapotranspiración

2.7.3.1 Evapotranspiración Potencial (ETP)

La evapotranspiración se calculó con el método de Penman-Monteith, en general las menores tasas de evapotranspiración potencial se presentan en el mes de febrero y las mayores en octubre y abril. En el **Cuadro N°019** se presentan los valores de evaporación potencial total media mensual utilizados en el balance hídrico.

Cuadro N° 019 Evapotranspiración potencial total media mensual en el Área de Estudio

Zona	Evapotranspiración Potencial Total Media Mensual (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Área de Estudio	71.1	64.9	78.5	80.7	76.7	73.2	77.0	79.4	76.8	80.7	76.0	76.6

Fuente: Elaboración propia.

2.7.3.2 Evapotranspiración Real (ETR) – Método FAO

Este método requiere calcular primeramente la evapotranspiración de cultivo por medio de la siguiente fórmula:

$$ETc = K_c * ETP \dots (2.3)$$

Donde:

ETc : Evapotranspiración de cultivo en mm/año

Kc : Coeficiente de cultivo

ETP : Evapotranspiración potencial en mm/año

Kc, es un factor de cultivo o de cobertura vegetal sobre la cuenca y su valor puede oscilar entre 0.55, para zonas desnudas, y 1.0 para zonas completamente cubiertas de vegetales. En este caso, la zona de estudio tiene una cobertura vegetal alta, por lo que asumimos que Kc tiene un valor de 0.80 en el área de estudio hidrogeológico.

“La evapotranspiración real (ETR) es el total o una fracción de la evapotranspiración de cultivo (ETc), según corresponda, dependiendo de la disponibilidad de agua en el suelo” (Uribe, Arumi, Gonzáles y Salgado, 2003, p.22).

En el **Cuadro N°020** se presentan los valores de la evapotranspiración de cultivo mensual estimada para el Área de Estudio. La evapotranspiración real se estimará a partir del balance hídrico (ver sección 2.8.5).

Cuadro N° 020 Evapotranspiración de cultivo total media mensual en el Área de Estudio.

Zona	Evapotranspiración de Cultivo Total Media Mensual (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Área de Estudio	56.9	51.9	62.8	64.6	61.4	58.6	61.6	63.5	61.4	64.6	60.8	61.3

Fuente: Elaboración propia.

2.7.4 Escurrimiento

El escurrimiento ha sido calculado mediante el modelo de balance SWB (Soil Water Balance) desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2010). El escurrimiento depende directamente del Número de Curva (CN) para estimar la precipitación efectiva, la cual representa la cantidad de precipitación que se convierte en escurrimiento superficial.

La estimación del Número de Curva (CN) se desarrolló en el estudio de hidrología, resultado un valor de 66, siendo representativo en las subdivisiones presentes en el área de estudio.

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \dots (2.4)$$

Donde:

Pe : Precipitación efectiva (escurrimiento) en mm

P : Precipitación media mensual en mm

S : Infiltración potencial máxima (mm)

El NRCS (ex SCS) estableció una relación para estimar la infiltración potencial máxima (S) a partir del número de curva (CN) mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \dots (2.5)$$

En el **Cuadro N°021** se presenta el escurrimiento medio mensual para el área de estudio, el cual se estimó con un número de curva (CN) igual a 70.

Cuadro N° 021 Escurrimiento mensual en el Área de Estudio

Tipo	Escurrimiento Mensual (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	220.8	250.2	282.6	273.6	130.1	31.4	4.9	3.2	14.0	30.4	29.1	96.0
Máximo	506.2	460.2	507.8	546.9	294.3	188.0	53.5	184.3	162.5	318.9	261.0	409.0
Mínimo	18.8	75.0	105.6	88.7	5.6	1.3	3.8	0.0	1.4	2.3	3.5	11.4

Fuente: Elaboración propia.

2.7.5 Balance Hídrico Mensual

El balance hídrico se desarrolló siguiendo las siguientes consideraciones:

- Si la evapotranspiración calculada es mayor que la suma de la precipitación y el almacenamiento, entonces el valor de la ETR es igual a la suma de la precipitación total mensual y el almacenamiento subsuperficial mensual.
- Si la suposición anterior ocurre la infiltración profunda que se genera en la cuenca será nula.
- Si la precipitación menos la escorrentía es mayor que la evapotranspiración se tiene un exceso, el cual se almacenará en el suelo subsuperficial hasta saturarlo completamente.
- Después de saturar el suelo si existe exceso este se transforma en infiltración profunda o recarga del agua subterránea.
- La escorrentía calculada está directamente ligada a los procesos de precipitación, por lo que no representan el caudal real, el cual también considera los abastecimientos por retención.
- Se considera el almacenamiento máximo para este tipo de suelos igual a 80 mm.

En el **Cuadro N°021** se presentan los resultados del balance hídrico para un año promedio y en la **Figura N°09** se muestra el balance gráfico para el año promedio del Área de Estudio.

Como se puede apreciar en el **Cuadro N°021** la recarga de agua subterránea a nivel promedio ocurre entre los meses de febrero y junio, siendo el mes de marzo el que presenta mayor tasa de recarga (infiltración).

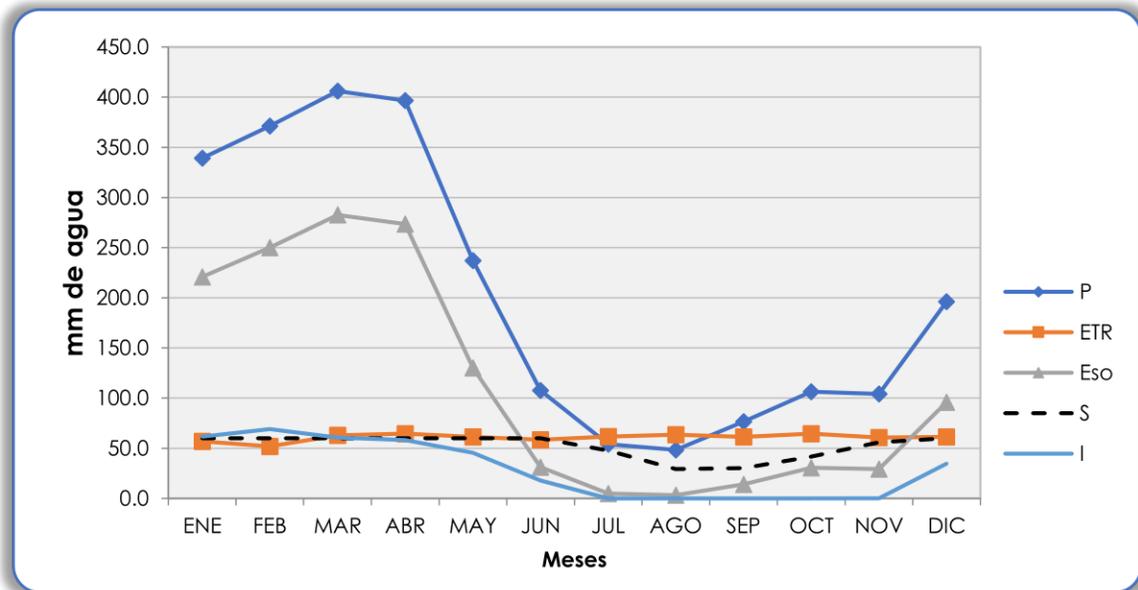
Cuadro N° 022 Balance hídrico mensual para año promedio en el Área de Estudio

Zona	Mes	Precipitación Total Media P (mm)	Escurrimiento Medio Eso (mm)	Almacenamiento Medio S (mm)	Evapotranspiración Real Media ETR (mm)	Infiltración Media (mm)
Área de Estudio	Ene	339.2	220.8	60.0	56.9	61.6
	Feb	371.2	250.2	60.0	51.9	69.1
	Mar	406.1	282.6	60.0	62.8	60.7
	Abr	396.5	273.6	60.0	64.6	58.3
	May	237.0	130.1	60.0	61.4	45.5
	Jun	107.8	31.4	60.0	58.6	17.9
	Jul	54.2	4.9	47.7	61.6	0.0

Zona	Mes	Precipitación Total Media P (mm)	Escurrimiento Medio Eso (mm)	Almacenamiento Medio S (mm)	Evapotranspiración Real Media ETR (mm)	Infiltración Media (mm)
	Ago	48.4	3.2	29.3	63.5	0.0
	Sep	76.5	14.0	30.4	61.4	0.0
	Oct	106.3	30.4	41.7	64.6	0.0
	Nov	104.2	29.1	55.9	60.8	0.0
	Dic	196.1	96.0	60.0	61.3	34.7

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 09 Balance hídrico mensual para el año promedio en el Área de Estudio



Fuente: Elaboración propia.

2.7.6 Balance Hídrico Anual

Para el año seco la ETR representa el 55.09% de la precipitación, la escorrentía el 37.16% y la infiltración es el 7.75%. Para el año promedio la ETR es igual al 29.85% de la precipitación, la escorrentía al 55.92% y la infiltración es el 14.24%. Finalmente, para el año húmedo la ETR es el 13.61% de la precipitación, la escorrentía es el 72.63% y la infiltración profunda es el 13.77%.

3 INVENTARIO DE RECURSOS HÍDRICOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES

3.1.1 Subdivisión Estero Alambique

En la subdivisión Estero Alambique se ubicaron siete (07) puntos del inventario de fuentes hídricas superficiales, hallándose flujo en todos ellos. Los resultados de las mediciones de campo se muestran en el **Cuadro N°023**.

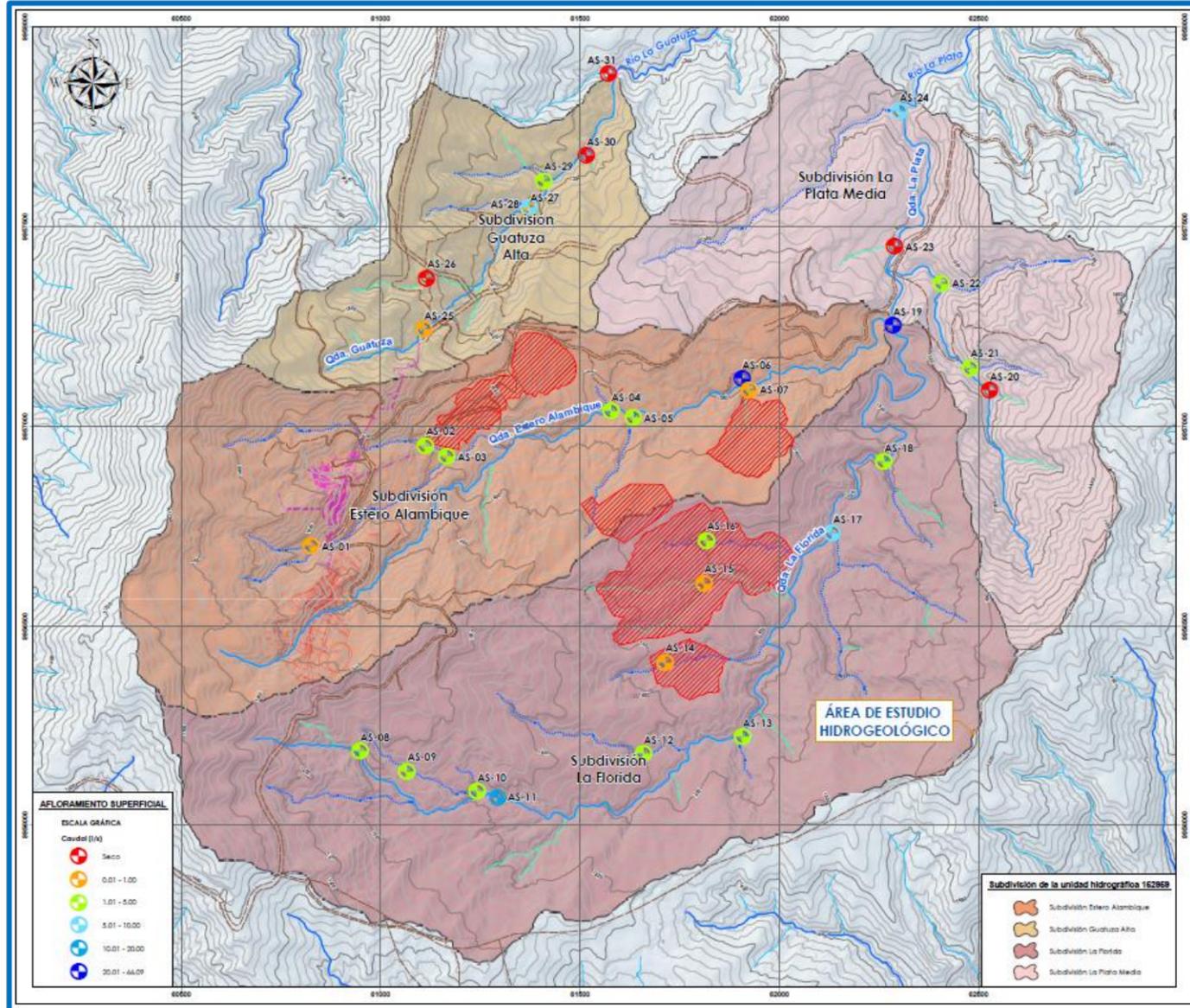
Cuadro N° 023 Inventario de fuentes hídricas superficiales en la subdivisión Estero Alambique

N°	Código	Cuerpo Hídrico	Coordenadas UTM ⁽¹⁾		Caudal (l/s)	pH	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T (°C)
			Este (m)	Norte (m)				
1	AS-01	Q. Mala	728 858	9 956 774	0.4	6.88	82	21.2
2	AS-02	Q. Tajo	729 145	9 957 026	4.1	6.83	89	24.2
3	AS-03	Q. Derrumbe	729 199	9 956 998	1.6	6.86	361	23.1
4	AS-04	S/N 3 Estero Alambique	729 610	9 957 112	3.0	6.86	206	22.6
5	AS-05	S/N 2 Estero Alambique	729 666	9 957 096	1.3	6.86	120	22.8
6	AS-06	Estero Alambique	729 938	9 957 194	23.6	6.86	280	22.1
7	AS-07	S/N 1 Estero Alambique	729 956	9 957 166	0.5	6.85	15	23.8

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 010 Inventario de fuentes hídricas superficiales en el Área de Estudio

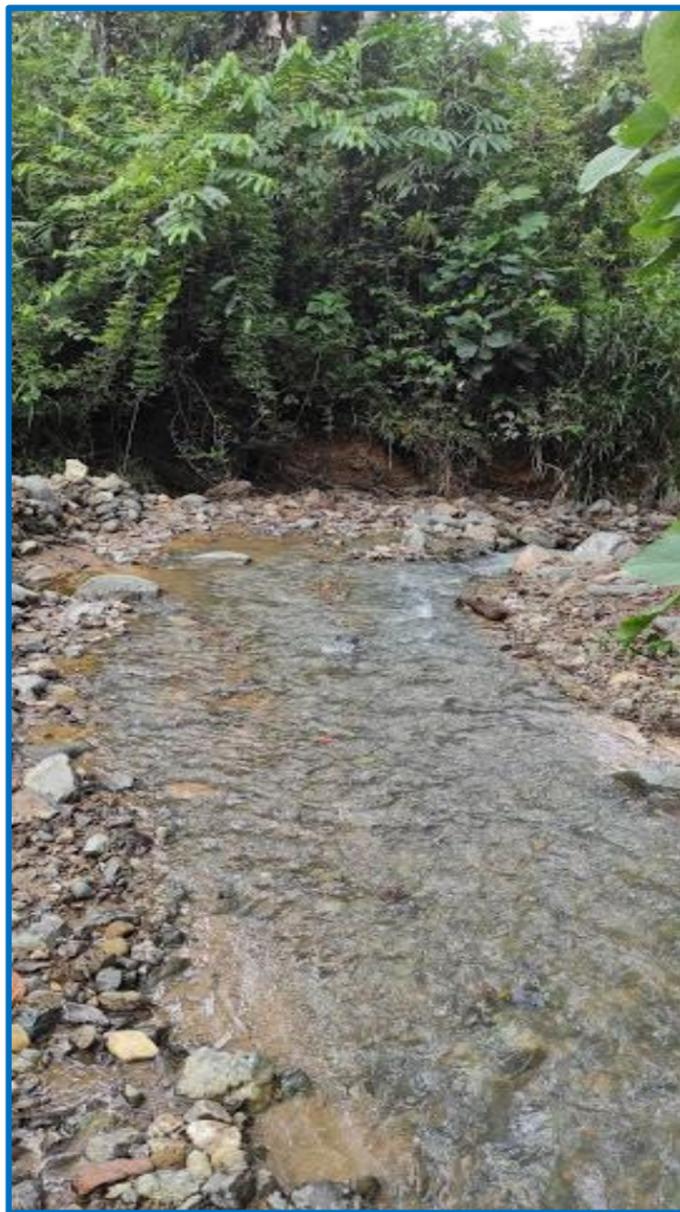


Fuente: Elaboración propia.

En el **Cuadro N°023** se puede apreciar que la quebrada Tajo tiene más del doble de caudal que la quebrada Derrumbe a pesar de tener áreas de aporte similares. En el punto AS-06 (ver **Fotografía N°01**) la quebrada Estero Alambique presenta un caudal de 23.6 l/s (lo cual es congruente con el valor medio calculado para el mes de junio, 55 l/s, considerando que el punto de generación de caudales se encuentra aguas abajo del punto AS-06).

Respecto al pH, las mediciones son muy similares, clasificándose como aguas neutras. En cuanto a la conductividad hidráulica (C.E.) presenta valores que varían entre 15 uS/cm (AS-07) y 361 uS/cm (AS-03).

Fotografía N°01 Imagen de la quebrada Estero Alambique (AS-06)



Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Subdivisión La Florida

En la subdivisión La Florida se ubicaron doce (12) puntos del inventario de fuentes hídricas superficiales, hallándose flujo en todos ellos. Los resultados de las mediciones de campo se muestran en el **Cuadro N°024**.

Cuadro N° 024 Inventario de fuentes hídricas superficiales en la subdivisión La Florida

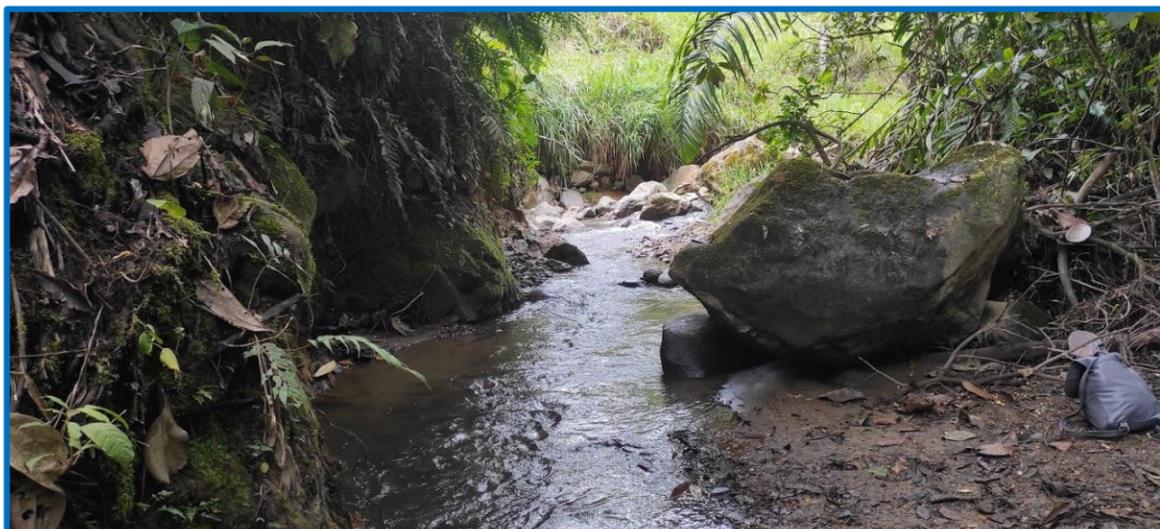
N°	Código	Cuerpo Hídrico	Coordenadas UTM ⁽¹⁾		Caudal (l/s)	pH	C.E. (uS/cm)	T (°C)
			Este (m)	Norte (m)				
1	AS-08	S/N 14 La Florida	728 981	9 956 261	2.0	6.87	158	18.7
2	AS-09	S/N 13 La Florida	729 098	9 956 212	1.6	6.86	36	19.1
3	AS-10	S/N 12 La Florida	729 274	9 956 161	2.7	6.86	147	20.5
4	AS-11	Quebrada La Florida	729 324	9 956 145	14.9	6.86	126	21.3
5	AS-12	S/N 8 La Florida	729 691	9 956 255	2.5	8.86	106	19.0
6	AS-13	S/N 7 La Florida	729 939	9 956 296	1.8	6.87	102	19.9
7	AS-14	S/N 5 La Florida	729 745	9 956 484	0.6	6.86	74	21.0
8	AS-15	S/N 4 La Florida	729 843	9 956 682	0.1	6.86	126	23.2
9	AS-16	S/N 3 La Florida	729 849	9 956 789	1.6	6.86	95	22.6
10	AS-17	S/N 2 La Florida	730 165	9 956 807	8.0	6.83	132	21.0
11	AS-18	S/N 1 La Florida	730 294	9 956 985	1.7	6.88	108	21.4
12	AS-19	Quebrada La Florida	730 316	9 957 327	66.1	6.85	80	21.4

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

Fuente: Elaboración propia.

En el **Cuadro N°024** se puede apreciar un incremento del flujo conforme se avanza aguas abajo (AS-08→AS-11→AS-19). En el punto AS-19 (ver **Fotografía N°02**) la quebrada La Florida presenta un caudal de 66.1 l/s.

Respecto al pH, las mediciones son muy similares, clasificándose como aguas neutras, salvo el punto AS-12 que es alcalina. En cuanto a la conductividad hidráulica (C.E.) presenta valores que varían entre 36 uS/cm (AS-09) y 158 uS/cm (AS-08), notándose una tendencia descendente conforme se avanza en la dirección de flujo (AS-08 158 uS/cm →AS-11 126 uS/cm→AS-19 80 uS/cm); en general se hallaron valores menores a los de la subdivisión Estero Alambique.

Fotografía N°02 Imagen de la quebrada La Florida (AS-19)


Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Subdivisión La Plata Media

En la subdivisión La Plata se ubicaron cinco (05) puntos del inventario de fuentes hídricas superficiales, hallándose flujo en tres (03) de ellos. Los resultados de las mediciones de campo se muestran en el **Cuadro N°025**.

Cuadro N° 025 Inventario de fuentes hídricas superficiales en la subdivisión La Plata Media

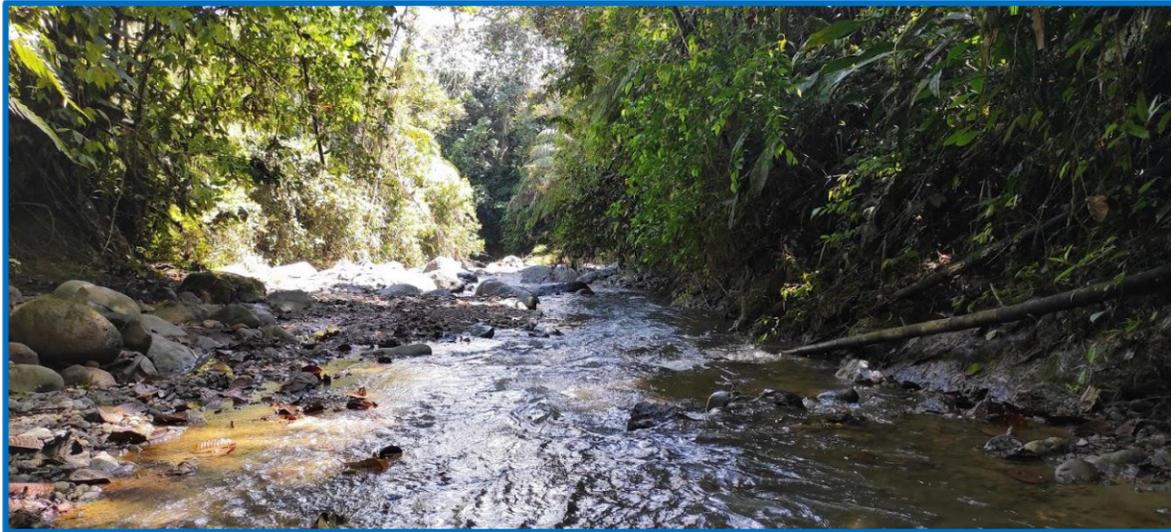
N°	Código	Cuerpo Hídrico	Coordenadas UTM ⁽¹⁾		Caudal (l/s)	pH	C.E. (uS/cm)	T (°C)
			Este (m)	Norte (m)				
1	AS-20	S/N 15.3 La Plata	730 559	9 957 164	Seco	-	-	-
2	AS-21	S/N 15.2 La Plata	730 510	9 957 220	1.2	6.86	109	19.7
3	AS-22	S/N 15.1 La Plata	730 438	9 957 432	2.9	6.86	84	20.4
4	AS-23	S/N 14 La Plata	730 321	9 957 524	Seco	-	-	-
5	AS-24	S/N 13 La Plata	730 333	9 957 862	7.1	6.86	168	23.2

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

Fuente: Elaboración propia.

Del **Cuadro N°025** se puede apreciar que los afluentes de la quebrada La Plata son de poco caudal. En la **Fotografía N°03** se puede apreciar el flujo de la quebrada La Plata aguas abajo del Área de Estudio.

Respecto al pH, las mediciones son muy similares, clasificándose como aguas neutras. En cuanto a la conductividad hidráulica (C.E.) presenta valores que varían entre 84 uS/cm (AS-22) y 168 uS/cm (AS-24).

Fotografía N°03 Imagen de la quebrada La Plata, aguas abajo del Área de Estudio


Fuente: Elaboración propia.

3.1.4 Subdivisión La Guatuzá Alta

En la subdivisión La Guatuzá Alta se ubicaron siete (07) puntos del inventario de fuentes hídricas superficiales, hallándose flujo en cuatro (04) de ellos. Los resultados de las mediciones de campo se muestran en el **Cuadro N°026**.

Cuadro N° 026 Inventario de fuentes hídricas superficiales en la subdivisión La Guatuzá Alta

N°	Código	Cuerpo Hídrico	Coordenadas UTM ⁽¹⁾		Caudal (l/s)	pH	C.E. (uS/cm)	T (°C)
			Este (m)	Norte (m)				
1	AS-25	Q. Guatuzá	729 142	9957318	0.8	6.86	68	22.5
2	AS-26	Q. San José	729 149	9957446	0.0	-	-	-
3	AS-27	S/N 10 Guatuzá	729 407	9957613	0.7	6.86	76	23.5
4	AS-28	Q. Andino (Guatuzá)	729 406	9957624	9.9	6.86	144	24.3
5	AS-29	Q. Guasti	729 442	9957689	1.3	6.86	65	23.8
6	AS-30	S/N 9 Guatuzá	729 549	9957751	0.0	-	-	-
7	AS-31	S/N 8 Guatuzá	729 605	9957957	0.0	-	-	-

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

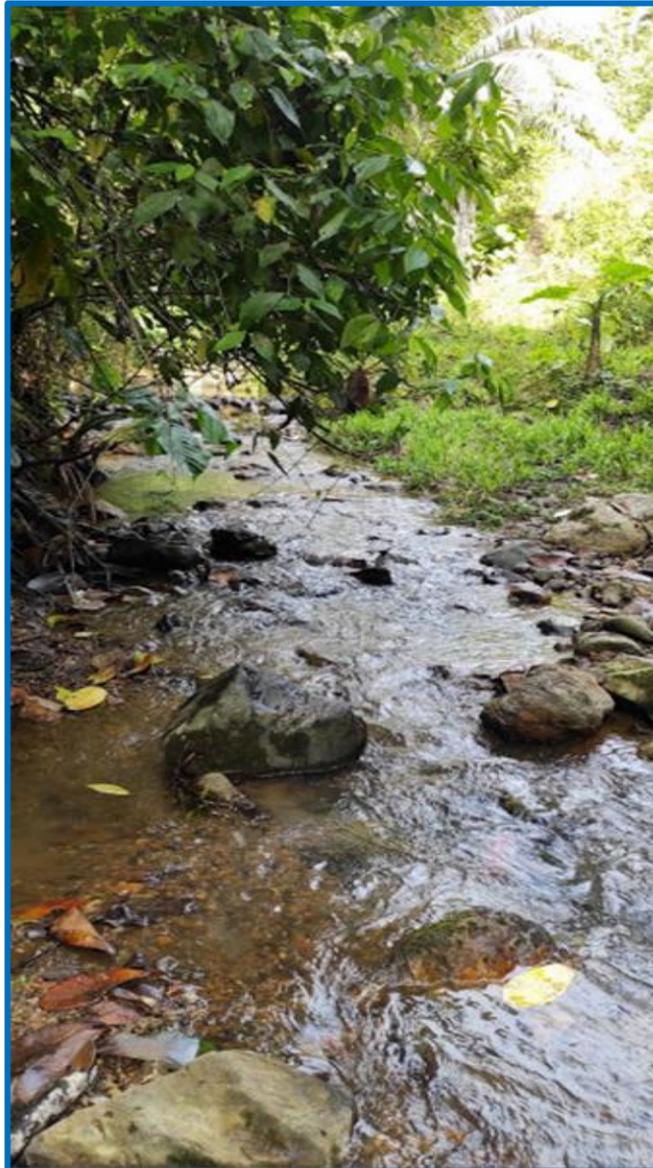
Fuente: Elaboración propia.

En el **Cuadro N°026** se puede apreciar un incremento del flujo conforme se avanza aguas abajo (AS-25→AS-28). En el punto AS-28 (ver **Fotografía N°04**) la quebrada Guatuzá presenta un caudal de 9.9 l/s.

Respecto al pH, las mediciones son muy similares, clasificándose como aguas neutras. En cuanto a la conductividad hidráulica (C.E.) presenta valores que varían entre 65 uS/cm (AS-

29) y 144 uS/cm (AS-28), notándose una tendencia ascendente conforme se avanza en la dirección de flujo (AS-25 68 uS/cm → AS-28 144 uS/cm); en general se hallaron valores menores a los de la subdivisión Estero Alambique.

Fotografía N°04 Imagen de la quebrada de La Guatuza (AS-28)



Fuente: Elaboración propia.

3.2 RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS

Durante los trabajos de campo se identificaron 36 afloramientos de agua subterránea dentro del Área de Estudio, disgregándose en dieciséis (16) en la subdivisión Estero Alambique, diez (10) en La Florida, siete (07) en La Plata Media y tres (03) en la subdivisión La Guatuza Alta, tal como se puede apreciar en la **Figura N°011**.

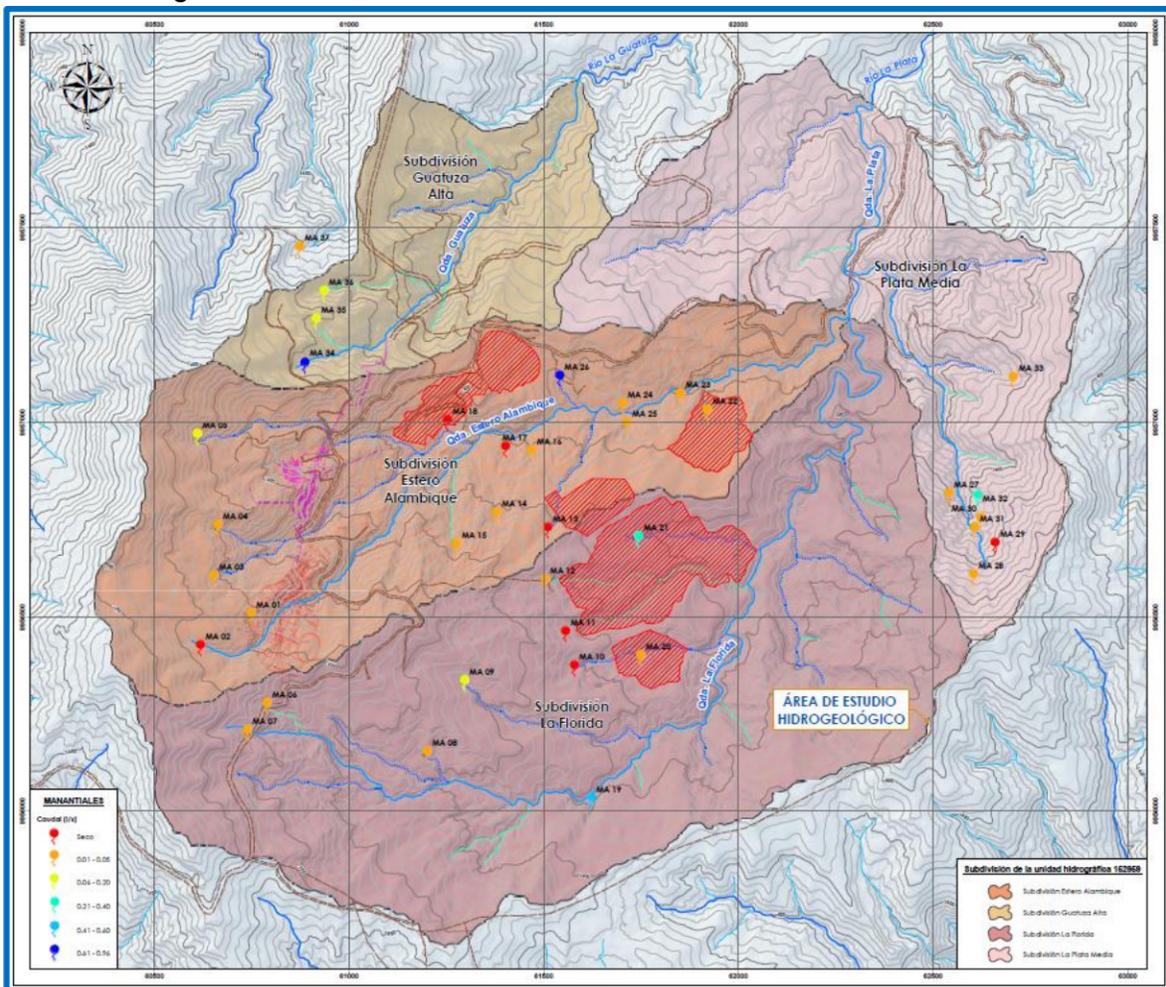
3.2.1 Subdivisión Estero Alambique

En la subdivisión Estero Alambique se ubicaron dieciséis (16) puntos del inventario de fuentes hídricas subterráneas, hallándose flujo en dos (02) de los lugares visitados. Los resultados de las mediciones de campo se muestran en el **Cuadro N°027**.

En el **Cuadro N°027** se puede apreciar que cuatro (04) de los lugares visitados (con flujo en épocas de lluvias de acuerdo a los guías locales) se encontraron secos, diez (10) afloramientos mantenían un caudal muy pequeño (caracterizado igual a 0.05 l/s) prácticamente sin flujo, y dos (02) puntos presentaban caudales de 0.19 l/s (MA-05) y 0.87 l/s (MA-26).

Respecto al pH, las mediciones son muy similares, clasificándose como aguas neutras. En cuanto a la conductividad hidráulica (C.E.) presenta valores que varían entre 2 uS/cm (MA-22) y 206 uS/cm (MA-26).

Figura N° 011 Inventario de fuentes hídricas subterráneas en el Área de Estudio



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 027 Inventario de fuentes hídricas subterráneas en la subdivisión Estero Alambique

N°	Código	Coordenadas UTM ⁽¹⁾		Altitud ⁽²⁾ (msnm)	Caudal (l/s)	pH	C.E. (uS/cm)	T (°C)
		Este (m)	Norte (m)					
1	MA-01	728 782	9 956 576	1596.60	0.05	6.86	86	19.3
2	MA-02	728 652	9 956 495	1636.45	Seco	-	-	-
3	MA-03	728 687	9 956 674	1616.72	0.05	6.88	79	19.5
4	MA-04	728 697	9 956 802	1598.16	0.05	6.86	81	19.8
5	MA-05	728 645	9 957 036	1601.50	0.19	6.88	77	19.2
6	MA-13	729 543	9 956 795	1458.83	Seco	-	-	-
7	MA-14	729 412	9 956 834	1459.35	0.05	6.86	117	22.5
8	MA-15	729 309	9 956 754	1487.73	0.05	6.87	102	21.0
9	MA-16	729 502	9 956 994	1408.74	0.05	6.89	76	21.5
10	MA-17	729 435	9 957 003	1407.73	Seco	-	-	-
11	MA-18	729 286	9 957 072	1422.74	Seco	-	-	-
12	MA-22	729 952	9 957 096	1358.48	0.05	6.86	2	22.6
13	MA-23	729 883	9 957 139	1352.23	0.05	6.86	77	23.5
14	MA-24	729 735	9 957 113	1369.57	0.05	6.86	145	23.6
15	MA-25	729 747	9 957 065	1369.65	0.05	6.86	135	24.1
16	MA-26	729 573	9 957 185	1394.94	0.87	6.86	206	22.6

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

(2) Elevación correspondiente a un MDT con celdas de 10x10m

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Subdivisión La Florida

En la subdivisión La Florida se ubicaron diez (10) puntos del inventario de fuentes hídricas subterráneas, hallándose flujo en tres (03) de los lugares visitados. Los resultados de las mediciones de campo se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro N° 028 Inventario de fuentes hídricas subterráneas en la subdivisión La Florida

N°	Código	Coordenadas UTM ⁽¹⁾		Altitud ⁽²⁾ (msnm)	Caudal (l/s)	pH	C.E. (uS/cm)	T (°C)
		Este (m)	Norte (m)					
1	MA-06	728 823	9 956 346	1600.79	0.05	6.90	86	19.9
2	MA-07	728 772	9 956 277	1610.52	0.05	6.86	56	19.5
3	MA-08	729 233	9 956 222	1513.66	0.05	6.91	66	20.0
4	MA-09	729 329	9 956 404	1509.03	0.12	6.86	113	22.0
5	MA-10	729 611	9 956 442	1453.71	Seco	-	-	-
6	MA-11	729 589	9 956 529	1462.46	Seco	-	-	-
7	MA-12	729 536	9 956 663	1475.57	0.05	6.84	73	20.5
8	MA-19	729 654	9 956 102	1445.03	0.47	6.86	5	21.0
9	MA-20	729 781	9 956 468	1422.52	0.05	6.86	10	21.3

N°	Código	Coordenadas UTM ⁽¹⁾		Altitud ⁽²⁾ (msnm)	Caudal (l/s)	pH	C.E. (uS/cm)	T (°C)
		Este (m)	Norte (m)					
10	MA-21	729 776	9 956 772	1404.54	0.27	6.86	122	22.1

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

(2) Elevación correspondiente a un MDT con celdas de 10x10m

Fuente: Elaboración propia.

En el **Cuadro N°028** se puede apreciar que dos (02) de los lugares visitados (con flujo en épocas de lluvias de acuerdo a los guías locales) se encontraron secos, cinco (05) afloramientos mantenían un caudal muy pequeño (caracterizado igual a 0.05 l/s) prácticamente sin flujo, y tres (03) puntos presentaban caudales de 0.12 l/s (MA-09), 0.27 l/s (MA-21) y 0.47 l/s (MA-19).

Respecto al pH, las mediciones son muy similares, clasificándose como aguas neutras. En cuanto a la conductividad hidráulica (C.E.) presenta valores que varían entre 5 uS/cm (MA-19) y 122 uS/cm (MA-21).

3.2.3 Subdivisión La Plata Media

En la subdivisión La Plata Media se ubicaron siete (07) puntos del inventario de fuentes hídricas subterráneas, hallándose flujo en uno (01) de los lugares visitados. Los resultados de las mediciones de campo se muestran en el **Cuadro N°029**.

Cuadro N° 029 Inventario de fuentes hídricas subterráneas en la subdivisión La Plata media

N°	Código	Coordenadas UTM ⁽¹⁾		Altitud ⁽²⁾ (msnm)	Caudal (l/s)	pH	C.E. (uS/cm)	T (°C)
		Este (m)	Norte (m)					
1	MA-27	730 572	9 956 884	1398.10	0.05	6.86	189	23.1
2	MA-28	730 635	9 956 675	1476.84	0.05	6.86	71	24.8
3	MA-29	730 690	9 956 756	1451.17	0.00	-	-	-
4	MA-30	730 653	9 956 821	1412.28	0.05	6.86	145	22.1
5	MA-31	730 638	9 956 794	1412.16	0.05	6.86	98	22.0
6	MA-32	730 644	9 956 877	1408.26	0.24	6.86	72	25.2
7	MA-33	730 737	9 957 182	1380.29	0.05	6.86	69	24.7

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

(2) Elevación correspondiente a un MDT con celdas de 10x10m

Fuente: Elaboración propia.

En el **Cuadro N°029** se puede apreciar que uno (01) de los lugares visitados (con flujo en épocas de lluvias de acuerdo a los guías locales) se encontró seco, cinco (05) afloramientos mantenían un caudal muy pequeño (caracterizado igual a 0.05 l/s) prácticamente sin flujo, y un (01) punto presenta caudal de 0.24 l/s (MA-32).

Respecto al pH, las mediciones son muy similares, clasificándose como aguas neutras. En

cuanto a la conductividad hidráulica (C.E.) presenta valores que varían entre 5 uS/cm (MA-19) y 122 uS/cm (MA-21).

3.2.4 Subdivisión La Guatuzá Alta

En la subdivisión La Guatuzá Alta se ubicaron tres (03) puntos del inventario de fuentes hídricas subterráneas, hallándose flujo en todos los lugares visitados. Los resultados de las mediciones de campo se muestran en el Cuadro.

Cuadro N° 030 Inventario de fuentes hídricas subterráneas en la subdivisión La Guatuzá Alta.

N°	Código	Coordenadas UTM ⁽¹⁾		Altitud ⁽²⁾ (msnm)	Caudal (l/s)	pH	C.E. (uS/cm)	T (°C)
		Este (m)	Norte (m)					
1	MA-34	728 920	9 957 220	1534.81	0.96	6.86	75	24.3
2	MA-35	728 949	9 957 331	1542.32	0.07	6.86	69	22.9
3	MA-36	728 969	9 957 404	1518.86	0.13	6.86	66	22.5
4	MA-37 ⁽³⁾	728 907	9 957 517	1514.48	0.05	6.86	59	19

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

(2) Elevación correspondiente a un MDT con celdas de 10x10m

(3) Se ubica cerca de la subdivisión La Guatuzá Alta

Fuente: Elaboración propia.

En el **Cuadro N°030** se puede apreciar que los caudales de los afloramientos subterráneos son de 0.07 l/s (MA-35), 0.13 l/s (MA-36) y 0.96 l/s (MA-34); este último afloramiento es el de mayor caudal dentro del Área de Estudio.

Respecto al pH, las mediciones son muy similares, clasificándose como aguas neutras. En cuanto a la conductividad hidráulica (C.E.) presenta valores que varían entre 66 uS/cm (MA-36) y 75 uS/cm (MA-34).

Fotografía N°05 Imagen del afloramiento subterráneo MA-34



Fuente: Elaboración propia.

4 INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

4.1 GEOFÍSICA

4.1.1 Generalidades

En el mes de mayo del 2021 se realizaron las investigaciones geofísicas mediante los métodos Refracción Sísmica, Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), Análisis Multicanal de Microtremores (MAM), Tomografía Geoeléctrica 2D y Sondaje Eléctrico Vertical (SEV), en el Proyecto Minero la Plata, con fines geotécnicos e hidrogeológicos.

En el caso de la hidrogeología se interpretaron las secciones tomográficas (complementadas con los sondajes electro verticales) y de refracción sísmica, tal como se detalla a continuación.

4.1.2 Refracción Sísmica

El método de refracción sísmica utiliza la propagación de las ondas elásticas a través del subsuelo y se basa en los siguientes fundamentos:

- Las ondas se propagan con diferentes velocidades en diferentes estratos geológicos.
- El contraste de velocidades entre dos medios debe ser alto.
- La velocidad de la onda se incrementa con la profundidad.

En el Área de Estudio se realizaron dieciséis (16) líneas de refracción sísmica distribuidas entre los principales componentes del proyecto, tal como se puede apreciar en el **Cuadro N°031**.

Con el estudio de la Refracción Sísmica (RS) se ha determinado los estratos sísmicos en función a los valores de velocidades de ondas compresionales (V_p). El primer estrato con velocidades menores a 1 km/s estarían relacionados a materiales de cobertura, el segundo estrato con velocidades entre 1 y 2 km/s estaría asociado a materiales medianamente compactos, el tercer estrato con velocidades que varían entre 2 y 3 km/s corresponderían a rocas fracturadas y/o alteradas y el cuarto estrato con velocidades mayores de 3 km/s correspondería a la roca con menor grado de fracturamiento.

Cuadro N° 031 Líneas de Refracción Sísmica realizadas en el Área de Estudio.

N°	Código	Coordenadas UTM ⁽¹⁾ Inicio		Coordenadas UTM ⁽¹⁾ Final		Longitud km)	Lugar
		Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)		
1	RSF-1	729887.51	9956635.88	729894.47	9956885.79	0.250	Depósito de Relaves Filtrados
2	RSF-2	729664.41	9956678.16	730010.64	9956715.39	0.350	
3	RSF-3	729654.16	9956762.49	730001.70	9956786.74	0.350	
4	RSF-4	729813.84	9956413.31	729881.87	9956547.03	0.150	Depósito de Relaves de Transferencia
5	RSF-5	729722.15	9956470.36	729923.70	9956495.40	0.205	
6	LS-1	729942.00	9956849.45	729990.37	9957180.97	0.335	Escombrera N° 1
7	LS-2	729803.26	9956963.77	730098.94	9957014.48	0.300	
8	LS-3	729878.02	9957090.69	730075.95	9957119.24	0.200	
9	LS-1	729580.48	9956797.17	729717.68	9956897.58	0.170	Planta de Procesos
10	LS-2	729574.40	9956787.94	729669.82	9956916.45	0.160	
11	LS-3	729612.94	9956813.36	729694.48	9956927.14	0.140	
12	LS1	729161.80	9957027.49	729355.45	9957125.44	0.240	Escombrera N° 2
13	LS2	729222.90	9957053.94	729281.16	9957192.18	0.150	
14	LS3	729286.66	9957060.19	729316.42	9957207.17	0.150	
15	LS4	729336.76	9957197.29	729525.86	9957262.44	0.200	
16	LS5	729457.70	9957163.16	729488.44	9957307.34	0.150	

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Tomografías Eléctricas

La tomografía geoelectrica es un método de resistividad multi-electrodo, basado en la modelización 2D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas).

El resultado final de este tipo de estudio es una Imagen distancia profundidad con la distribución de los valores de resistividad verdadera del subsuelo.

En el Área de Estudio se realizaron veintiséis (26) líneas de tomografía eléctrica distribuidas en toda el Área de Estudio, tal como se puede apreciar en el **Cuadro N°032**.

De forma general se determinaron tres horizontes geoelectricos. El Primer Horizonte H1, comprende valores de resistividad mayores a 100 Ohm.m las mismas que estarían relacionado a los materiales de cobertura, el segundo horizonte H2 con valores de resistividad menores a 100 Ohm.m se relacionaría a materiales con presencia de humedad y el Tercer horizonte H3 muestra resistividades mayores a 100 Ohm.m, las mismas que podrían estar relacionados a la roca fracturada y/o alterada.

Cuadro N° 032 Líneas de Tomografía Eléctrica realizadas en el Área de Estudio.

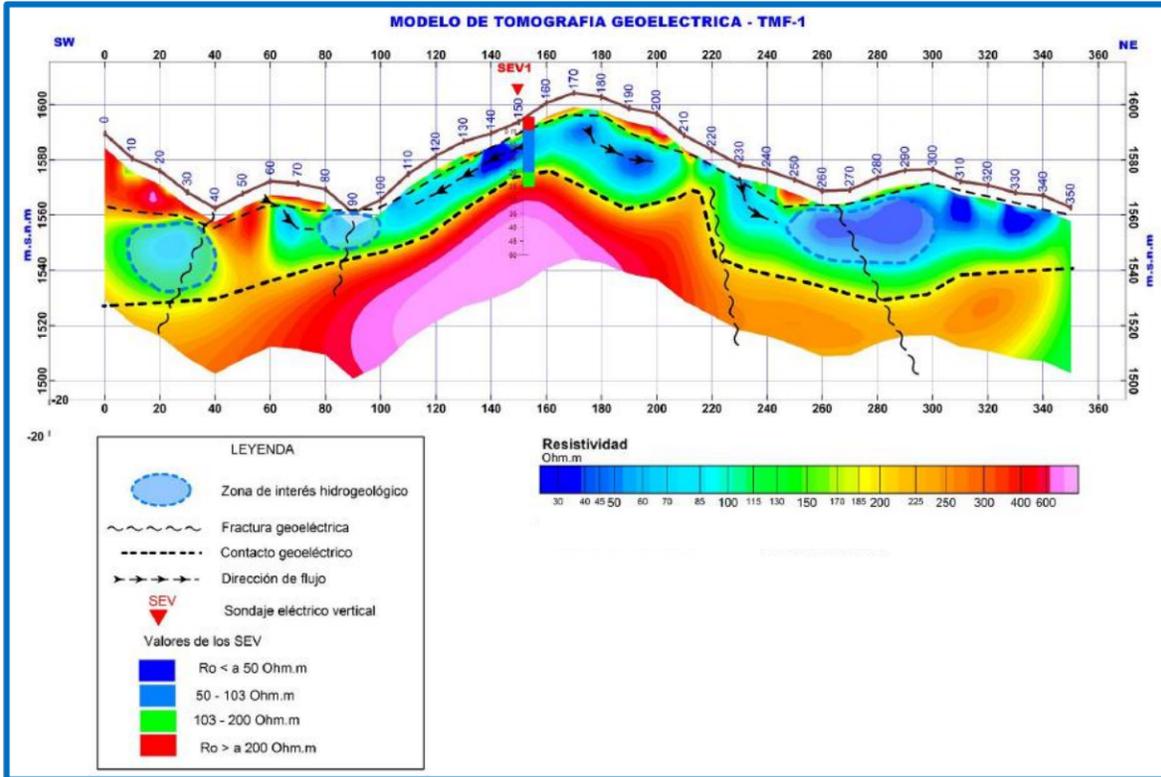
N°	Código	Coordenadas UTM ⁽¹⁾ Inicio		Coordenadas UTM ⁽¹⁾ Final		Longitud km)	Lugar
		Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)		
1	TMF-01	711272.24	8548145.85	511468.55	8548184.33	0.250	Depósito de Relaves Filtrados
2	TMF-02	729890.05	9956635.95	729897.07	9956885.67	0.160	
3	TMF-03	729807.00	9956726.15	729811.52	9956876.07	0.150	
4	TMF-04	729737.88	9956604.53	729742.40	9956754.46	0.150	Depósito de Relaves de Transferencia
5	TMF-05	729629.39	9956485.87	729689.08	9956623.47	0.150	
5	TMF-06	729816.16	9956414.54	729884.200	9956548.23	0.150	
6	LTG1	729813.95	9956915.11	730100.99	9956956.64	0.290	Escombrera N° 1
7	LTG2	729846.47	9957041.58	730074.50	9957071.62	0.230	
8	LTG3	729893.10	9957148.82	730019.18	9957180.58	0.130	
9	LTG1	729168.98	9957131.68	729304.53	9957188.02	0.150	Escombrera N° 2
10	LTG2	729201.45	9957064.14	729338.40	9957123.49	0.150	
11	LTG3	729415.82	9957151.38	729421.87	9957301.67	0.150	
12	LTG4	729457.70	9957163.16	729488.44	9957307.34	0.150	
13	TMF-01	728744.41	9956672.24	728766.99	9957021.50	0.350	Subdivisión Estero Alambique
14	TMF-02	729108.24	9956766.97	729203.99	9957103.61	0.350	
15	TMF-03	729409.11	9956875.24	729559.84	9957191.13	0.350	
16	TMF-04	729822.46	9957029.51	730039.83	9957303.81	0.350	
17	LTG1	728986.95	9956660.95	729121.94	9956798.97	0.200	
18	LTG2	728979.17	9956587.24	729111.18	9956736.41	0.200	
19	LTG3	728995.83	9956668.29	729129.00	9956815.06	0.200	
20	LTG4	729030.96	9956701.91	729175.44	9956843.47	0.200	
21	TMF-05	730137.24	9957255.87	730443.18	9957430.82	0.350	Subdivisión La Plata Media
22	TMF-06	730278.01	9957611.56	730541.89	9957834.98	0.350	Subdivisión La Florida
23	TMF-07	730132.78	9956950.97	730470.98	9957053.40	0.350	
24	TMF-08	729699.96	9956239.66	729957.71	9956471.42	0.350	
25	TMF-09	729555.26	9956013.34	729788.40	9956274.53	0.350	
26	TMF-10	728770.82	9956289.51	729116.12	9956347.02	0.350	

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

Fuente: Elaboración propia.

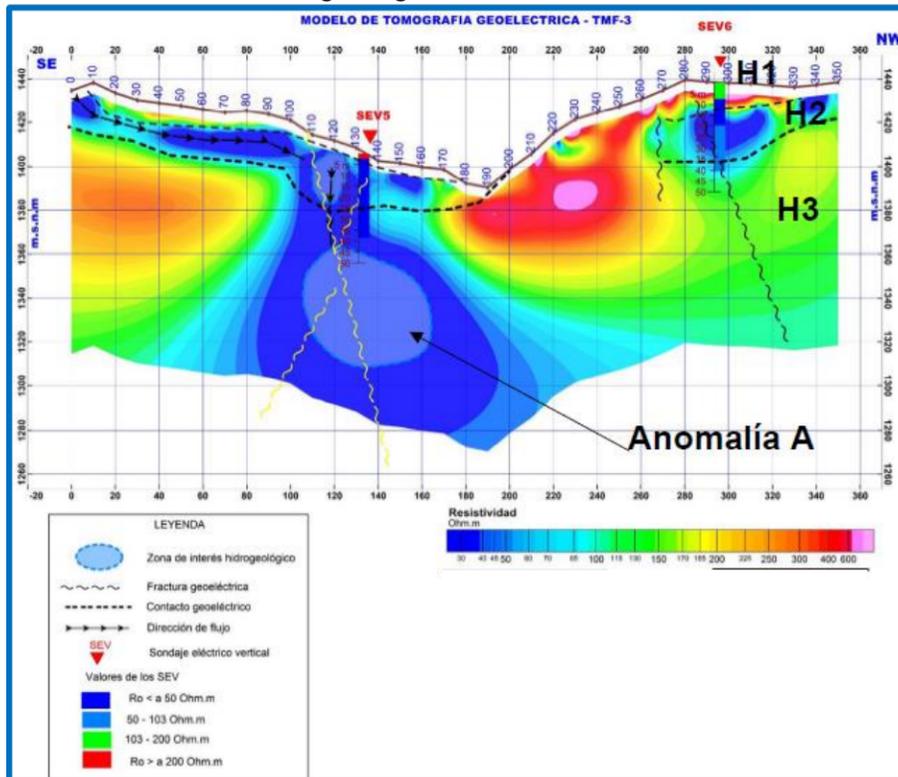
Los niveles de agua subterránea se encuentran entre los 60 Ohm.m y los 100 Ohm.m, mientras que la roca fracturada dependiendo de si está saturada o no se ubica a partir de los 80 ohm.m. En los perfiles destacan zonas de alta resistividad en superficie, los cuales están ligados a los suelos de tipo andosol y a mayor profundidad con saprolitos y presencia de material arcillo-limoso.

Figura N° 012 Sección de tomografía geoelectrica TMF-01 – Subdivisión Estero Alambique



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 013 Sección de tomografía geoelectrica TMF-01 – Subdivisión Estero Alambique



Fuente: Elaboración propia.

En general las secciones evaluadas presentan alto grado de heterogeneidad lo cual se condice con el contexto geológico. En algunas secciones se muestran estratificaciones del terreno (e.g. TMF-07 donde se muestra una zona con estratos casi semiparalelos que representarían a los materiales de la unidad HSV sedimentaria volcánica).

En algunas secciones se hallaron zonas anómalas desde el punto de vista geofísico (ver **Figura N°013**), las cuales se corresponden con saprolitos saturados con presencia de arcillas.

4.2 PERFORACIONES E INSTALACIÓN DE PIEZÓMETROS

Para el presente proyecto se ejecutaron dieciocho (18) perforaciones, distribuidas entre los principales componentes a diseñar, y zonas de interés hidrogeológico (véase el **Cuadro N°033**).

Cuadro N° 033 Relación de perforaciones realizadas en el Área de Estudio en el año 2021

Sondaje	Coordenadas UTM ⁽¹⁾		Altitud ⁽²⁾ (msnm)	Inclinación	Profundidad (m)	Profundidad Suelo (m)	Piezómetro
	Este (m)	Norte (m)					
P-01	729850.89	9956474.63	1414.55	90°	30.00	23.54	2"
P-02	729993.82	9956728.45	1393.77	90°	34.53	34.53	2"
P-03	729893.46	9956734.01	1395.52	90°	17.55	12.82	2"
P-04	729763.66	9956675.62	1416.12	90°	27.50	19.74	2"
P-05	729682.00	9956862.00	1440.61	90°	50.00	42.96	2"
P-06	730033.48	9957105.81	1368.65	90°	26.52	16.70	2"
P-07	729961.64	9957009.94	1385.56	90°	31.85	31.85	2"
P-08	729937.67	9956733.64	1398.11	90°	35.00	21.54	2"
P-09	729756.50	9956725.21	1426.87	90°	50.00	46.09	2"
P-10	729892.64	9956519.62	1416.35	90°	30.00	13.87	2"
P-11	729236.45	9957052.63	1432.84	90°	30.00	20.23	2"
P-12	729292.486	9957142.57	1446.80	90°	30.00	17.22	2"
P-13	729463.80	9957218.58	1417.33	90°	30.00	13.49	2"
P-14	729642.71	9956844.47	1451.88	90°	60.00	33.54	2"
P-15	729481.19	9956774.21	1478.40	90°	60.00	21.64	2"
PH-01	728984.48	9956757.14	1530.95	90°	60.00	15.25	2"
PH-02	730343.50	9957358.96	1315.03	90°	60.00	20.88	2"
PH-03	728950.93	9956317.93	1565.43	90°	60.00	17.91	2"

(1) Datum WGS 84, Zona 17M

(2) Elevación correspondiente a un MDT con celdas de 10x10m

Fuente: Elaboración propia.

En las perforaciones realizadas durante el 2021 se instalaron piezómetros del tipo Casagrande, con diámetros de 2" (véase la **Fotografía N°06** y la **Figura N°015**).

4.3 LOGUEOS

Se analizaron los dieciocho logueos de las perforaciones realizadas en el año 2021 (véase el **Cuadro N°035** y **Figura N°014**), notándose la presencia de roca dolerita en dieciséis de ellas a profundidades variables medidas desde la superficie (15.25 m en el sondaje PH-01 hasta 46.09 m en el P-09).

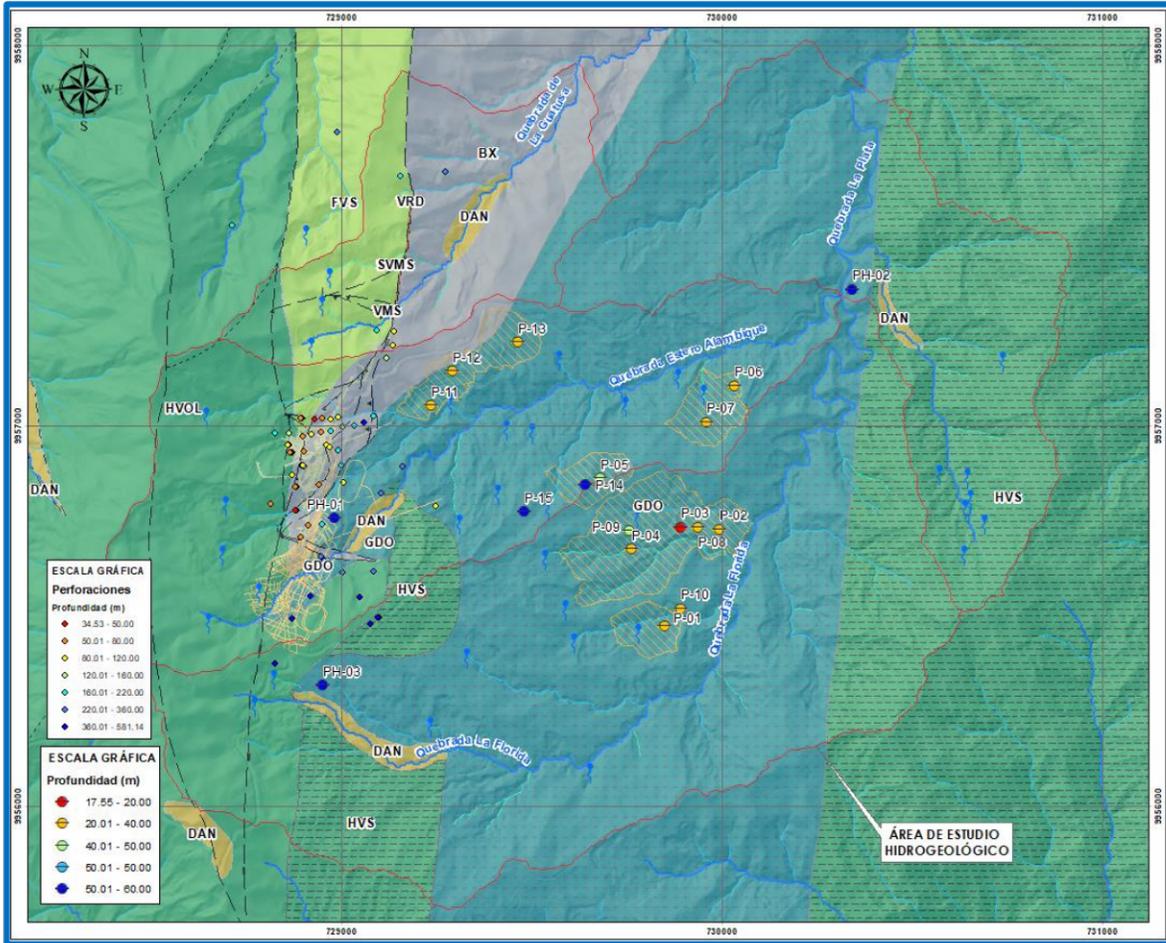
En términos generales el suelo está formado por materiales limosos y arcillosos, en menor medida por gravas y arenas, y por saprolitos (encontrado en doce perforaciones). En el **Cuadro N°034** se puede apreciar las principales estadísticas de los logueos realizados y en el capítulo 5 se discuten y analizan esos resultados.

Fotografía N°06 Instalación de piezómetro P-01



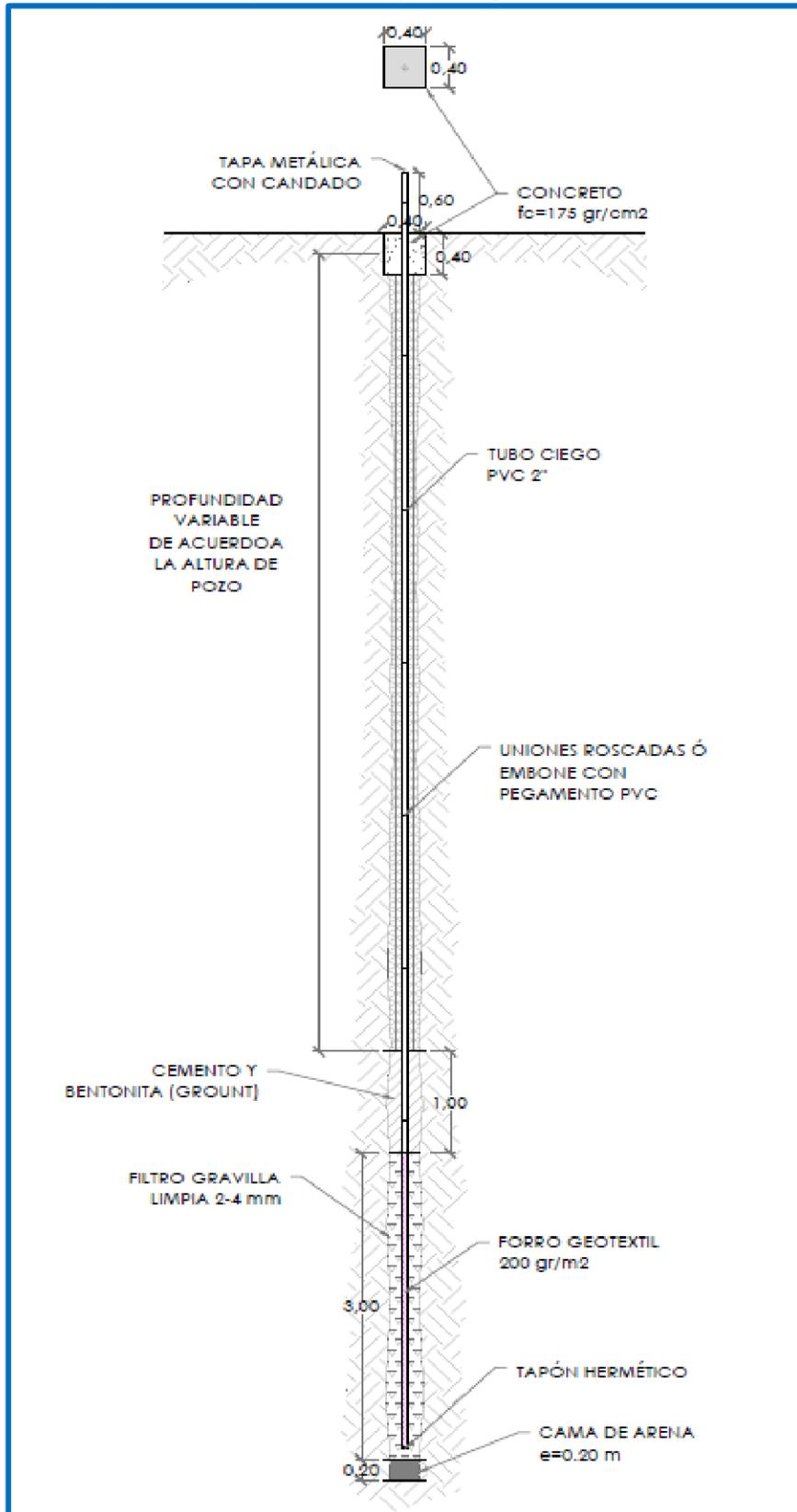
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 014 Ubicación de piezómetros y perforaciones en el Área de Estudio



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 015 Esquema de los piezómetros tipo Casagrande instalados en el Área de Estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 034 Resumen del análisis de logueos

Litología	Número de Perforaciones	Espesor (m)			Profundidad a la que detectada (m)		
		Media	Mediana	Rango	Media	Mediana	Mínimo
Arcilla inorgánica	10	6.00	4.70	1.02 – 23.21	6.68	6.99	2.10
Arcilla limosa	17	7.15	5.02	0.40 – 21.23	2.97	2.28	0.00
Arena	16	2.66	1.25	0.38 – 0.99	4.25	1.41	0.60
Grava	6	4.23	2.07	0.94 – 14.85	17.91	16.30	6.20
Limo inorgánico	13	5.10	3.43	0.64 – 10.64	6.66	4.47	0.55
Limo orgánico	17	1.67	1.42	0.30 – 3.29	0.17	0.00	0.00
Saprolito/Ceniza volcánica	12	6.43	4.75	0.77 – 18.30	17.96	15.79	8.27
Dolerita	16	18.70	13.12	3.91 – 44.75	20.90	18.48	5.66

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente se cuenta con información de la profundidad del contacto suelo-roca en las perforaciones realizadas en los años 2017-2018.

4.4 PRUEBAS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Con el fin de evaluar las propiedades hidráulicas de los materiales, se analizaron los ensayos de conductividad hidráulica realizados durante el año 2021, tanto del tipo Lefranc de carga variable como de carga constante.

De acuerdo con las características del suelo/roca se realizaron ensayos del tipo Lefranc de carga variable y carga constante; así, en los tramos menos fracturados se realizaron ensayos carga variable y en los tramos muy fracturados se realizaron ensayos de carga constante. Esto en función al consumo requerido de agua para el ensayo correspondiente.

En total se realizaron 135 pruebas, de las cuales 60 se realizaron en roca y 75 en suelos, aunque hay dos (02) pruebas que se realizaron en un tramo compuesto por suelo y roca. Los principales valores estadísticos de las pruebas realizadas en cada perforación se pueden apreciar en el **Cuadro N°035**. Cada una de las pruebas realizadas y el análisis detallado de estos resultados, por litología y profundidad, se discuten en el Capítulo 5.

Cuadro N° 035 Resumen de las pruebas de conductividad hidráulica por perforación

Perforación	Número de Pruebas	K (m/d)		
		Media	Mínimo	Máximo
P-01	6	1.227	0.002	6.969
P-02	7	0.847	0.016	1.610
P-03	3	1.005	0.127	2.481
P-04	5	2.021	0.023	4.867
P-05	9	1.247	0.014	6.314

Perforación	Número de Pruebas	K (m/d)		
		Media	Mínimo	Máximo
P-06	5	0.388	0.027	0.804
P-07	5	0.806	0.022	2.849
P-08	6	1.039	0.064	4.007
P-09	10	1.262	0.009	8.140
P-10	6	1.279	0.031	4.387
P-11	6	0.199	0.001	0.999
P-12	6	0.880	0.005	4.336
P-13	6	0.554	0.016	1.207
P-14	12	1.380	0.002	4.996
P-15	12	2.409	0.019	6.155
PH-01	12	4.129	2E-04	11.215
PH-02	7	0.807	0.002	4.074
PH-03	12	1.738	0.103	8.020

Fuente: Elaboración propia.

4.5 MEDICIONES DE NIVEL DE AGUA SUBTERRÁNEA

Tras la instalación de los piezómetros se realizaron mediciones diarias en cada uno de ellos, excepto en el piezómetro P-14 el cual se encuentra inoperativo, desde el 09 de junio de 2021 hasta el cierre del presente informe. El análisis detallado de las mediciones realizadas se discute en el Capítulo 5.

En el **Cuadro N°036** se pueden apreciar los principales valores estadísticos de las mediciones realizadas entre el 09 de junio hasta el 08 de agosto del presente año. Los descensos varían entre 0.26 m en el piezómetro P-10 hasta los 2.49 m en el piezómetro P-05; el primero ubicado cerca de la zona de descarga y el segundo en una zona de recarga. En la **Figura N°016** se puede apreciar el descenso en los piezómetros analizados.

Adicionalmente se analizaron las mediciones realizadas durante febrero de 2018 (Heredia, 2018). Teniendo en cuenta que se trata de perforaciones inclinadas los valores medidos no corresponden a las coordenadas que se muestran en el **Cuadro N°036** por lo cual se calcularon las coordenadas aproximadas a las que corresponderían las mediciones realizadas (para mayor detalle véase el Capítulo 5).

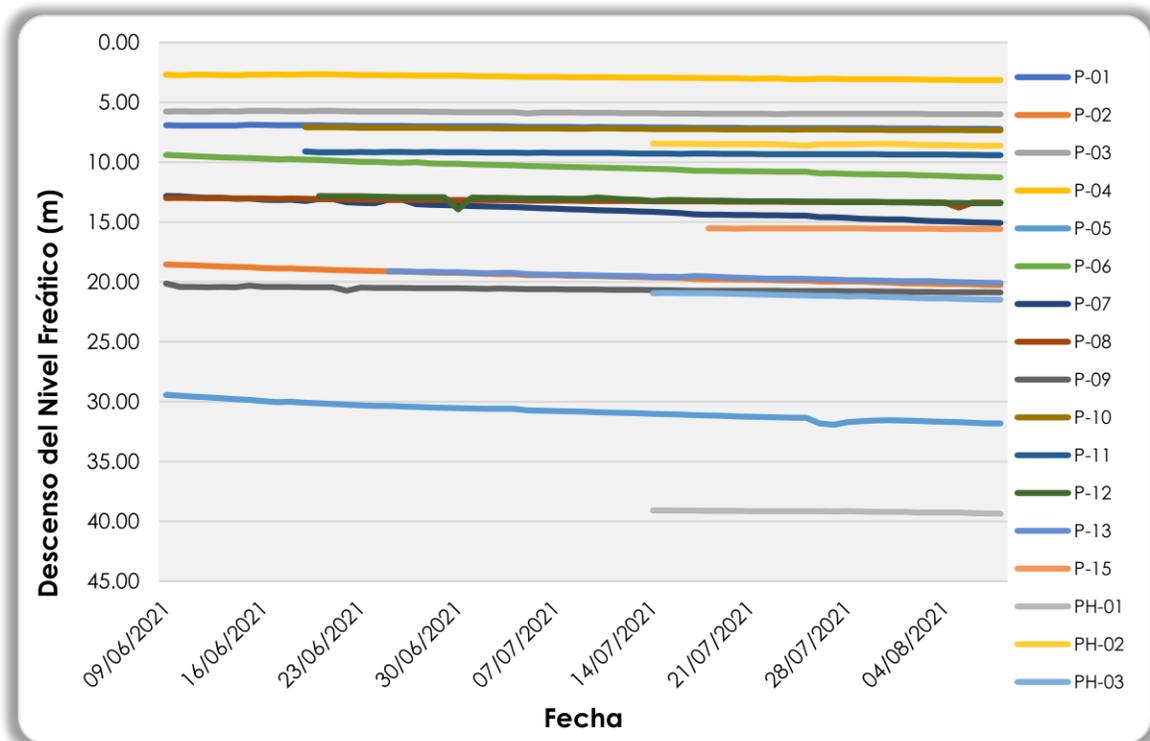
Cuadro N° 036 Resumen de las mediciones de niveles de agua en el periodo mayo-agosto 2021

Perforación	Número de Mediciones	Profundidad del Nivel Freático (m)			Descenso (m)	Tasa de Descenso (m/d)
		Media	Mínimo	Máximo		
P-01	61	7.06	6.88	7.23	0.35	0.006
P-02	61	19.48	18.54	20.27	1.73	0.028

Perforación	Número de Mediciones	Profundidad del Nivel Freático (m)			Descenso (m)	Tasa de Descenso (m/d)
		Media	Mínimo	Máximo		
P-03	61	5.87	5.72	6.01	0.29	0.005
P-04	61	2.90	2.67	3.15	0.49	0.008
P-05	61	30.82	29.44	31.93	2.49	0.041
P-06	61	10.40	9.40	11.28	1.88	0.031
P-07	61	13.95	12.83	15.08	2.25	0.037
P-08	61	13.22	12.99	13.80	0.81	0.013
P-09	61	20.63	20.14	20.89	0.75	0.012
P-10	51	7.23	7.09	7.35	0.26	0.005
P-11	51	9.27	9.11	9.42	0.31	0.006
P-12	50	13.16	12.83	13.95	1.12	0.022
P-13	45	19.60	19.11	20.09	0.98	0.022
P-15	22	15.56	15.53	15.60	0.07	0.003
PH-01	26	39.19	39.09	39.36	0.27	0.010
PH-02	26	8.52	8.46	8.63	0.17	0.007
PH-03	26	21.18	20.93	21.50	0.57	0.022

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 016 Descenso del nivel freático en los piezómetros analizados



Fuente: Elaboración propia.

5 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

5.1 PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

5.1.1 Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica (K) de un material es un parámetro que expresa la facilidad para que el agua circule a través de él (Gonzales, s/f).

“Es, por tanto, el principal parámetro que caracteriza las propiedades hídricas de los materiales en el suelo o en el macizo rocoso, y uno de los que registra mayores variaciones en función del tipo de material. También se le denomina coeficiente de permeabilidad, pero esta denominación puede crear confusión con la permeabilidad intrínseca o específica o simplemente permeabilidad, que es una propiedad física del medio”. (Gonzales, s/f)

A continuación, se describen los análisis realizados por litología y profundidad, con la finalidad de caracterizar los materiales geológicos presentes en el Área de Estudio.

5.1.1.1 Análisis Exploratorio de Datos

“El Análisis exploratorio de datos (AED) surge de los trabajos realizados por Tukey (1977), incrementándose su uso desde entonces, ya que se ha comprobado que el examen previo de los datos es un paso necesario” (UNESCO, 2006, pág. 13)

Este análisis, habitualmente descuidado por parte de los analistas de datos, no es realizado comúnmente o lo es de forma somera, lo cual incrementa el error de los futuros cálculos que tengan como insumo la data no analizada previamente.

“Muchas veces las tareas implícitas en dicho examen pueden parecer insignificantes y sin consecuencias a primera vista, pero son una parte esencial de cualquier análisis estadístico. El uso directo de la data sin evaluar su estructura, consistencia, presencia de valores atípicos y relaciones entre variables, entre otros, constituye un enfoque de caja negra que incrementa el grado de incertidumbre sobre la validez de los resultados obtenidos”. (Lavado, 2013)

El AED nos permite (UNESCO, 2006):

1. Organizar y preparar los datos.
2. Detectar fallas en el diseño y muestreo de la data.
3. Tratamiento y evaluación de data faltante.
4. Identificación de outliers (valores atípicos).

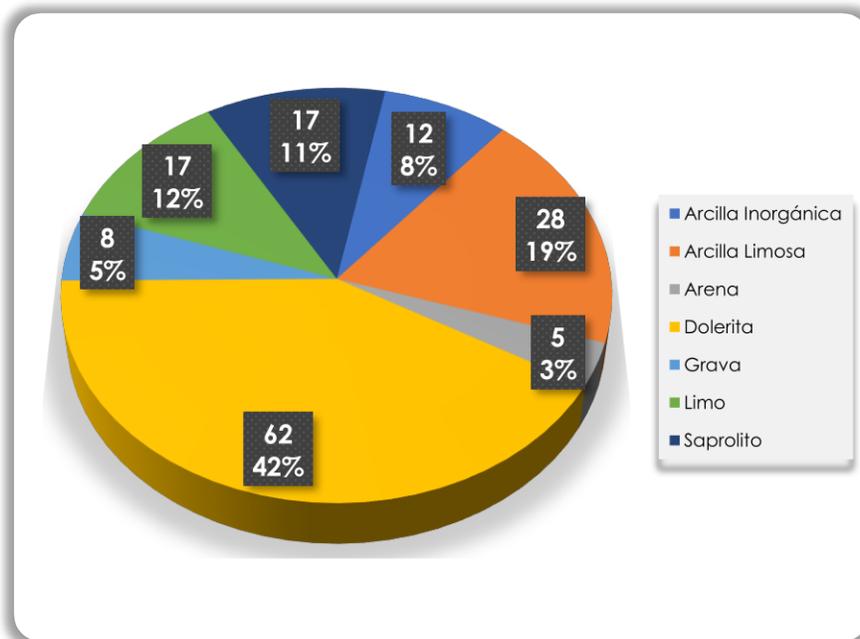
5. Comprobación de los supuestos básicos estadística como son la normalidad, independencia y homogeneidad.

Para realizar el AED Figueras y Gargallo (2003) recomiendan seguir las etapas:

1. Preparación de datos.
2. Análisis gráfico y numérico de las variables individuales que se estudien.
3. Análisis gráfico y numérico de las relaciones entre las variables que se estudien.
4. Evaluar los supuestos básicos como son la normalidad, aleatoriedad, independencia y homogeneidad.
5. Identificar los outliers y evaluar su impacto en los análisis estadísticos posteriores.
6. Evaluar el impacto potencial de los datos faltantes en los análisis estadísticos que se realicen.

En total se analizaron 135 pruebas distribuidas entre los materiales litológicos que se indican en la **Figura N°017**.

Figura N° 017 Distribución de pruebas realizadas por litología



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la información de los histogramas, cuantiles, P-P plots y pruebas de normalidad ninguna de las litologías presenta una distribución normal, y cuatro (04) de ellas si son normales mediante una transformación logarítmica (véase la **Figura N°018**).

La aleatoriedad se verificó con la prueba de rachas, tanto a la media como a la mediana, resultando que los valores de conductividad hidráulica (y su valor logarítmico) son aleatorios con excepción de la dolerita. La homogeneidad de las muestras evaluadas se realizó mediante las pruebas de Wald-Wolfowitz, prueba de medianas, U de Mann-Whitney,

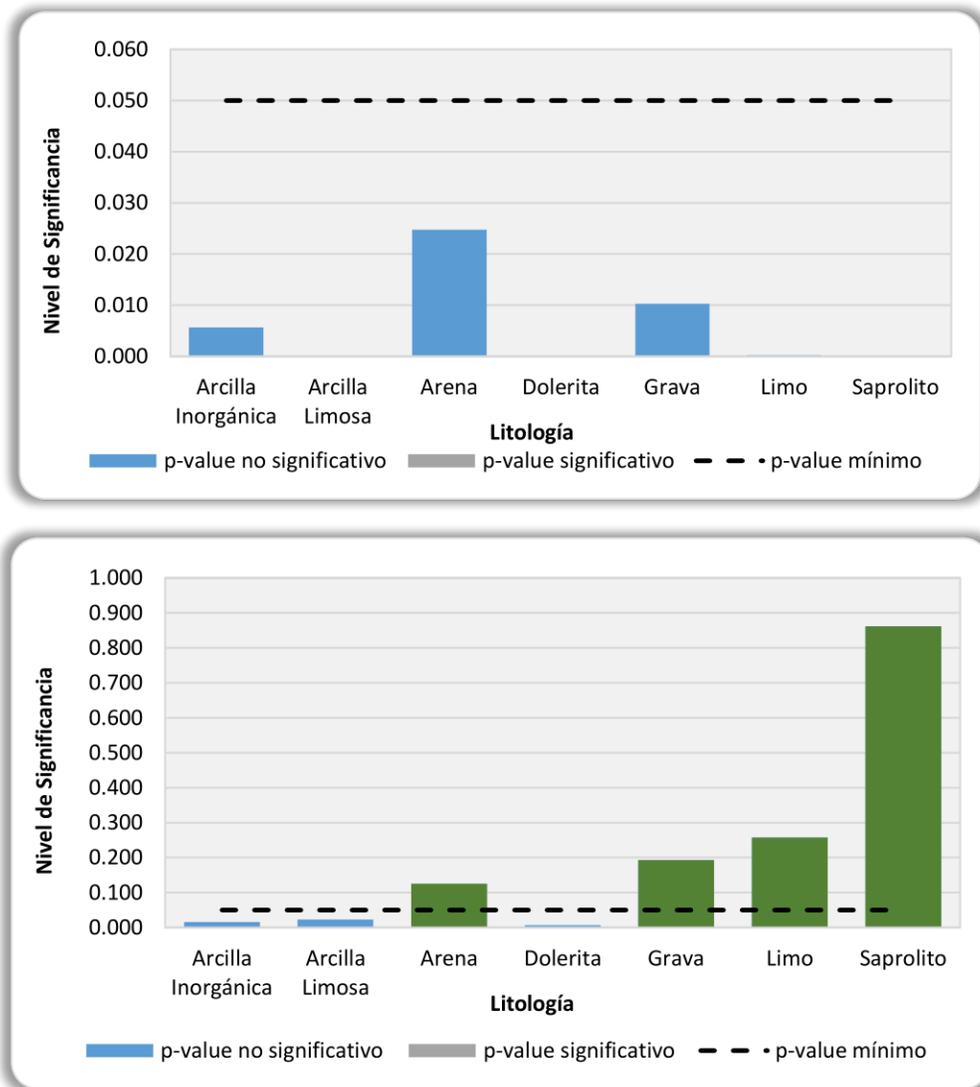
Kolgomorov-Smirnov y Kruskal-Wallis resultando que todas son homogéneas entre sí.

Finalmente se identificaron los posibles outliers mediante los box-plots (véase la **Figura N°019**), tanto para la conductividad hidráulica como para su transformada logarítmica, concluyendo en mantener esos valores dudosos.

5.1.1.2 Análisis por Litología

En el Área de Estudio se encuentra presencia de rocas volcánicas de composición basáltica y andesítica, brechas, rocas sedimentarias (lutitas y lodolitas) e intrusivas (dolerita), cubiertas por depósitos sedimentarios formados por suelos y saprolitos con presencia de limos y arcillas mayoritariamente.

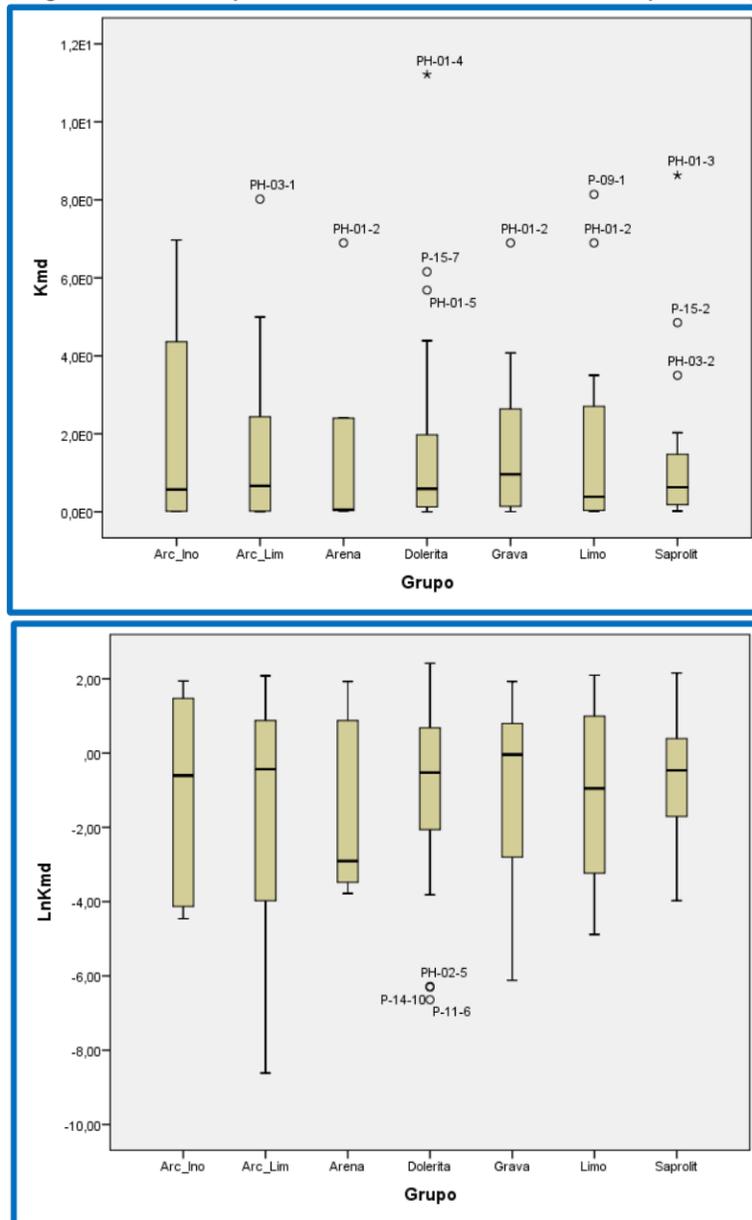
Figura N° 018 Nivel de significancia de la prueba de normalidad para la conductividad hidráulica por litología



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados estadísticos más significativos se indican en el **Cuadro N°037**, donde se puede apreciar la similitud entre los valores medios, una elevada desviación estándar (debido a la gran variabilidad de los resultados) y un coeficiente de variación muy similar, lo cual junto a valores medios muy próximos confirman la homogeneidad de las muestras analizadas.

Figura N° 019 Box plot de la conductividad hidráulica por litología



Fuente: Elaboración propia.

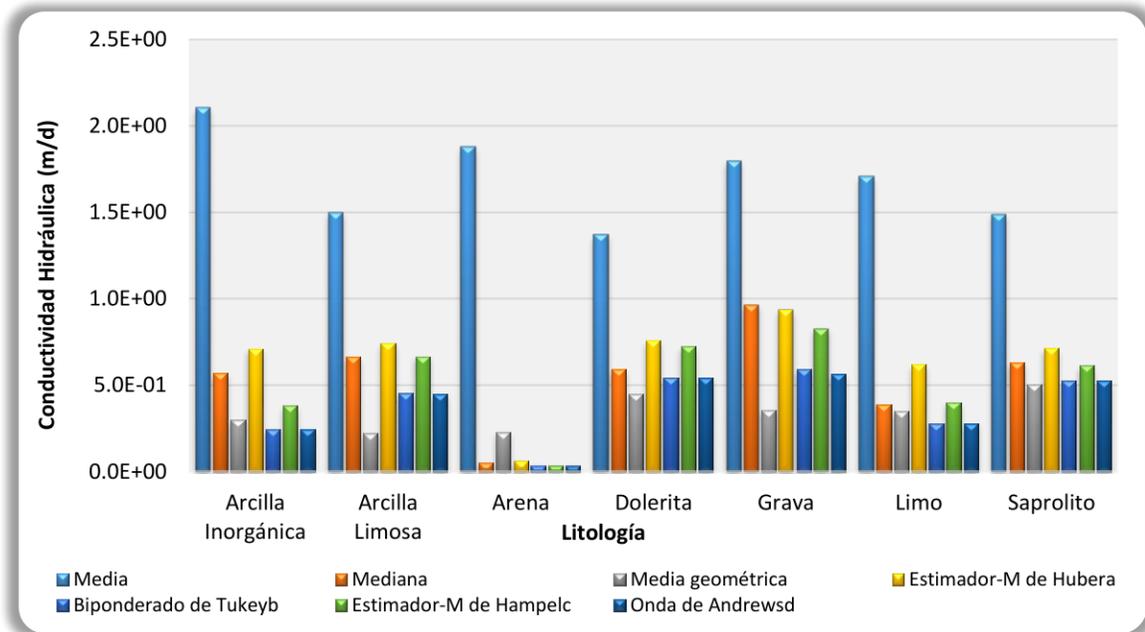
Debido a la alta variabilidad de las muestras analizadas (media, mediana y media geométrica y estimadores robustos de la media muy dispares, véase la **Figura N°026**), para estimar la conductividad hidráulica característica de cada litología se optó por la media geométrica como se sugiere en el Handbook of Groundwater Engineering (Deuller, 1999).

Cuadro N° 037 Resumen de los valores de conductividad hidráulica por litología

Parámetros		Litología						
		Arcilla Inorgánica	Arcilla Limosa	Arena	Dolerita	Grava	Limo	Saprolito
Número de datos		12	28	5	62	8	17	17
Media		2.104	1.500	1.881	1.368	1.797	1.704	1.489
Error típ. de la media		0.769	0.388	1.335	0.241	0.863	0.598	0.549
Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite Inferior	0.411	0.703	0.000	0.886	0.000	0.436	0.324
	Límite Superior	3.798	2.297	5.586	1.851	3.837	2.971	2.653
Media recortada al 5%		1.950	1.269	1.705	1.099	1.613	1.440	1.173
Media geométrica		0.299	0.223	0.229	0.448	0.355	0.349	0.503
Mediana		0.571	0.663	0.055	0.592	0.962	0.387	0.629
Varianza		7.104	4.225	8.905	3.609	5.954	6.079	5.127
Desviación estándar		2.665	2.056	2.984	1.900	2.440	2.466	2.264
Coeficiente de variación		1.267	1.371	1.587	1.388	1.358	1.447	1.521
Mínimo		1.16E-02	1.81E-04	2.28E-02	1.31E-03	2.20E-03	7.56E-03	1.88E-02
Máximo		6.969	8.020	6.895	11.215	6.895	8.140	8.631
Rango		6.957	8.019	6.872	11.213	6.893	8.132	8.613
Amplitud intercuartil		4.359	2.626	4.621	1.883	3.279	2.742	1.622
Asimetría		0.920	1.668	1.684	2.884	1.677	1.786	2.389
Error típ. de la asimetría		0.637	0.441	0.913	0.304	0.752	0.550	0.550
Curtosis		-0.808	2.490	2.513	11.447	2.156	2.538	5.946
Error típ. de la curtosis		1.232	0.858	2.000	0.599	1.481	1.063	1.063
Percentiles	25	0.016	0.018	0.027	0.124	0.077	0.035	0.129
	50	0.571	0.663	0.055	0.592	0.962	0.387	0.629
	75	4.374	2.644	4.647	2.006	3.356	2.777	1.751

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 020 Estimadores de la media de la conductividad hidráulica por litología



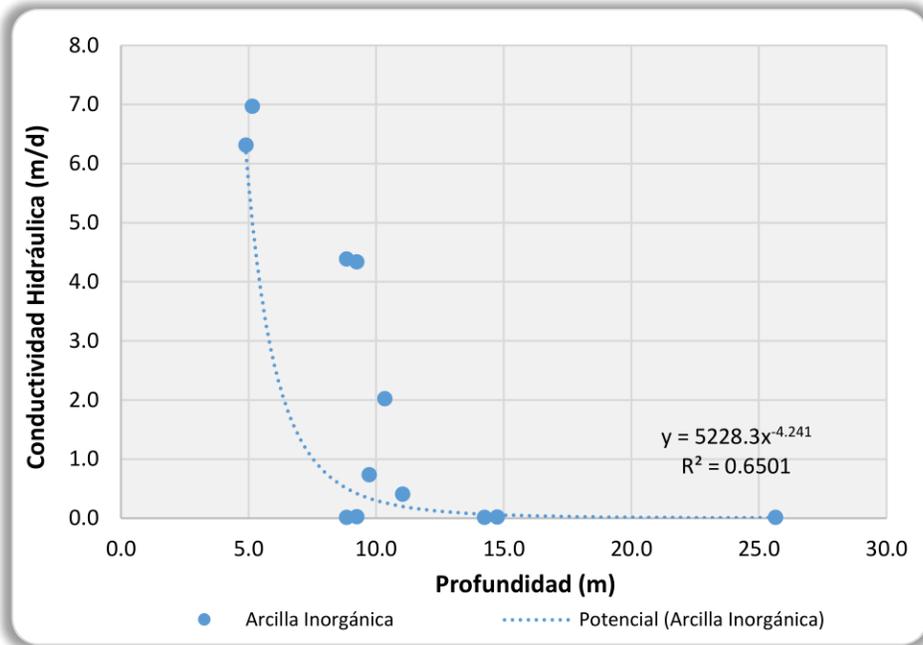
Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.3 Análisis por Profundidad

Se ha evaluado la conductividad hidráulica y su relación con la profundidad, con la finalidad de determinar si en el caso de los materiales cuaternarios existe una estratificación hidráulica significativa y en el caso de la roca hallar alguna relación matemática que nos permita extrapolar valores a mayores profundidades de las prospectadas.

En el caso de los suelos las arcillas inorgánicas (ver **Figura N°021**) y la grava presentan una relación estadísticamente significativa (evaluado mediante el análisis de T-Student y Rho Spearman), mientras que el resto de los tipos de suelo no. Realizando el análisis para las arcillas (orgánicas e inorgánicas) no se halló una relación significativa, y finalmente se analizaron todas las muestras de material cuaternario en conjunto, resultando en una correspondencia no significativa entre ambas variables.

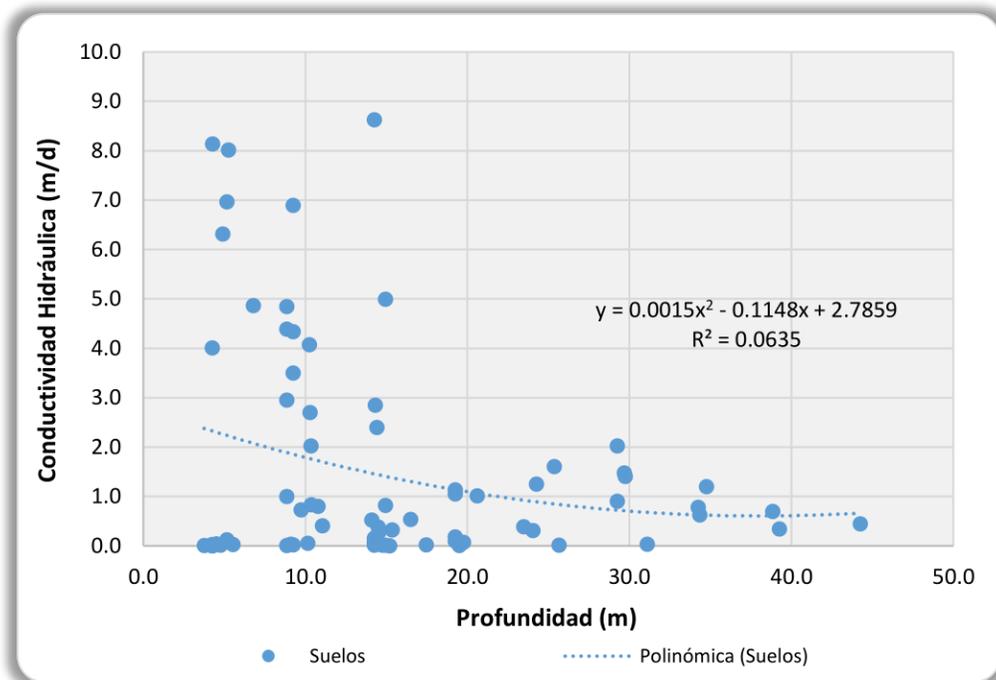
Figura N° 021 Relación conductividad hidráulica y profundidad para la arcilla inorgánica



Fuente: Elaboración propia.

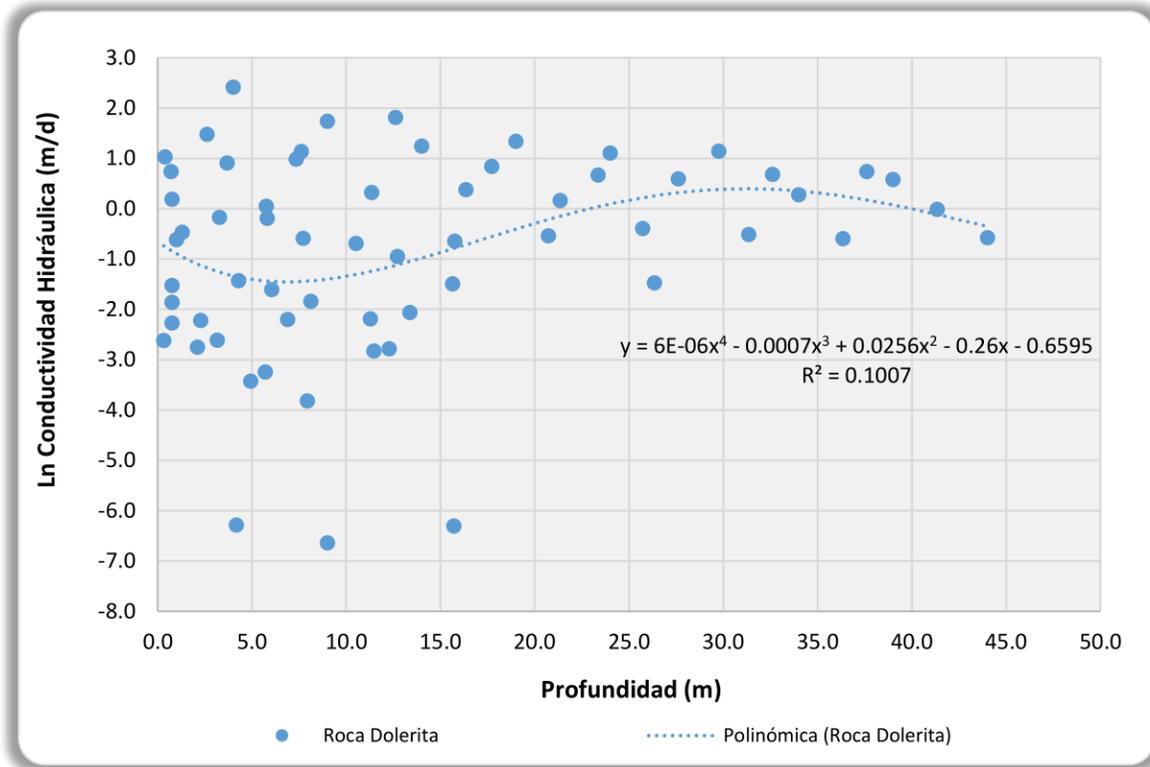
En el caso de los ensayos realizados a la dolerita se halló una relación polinomial de cuarto orden, estadísticamente significativa, que muestra un ligero descenso de los valores logarítmicos de la conductividad hidráulica conforme se profundiza, aunque esta relación no es muy fuerte por lo que se descarta su uso (véase la **Figura N°023**).

Figura N° 022 Relación conductividad hidráulica y profundidad para los materiales cuaternarios



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 023 Relación conductividad hidráulica y profundidad para la dolerita



Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.4 Análisis Espacial

La conductividad hidráulica usualmente es anisotrópica y heterogénea, siendo la anisotropía la variación a nivel vectorial de la variable analizada, y la heterogeneidad es la variación de los valores medidos en cuanto a su ubicación espacial.

Como se ha visto en los ítems anteriores la variabilidad de resultados de la conductividad hidráulica entre cada sondaje y litología confirman la heterogeneidad hidrogeológica del Área de Estudio.

Para el caso de la anisotropía en las muestras analizadas se calcularon las conductividades hidráulicas paralelas al plano K_h y normales al plano K_v con las ecuaciones 6.1 y 6.2 (Custodio & Llamas, 1976):

$$K_h = \frac{h_1 * K_1 + h_2 * K_2 + h_3 * K_3 + \dots + h_n * K_n}{H} \dots (6.1)$$

$$K_v = \frac{H}{h_1/K_1 + h_2/K_2 + h_3/K_3 + \dots + h_n/K_n} \dots (6.1)$$

Donde:

K_n : Conductividad hidráulica del estrato n (m/d)

h_n : Espesor del estrato n (m)

H : Espesor total (m)

K_h : Conductividad hidráulica horizontal (m/d)

K_v : Conductividad hidráulica vertical (m/d)

En el caso de los depósitos cuaternarios se utilizaron los valores indicados en el **Cuadro N°034** para definir los estratos promedio del área de estudio y sus correspondientes espesores, y las medias geométricas calculadas para cada litología que se muestran en el **Cuadro N°037**. En el caso de la dolerita se asumieron estratos artificiales de 10 m espesor y se usó la media geométrica de las pruebas que comprenden esos intervalos. Los resultados se muestran en el **Cuadro N°038**.

Como se puede apreciar en el **Cuadro N°038** los depósitos cuaternarios se podrían considerar isotrópicos y la dolerita presenta bajo nivel de anisotropismo. Los valores usuales de la ratio K_h/K_v varían entre 1-10 (Singhal & Gupta, 2010).

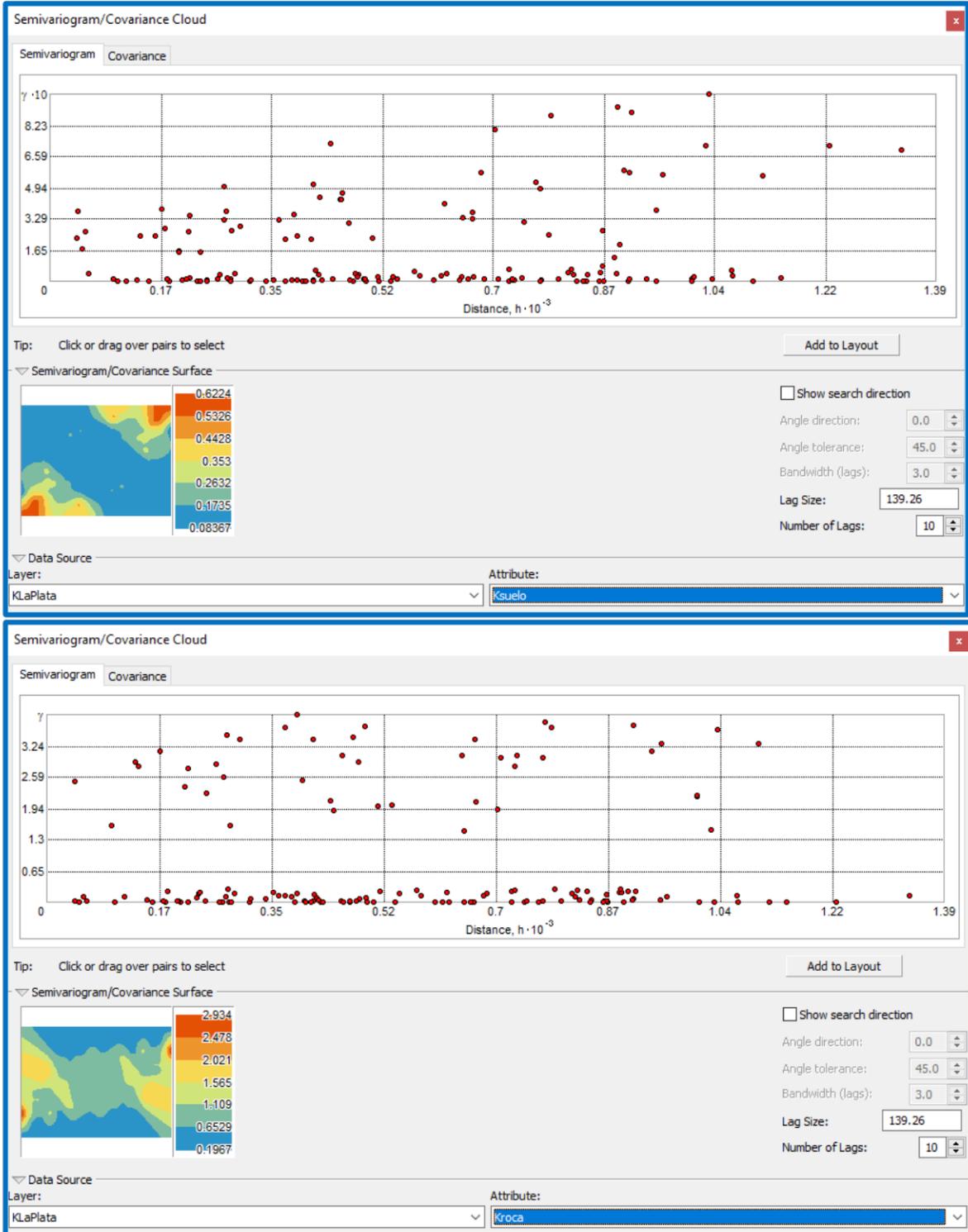
Cuadro N° 038 Resumen de los valores de conductividad hidráulica por litología

Litología	K_h (m/d)	K_v (m/d)	Ratio K_h/K_v
Depósitos Cuaternarios	0.336	0.310	1.084
Dolerita	0.768	0.542	1.418

Fuente: Elaboración propia.

La correlación espacial entre una determinada propiedad medida en campo se mide a través de un semivariograma (Kresic, 2007). Se generaron semivariogramas (véase la **Figura N°024**) para la conductividad hidráulica (media geométrica) de los depósitos cuaternarios y la dolerita de cada perforación realizada, hallándose poca correspondencia debido a la alta heterogeneidad del medio geológico y a la poca cantidad de información espacial (18 perforaciones).

Figura N° 024 Relación conductividad hidráulica y profundidad para la dolerita



Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.5 Estimación de la Conductividad Hidráulica Efectiva (Kef)

Los acuíferos en su inmensa mayoría son heterogéneos, y la conductividad hidráulica varía ampliamente a través de cortas distancias. Usualmente, es impráctico mapear la exacta distribución espacial de la conductividad hidráulica por motivos económicos o de tiempo, por lo que estos esfuerzos son algo innecesarios en muchas aplicaciones donde un valor medio puede ser suficiente para el manejo y toma de decisiones en el campo hidrogeológico (Deuller, 1999).

La mayoría de estudios hidrogeológicos y modelamientos usan la media geométrica, para roca fracturada con buena conectividad entre ellas, mientras otros prefieren la media armónica con rocas con una pobre red de fracturas y poca interconexión (Wels, 2012).

La media geométrica es usada cuando la conductividad hidráulica presenta una distribución lognormal o normal y la información es aleatoria. Como se ha visto en el AED la información no es normal en la mayoría de casos y la dolerita es no aleatoria.

La media armónica se usa mayormente para promediar la conductividad hidráulica en zonas donde el flujo es perpendicular a las unidades hidroestratigráficas (flujo a través de fallas de baja permeabilidad o de recarga vertical en zonas confinadas) (Wels, 2012).

Teniendo en cuenta que no se cuentan con la suficiente cantidad de información para realizar un modelamiento geoestadístico de la conductividad hidráulica, y que optar por la media geométrica o armónica en este caso no sería lo óptimo el cálculo de la conductividad hidráulica se realizará con la siguiente metodología (Connell & Chapman, 1989).

Se realizaron análisis estadísticos no paramétricos para decidir la agrupación de las litologías muestreadas (véase el ejemplo de la **Figura N°025**), hallándose que los materiales de los depósitos cuaternarios pueden considerarse una sola población estadística (incluso la dolerita fracturada presenta homogeneidad respecto a las otras litologías, pero se ha optado por realizar un análisis por separado).

Figura N° 025 Análisis de homogeneidad entre la arcilla limosa y el limo

	Hipótesis nula	Test	Sig.	Decisión
1	La distribución de Arclno vs Limo es la misma entre las categorías de Glt.	Prueba de ejecuciones de Wald-Wolfowitz de muestras independientes	,565 ¹	Retener la hipótesis nula.
2	Las medianas de Arclno vs Limo son las mismas entre las categorías de Glt.	Prueba de medianas de muestras independientes	1,000 ^{1,2}	Retener la hipótesis nula.
3	La distribución de Arclno vs Limo es la misma entre las categorías de Glt.	Prueba U de Mann-Whitney de muestras independientes	,948 ¹	Retener la hipótesis nula.
4	La distribución de Arclno vs Limo es la misma entre las categorías de Glt.	Prueba Kolmogorov-Smirnov de muestras independientes	,812	Retener la hipótesis nula.
5	La distribución de Arclno vs Limo es la misma entre las categorías de Glt.	Prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes	,929	Retener la hipótesis nula.

Se muestran las significancias asintóticas. El nivel de significancia es ,05.

¹Se muestra la significancia exacta para esta prueba.

²Sig. exacta de Fisher

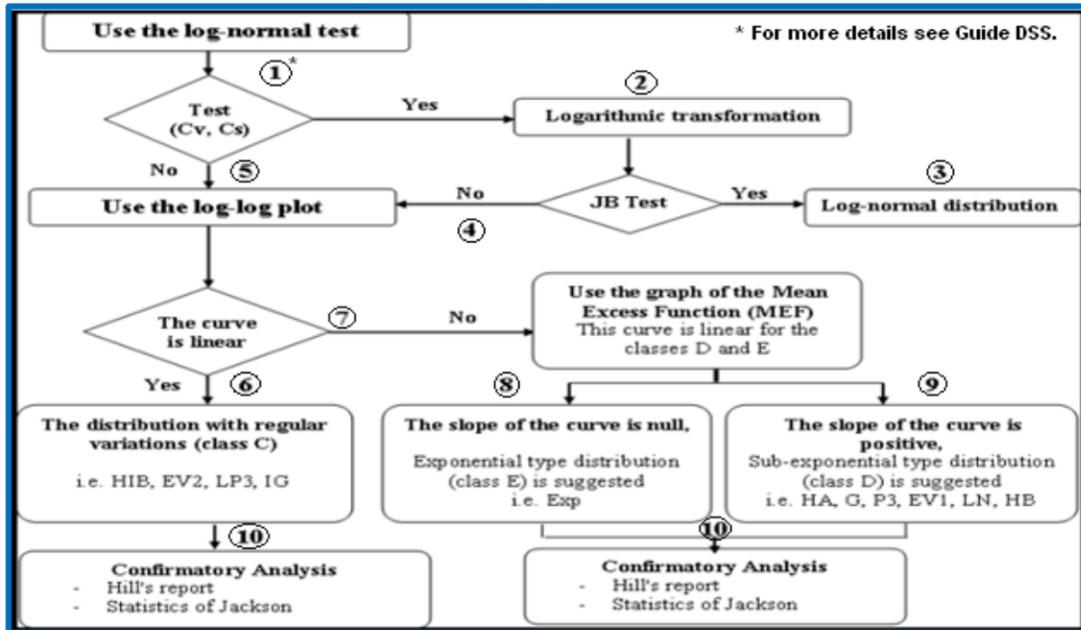
Fuente: Elaboración propia.

Una vez se determina que existen dos poblaciones estadísticas diferentes, depósitos cuaternarios y dolerita, se realizó el análisis de ajuste probabilístico para determinar la función de probabilidad (FDP) que más se adapta a nuestra información. Este análisis se realizó con el método del Decision Support System (DSS) que viene incorporado en el software Hyfran Plus (véase la **Figura N°026**).

Realizado el DSS se obtuvieron tres funciones probabilísticas (FDP) para cada litología analizada (suelo y roca), eligiendo entre ellas mediante los criterios de comparación Bayesian Information Criteria (BIC), Aikake Información Critería (AIC) y la probabilidad a posteriori P(Mi/x). En la **Figura N°027** se aprecia que en el caso de los depósitos cuaternarios la FDP que mejor se ajusta a los datos, es la distribución Gamma (calculado con el método de los momentos) y en la

Figura N°028 se muestra que en el caso de la dolerita es mejor optar por una ponderación entre las distribuciones Gamma y Weibull (ambas calculadas con el método de los momentos).

Figura N° 026 Diagrama de decisión DSS



Fuente: Manual de Usuario Hyfran Plus.

Figura N° 027 Criterios de comparación entre FDP para la conductividad hidráulica de los depósitos cuaternarios

Comparison criteria of the distributions

Return period : WARNING ! The decision-support system (comparison criteria as described in the HYFRAN menu) is still being developed. It should therefore only be used as an indication.

Sample size :

Model	Nb param.	XT	P(Mi)	P(Mi x)	BIC	AIC
Gamma (Method of moments)	2	0.677	33.33	96.61	164.787	160.125
Log-Pearson type 3 (Méthode SAM)	3	0.354	33.33	3.39	171.488	164.496
Exponential (Maximum Likelihood)	2	1.065	33.33	0.00	228.800	224.139

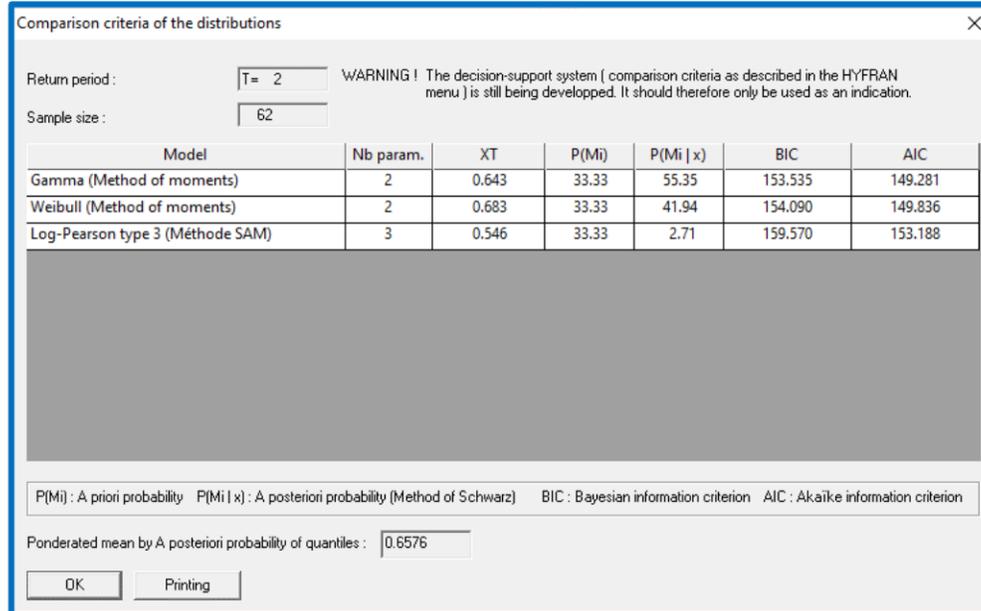
P(Mi) : A priori probability P(Mi | x) : A posteriori probability (Method of Schwarz) BIC : Bayesian information criterion AIC : Akaike information criterion

Ponderated mean by A posteriori probability of quantiles :

OK Printing

Fuente: Elaboración propia.

A partir de las distribuciones de probabilidad se estimaron las medianas para cada grupo de datos, siendo este valor la conductividad hidráulica efectiva o representativa de sus respectivas unidades hidrogeológicas (véase el **Cuadro N°023**). En el caso de las unidades litológicas no comprendidas en el presente análisis se ha caracterizado sus valores de conductividad teniendo en cuenta diversas fuentes bibliográficas, tal como se puede apreciar en el **Cuadro N°024** y en el **cuadro N°025**.

Figura N° 028 Criterios de comparación entre FDP para la conductividad hidráulica de la dolerita


Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 039 Conductividad hidráulica efectiva para los depósitos cuaternarios y la dolerita.

Litología	K _{ef} (m/d)	Desviación Estándar (m/d)	Intervalo de Confianza (m/d)	
			Límite Inferior	Límite Superior
Depósitos Cuaternarios	0.677	0.213	0.260	1.094
Dolerita ⁽¹⁾	0.661	0.185	0.297	1.024

(1) Valor ponderado con las probabilidades a posteriori de las FDP Gamma (56.89%) y Weibull (43.11%)

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 040 Conductividad hidráulica efectiva para las formaciones geológicas del Área de Estudio – Estratos Superiores

Litología	K _{ef} (m/d)	Desviación Estándar (m/d)	Intervalo de Confianza (m/d)	
			Límite Inferior	Límite Superior
Depósitos Coluvio-Aluviales ⁽¹⁾	0.677	0.213	0.260	1.094
Depósitos Aluviales ⁽¹⁾	1.000	-	0.500	1.500
Bloque Bajo (FVS)	0.020	-	0.002	0.200
Bloque Alto Volcánico (HVOL)	0.100	-	0.010	1.000
Bloque Alto (HVS)	0.050	-	0.010	0.500
Brecha (Bx)	0.100	-	0.010	1.000
Dolerita (GDO) ⁽¹⁾	0.661	0.185	0.297	1.024
Andesita (DAN)	0.100	-	0.010	1.000

Fuente: (1) SINCO Ingeniería y Construcción S.A.C., el resto fueron adaptados de (Acworth, 2019), (Deuller, 1999), (Hazel, 2009), (Kresic, 2007) y (Singhal & Gupta, 2010).

Cuadro N° 041 Conductividad hidráulica efectiva para las formaciones geológicas del Área de Estudio – Estratos Inferiores

Litología	K _{ef} (m/d)	Desviación Estándar (m/d)	Intervalo de Confianza (m/d)	
			Límite Inferior	Límite Superior
Bloque Bajo (FVS)	0.001	-	10 ⁻⁴	0.005
Bloque Alto Volcánico	0.005	-	5x10 ⁻⁴	0.010

Litología	K _{ef} (m/d)	Desviación Estándar (m/d)	Intervalo de Confianza (m/d)	
			Límite Inferior	Límite Superior
(HVOL)				
Bloque Alto (HVS)	0.005	-	5x10 ⁻⁴	0.010
Brecha (Bx)	0.002	-	2x10 ⁻⁴	0.010
Dolerita (GDO)	0.005	-	0.001	0.010

Fuente: Adaptado de (Acworth, 2019), (Deuller, 1999), (Hazel, 2009), (Kresic, 2007) y (Singhal & Gupta, 2010)

5.1.2 Porosidad

La porosidad de un material es la relación entre el volumen de su parte vacía u ocupada por aire y/o agua y su volumen total (Custodio & Llamas, 1976). Es un parámetro adimensional y depende únicamente de la constitución de la roca o suelo, es decir, de su textura característica, sin que intervenga la forma geométrica ni la potencia de la formación o su mecanismo de funcionamiento hidráulico en la naturaleza.

La capacidad de almacenamiento de las rocas fisuradas se caracteriza por su doble porosidad: La porosidad primaria intergranular que es leve y la porosidad secundaria o adquirida por fracturamiento que es la más importante porque puede multiplicar por 10 o 20 veces más a la porosidad intergranular, pudiendo alcanzar valores de porosidad de hasta 30%. En cuanto a las rocas volcánicas presentes en el área de estudio, las lavas al enfriarse dejan escapar gases, al verse liberadas de presión, esto produce agujeros en las rocas (textura vesicular). Estos agujeros crean porosidad, pero puede que no estén conectados.

“Un hecho comprobado, tanto por bombeo en acuíferos como en ensayos de investigación en laboratorio, es que, de las reservas en agua del suelo, solo es recuperable mediante captaciones el agua gravífica, que es una parte de la porosidad total” (Gonzales, s/f, pág. 16).

En estudios del movimiento del agua subterránea solo importan los poros interconectados y a veces los semicerrados. Así nace el concepto de porosidad eficaz que tiene en cuenta el volumen de estos poros respecto al volumen total del terreno natural considerado. La porosidad eficaz no representa más que una porción a menudo pequeña de la porosidad total (Custodio & Llamas, 1976).

En el **Cuadro N°042** se presentan los valores estimados de la porosidad y de la porosidad efectiva o eficaz.

Cuadro N° 042 Porosidad efectiva estimada

Unidad Regional	Porosidad (%)	Porosidad Efectiva (%)
Depósitos Coluvio-Aluviales	20 – 25	5 – 15
Depósitos Aluviales	25 – 30	15 – 20
Bloque Bajo (FVS)	5 - 15	1 – 3
Bloque Alto Volcánico (HVOL)	10 – 15	2 – 5
Bloque Alto (HVS)	10 – 20	1 – 3
Brecha (Bx)	10 – 20	1 – 5
Dolerita (GDO)	5 – 10	1 – 3
Andesita (DAN)	10 – 15	2 – 5

Fuente: Adaptado de (Acworth, 2019), (Custodio & Llamas, 1976), (Deuller, 1999), (Hazel, 2009), (Kresic, 2007) y (Singhal & Gupta, 2010)

5.1.3 Coeficiente de Almacenamiento y Rendimiento Específico

Cuando se bombea agua de un pozo, el agua procede del acuífero mediante uno de estos dos sistemas: drenaje o vaciado de los poros de este (acuíferos libres) o de los pequeños efectos elásticos del armazón físico del acuífero y de la propia elasticidad del agua, siendo ésta la única forma de obtener agua en un acuífero cautivo (Custodio & Llamas, 1976).

“En el primer caso el agua procede del vaciado físico del agua gravífica (agua libre) contenida en el acuífero. El volumen del agua obtenido por unidad de volumen coincidirá, pues, con la porosidad eficaz (me) de la zona saturada” (Custodio & Llamas, 1976, pág. 264). El concepto anterior es conocido como Rendimiento Específico.

En el segundo caso el mecanismo es diferente al de los acuíferos libres y mucho más complejo, puesto que intervienen otro tipo de acciones. En efecto, el agua extraída de los poros se dilata por descompresión elástica proporcionando una cantidad de agua; por otra parte, la presión intersticial (del agua) en el terreno disminuye, lo cual trae como consecuencia la dilatación de granos minerales y el estrujamiento de la trama rocosa (a la manera de una esponja) con la consiguiente expulsión de un poco de agua, para hacer frente a la presión constante del terreno sobre el acuífero, con lo que éste disminuye un poco su espesor gracias a los efectos elásticos del acuífero considerado en conjunto, y ello puede provocar incluso ligeros hundimientos del terreno en superficie en las cercanías de los pozos de bombeo (Custodio & Llamas, 1976).

“De esta forma el coeficiente de almacenamiento se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero de sección igual a la unidad y altura igual a la del acuífero saturado si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico o de carga hidráulica. El coeficiente de almacenamiento, representado por S, no tiene dimensiones” (Custodio & Llamas, 1976, pág. 264).

En el modelamiento es más usual el uso del parámetro de coeficiente de almacenamiento específico, el cual resulta de la división del coeficiente de almacenamiento y el espesor del acuífero.

No hay información disponible de las propiedades de almacenamiento de los materiales del lugar. Basados en la experiencia de otros sitios, puede asumirse que las rocas volcánicas y sedimentarias tendrían un coeficiente de almacenamiento (debido a la compresibilidad del acuífero) de 1×10^{-4} a 1×10^{-6} y un rendimiento específico (porosidad drenable) de 0.01 a 0.05. Podrían ser esperados ligeramente más altos rendimientos específicos y coeficientes de almacenamiento en zonas de alta fracturación. Se espera que los sedimentos cuaternarios formen un acuífero freático con un rendimiento específico de 0.05 a 0.20.

5.2 GEOMETRÍA DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS

La extensión areal de las formaciones litológicas se resume en el **Cuadro N°043**, tanto en superficie como a nivel del basamento rocoso. Se puede apreciar que a nivel superficial casi toda el Área de Estudio está cubierta por depósitos cuaternarios (98.6% del total), y a nivel del basamento la dolerita (GDO) representa la mayor extensión litológica en el Área de Estudio (51.6% del total), seguido de los materiales sedimentarios de la unidad Bloque Alto (HVS) y los materiales volcánicos (HVOL).

Para obtener los espesores medios de las unidades litológicas se utilizaron los logueos, prospecciones geofísicas y secciones geológicas realizados en el Área de Estudio.

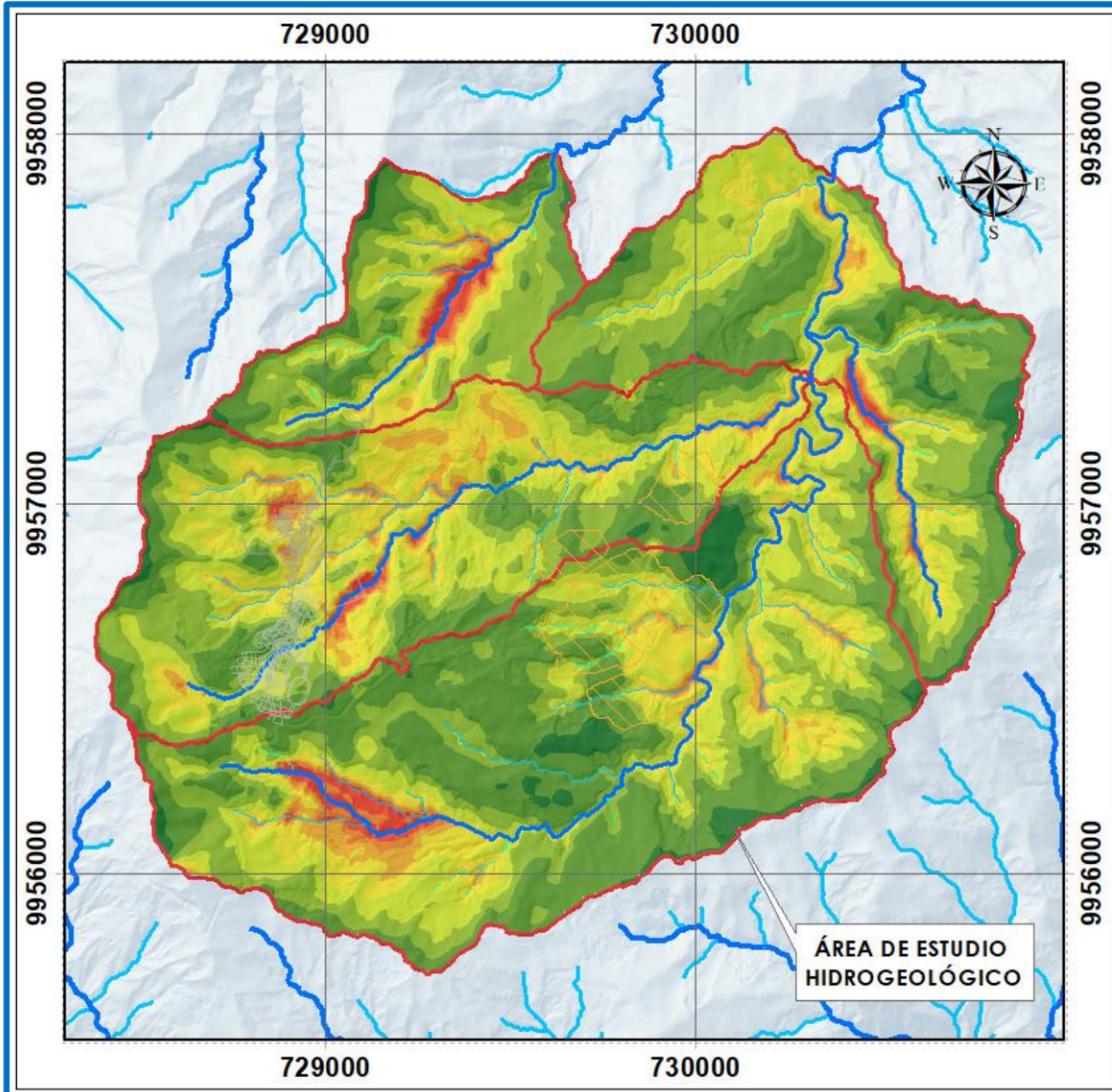
En la **Figura N°030** se muestran los espesores de los depósitos cuaternarios estimados a partir de las isopacas y el nivel del terreno superficial. Se puede apreciar que las mayores acumulaciones se dan en las partes altas del área de estudio, disminuyendo el espesor en las zonas de las quebradas.

Cuadro N° 043 Extensión de las unidades litológicas en superficie

Unidad Regional	Área en Superficie (km ²)	Área en Profundidad (km ²)
Depósitos Coluvio-Aluviales	3.689	-
Depósitos Aluviales	0.155	-
Bloque Bajo (FVS)	-	0.138
Bloque Alto Volcánico (HVOL)	-	0.540
Bloque Alto (HVS)	-	0.805
Brecha (Bx)	-	0.338
Dolerita (GDO)	-	2.014
Andesita (DAN)	0.056	0.056
Otros (VRD, VMS y SVMS)	-	0.009
Total	3.900	3.900

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 029 Espesores de los depósitos cuaternarios en el Área de Estudio



Fuente: Elaboración propia.

El espesor medio de los depósitos cuaternarios es de 32.2 m, con variaciones desde 0 m (afloramientos rocosos) hasta 81.9 m. En cuanto al espesor de las formaciones rocosas, como se puede apreciar en las secciones geológicas y como menciona (BGS - CODIGEM, 1993), no se ha detectado la formación subyacente a la unidad Macuchi (de la cual forman parte todas las unidades litológicas analizadas), por lo cual se ha determinado una profundidad de 400 – 500 m como límite del flujo subterráneo apreciable (en la práctica se toma como límite vertical del modelo la cota 1100 msnm).

5.3 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

5.3.1 Definiciones

Las formaciones geológicas se pueden clasificar desde el punto de vista hidrogeológico en acuíferos, acuitardos, acuicludos y acuífugos, desde el punto de vista de su comportamiento hidráulico, en libres, confinados y semiconfinados, y por los componentes litológicos que los conforman, no consolidados, consolidados, fracturados, kársticos, etc.

Los acuíferos se definen como "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 & Llamas, 1976, pág. 259). Específicamente los acuíferos de materiales cuaternarios están formados por materiales no consolidados, tales como arenas, gravas, mezcla de ambos, etc., pudiendo tener origen diverso: aluvial, fluvial, glaciar, etc.

Los acuíferos fisurados son unidades hidrogeológicas cuya producción y almacenamiento de agua subterránea ocurre mediante fisuras, fracturas y una escasa porosidad primaria (porosidad intergranular) debido a que han sufrido un proceso de diagénesis. Este tipo de acuíferos se caracterizan por tener caudales de descarga con un rendimiento más permanente que los no consolidados o los kársticos, es decir que su caudal se mantiene durante gran parte del año, debido a que la velocidad de flujo interno en la zona saturada es lenta. Durante la temporada de lluvias se recargan de manera paulatina, incrementando su caudal de descarga ligeramente.

El acuitardo es una formación geológica, que conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente por lo que no son aptos para ubicar captaciones, pero en situaciones especiales permite la recarga vertical de otros acuíferos, que puede ser muy importante en ciertos casos (Custodio & Llamas, 1976).

El acuicludo es una formación geológica, que, conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación no la transmite, de manera que no es capaz de proporcionar agua por ningún método práctico (Custodio & Llamas, 1976).

5.3.2 Clasificación Hidrogeológica

En la **Figura N°030** se muestra la clasificación de los tipos de acuífero en función de sus valores de conductividad hidráulica. En la **Figura N°031** se muestra la clasificación de los tipos de acuífero en función de sus valores de transmisibilidad (espesor saturado multiplicado por la conductividad hidráulica).

Figura N° 030 Ordenes de magnitud de la conductividad hidráulica (m/d)

Permeabilidad m/día	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴
Calificación	Impermeables		Poco permeable	Algo permeable		Permeable		Muy permeable			
Calificación del acuífero	Acuícludo (y Acuífugo)		Acuitardo	Acuífero pobre		Acuífero de regular a bueno		Acuífero excelente			
Tipo de materiales	Arcilla compacta Pizarra Granito		Limo arenoso Limo Arcilla limosa	Arena fina Arena limosa Caliza fracturada		Arena limpia Grava y arena Arena fina		Grava limpia			

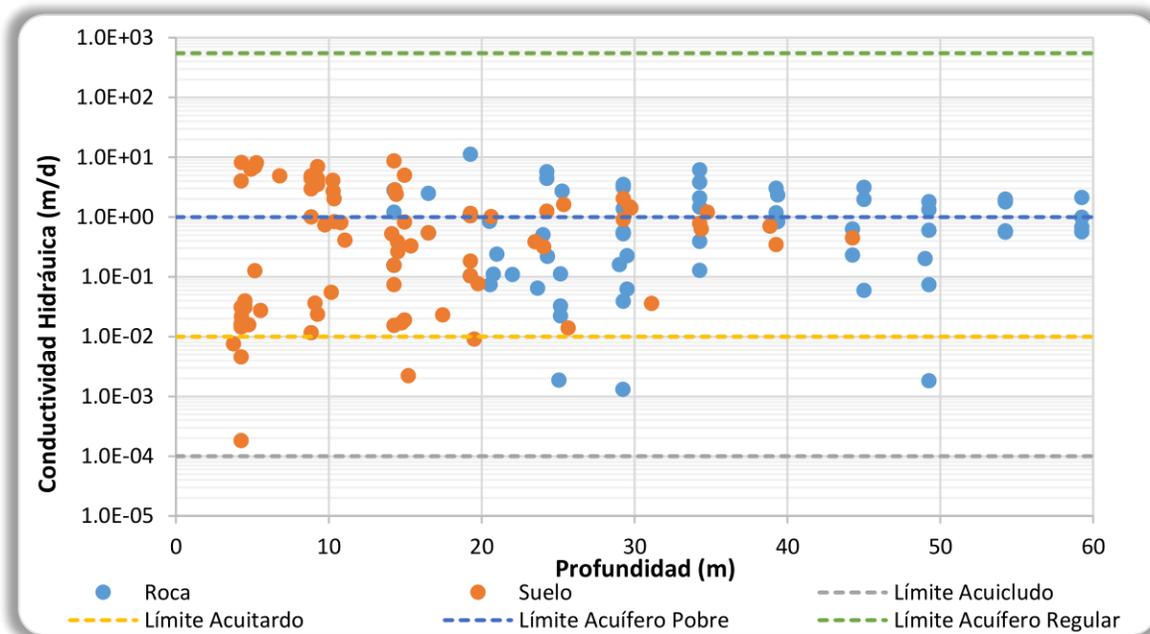
Fuente: Adaptado de (Custodio & Llamas, 1976).

Figura N° 031 Clasificación de terrenos por su transmisividad (m²/d)

T	1	10	10 ²	10 ³	
Calificación	Impemeables	Poco permeable	Algo permeable	Permeable	Muy permeable
Calificación del acuífero	Sin acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente
Tipo de materiales	Arcilla compacta. Pizarra. Granito.	Limo arenoso. Limo. Arcilla limosa.	Arena fina. Arena limosa. Caliza poco fracturada. Basaltos.	Arena limpia. Grava y arena. Arena fina. Caliza fracturada.	Grava limpia Dolomías, calizas muy fracturadas.

Fuente: Adaptado de (Custodio & Llamas, 1976)

Figura N° 032 Clasificación hidrogeológica de los ensayos realizados a los materiales cuaternarios y a la dolerita



Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura N°032** se puede apreciar que la gran mayoría de muestras analizadas se pueden clasificar como acuíferos pobres a regulares, y la minoría como acuitardos.

A partir de la conductividad hidráulica efectiva se han clasificado las litologías tal como se muestra es de tipo libre.

Cuadro N°044 Teniendo en cuenta los resultados se puede considerar que los depósitos cuaternarios y la roca fracturada (especialmente la dolerita) se pueden clasificar como acuíferos pobres y a profundidad (mayor a los 80 m) la roca se clasifica como acuitardo.

5.3.3 Unidades Hidrogeológicas

Teniendo en cuenta la información previa se han agrupado las unidades litológicas en las siguientes unidades hidrogeológicas.

UH-01: Acuífero pobre no consolidado, isotrópico y heterogéneo, formado por depósitos cuaternarios del tipo coluvio-aluvial y aluvial. Su extensión cubre el 98.6% del área de estudio y su profundidad media es de 32.2 m. Es de tipo libre.

Cuadro N° 044 Clasificación hidrogeológica según litología, conductividad hidráulica y transmisividad

Litología	Profundidad (m)	Espesor Potencial (m)	Espesor Saturado ⁽¹⁾ (m)	$K_{conceptual}$ (m/d)	T (m ² /d)	Tipo
Depósitos coluvio-aluviales	0-80	32.2	12.7	0.677	8.598	Acuífero Pobre
Depósitos aluviales	0-10	5.0	4.0	1.000	4.000	Acuífero Muy Pobre
Bloque Bajo (FVS)	0-60	60.0	50.0	0.020	1.000	Acuífero Muy Pobre
	60-500	400.0	400.0	0.001	0.400	Acuitardo
Bloque Alto Volcánico (HVOL)	0-80	80.0	70.0	0.100	7.000	Acuífero Muy Pobre
	80-500	400.0	400.0	0.005	2.000	Acuitardo
Bloque Alto (HVS)	0-70	70.0	60.0	0.050	3.000	Acuífero Muy Pobre
	70-500	400.0	400.0	0.005	2.000	Acuitardo
Brecha (Bx)	0-70	70.0	60.0	0.100	6.000	Acuífero Pobre
	70-500	400.0	400.0	0.002	0.800	Acuitardo
Dolerita (GDO)	0-80	80.0	70.0	0.661	46.270	Acuífero Pobre
	80-500	400.0	400.0	0.005	2.000	Acuitardo
Andesita (DAN)	0-80	60.0	40.0	0.100	4.000	Acuífero Muy Pobre

(1) Estimado a partir de la información piezométrica

Fuente: Elaboración propia.

UH-02: Acuífero pobre fisurado, anisotrópico y heterogéneo, formado por roca fracturada

del tipo volcano-sedimentario e intrusiones doleríticas en forma de sill. En superficie afloran andesitas cubriendo el 1.4 del Área de Estudio. Es de tipo libre.

UH-03: Acuitardo, anisotrópico y heterogéneo, formado por roca masiva del tipo volcano-sedimentario e intrusiones doleríticas en forma de sill. Se espera un comportamiento de este tipo en la roca del Área de Estudio a partir de los 60-80 m de profundidad medidos desde el contacto suelo-roca. Se espera un comportamiento cercano al semicautivo.

Las unidades hidrogeológicas conformada por el material rocoso presentan subdivisiones de acuerdo con la litología de sus componentes, y serán modeladas conservando los valores individualizados que se muestran en el ítem 5.2.

5.4 HIDRODINÁMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

5.4.1 Niveles Freáticos y Niveles Piezométricos

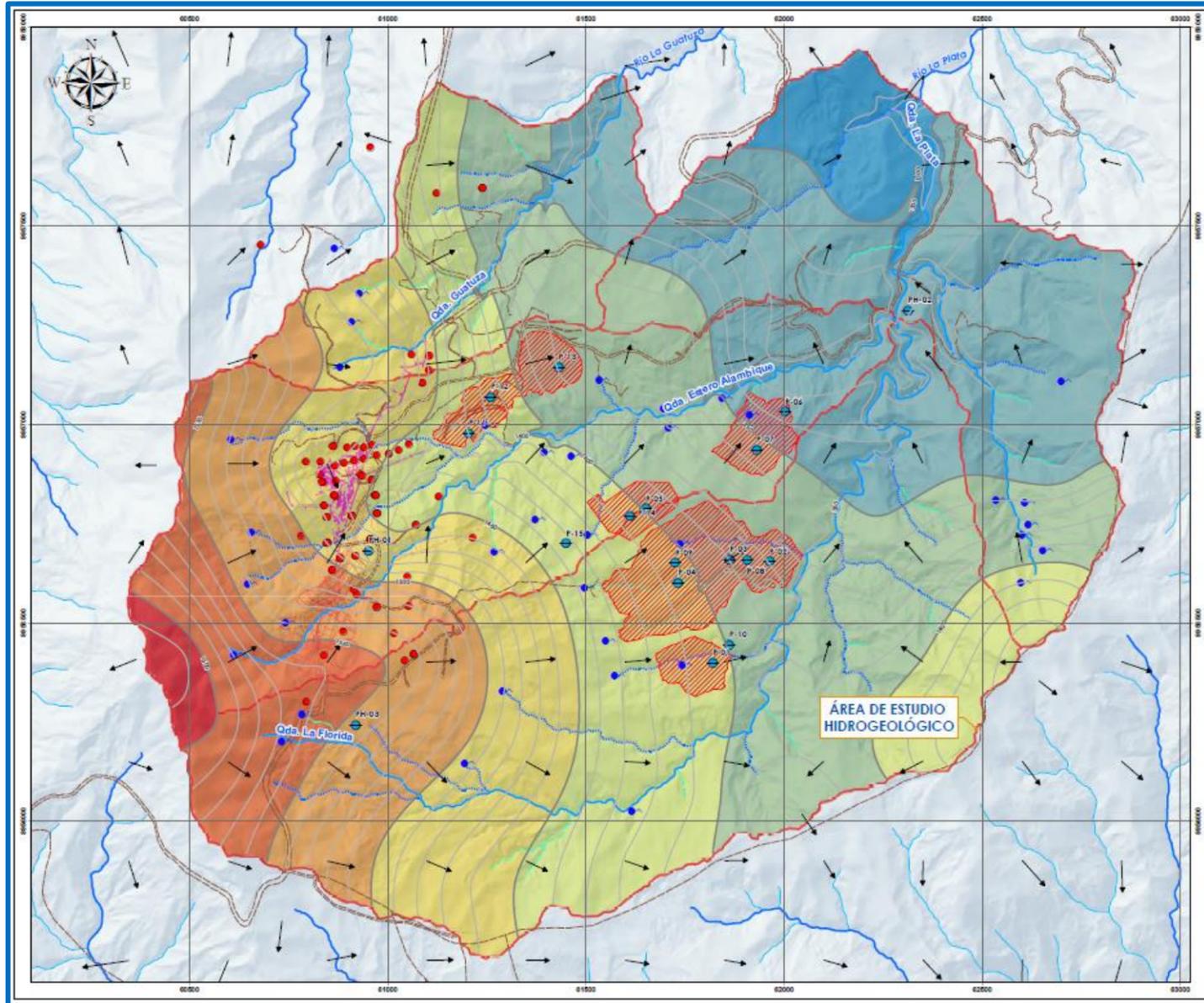
A partir de las mediciones del nivel de agua subterránea en los piezómetros instalados en el 2021 se puede apreciar un comportamiento similar del nivel freático, teniendo en cuenta que solo en los piezómetros P-02 y P-07 la zona ranurada se encuentra en los depósitos cuaternarios.

Si se ordena la información por profundidad de perforación se puede apreciar un cambio notable entre las mediciones del nivel de agua, variando entre 20 m para las perforaciones con profundidad entre 0 y 100 m, y de 40 m entre pozos con profundidades superiores a los 80 m, lo cual es indicativo de la presencia de dos sistemas de flujo con un flujo vertical descendente significativo.

Si en el área de interés es conocida la presencia de gradientes verticales, es recomendable realizar dos mapas de contornos, uno para el flujo somero y otro para el flujo del acuífero profundo (Kresic, 2007). Probablemente uno de los errores más comunes es el de mezclar las mediciones de piezómetros ubicados a diferentes profundidades con las zonas ranuras atravesando distintas unidades hidrogeológicas con gradientes verticales considerables, y realizar un mapa de contornos.

Teniendo en cuenta lo anterior se han delimitado los contornos del agua subterránea considerando dos sistemas de flujo, uno mixto (intergranular y a través de las zonas de roca más fracturada) de características libres, y otro en la zona más profunda (a través del sistema de fracturamiento reducido de la roca más competente) con características semiconfinadas (debido a la presurización intrínseca de la roca a esas profundidades) influenciado por los ríos más grandes del entorno (río Toachi y en menor medida el río

Figura N° 02 Mapa de niveles piezométricos del acuitardo inferior



Fuente: Elaboración propia.

En la en la **Figura N°033** se puede apreciar que el sentido del flujo subterráneo tiene una dirección predominante NE, siendo del tipo local predominantemente; con pequeña interacción local con las cuencas adyacentes. La gradiente promedio es de 23.52%, presentando mayores pendientes en las zonas de menor permeabilidad (parte este del Área de Estudio, donde la profundidad del suelo es menor y el flujo está controlado por la roca fracturada).

En la **Figura N°034** se puede apreciar que existen direcciones de flujo presentan direcciones predominantes NE, SE y E, influenciados por la presencia del río Toachi (ubicado en cotas inferiores). La gradiente promedio es de 17.15%, menor a la del acuífero pobre superior.

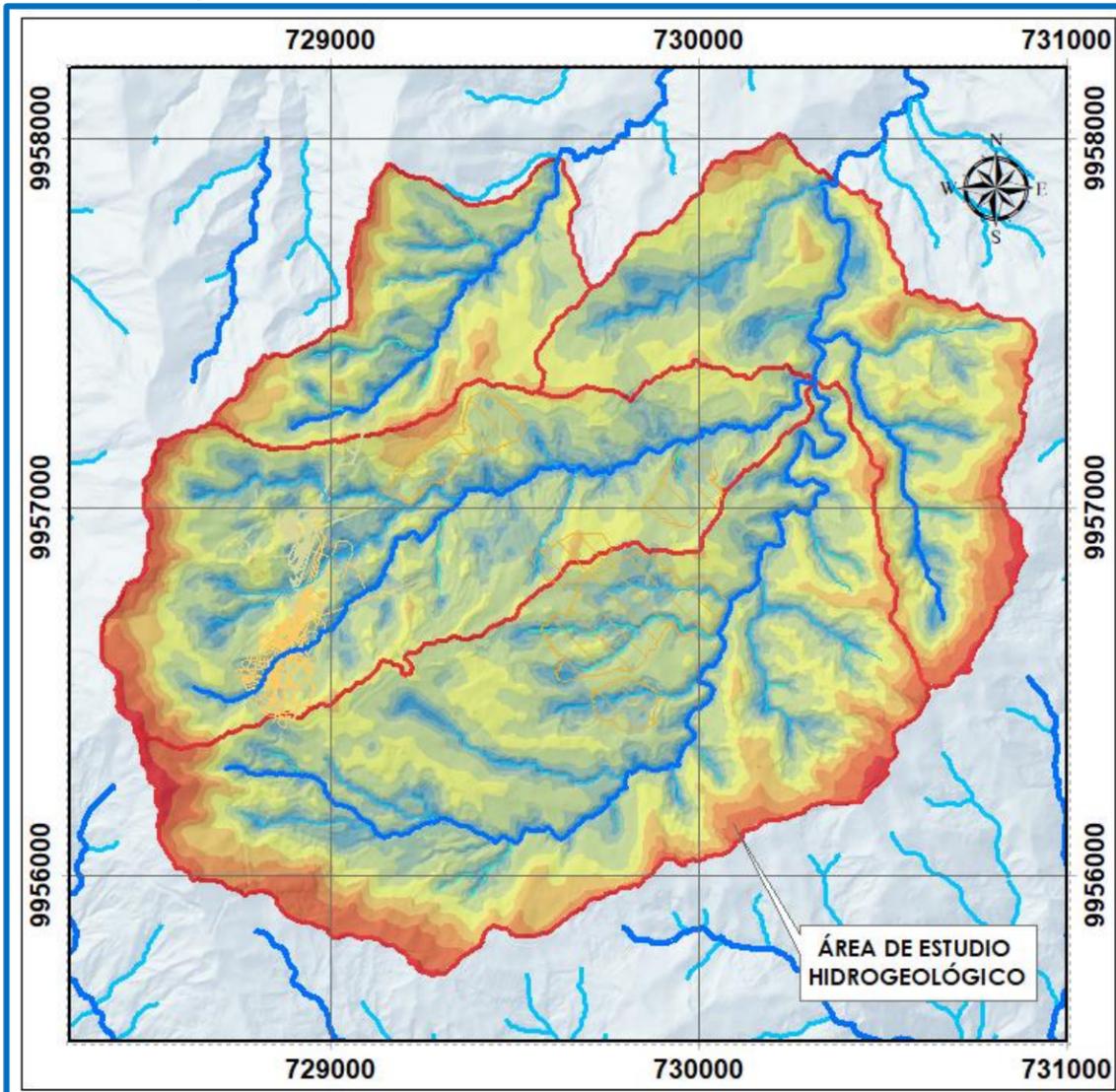
El nivel freático promedio se ubica a los 19.5 m de profundidad, variando entre los 90 m de profundidad en las zonas altas hasta los 0 m en las quebradas principales. El nivel de agua del acuitardo inferior se asume que se ubica en la zona de contacto con al acuífero superior, es decir entre los 80-120 de profundidad medidos desde la superficie.

5.4.2 Relación entre las Aguas Subterráneas y las Aguas Superficiales

La topografía es un indicador bastante obvio que permite proponer que la dirección del flujo del agua subterránea se dirige de las partes topográficamente altas (áreas de recarga) hacia las topográficamente bajas (áreas de descarga) o como lo define Hubbert (1940), el flujo siempre ocurrirá de regiones con cargas hidráulicas mayores hacia regiones de cargas hidráulicas menores. Lo anterior es algo evidente, pero en aguas subterráneas suceden casos que no concuerdan con lo mencionado anteriormente. En general el agua circula de los puntos en los que la columna de agua es más alta hacia aquellos en los que es más baja.

En el Área de Estudio las aguas subterráneas tienen flujos locales, intermedios y regionales alimentando las quebradas en las partes altas (a través de flujos locales), las partes medias y bajas (a través de flujos intermedios) y a los ríos principales del sistema hídrico regional (a través de los flujos regionales).

En la **Figura N°035** se pueden apreciar las zonas de recarga (profundidades mayores a 20 m), las zonas de transición (profundidades entre 5 y 20 m) y las zonas de descarga (profundidades menores a 5 m). Estas zonas son definidas por Toth (2009).

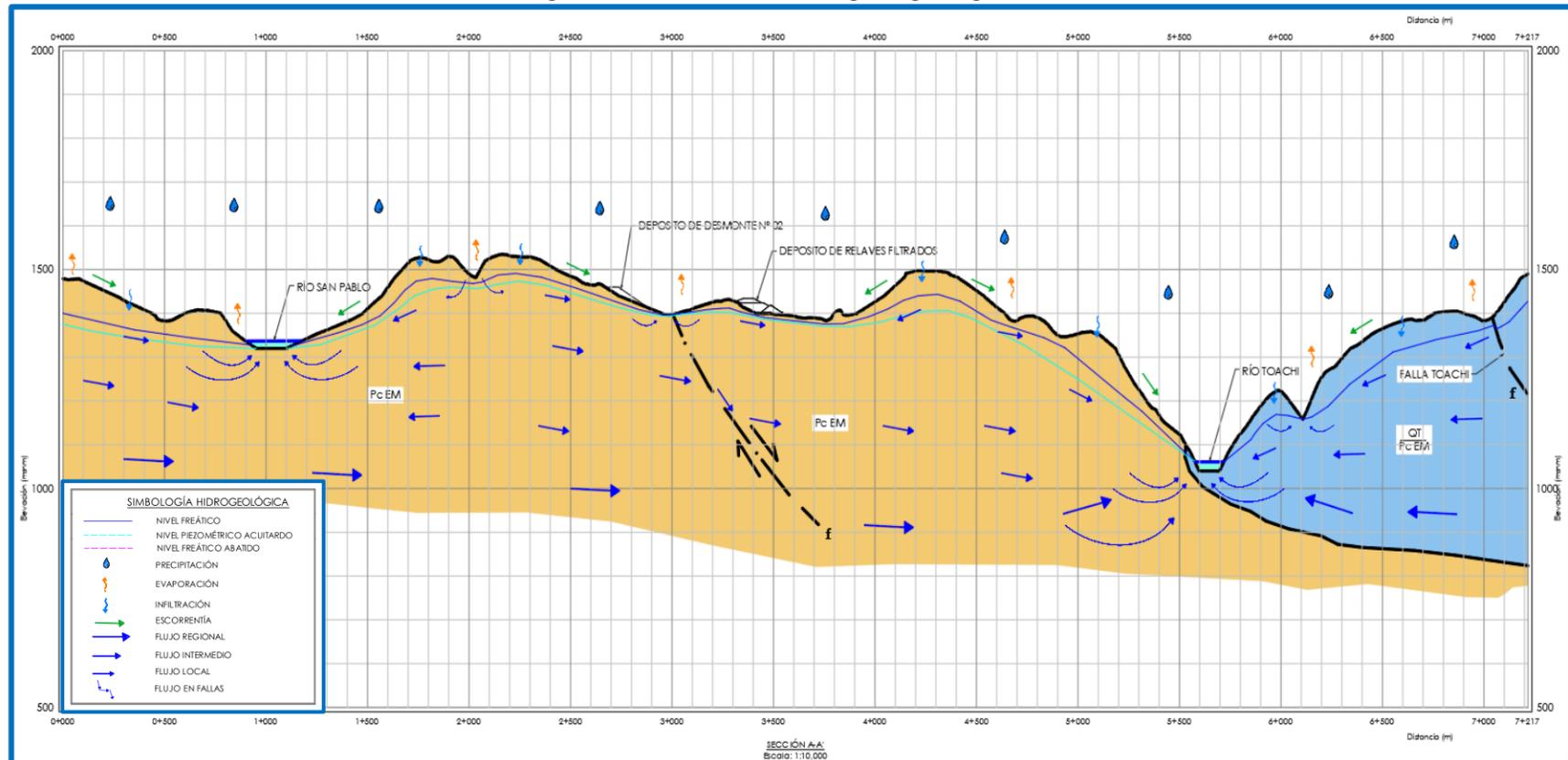
Figura N° 03 Mapa de profundidad del nivel freático del acuífero superior

Fuente: Elaboración propia.

En las partes iniciales de las quebradas presentan un comportamiento irregular, recargando el acuífero en los primeros meses de las épocas de estiaje (mientras mantienen flujo) y luego son recargados por el sistema acuífero en épocas de lluvias. En las partes medias y bajas las quebradas son recargadas por el sistema acuífero evidenciando caudal en todo el año.

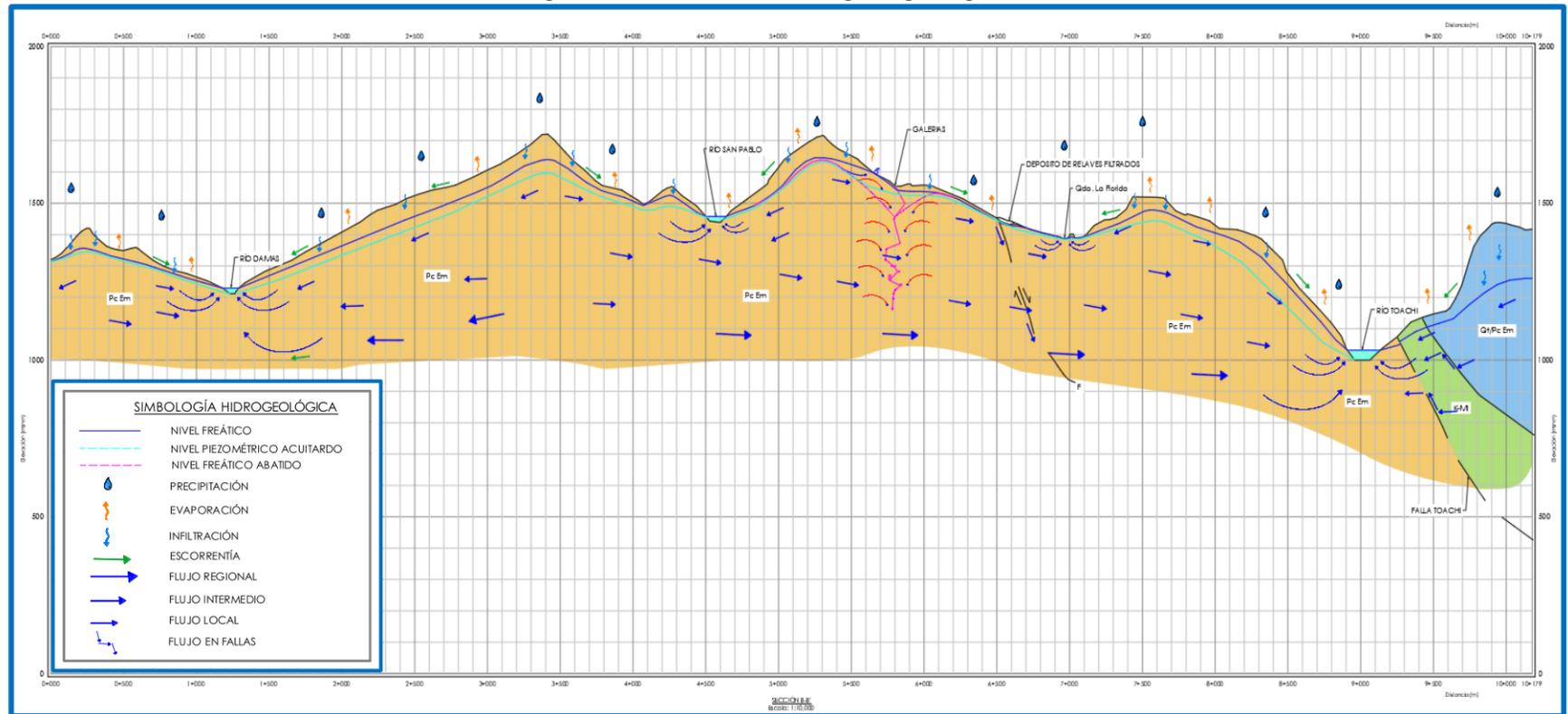
Los manantiales que se han identificado en el área de estudio presentan en su mayoría un caudal muy bajo, y considerando la recarga promedio en el Área de Estudio, le corresponden áreas de recarga menores a 0.30 km² (Custodio & Llamas, 1976).

Figura N° 02 Sección de hidrogeología regional A-A



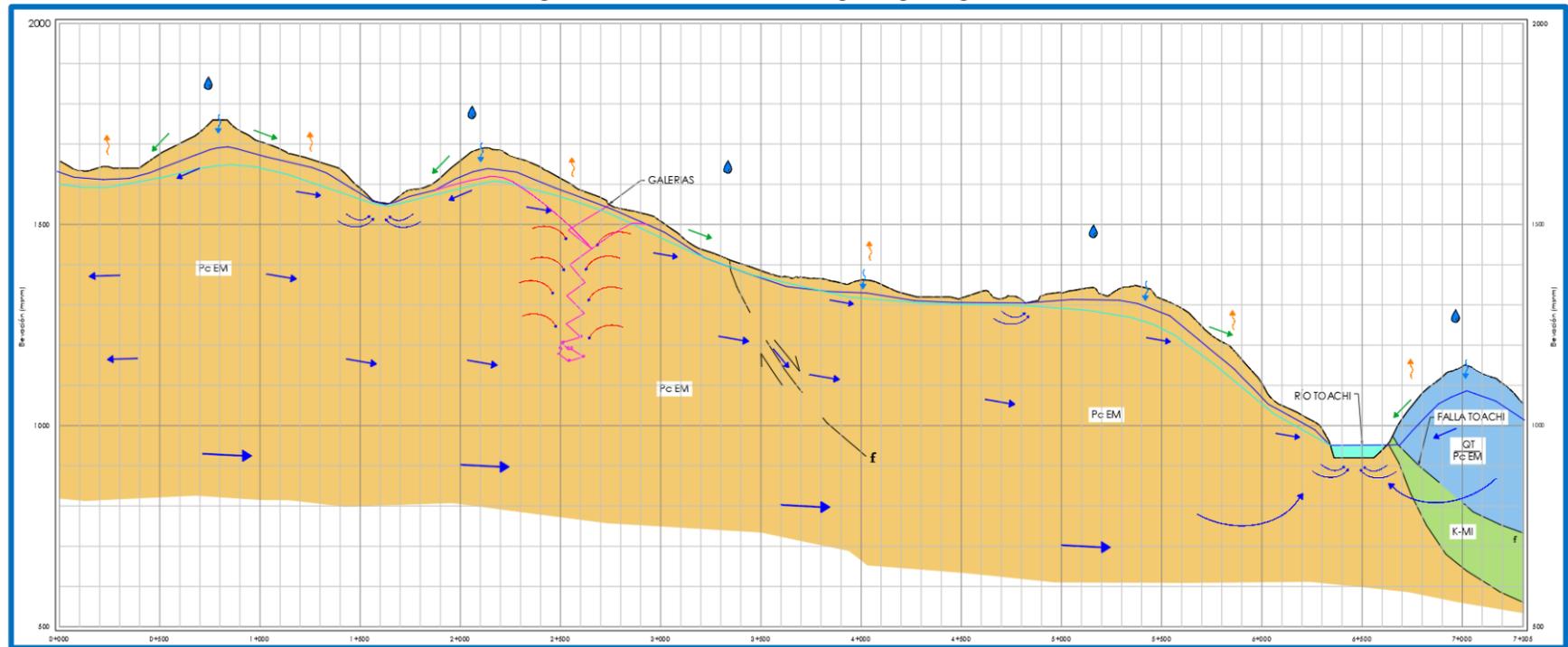
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 03 Sección de hidrogeología regional B-B



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 04 Sección de hidrogeología regional C-C



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en las **Figuras N°036 a 039** se presentan flujos locales, intermedios y regionales. Los flujos locales alimentan las quebradas adyacentes con recorridos menores, los flujos locales alimentan las quebradas en sus partes medias y bajas, y los flujos regionales alimentan los ríos principales como es el caso del río Toachi.

La recarga se produce principalmente en las partes altas (zonas de delimitación de cuencas) y las descargas se dan a nivel local en forma de manantiales y flujo base en las quebradas, y a nivel regional como flujo base de los ríos Toachi y en menor medida el río Damas. Existe un flujo de ingreso proveniente del río San Pablo.

De lo anterior podemos considerar como condiciones de frontera regional a los ríos Toachi y Damas.

6.2 MARCO HIDROGEOLÓGICO LOCAL

6.2.1 Sistema Hidrogeológico

De acuerdo a lo indicado se pueden discretizar tres (03) unidades hidrogeológicas en el Área de Estudio, cada una de ellas con subunidades correspondientes a sus litologías.

De los análisis de conductividad hidráulica e hidrodinámica del agua subterránea (vease el Capítulo 5) podemos agrupar las unidades hidrogeológicas UH-01 y UH-02 en un sistema acuífero de tipo mixto (intergranular y fracturamiento elevado), con características hidráulicas pobres, anisotrópico (la UH-01 se considerará isotrópica en el modelamiento numérico) y heterogéno, no cautivo, que se extiende por toda la superficie del Área de Estudio, con una profundidad variable entre 60 – 150 m.

Subyaciendo al acuífero se ubica un acuitardo formado por depósitos volcano sedimentarios e intrusiones dolériticas, el cual es anisotrópico y heterogéneo, semiconfinado, con un espesor preliminar de 400-500 m (como parte de la calibración del modelo numérico se variará el espesor de las unidades hidrogeológicas), siendo el límite conceptual la cota 1100 msnm.

6.2.2 Fuentes de Recarga

La principal fuente de recarga de los estratos permeables proviene de las precipitaciones que ocurren principalmente entre los meses de diciembre y abril. El periodo de recarga, para un año promedio, se entre los meses de febrero y junio, siendo el mes de marzo el que presenta mayor tasa de recarga (infiltración), en los demás meses del periodo de lluvias se presentan eventos de recarga, pero la descarga llega a igualar las tasas de almacenamiento por lo que se considera una recarga nula. En el resto de los meses la intensidad de recarga es nula dado que la precipitación que se almacenó en la zona no saturada del suelo no llega a infiltrarse profundamente.

Para el año seco la ETR representa el 57.91% de la precipitación, la escorrentía el 42.09% y no hay infiltración profunda. Para el año promedio la ETR es igual al 35.05% de la precipitación, la escorrentía al 60.75% y la infiltración profunda es el 4.20% (102.6 mm). Finalmente, para el año húmedo la ETR es el 15.99% de la precipitación, la escorrentía es el 76.37% y la infiltración profunda es el 7.64% (409.6 mm).

6.2.3 Zonas de Recarga y Descarga

Como se puede apreciar en la Figura N° 6.19 las zonas de recarga (profundidades del nivel freático mayores a 20 m) se dan en las partes altas del Área de Estudio. El acuífero superior presenta flujo vertical que recarga el acuitardo inferior.

Las zonas de transición (profundidades del nivel freático entre 5 y 20 m) ocurren en zonas de piedemonte y pueden considerarse como zonas de recarga local.

Las zonas de descarga (profundidades del nivel freático menores a 5 m) se ubican en torno a las quebradas y a nivel regional las principales zonas de descarga son los ríos Toachi y en menor medida el río Damas.

6.2.4 Sentido del Flujo Subterráneo

El sentido del flujo subterráneo somero tiene una dirección predominante NE, siendo del tipo local predominantemente; con pequeña interacción local con las cuencas adyacentes. La gradiente promedio es de 23.52%, presentando mayores pendientes en las zonas de menor permeabilidad (parte este del Área de Estudio, donde la profundidad del suelo es menor y el flujo está controlado por la roca fracturada).

Las direcciones de flujo profundo predominantes son NE, SE y E, influenciados por la presencia del río Toachi (ubicado en cotas inferiores). La gradiente promedio es de 17.15%, menor a la del acuífero pobre superior.

El nivel freático promedio se ubica a los 19.5 m de profundidad, variando entre los 90 m de profundidad en las zonas altas hasta los 0 m en las quebradas principales. El nivel de agua del acuitardo inferior se asume que se ubica en la zona de contacto con el acuífero superior, es decir entre los 80-120 de profundidad medidos desde la superficie. Existe un gradiente vertical descendente entre el acuífero superior y el acuitardo.

6.3 MODELO CONCEPTUAL EN ESTADO ACTUAL

A partir del análisis de las condiciones geológicas, geomorfológicas, hidrológicas e hidrodinámicas, complementadas con diversas investigaciones de campo, se ha llegado al planteamiento del modelo conceptual siguiente

1. El sistema hidrogeológico está conformado por un acuífero mixto (intergranular y roca con fuerte fracturamiento) superior y un acuitardo subyaciéndolo.
2. El modelo cuenta con tres estratos principales, el primero formado por material

cuaternario de espesor medio igual a 32.2 m. El segundo estrato está formado por rocas fracturadas, con profundidades variables (50-90 m, medidos desde el contacto suelo-roca) y el tercer estrato está formada por roca más competente y catalogada como acuitardo con una profundidad que alcanza los 400-500 m.

3. La recarga de agua subterránea se realiza principalmente por infiltración de precipitación controlada por la permeabilidad del macizo rocoso y la porosidad de los materiales no consolidados. Se estima que la recarga promedio para el área de estudio es del 14.24% de la precipitación media anual (347.9 mm).
4. Las zonas de recarga se ubican principalmente en las partes altas del Área de Estudio y las zonas de descarga preferente se ubican en las quebradas y en menor medida en zonas de laderas (manantiales).
5. La descarga de agua subterránea se refleja como flujos base en las quebradas del área de estudios (en promedio representa el 32.40% del caudal medio anual).
6. Los sistemas de flujo del agua subterránea somera imitan de cerca las microcuencas de agua superficial y siguen los gradientes topográficos, descargando su flujo en la red hídrica del área de estudio con una dirección preferente NE.
7. El flujo profundo presenta direcciones preferentes NE, SE y E, influenciado por los ríos Toachi y en menor medida por el río Damas.
8. El acuífero superior y el acuitardo se encuentran interconectados mediante recarga vertical descendente y zonas de descarga comunes (partes medias y bajas de las quebradas principales).
9. El mayor flujo de agua subterránea ocurre en los horizontes de macizo rocoso de mayor intemperización.
10. Las condiciones de frontera principales son los ríos Toachi y Damas.
11. Las fallas se consideran sistemas de flujo preferencial.

En la **Figura N°040** se muestra el plano hidrogeológico local, y en las **figuras N°041 a 046** las secciones hidrogeológicas locales.

6.4 INFLUENCIA DE LAS ACTIVIDADES MINERAS

La principal afectación del proyecto minero en el entorno hidrogeológico es el abatimiento de la napa freática producto del bombeo de agua para mantener en condiciones secas las galerías de explotación y el propio efecto dren que generarán las mencionadas galerías

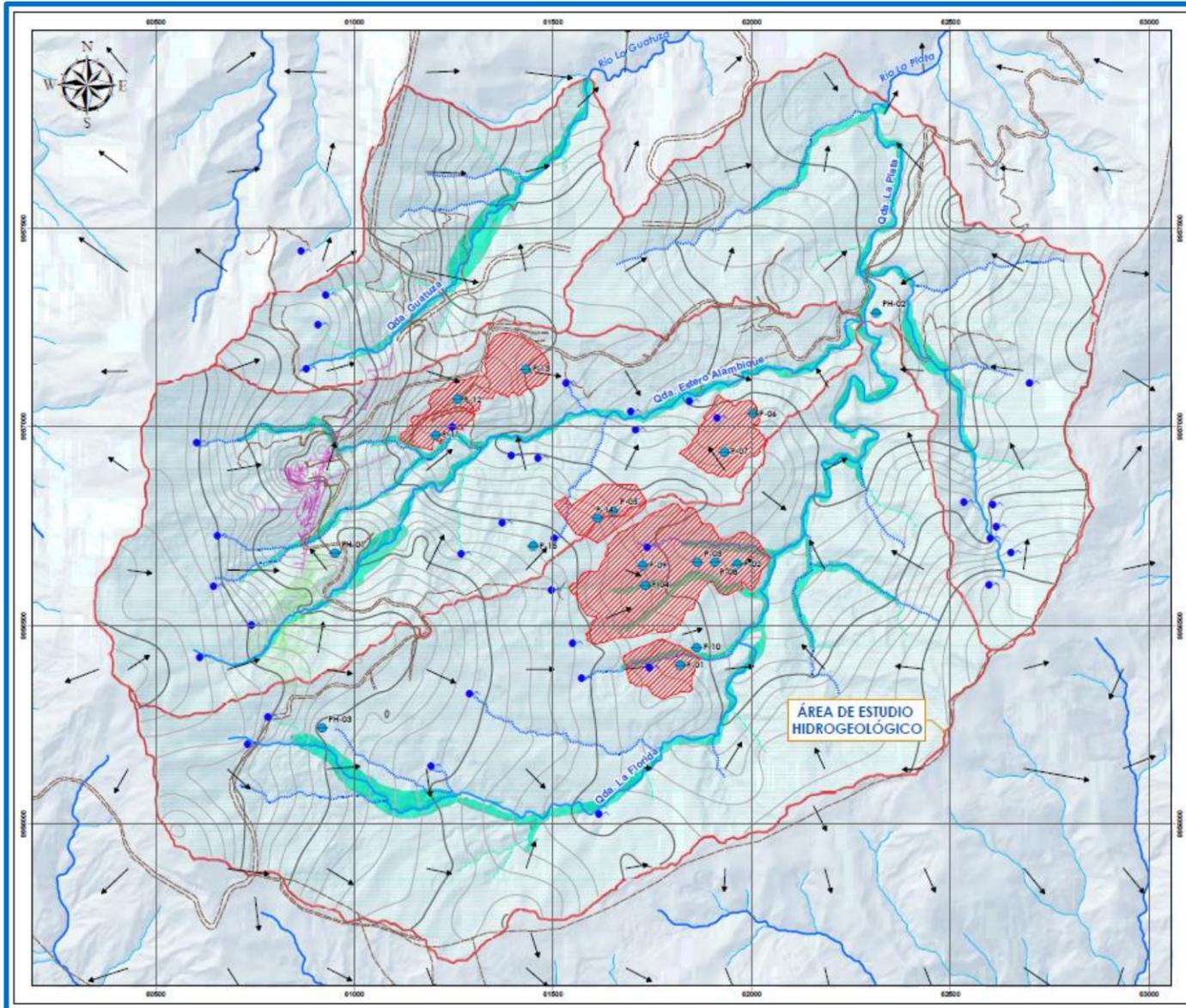
(son conductos preferentes de flujo).

Se espera que durante los trabajos de perforación se ubique agua subterránea somera a los 5-10 m de profundidad, y agua subterránea profunda entre los 50-60 m de profundización. El cálculo del abatimiento se realizará en el modelo numérico.

Otro de los impactos que pueden generar las actividades mineras es la de contaminación del nivel freático y/o piezométrico. Una primera aproximación de la ruta de contaminantes es la dirección de flujo que se muestra en las secciones hidrogeológicas locales. En estas se muestra que los flujos provenientes de los componentes descargarán en las quebradas adyacentes en tiempos más cortos y la profundización de la pluma contaminante llevará más tiempo (flujo horizontal mayor al flujo vertical).

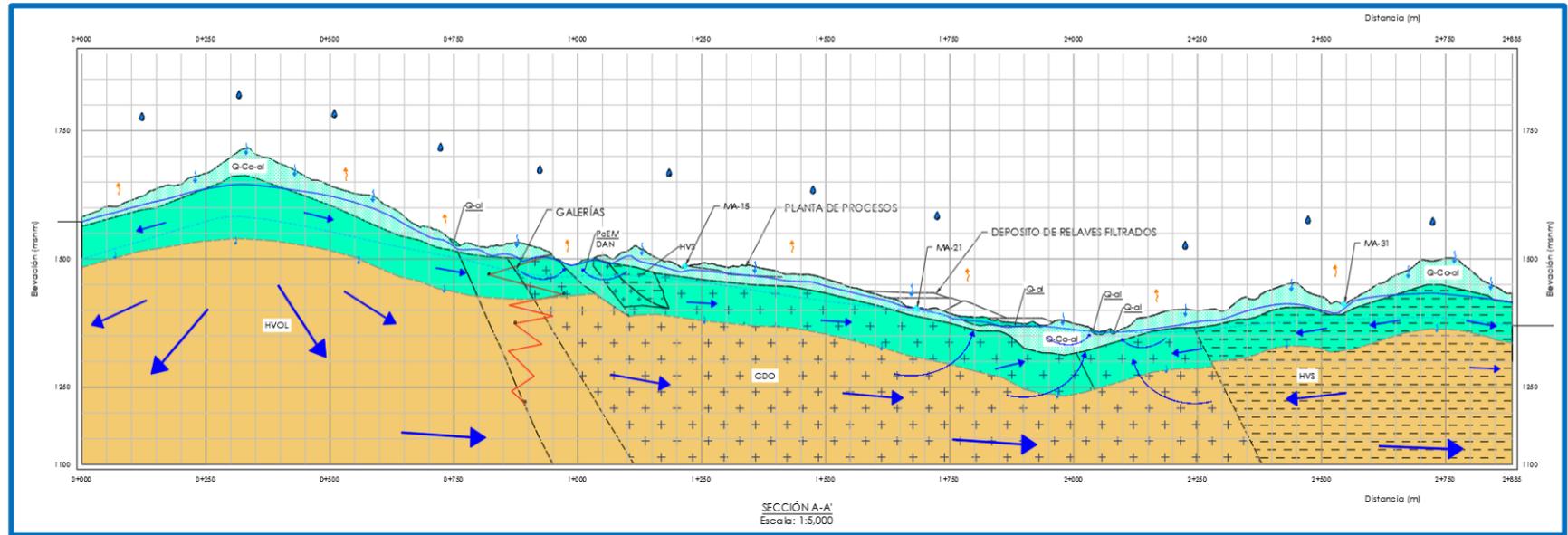
En el modelo numérico está contemplado la simulación de la ruta de contaminantes, el cual añade el tiempo de duración entre el proceso de contaminación y la descarga en los cuerpos hídricos circundantes.

Figura N° 05 Plano de hidrogeología local



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 06 Sección de hidrogeología local A-A

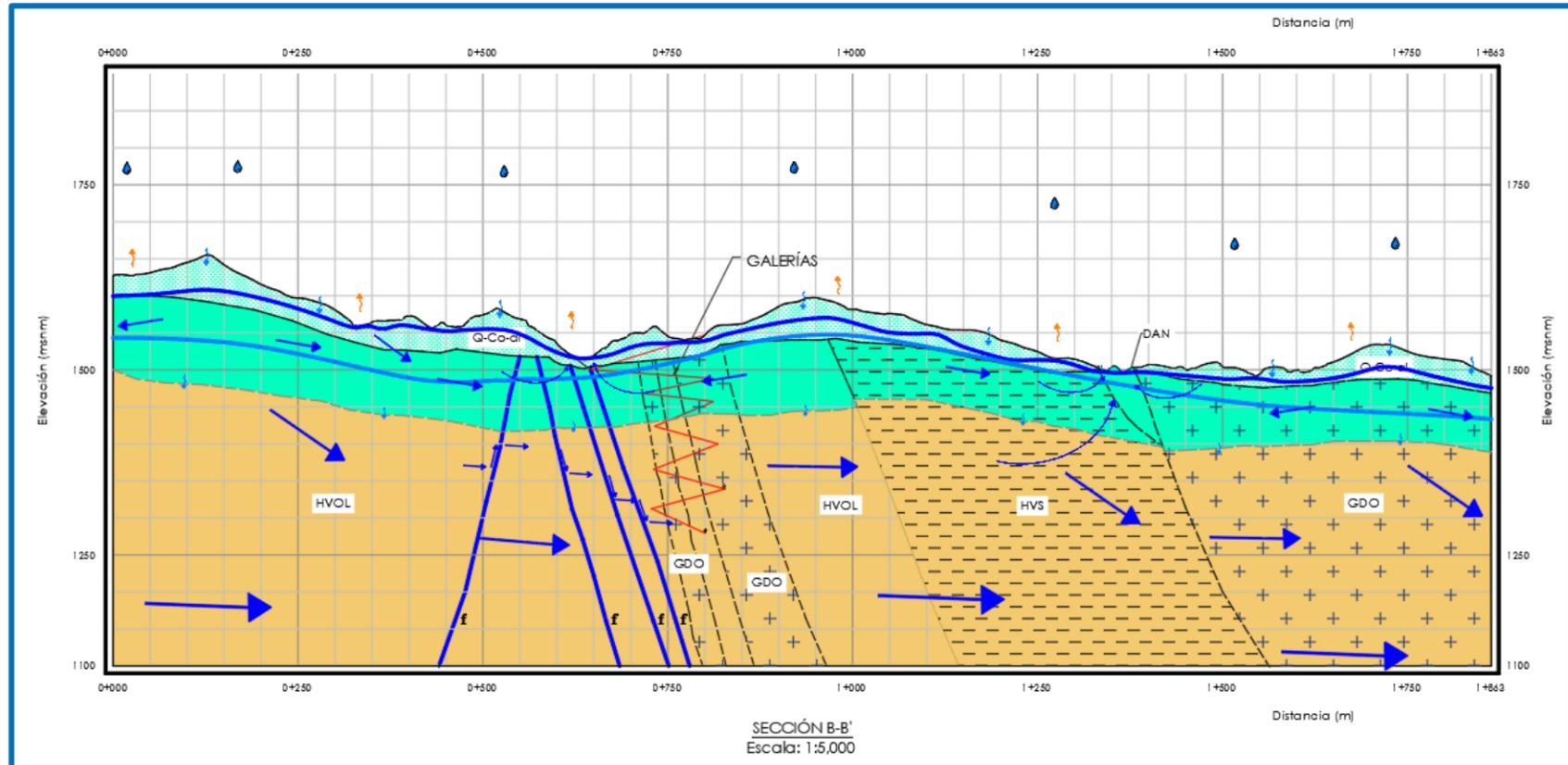


UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	DESCRIPCIÓN
	ACUÍFERO MIXTO SUPERIOR DE CALIDAD POBRE
	ACUITARDO FRACTURADO INFERIOR

SIMBOLOGÍA HIDROGEOLÓGICA	
	NIVEL FREÁTICO ACUÍFERO POBRE
	NIVEL PIEZOMÉTRICO ACUITARDO
	CONTACTO HIDROGEOLÓGICO
	PRECIPITACIÓN
	EVAPORACIÓN
	INFILTRACIÓN
	FLUJO REGIONAL
	FLUJO INTERMEDIO
	FLUJO LOCAL
	FLUJO EN FALLAS
	MANANTIALES

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 07 Sección de hidrogeología local B-B

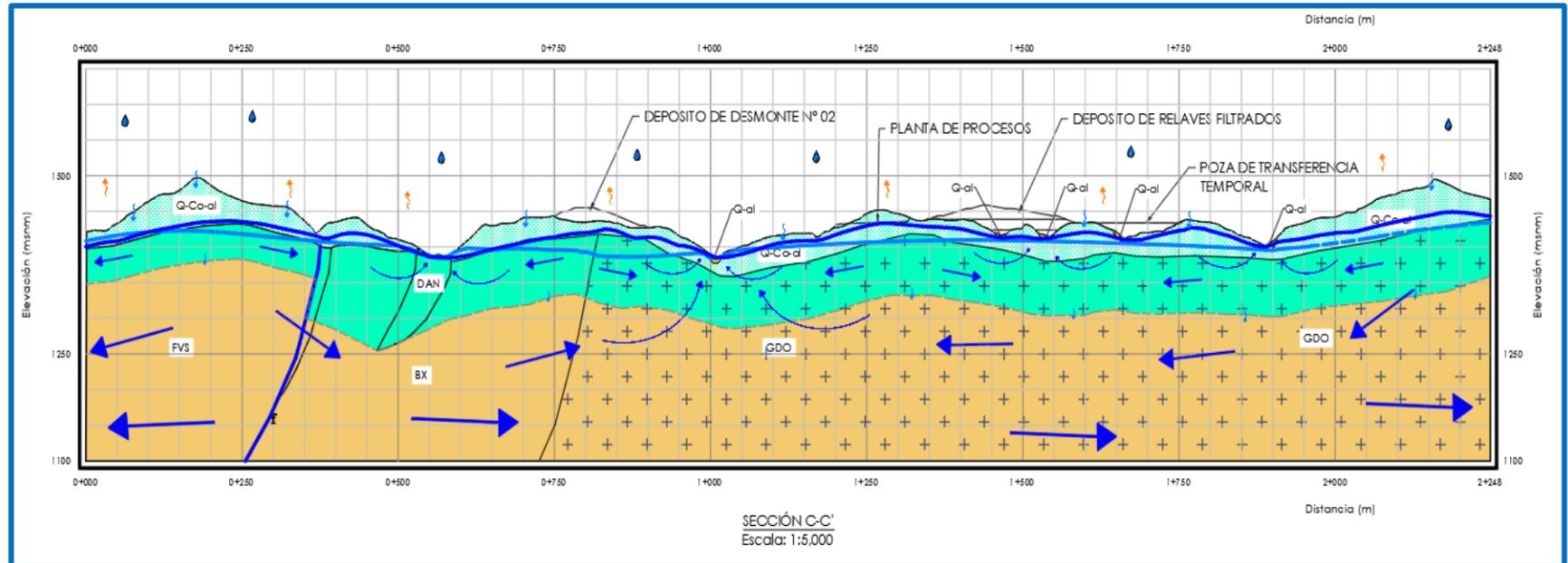


UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	DESCRIPCIÓN
	ACUÍFERO MIXTO SUPERIOR DE CALIDAD POBRE
	ACUITARDO FRACTURADO INFERIOR

SIMBOLOGÍA HIDROGEOLÓGICA	
	NIVEL FREÁTICO ACUÍFERO POBRE
	NIVEL PIEZOMÉTRICO ACUITARDO
	CONIACIO HIDROGEOLÓGICO
	PRECIPITACIÓN
	EVAPORACIÓN
	INFILTRACIÓN
	FLUJO REGIONAL
	FLUJO INTERMEDIO
	FLUJO LOCAL
	FLUJO EN FALLAS
	MANANTIALES

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 08 Sección de hidrogeología local C-C

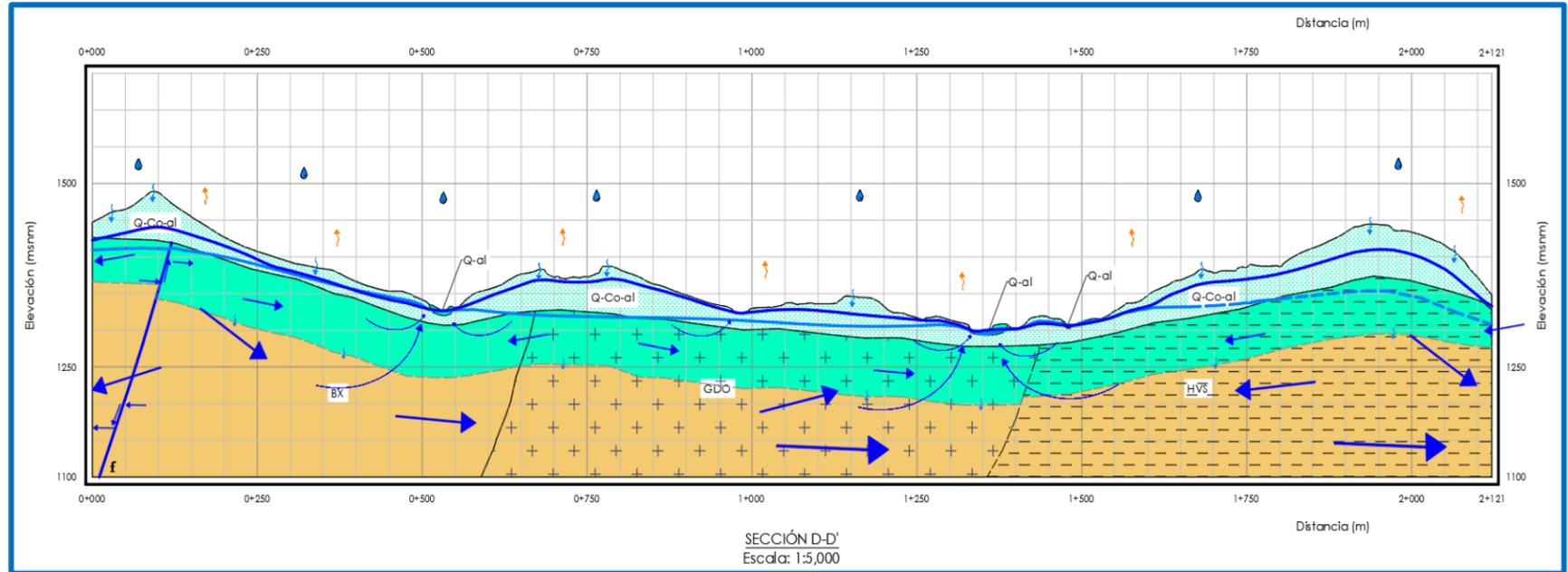


UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	DESCRIPCIÓN
	ACUÍFERO MIXTO SUPERIOR DE CALIDAD POBRE
	ACUITARDO FRACTURADO INFERIOR

SIMBOLOGÍA HIDROGEOLÓGICA	
	NIVEL FREÁTICO ACUÍFERO POBRE
	NIVEL PIEZOMÉTRICO ACUITARDO
	CONTACTO HIDROGEOLÓGICO
	PRECIPITACIÓN
	EVAPORACIÓN
	INFILTRACIÓN
	FLUJO REGIONAL
	FLUJO INTERMEDIO
	FLUJO LOCAL
	FLUJO EN FALLAS
	MANANTIALES

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 09 Sección de hidrogeología local D-D

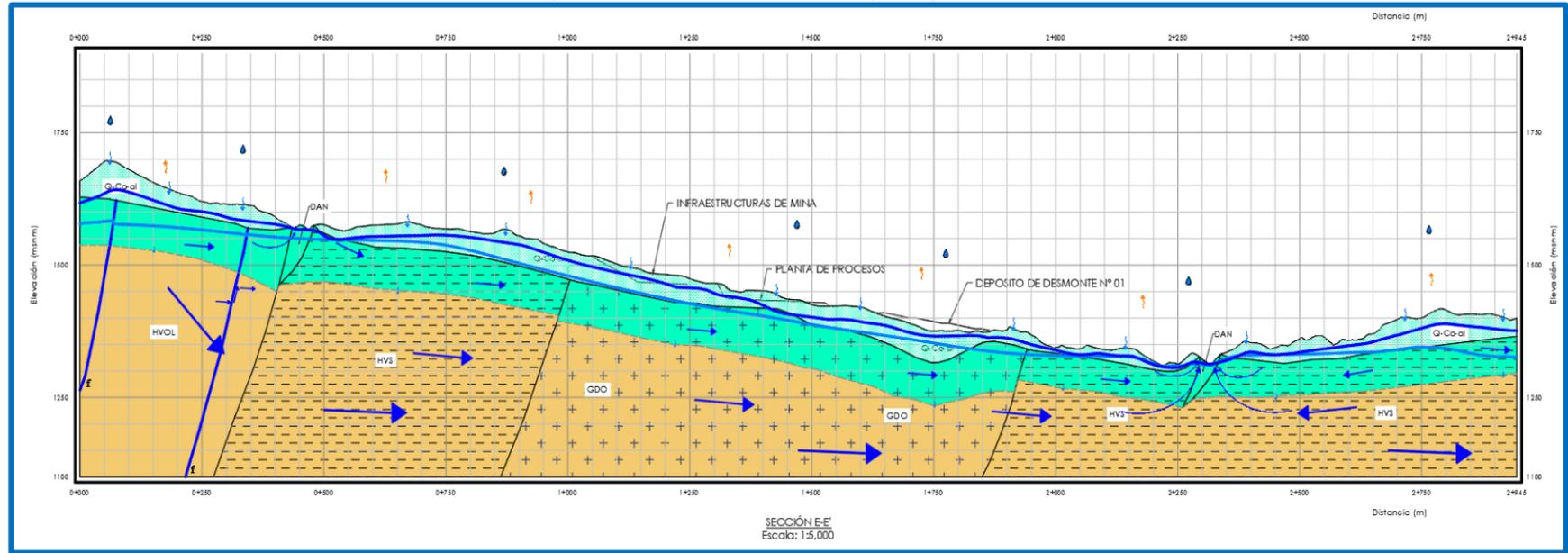


SIMBOLOGÍA HIDROGEOLÓGICA	
	NIVEL FREÁTICO ACUÍFERO POBRE
	NIVEL PIEZOMÉTRICO ACUITARDO
	CONTACTO HIDROGEOLÓGICO
	PRECIPITACIÓN
	EVAPORACIÓN
	INFILTRACIÓN
	FLUJO REGIONAL
	FLUJO INTERMEDIO
	FLUJO LOCAL
	FLUJO EN FALLAS
	MANANTIALES

UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	DESCRIPCIÓN
	ACUÍFERO MIXTO SUPERIOR DE CALIDAD POBRE
	ACUITARDO FRACTURADO INFERIOR

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 010 Sección de hidrogeología local E-E

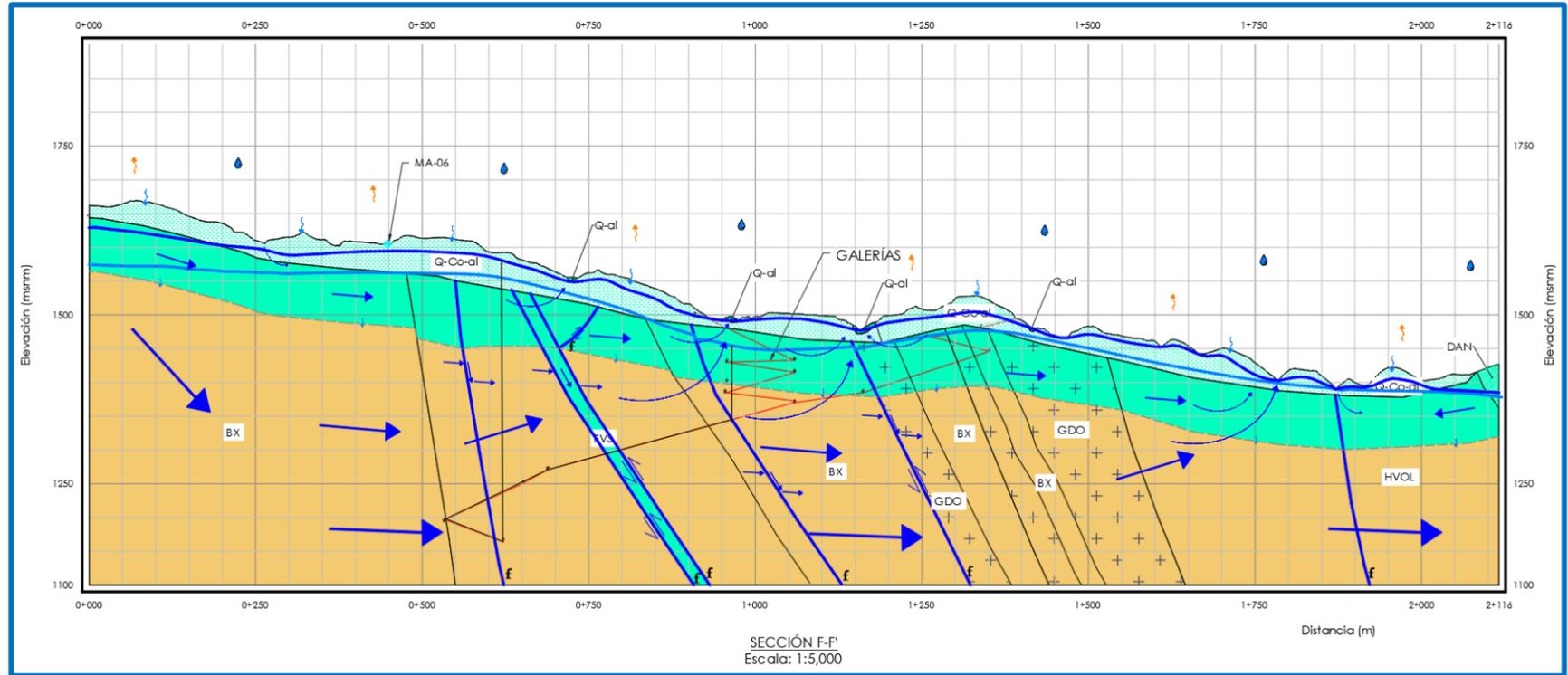


UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	DESCRIPCIÓN
	ACUÍFERO MIXTO SUPERIOR DE CALIDAD POBRE
	ACUITARDO FRACTURADO INFERIOR

SIMBOLOGÍA HIDROGEOLÓGICA	
	NIVEL FREÁTICO ACUÍFERO POBRE
	NIVEL PIEZOMÉTRICO ACUITARDO
	CONTACTO HIDROGEOLÓGICO
	PRECIPITACIÓN
	EVAPORACIÓN
	INFILTRACIÓN
	FLUJO REGIONAL
	FLUJO INTERMEDIO
	FLUJO LOCAL
	FLUJO EN FALLAS
	MANANTIALES

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 011 Sección de hidrogeología local F-F



UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	DESCRIPCIÓN
	ACUÍFERO MIXTO SUPERIOR DE CALIDAD POBRE
	ACUITARDO FRACTURADO INFERIOR

SIMBOLOGÍA HIDROGEOLÓGICA	
	NIVEL FREÁTICO ACUÍFERO POBRE
	NIVEL PIEZOMÉTRICO ACUITARDO
	CONTACTO HIDROGEOLÓGICO
	PRECIPITACIÓN
	EVAPORACIÓN
	INFILTRACIÓN
	FLUJO REGIONAL
	FLUJO INTERMEDIO
	FLUJO LOCAL
	FLUJO EN FALLAS
	MANANTIALES

Fuente: Elaboración propia.

7 MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO

7.1 DISEÑO DEL MODELO DE ACUÍFERO

7.1.1 Discretización del Sistema Acuífero

La discretización del sistema acuífero en diferencias finitas ha sido realizada empleando mallas cuadradas $\Delta x = 10 \text{ m}$ y $\Delta y = 10 \text{ m}$, habiéndose discretizado el sistema acuífero mediante 228 filas y 254 columnas, haciendo un total de 57 912 mallas que cubren aproximadamente 5.79 km² de superficie; de estas celdas 39 242 son celdas activas cubriendo el área de modelamiento de 3.90 km². El sistema acuífero discretizado se muestra en la **Figura N°047**.

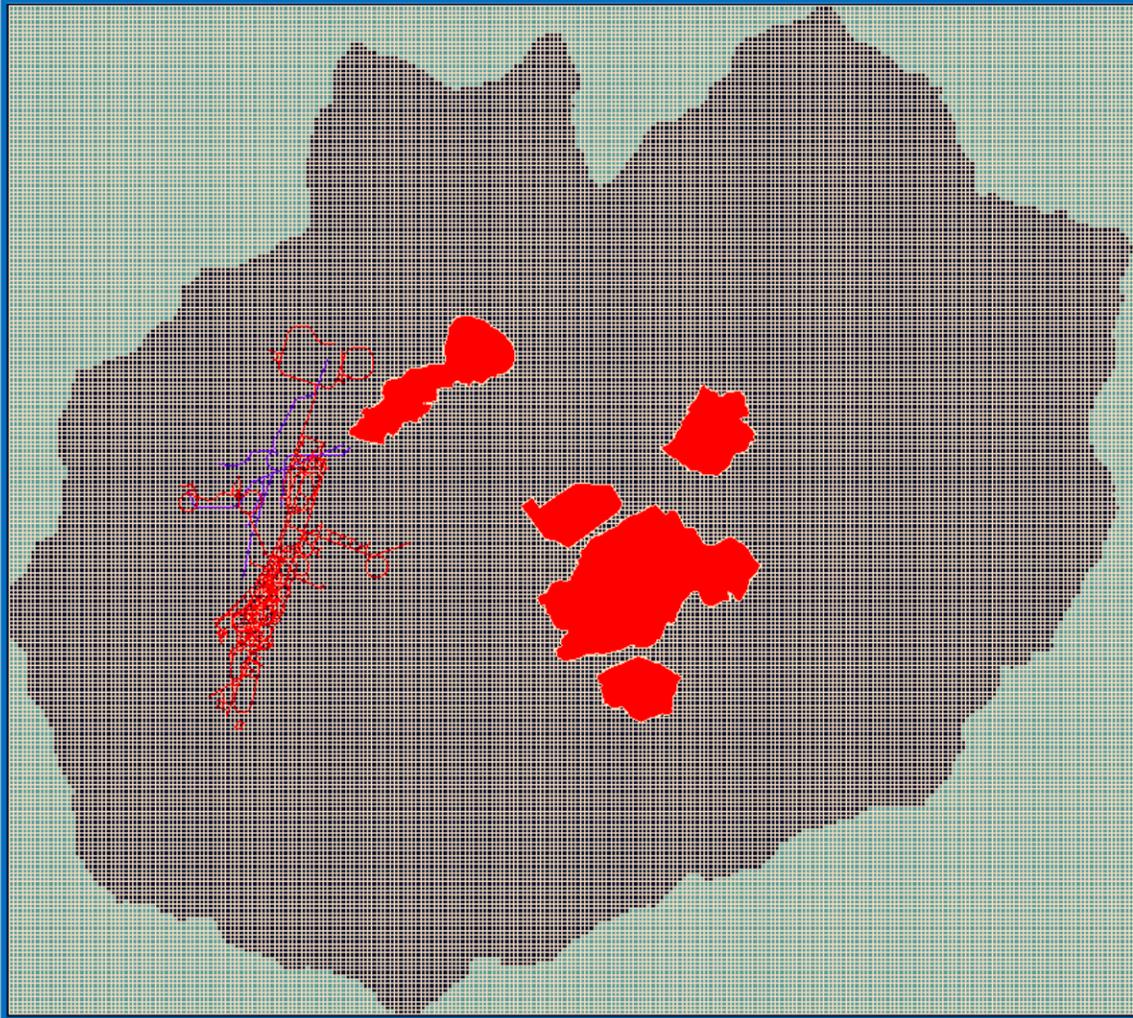
Unidades

Las unidades empleadas para las variables del modelo se indican en el **Cuadro N°043**.

Cuadro N° 045 Unidades utilizadas en el modelo

Variable	Unidad
Longitud	m
Conductividad hidráulica	m/d
Recarga y ETo	mm/año
Descarga	m ³ /d
Tiempo	días

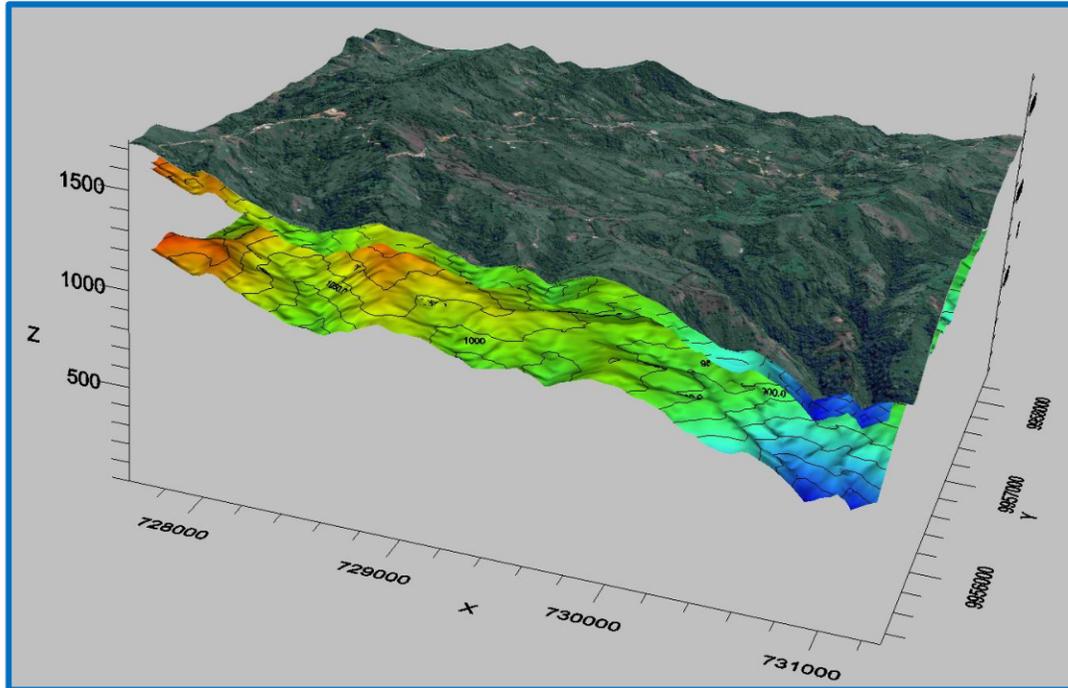
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 012 Discretización del sistema acuífero y componentes proyectados de la U.M. La Plata

Fuente: Elaboración propia.

7.1.2 Número de Capas y Tipo de Acuífero

El modelo de flujo del agua subterráneo ha sido discretizado verticalmente en trece estratos de espesor variable; los dos primeros estratos son de 5 m cada uno, seguidas de 6 estratos de 10 m de espesor cada uno y las cuatro últimas capas son de 100 m cada una, totalizando 500 m. Ciertas partes de la unidad hidrogeológica UH-01 y la UH-02 del modelo conceptual son de poca potencia por lo que han sido modeladas como una capa mixta (considerando en profundidad la presencia de roca volcánica). Véase la **Figura N°048**.

Figura N° 013 Vista satelital del área del modelo y estratos modelados.

Fuente: Elaboración propia.

7.1.3 Condiciones de Frontera

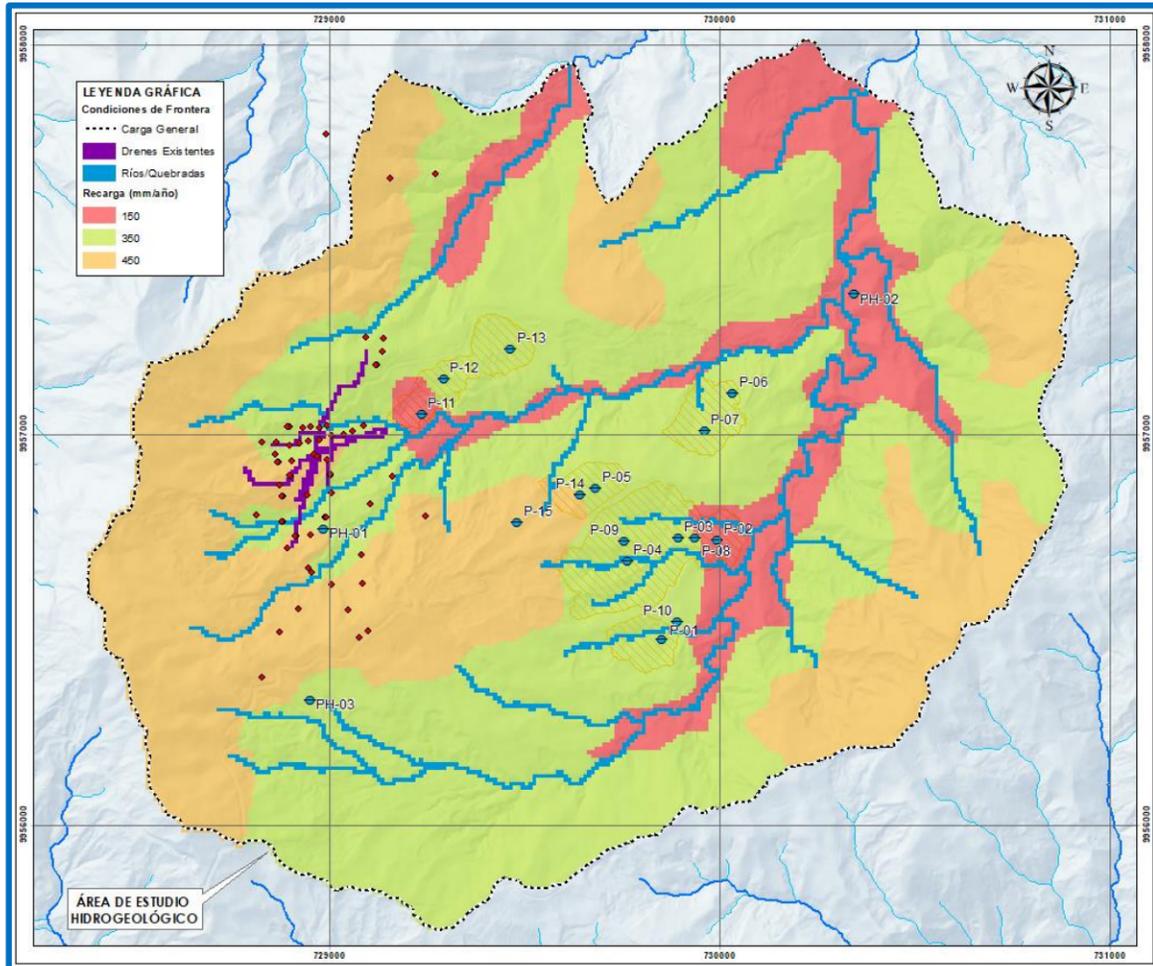
Las condiciones de frontera son planteamientos matemáticos que especifican la variable dependiente (carga) o la derivada de la variable dependiente (flujo) del sistema acuífero. Las fronteras hidrogeológicas son representadas por tres tipos de condiciones matemáticas:

- Tipo 1: Fronteras con cargas especificadas (condición de Dirichlet) para las cuales la carga es dada.
- Tipo 2: Fronteras con flujo especificado (condiciones de Neumann) para las cuales la derivada de la carga (flujo) a través de la frontera es dada.
- Tipo 3: Fronteras con flujo dependiente de las cargas (condición de Cauchy o mixta) para el cual el flujo a través de la frontera es calculado para una carga especificada en la frontera.

Se ha identificado dos tipos de condiciones de frontera, la (i) condición de frontera tipo II (flujo impuesto), constituido por la intensidad de recarga neta producto de la intensidad de precipitación, y la condición de frontera tipo III (flujo dependiente de la carga hidráulica), las cuales están definidas como el curso de los ríos y quebradas, drenes, y, zonas de ingreso y/o salida de flujo (límites de cuenca).

La recarga se aplicó a toda el área de estudio (discretizándose en tres zonas), se modelaron las quebradas Estero Alambique, La Florida y La Guatuza, así como un tramo del río La Plata, y algunos afluentes menores. Adicionalmente se modelaron flujos de ingreso y/o salida en los límites del modelo, tal como se puede apreciar en la **Figura N°049**.

Figura N° 014 Condición de frontera del tipo river, drenes, carga general y recarga utilizados en el modelo numérico.



Fuente: Elaboración propia.

7.1.4 Parámetros de Entrada del Modelo

7.1.4.1 Conductividad Hidráulica

Las unidades hidrogeológicas definidas en el modelo conceptual se han modelado en cada uno de los estratos que le corresponden. Las unidades UH-04, UH-05, UH-06, UH-07 y UH-08 se han modelado con tres valores de conductividad hidráulica diferentes cada uno según el estrato que le corresponda. Esta conceptualización es la misma que se discute en los capítulos 7 y 8. En el **Cuadro N°044** se presentan los valores asumidos y los valores

calibrados medios de las conductividades hidráulicas.

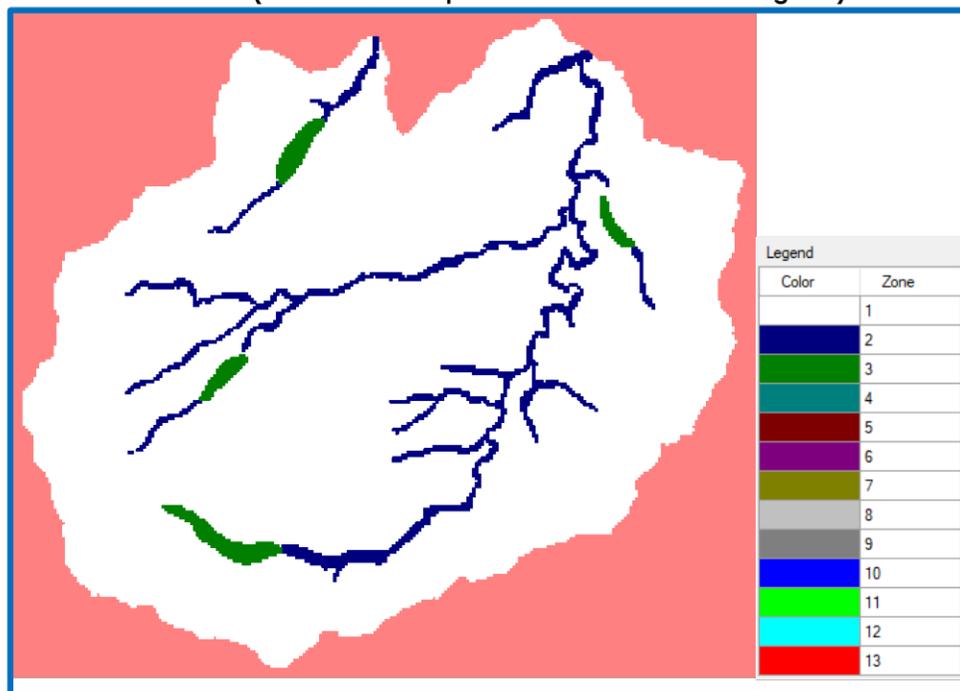
Cuadro N° 046 Conductividad hidráulica por unidades litológicas y estratos del modelo.

Unidad Litológica	Zona del Modelo	Estratos	Conductividad Hidráulica en el Eje X e Y (cm/s)		Conductividad Hidráulica en el Eje Z (cm/s)	
			Conceptual	Calibrada	Conceptual	Calibrada
Depósitos coluvio-aluviales	1	1-8	0.677	0.300	0.677	0.300
Depósitos aluviales	2	1-2	1.000	1.000	1.000	1.000
Bloque Alto Volcánico (HVOL) – Andesita (DAN)	3	1-8	0.100	0.075	0.070	0.054
Dolerita (GDO)	4	2-8	0.661	0.200	0.465	0.140
Bloque Alto (HVS)	5	2-8	0.050	0.050	0.035	0.035
Bloque Bajo (FVS)	6	2-8	0.020	0.020	0.014	0.014
Brecha (Bx)	7	3-8	0.100	0.100	0.070	0.070
Bloque Alto Volcánico (HVOL)	8	9-13	0.005	0.010	0.0035	0.007
Dolerita (GDO)	9	9-13	0.005	0.0025	0.0035	0.00175
Bloque Alto (HVS)	10	9-13	0.005	0.005	0.0035	0.0035
Bloque Bajo (FVS)	11	9-13	0.001	0.001	0.0007	0.0007
Brecha (Bx)	12	9-13	0.002	0.001	0.0014	0.0007
Fallas	13	3-13	0.200	0.200	0.200	0.400

Fuente: Elaboración propia.

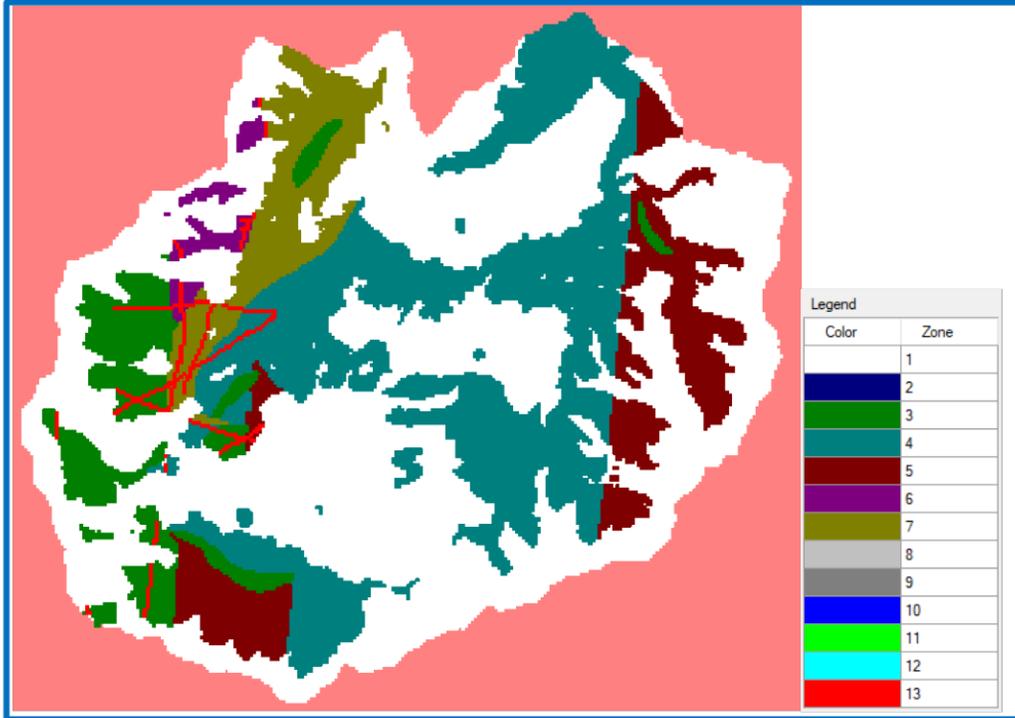
En las **Figuras N°049 a N°051** se puede apreciar la vista en planta de la distribución de la conductividad hidráulica para el modelo en análisis.

Figura N° 015 Vista de la conductividad hidráulica asignada al primer estrato del modelo numérico (las zonas corresponden a las unidades litológicas)



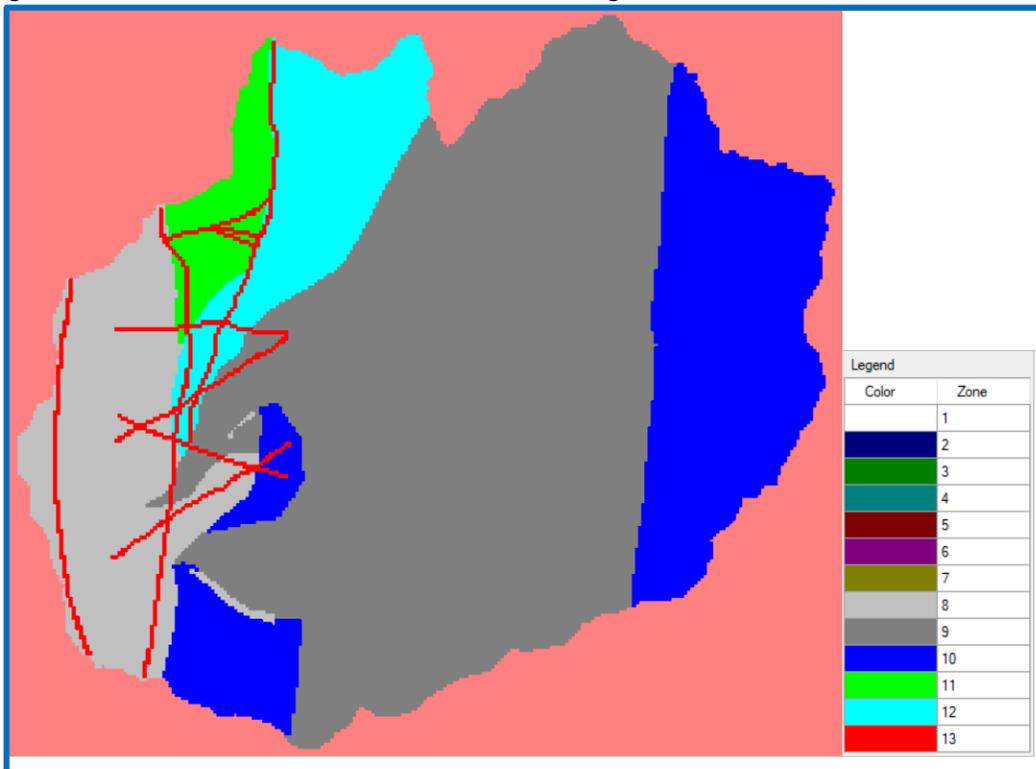
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 016 Vista de la conductividad hidráulica asignada al modelo numérico en el estrato 5



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 017 Vista de la conductividad hidráulica asignada al modelo numérico en el estrato 9.



Fuente: Elaboración propia.

7.1.4.2 Parámetros de Almacenamiento

Los valores del coeficiente de almacenamiento (S_s), rendimiento específico (S_y), porosidad eficaz (n_e) y porosidad total (n) para las capas modeladas se presentan en el **Cuadro N°045**

Cuadro N° 047 Parámetros de almacenamiento por capas

Zona	Estratos	Coficiente de Almacenamiento (S_s)	Rendimiento Específico (S_y)	Porosidad Eficaz (n_e)	Porosidad Total (n)
1	1-8	0.0001	0.15	0.15	0.25
2	1-2	0.0001	0.15	0.15	0.25
3	1-13	0.00001	0.03	0.03	0.10
4	2-13	0.00001	0.02	0.02	0.05
5	2-13	0.00001	0.02	0.02	0.15
6	2-13	0.00001	0.02	0.02	0.10
7	2-13	0.00001	0.03	0.03	0.15

Fuente: Elaboración propia.

7.1.4.3 Superficies Potenciométricas

Las construcción de las alturas potenciométrica en la zona de estudio se realizó a partir del DEM de la superficie natural y las aturas piezométricas recopiladas, realizando un cruce de información con la ayuda de herramientas GIS, el cual involucró la simplificación para representar la superficie potenciométrica de la zona de estudio sin variaciones de pequeña escala y permitiendo que los contornos caigan mucho más bajo que la superficie del terreno en promontorios, lomos aislados, y áreas de altiplanicie sin datos de pozos.

Los cauces de cursos de agua, filtraciones y zonas de descarga mapeadas se utilizaron como guías en los casos en que las elevaciones del contorno de agua subterránea eran iguales a las elevaciones de la superficie.

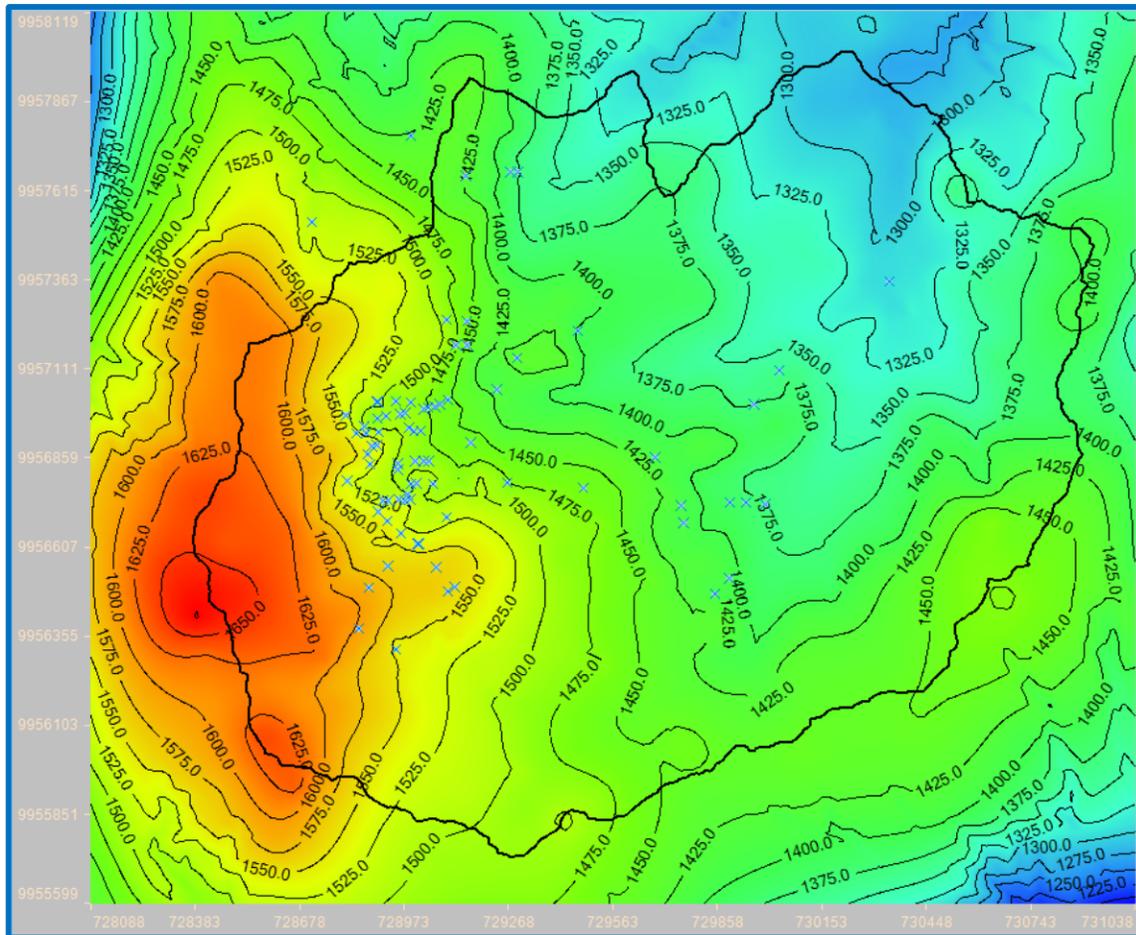
Las mediciones disponibles de carga de flujo se usaron con interpolaciones lineales entre piezómetros y modelos de elevaciones con fluctuaciones de carga y la ecuación de energía, para posteriormente construir un sistema piezométrico en toda la zona de estudio.

En el área de estudio donde no se contaba con mucha información se usó como guía la literatura para describir las características hidráulicas según la estratigrafía y el tipo de material.

En la **Figura N°052** se puede apreciar las cargas piezométricas iniciales utilizadas para las capas 1-8 en el modelo estacionario, así como los piezómetros existentes y perforaciones utilizados en la calibración del modelo.

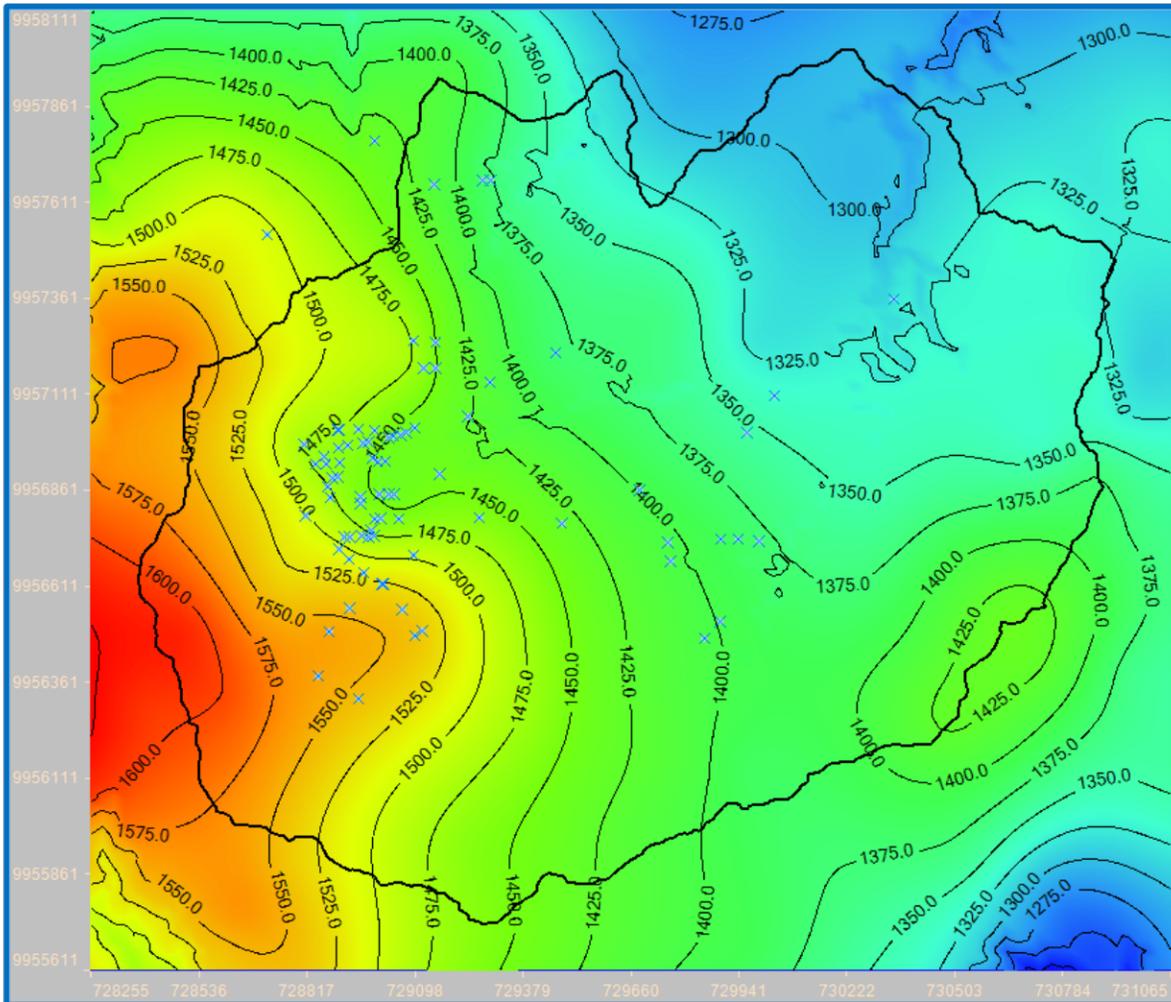
En la **Figura N°053** se muestran las cargas piezométricas de las capas 9-13 del modelo estacionario, tal como se indica en el modelo conceptual.

Figura N° 018 Cargas piezométricas iniciales utilizadas en las capas 1-8 del modelo numérico estacionario



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 019 Cargas piezométricas iniciales utilizadas en las capas 9-13 del modelo numérico estacionario



Fuente: Elaboración propia.

7.2 MODELO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO

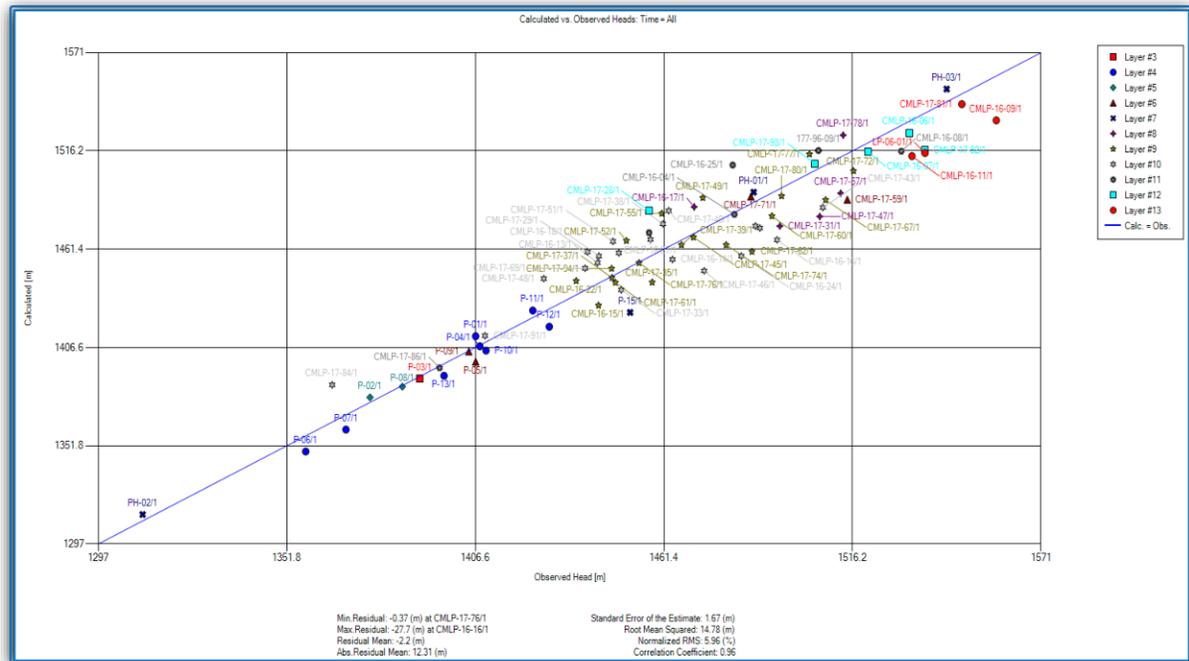
El proceso de calibración del modelo en régimen estacionario ha consistido en minimizar la carga observada en los puntos de observación y las calculadas por el modelo, mediante la modificación de la conductividad hidráulica inicialmente ingresada, así como la conductancia del lecho de ríos, lagos, zonas de carga variable y la recarga.

7.2.1 Resultados de la Calibración

El modelo ha sido calibrado para un año promedio, utilizando las mediciones recopiladas de los niveles de agua en los piezómetros del área de estudio. En la **Figura N°054**, se muestra la diferencia entre las cargas observadas y calculadas en los piezómetros existentes (medidas entre junio y agosto de 2021), cuantificadas mediante los estadísticos

principalmente por la raíz media cuadrática normalizada es igual a 5.96%, valor que se encuentran en el rango de los modelos apropiadamente calibrados. Los residuales varían entre -0.37 m (CMLP-17-76) y -27.70 m (CMLP-16-16), el residual medio es igual a -2.20 m y el residual absoluto es de 12.31 m.

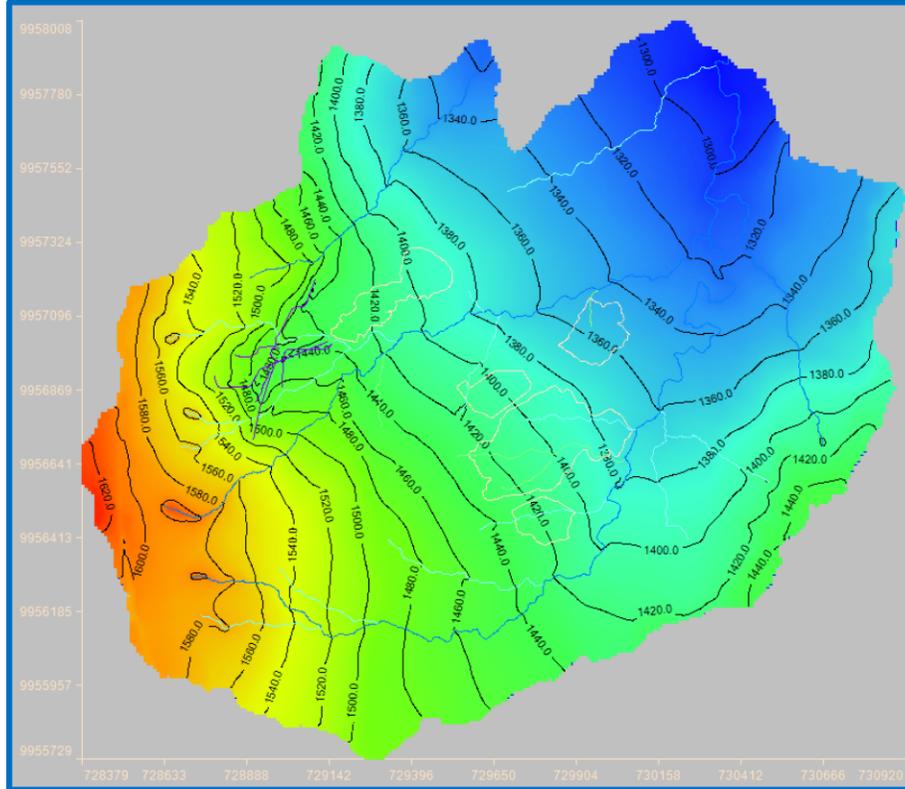
Figura N° 020 Cargas calculadas y observadas en piezómetros existentes (modelo en régimen estacionario)



Fuente: Elaboración propia.

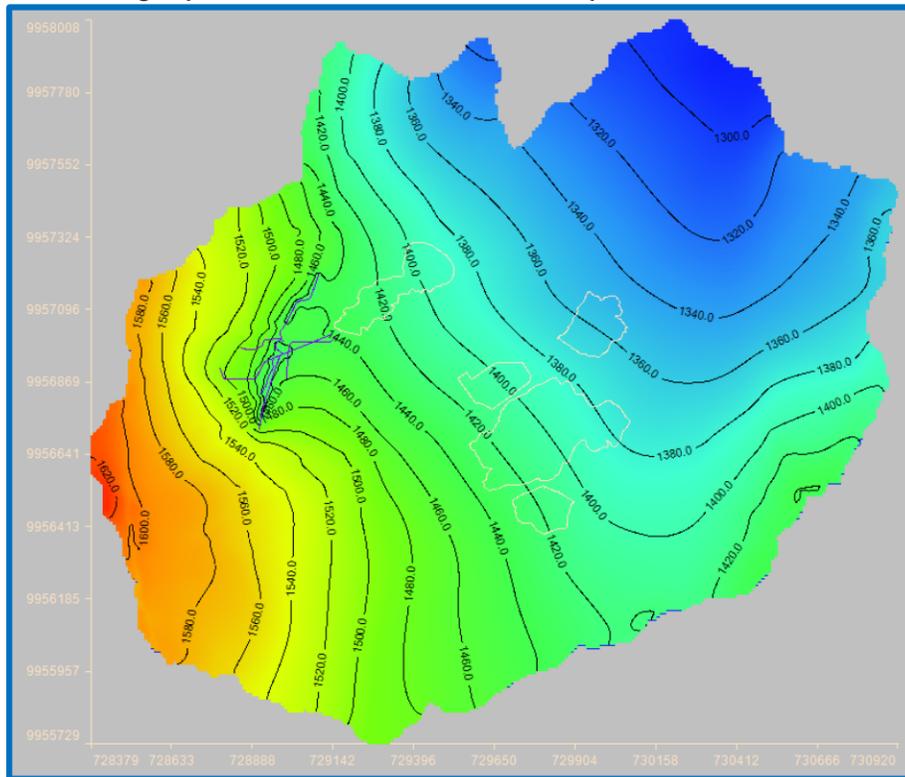
En las **Figuras N°055 a N°057** muestran vistas en planta de la carga piezométrica en algunos de los diferentes estratos del modelo. Las cargas modeladas son similares a las cargas conceptualizadas, lo cual confirma el movimiento de agua subterránea con direcciones de flujo SW-NE y W-E. De acuerdo con el modelo conceptual, los primeros 70 metros de profundidad se corresponden a un acuífero libre, lo cual se constata con lo poca variación piezométrica en los primeros 8 estratos modelados y conforme se profundiza el acuitardo inferior se comporta como semiconfinado (ver **Figuras N°057 y 058**).

Figura N° 021 Cargas piezométricas modeladas en la capa 1 del modelo numérico estacionario.



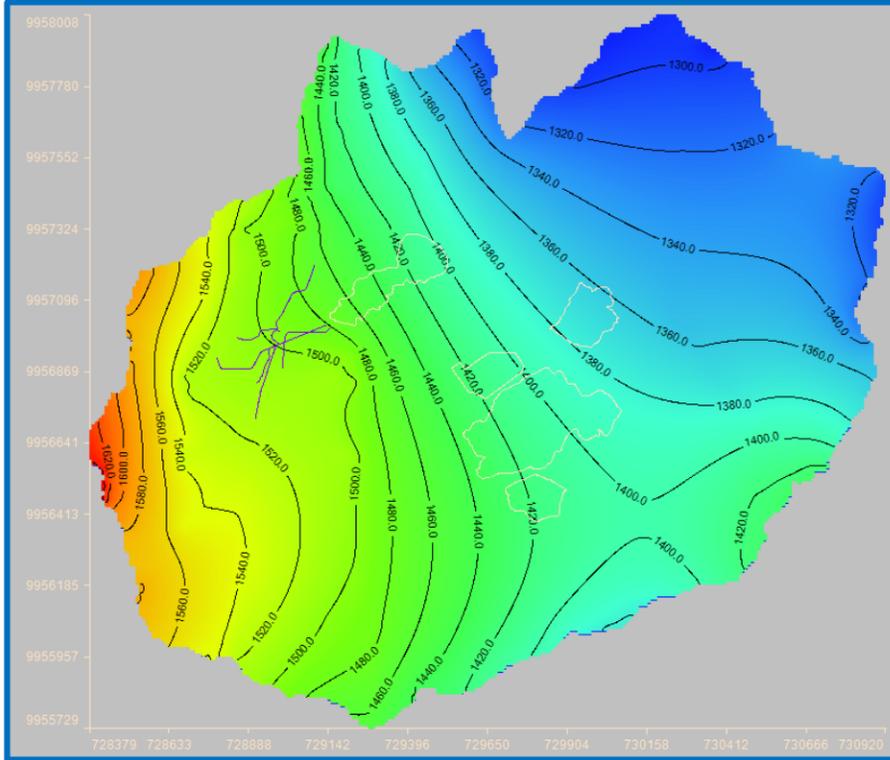
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 022 Cargas piezométricas modeladas en la capa 9 del modelo numérico estacionario



Fuente: Elaboración propia.

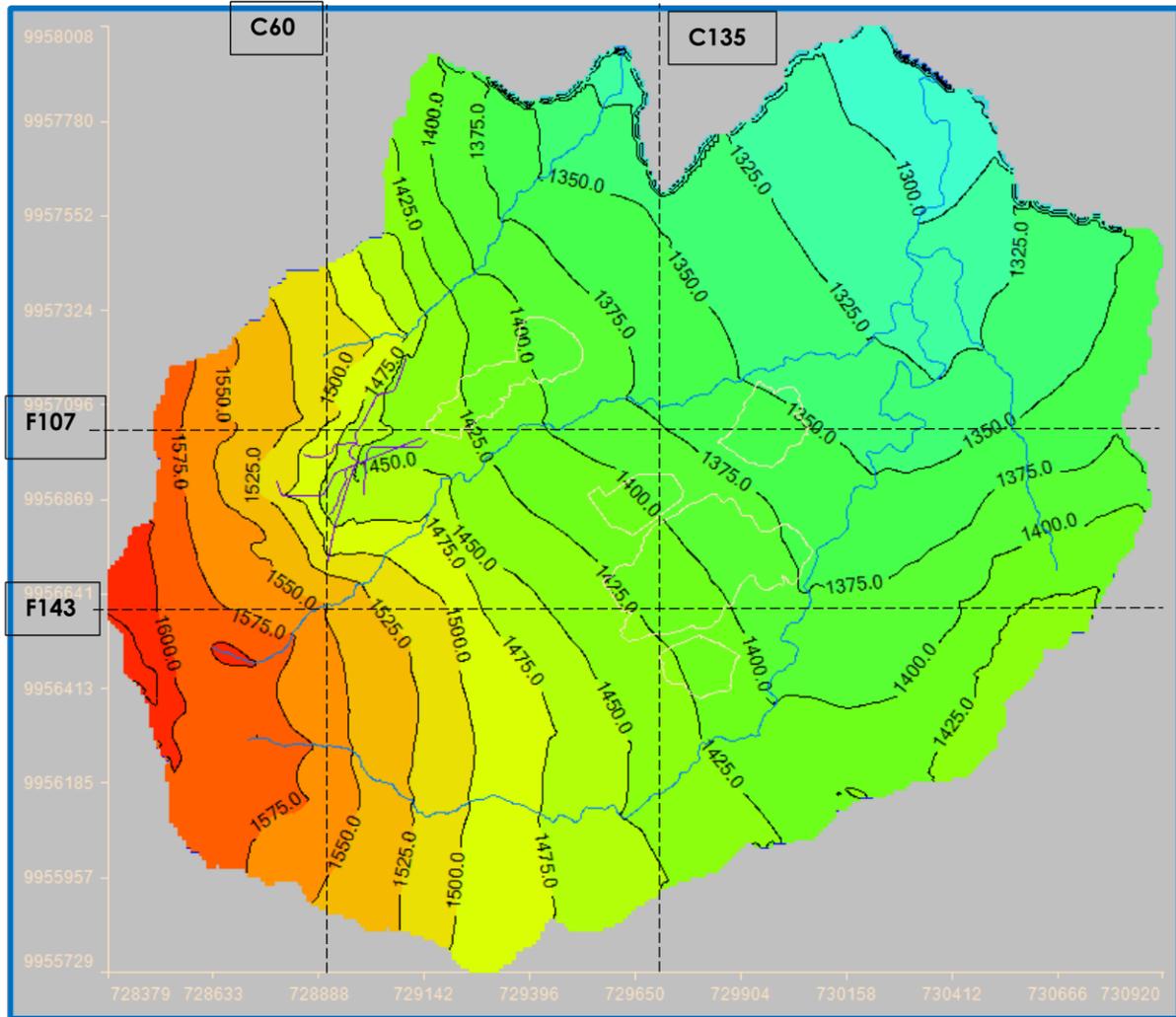
Figura N° 023 Cargas piezométricas modeladas en la capa 13 del modelo numérico estacionario.



Fuente: Elaboración propia.

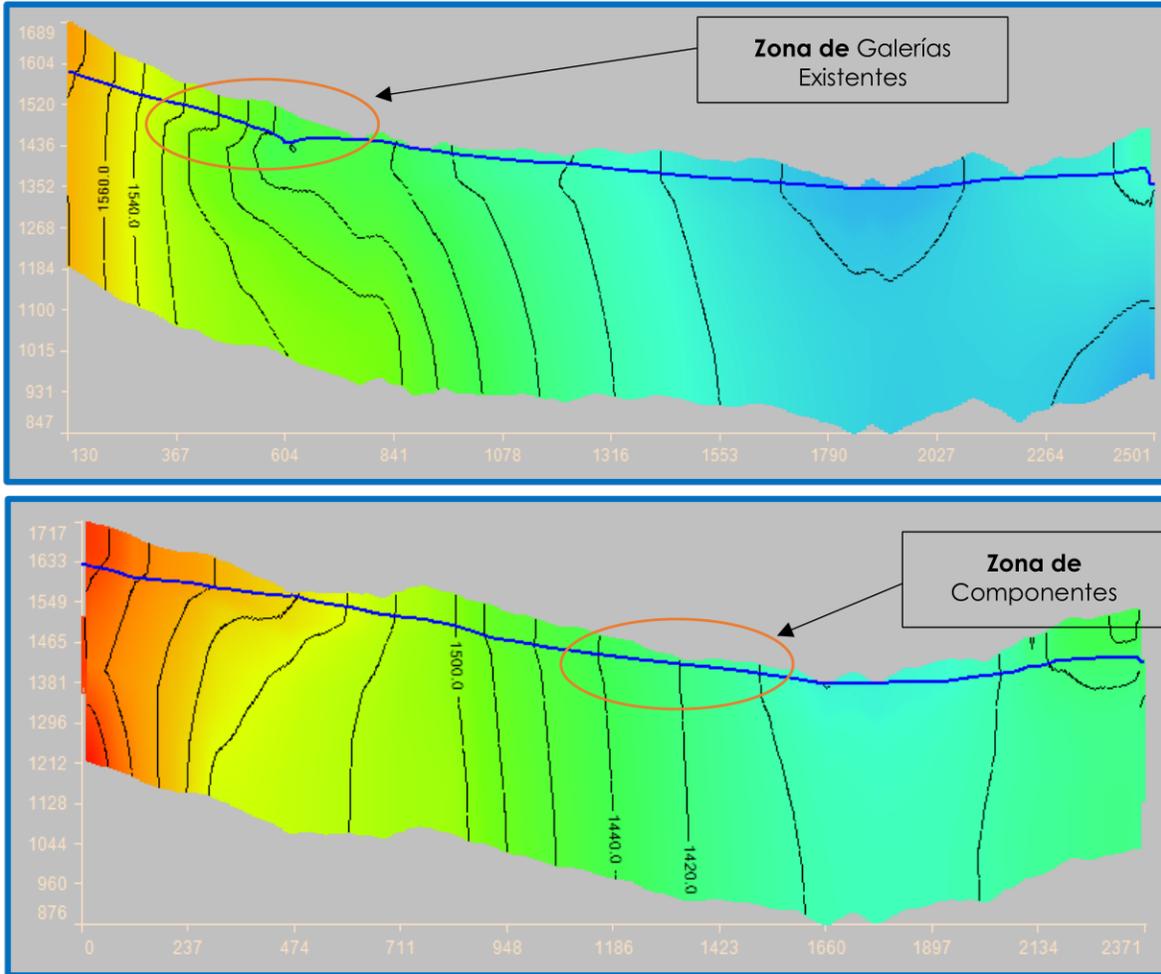
En las **Figuras N°058 a N°060** se presentan la planta del nivel freático y secciones transversales con las cargas y niveles de agua modelados; en estas secciones se puede apreciar el abatimiento existente producto del drenaje de las galerías actuales. Adicionalmente se puede apreciar que el movimiento de agua subterránea sigue principalmente la dirección horizontal (líneas equipotenciales casi verticales).

Figura N° 024 Vista en planta de los niveles de agua subterránea modeladas en régimen estacionario



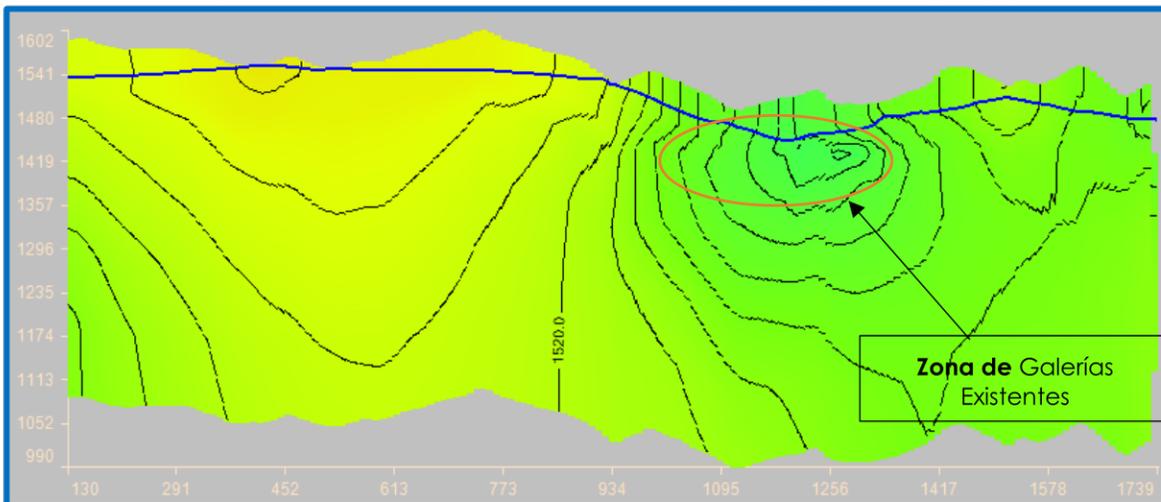
Fuente: Elaboración propia.

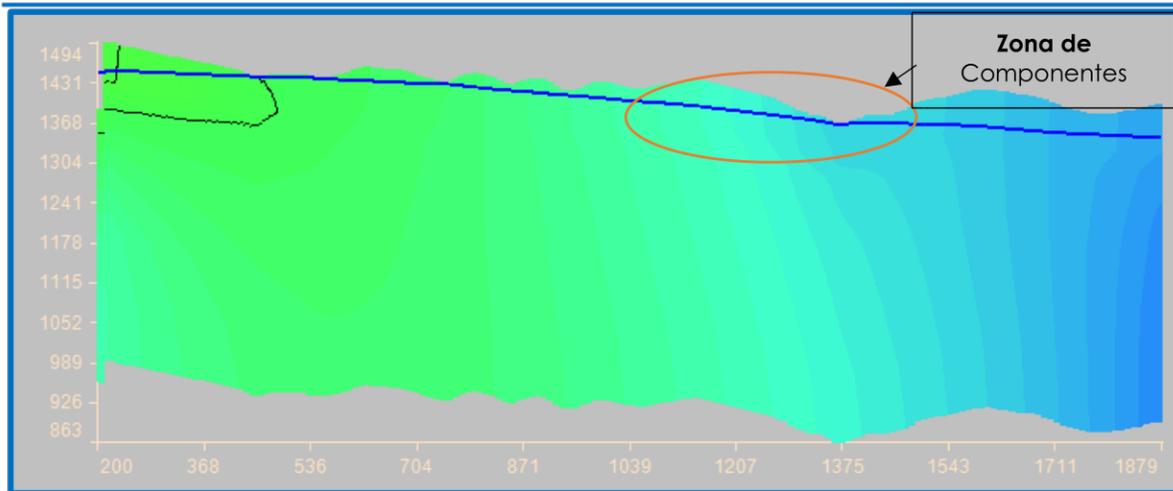
Figura N° 025 Sección transversal fila 107 (arriba) y fila 143 (abajo)



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 026 Sección transversal columna 60 (arriba) y fila 135 (abajo)





Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura N°061** (vista superior) se puede apreciar el efecto dren de las galerías existentes y en la parte inferior se puede apreciar la profundidad del nivel de agua en las zonas de componentes.

7.2.2 Balance de Agua en Régimen Estacionario

En el **Cuadro N°048** y en la **Figura N°062** se presentan los resultados del balance de agua en régimen estacionario.

La principal recarga del acuífero proviene de la recarga de precipitación, seguida de las recargas a través de la infiltración en quebradas y en menor medida el ingreso de flujo proveniente de las cuencas adyacentes, principalmente del río San Pablo (ver **Cuadro N°058**). Existe un pequeño flujo de entrada proveniente de la zona oeste y noroeste del área de estudio (carga variable GHB). Respecto a las descargas, son las quebradas las que reciben mayor cantidad de agua subterránea, seguido de los drenes existentes, y las salidas de flujo, especialmente en las zonas bajas es la otra fuente destacable de descarga.

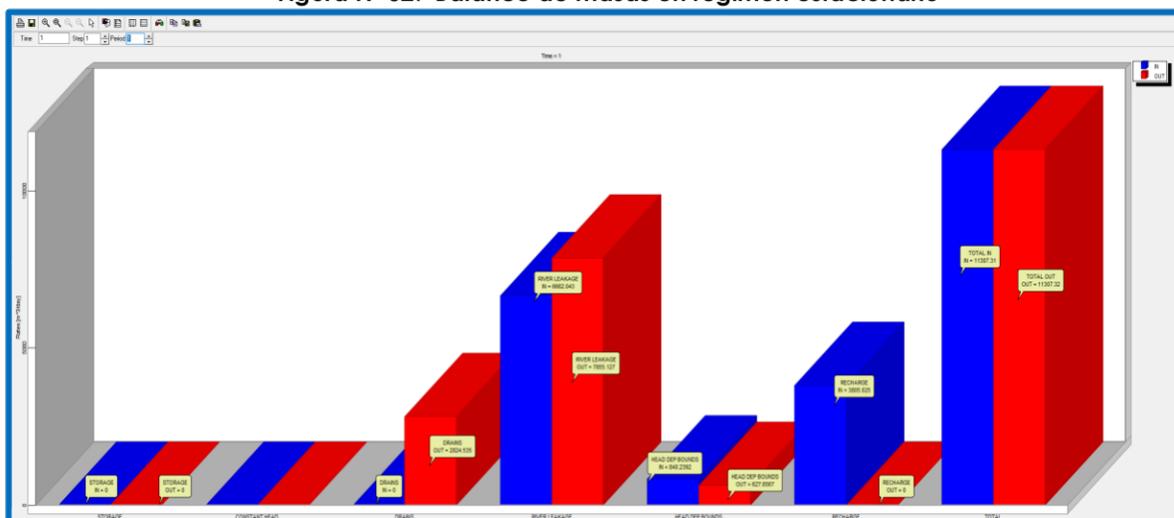
En el **Cuadro N°048** se puede observar que en el área de estudio las quebradas tienen en conjunto un caudal base medio anual de 90.916 l/s para un año medio; los caudales bases generados en toda el área de estudio llegan a 79.350 l/s. En el caso de los drenes se han monitoreado caudales entre los meses de julio y agosto del 2021 con un valor promedio aproximado de 30 l/s, y el modelo nos indica un valor de 32.691 para un año promedio, por lo cual consideramos que el modelo representa de buena forma esta condición de frontera.

Cuadro N° 048 Balance hídrico en el área de modelamiento – Modelo de flujo en régimen estacionario

Fuente	Caudal			
	(m ³ /d)	(l/s)	(m ³ /s)	(MMC/año)
Recarga				
Almacenamiento	0.000	0.000	0.000	0.000
Drenes	0.000	0.000	0.000	0.000
Ríos o quebradas	6662.044	77.107	0.077	2.432
Carga Variable (GHB)	840.239	9.725	0.010	0.307
Recarga	3805.025	44.040	0.044	1.389
Total	11307.308	130.872	0.131	4.127
Descarga				
Almacenamiento	0.000	0.000	0.000	0.000
Drenes	2824.535	32.691	0.033	1.031
Ríos o quebradas	7855.127	90.916	0.091	2.867
Carga Variable (GHB)	627.657	7.265	0.007	0.229
Recarga	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	11307.319	130.872	0.131	4.127
Diferencia	-0.011	0.000	0.000	0.000
Discrepancia (%)	-9.640E-05	-9.640E-05	-9.640E-05	-9.640E-05

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se muestra el balance de masas del modelamiento numérico del sistema acuífero del área de estudio para régimen estacionario.

Figura N° 027 Balance de masas en régimen estacionario


Fuente: Elaboración propia.

7.3 MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO

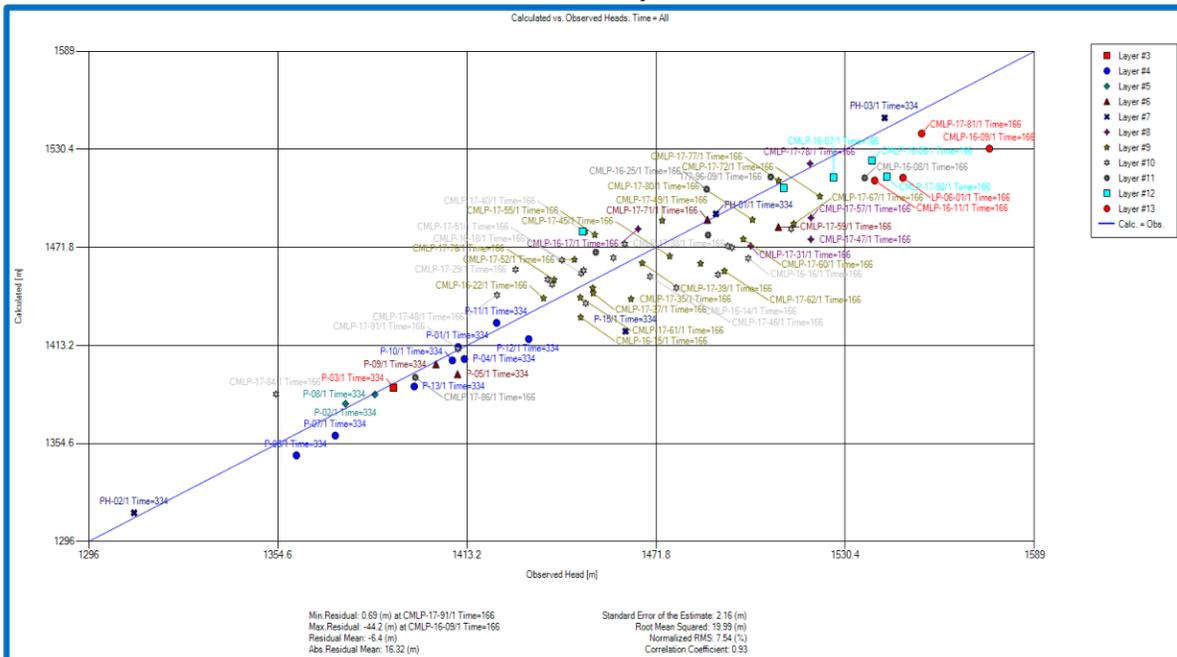
7.3.1 Condiciones Iniciales

El modelo en régimen transitorio ha sido formulado a fin de conocer la variación temporal de las cargas hidráulicas y descargas, utilizándose para ello un año de recarga promedio, el cual fue subdividido en cuatro (04) trimestres, iniciando con el periodo setiembre-noviembre. La recarga neta del sistema acuífero ocurre principalmente durante los trimestres diciembre-febrero y marzo-mayo. Las cargas iniciales se corresponden a los resultados del modelo estacionario.

7.3.2 Resultados de la Calibración

El modelo ha sido calibrado con información piezométrica recopilada en el área de estudio durante el periodo junio-agosto del 2021 y febrero de 2018. La diferencia entre las cargas observadas y calculadas, cuantificadas mediante los estadísticos principalmente por la raíz media cuadrática normalizada, es igual a 7.54%, valor que se encuentran en el rango de los modelos apropiadamente calibrados.

Figura N° 028 Cargas calculadas y observadas en piezómetros existentes (modelo en régimen transitorio)

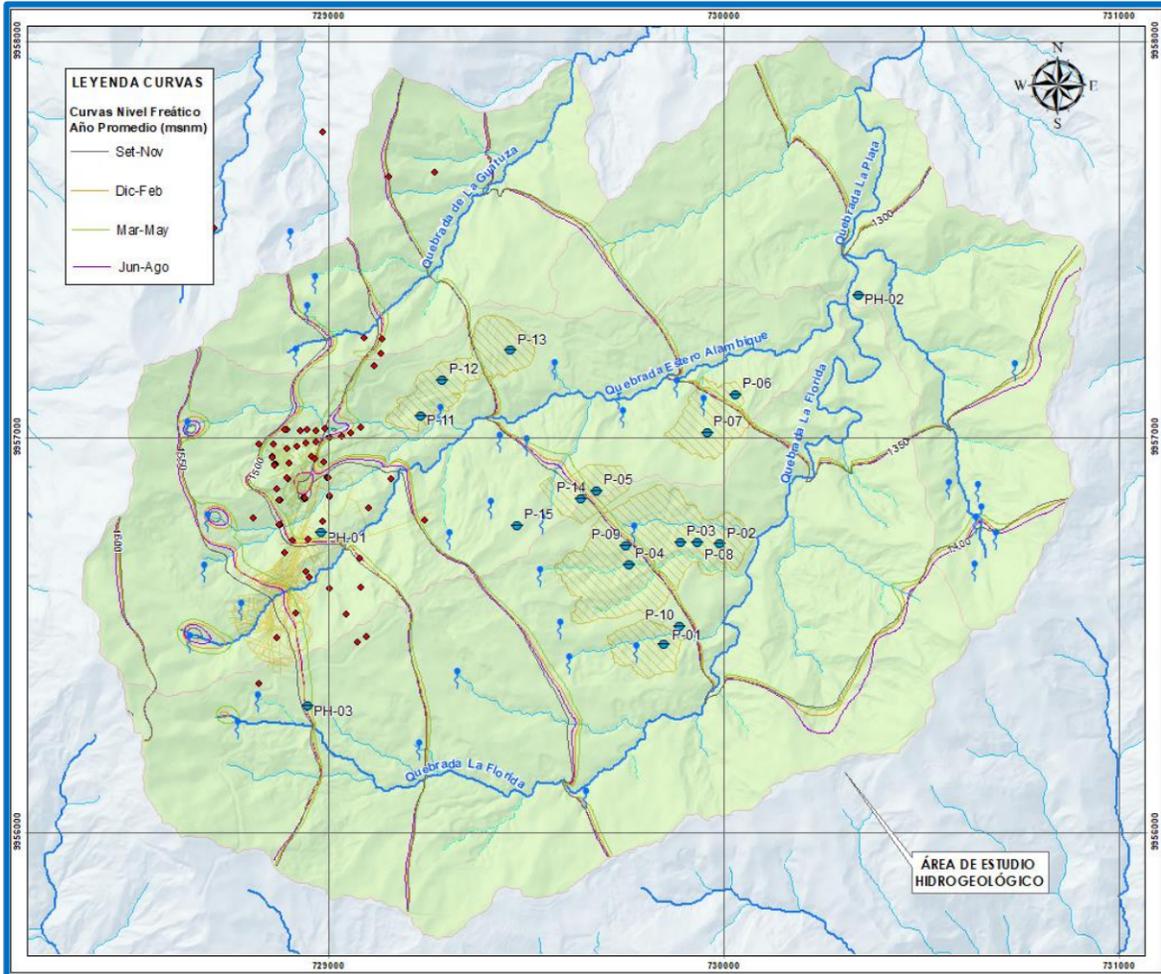


Fuente: Elaboración propia.

Los residuales varían entre -0.69 m (CMLP-17-76) y -44.2 m (CMLP-16-09), el residual medio es igual a -6.40 m y el residual absoluto es de 16.32 m.

En la **Figura N°064** se puede apreciar la variación trimestral del nivel de agua subterránea en el Área de Estudio.

Figura N° 029 Variación trimestral del nivel freático para un año promedio



Fuente: Elaboración propia.

7.3.3 Balance Hídrico Subterráneo en Régimen Transitorio

El balance hídrico subterráneo en el acuífero analizado es mostrado en el **Cuadro N°049** para 91 días (trimestre setiembre-noviembre), en el **Cuadro N°050** para el trimestre diciembre-febrero, en el **Cuadro N°051** para el trimestre marzo-mayo y en el **Cuadro N°052** para el trimestre junio-agosto.

Cuadro N° 049 Balance hídrico del área de modelamiento en régimen transitorio – time 91 (setiembre-noviembre)

Fuente	Caudal			
	(m ³ /d)	(l/s)	(m ³ /s)	(MMC/año)
Recarga				
Almacenamiento	3888.568	45.007	0.045	1.419
Drenes	0.000	0.000	0.000	0.000
Ríos o quebradas	4415.066	51.100	0.051	1.611
Carga Variable (GHB)	801.324	9.275	0.009	0.292

Recarga	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	9104.958	105.381	0.105	3.323
Descarga				
Almacenamiento	0.707	0.008	0.000	0.000
Drenes	2296.818	26.584	0.027	0.838
Ríos o quebradas	5963.765	69.025	0.069	2.177
Carga Variable (GHB)	843.662	9.765	0.010	0.308
Recarga	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	9104.951	105.381	0.105	3.323
Diferencia	0.007	0.000	0.000	0.000
Discrepancia (%)	7.139E-05	7.139E-05	7.139E-05	7.139E-05

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 050 Balance hídrico en el área de modelamiento en régimen transitorio – time 181 (diciembre-febrero)

Fuente	Caudal			
	(m ³ /d)	(l/s)	(m ³ /s)	(MMC/año)
Recarga				
Almacenamiento	297.245	3.440	0.003	0.108
Drenes	0.000	0.000	0.000	0.000
Ríos o quebradas	8445.815	97.752	0.098	3.083
Carga Variable (GHB)	1071.913	12.406	0.012	0.391
Recarga	1453.139	16.819	0.017	0.530
Total	11268.112	130.418	0.130	4.113
Descarga				
Almacenamiento	1365.303	15.802	0.016	0.498
Drenes	2654.905	30.728	0.031	0.969
Ríos o quebradas	6764.986	78.298	0.078	2.469
Carga Variable (GHB)	482.926	5.589	0.006	0.176
Recarga	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	11268.120	130.418	0.130	4.113
Diferencia	-0.008	0.000	0.000	0.000
Discrepancia (%)	-6.745E-05	-6.745E-05	-6.745E-05	-6.745E-05

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 051 Balance hídrico en el área de modelamiento en régimen transitorio – time 273 (marzo-mayo)

Fuente	Caudal			
	(m ³ /d)	(l/s)	(m ³ /s)	(MMC/año)
Recarga				
Almacenamiento	59.165	0.685	0.001	0.022
Drenes	0.000	0.000	0.000	0.000
Ríos o quebradas	9260.207	107.178	0.107	3.380

Fuente	Caudal			
	(m ³ /d)	(l/s)	(m ³ /s)	(MMC/año)
Carga Variable (GHB)	1112.092	12.871	0.013	0.406
Recarga	2194.041	25.394	0.025	0.801
Total	12625.505	146.129	0.146	4.608
Descarga				
Almacenamiento	1692.065	19.584	0.020	0.618
Drenes	2961.119	34.272	0.034	1.081
Ríos o quebradas	7503.196	86.843	0.087	2.739
Carga Variable (GHB)	469.145	5.430	0.005	0.171
Recarga	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	12625.525	146.129	0.146	4.608
Diferencia	-0.020	0.000	0.000	0.000
Discrepancia (%)	-1.568E-04	-1.568E-04	-1.568E-04	-1.568E-04

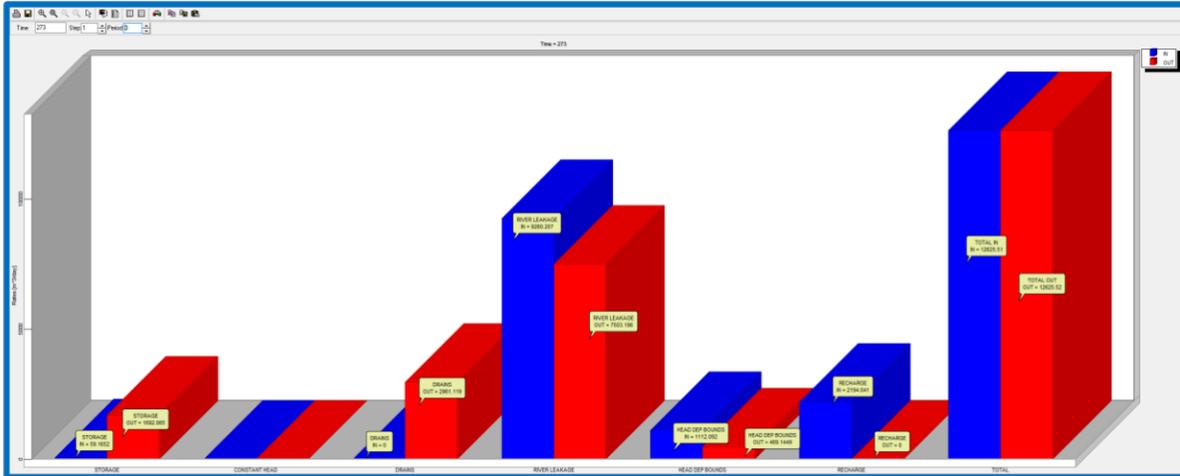
Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 052 Balance hídrico en el área de modelamiento en régimen transitorio – time 365 (junio-agosto)

Fuente	Caudal			
	(m ³ /d)	(l/s)	(m ³ /s)	(MMC/año)
Recarga				
Almacenamiento	2677.202	30.986	0.031	0.977
Drenes	0.000	0.000	0.000	0.000
Ríos o quebradas	5929.437	68.628	0.069	2.164
Carga Variable (GHB)	855.263	9.899	0.010	0.312
Recarga	157.002	1.817	0.002	0.057
Total	9618.903	111.330	0.111	3.511
Descarga				
Almacenamiento	0.900	0.010	0.000	0.000
Drenes	2542.404	29.426	0.029	0.928
Ríos o quebradas	6304.525	72.969	0.073	2.301
Carga Variable (GHB)	771.077	8.924	0.009	0.281
Recarga	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	9618.906	111.330	0.111	3.511
Diferencia	-0.003	0.000	0.000	0.000
Discrepancia (%)	-2.599E-05	-2.599E-05	-2.599E-05	-2.599E-05

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 030 Balance de masas en régimen transitorio periodo abril-junio



Fuente: Elaboración propia.

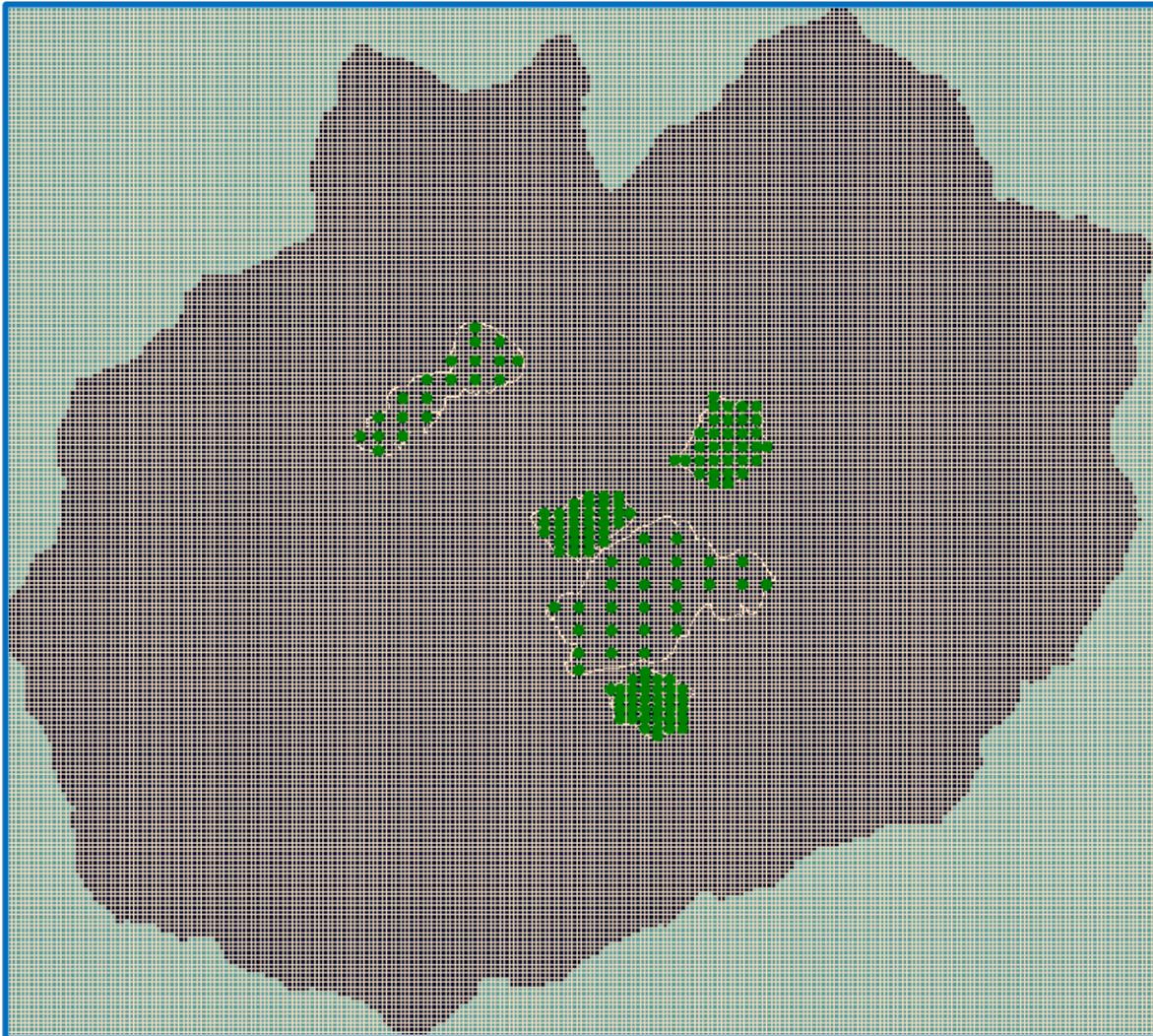
En los **Cuadros N°049 al N°052** se puede apreciar que el almacenamiento se recarga esencialmente en el periodo setiembre-noviembre (coincidiendo con el inicio del periodo de transición a la época húmeda) para luego ir alimentando progresivamente el acuífero en los demás trimestres. La recarga y descarga desde las quebradas simula de buena forma la periodicidad de los caudales indicado en el Capítulo 2; los caudales de descarga del acuífero hacia las quebradas tienen su mayor valor en los meses de lluvia, aunque proporcionalmente (relativo al caudal total) es mayor en las épocas de estiaje. Los drenes descargan entre 26.584 l/s en el trimestre setiembre-noviembre y 34.272 l/s en el trimestre marzo-mayo.

En general se considera que el modelo transitorio es coherente con los resultados del modelo estacionario y con el modelo conceptual descrito en el capítulo anterior.

7.4 RUTA DE CONTAMINANTES

Con el modelo de flujo del agua subterránea calibrado, se ha simulado la probable ruta que seguirían los contaminantes una vez ocurrida algún tipo de contaminación producto de alguna falla en los sistemas de protección de los principales componentes de la U.M. Plata. La distribución de las partículas asignadas para los componentes proyectados se muestra en la **Figura N°066**.

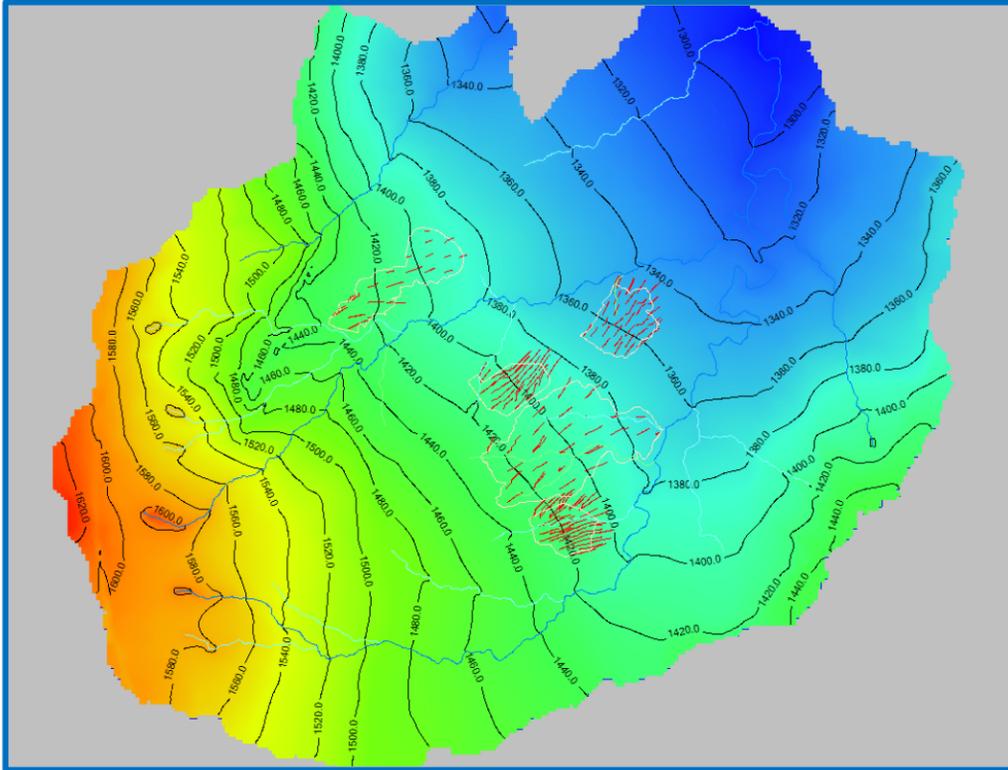
Figura N° 031 Partículas asignadas al modelo de ruta de contaminantes, componentes proyectados



Fuente: Elaboración propia.

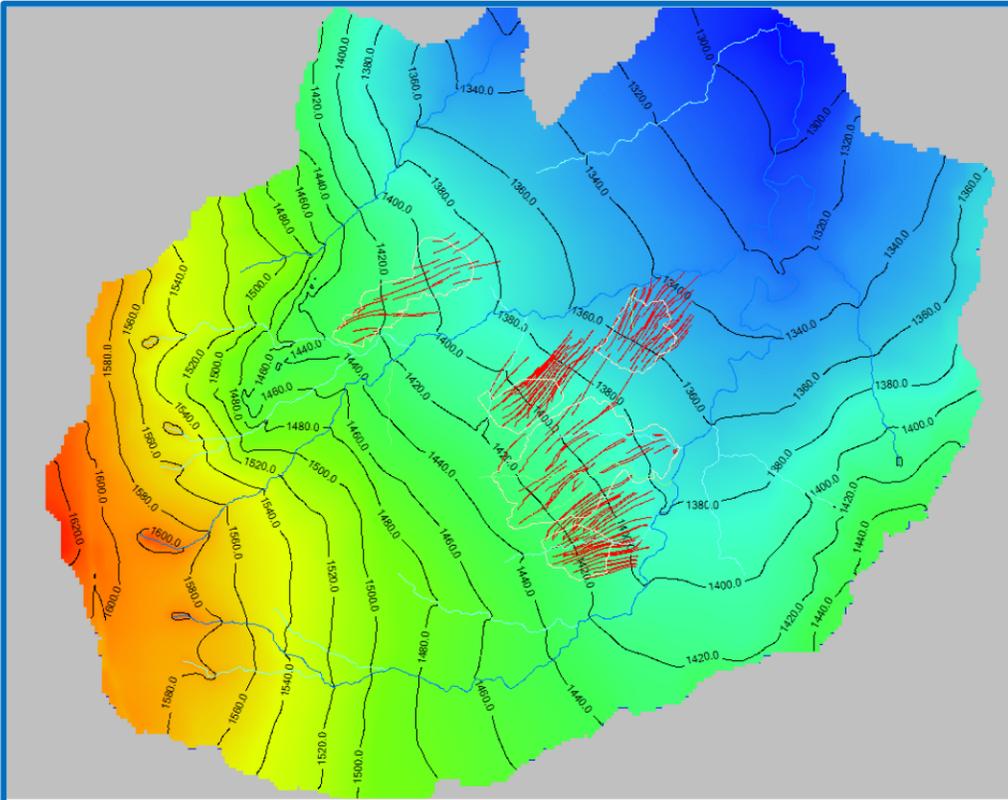
En las **Figuras N°067** y **N°068** se puede apreciar que en los primeros 90 días las partículas contaminadas no presentan mayor avance. A los 180 días de iniciado el proceso de contaminación las partículas procedentes de la escombrera N° 1 llegan a la quebrada Estero Alambique (ver **Figura N°069**). Al año de contaminación las partículas contaminantes llegan a las quebradas La Florida y el Afluente del río La Plata ubicado al norte del Área de Estudio (ver **Figura N°070**). Finalmente, a los 5 años de producida la contaminación las partículas contaminantes llegan hasta el río La Plata

Figura N° 032 Simulación de movimiento de contaminantes para 30 días



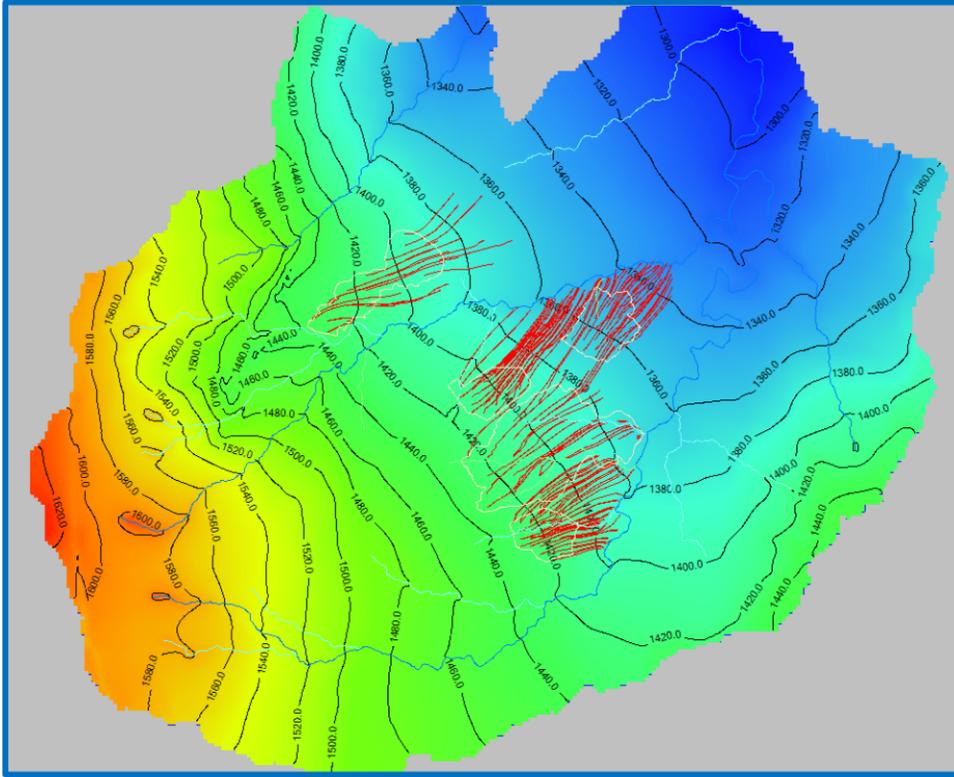
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 033 Simulación de movimiento de contaminantes para 60 días



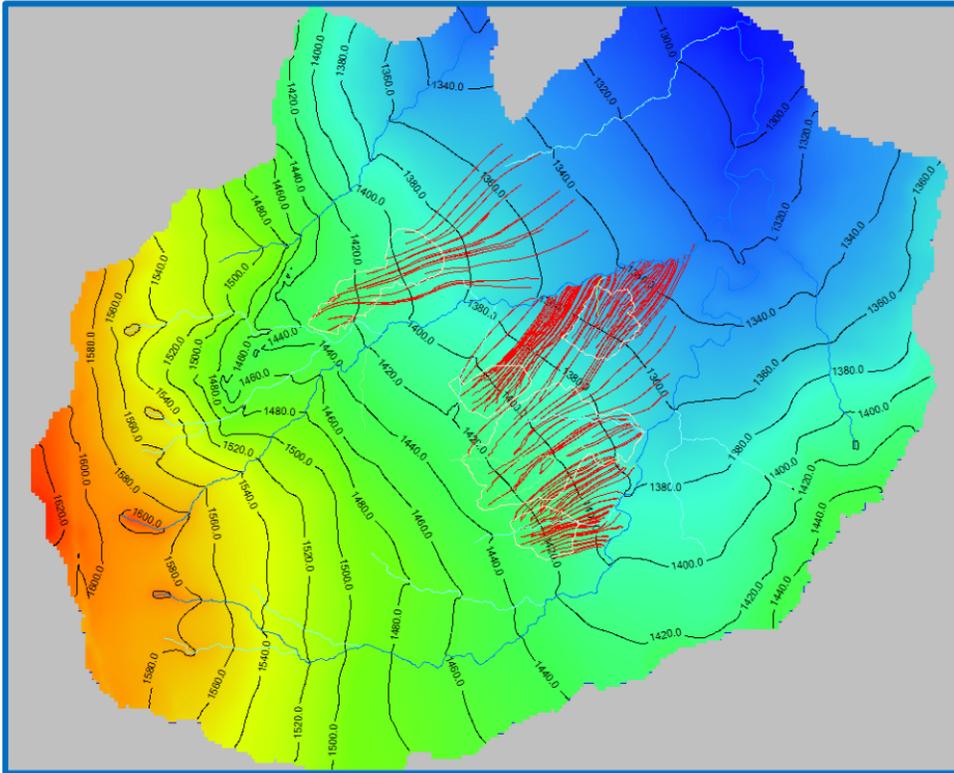
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 034 Simulación de movimiento de contaminantes para 180 días



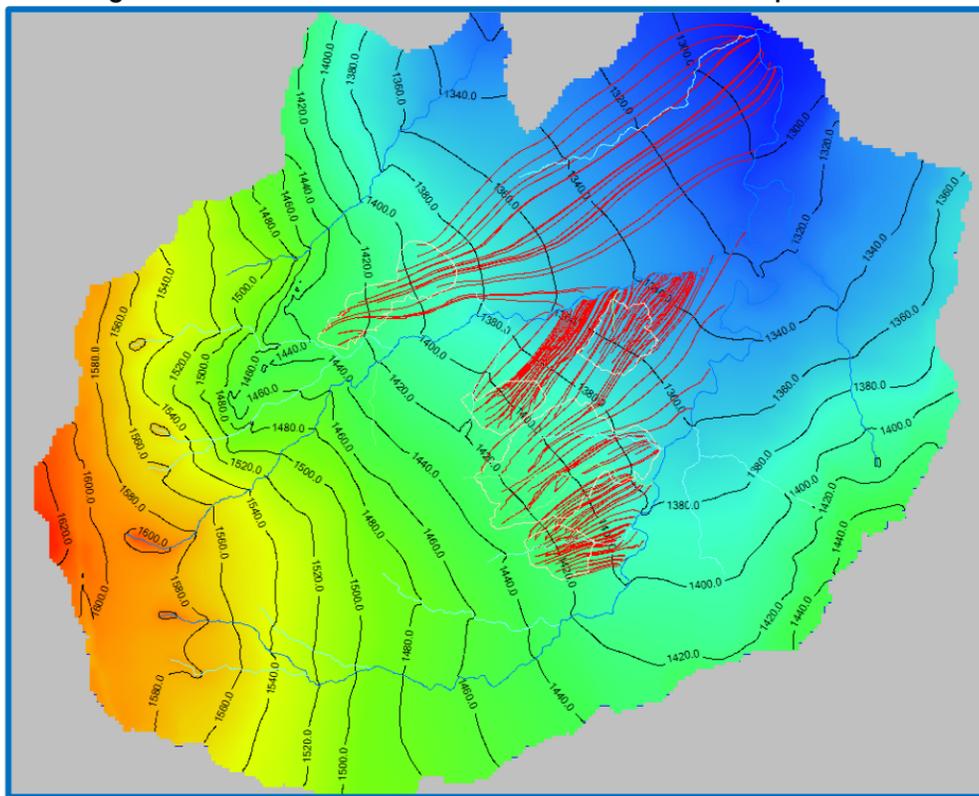
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 035 Simulación de movimiento de contaminantes para 365 días



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 036 Simulación de movimiento de contaminantes para 1825 días



Fuente: Elaboración propia.

7.5 INFLUENCIA DEL DRENAJE EN LAS GALERÍAS PROYECTADAS

A partir del modelo calibrado se ha generado un modelo de predicción de las galerías proyectadas. El sistema de galerías se ha modelado a partir de 5 drenes principales que totalizan una longitud de 4690 m y los resultados discretizados por profundidad se pueden apreciar en el **Cuadro N°053**.

La influencia de las galerías en la piezometría se puede observar en la **Figura N°072** y el abatimiento de la napa en la **Figura N°073**. El abatimiento llega hasta los 50 m aproximadamente en las zonas aledañas a las galerías proyectadas y su extensión es local, afectando los recursos hídricos de esta parte del área de estudio; en promedio existe una reducción de 2.43 m en el nivel freático del área de estudio.

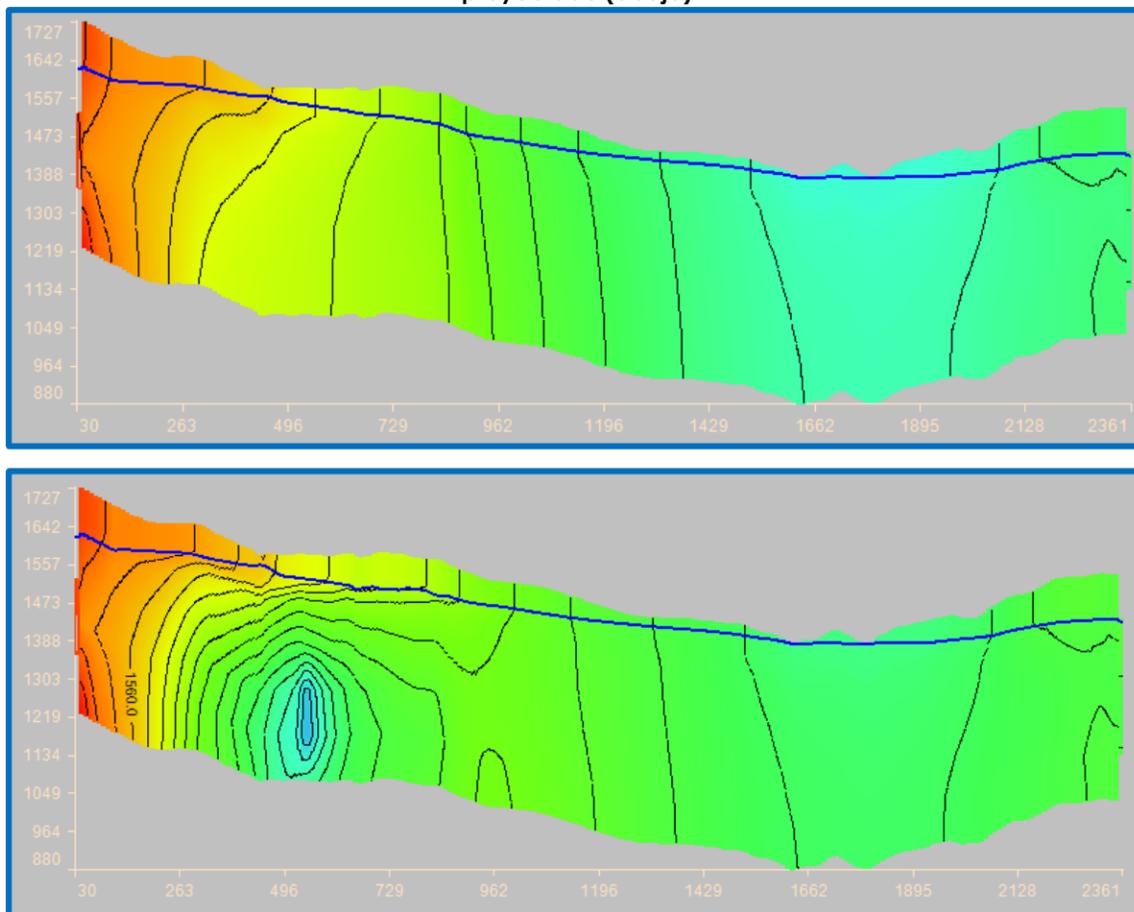
En la zona de captación de agua se prevé un abatimiento de 1.60 m en la celda modelada y valores de hasta 10 m de abatimiento en zonas cercanas por lo que se espera una reducción del caudal utilizado actualmente.

Cuadro N° 053 Módulos de drenaje en las galerías proyectadas.

Sector	Profundidad (m)	Módulo de Drenaje (l/s/km)
1	0-50	2.40
2	50-100	3.60
3	100-150	5.00
4	150-200	6.76
5	200-250	7.12
6	250-300	9.63
7	300-350	9.08
8	350-400	12.28
9	400-450	8.39
10	450-500	11.35

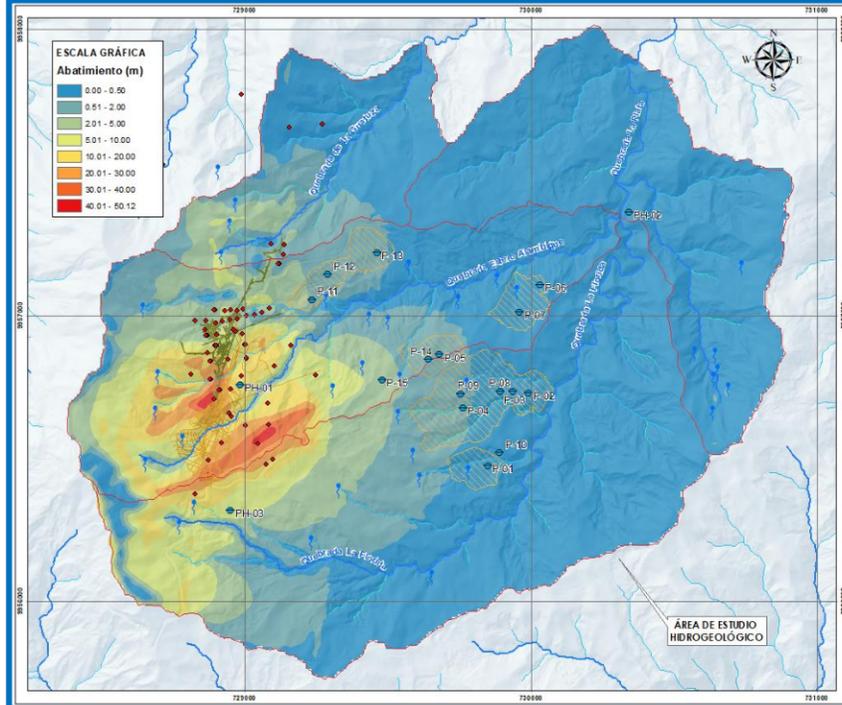
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 037 Variación del nivel piezométrico en la fila 146 en estado actual (arriba) y proyectado (abajo)



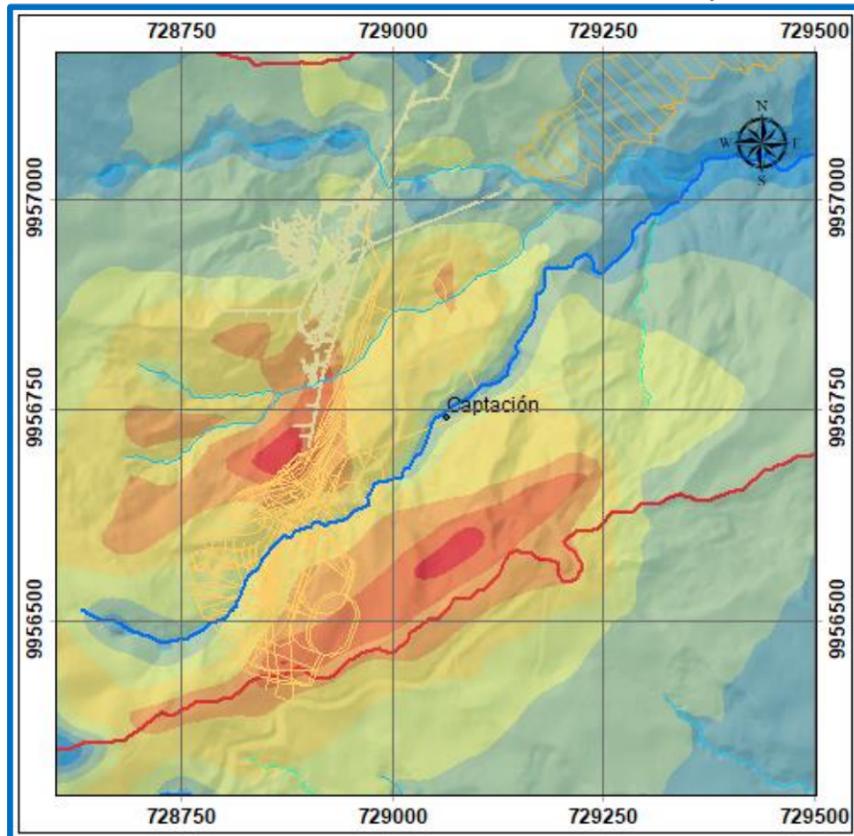
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 038 Abatimiento del nivel freático producto del drenaje de galerías



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 039 Abatimiento del nivel freático en zonas cercanas a la captación de agua existente



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los cambios en los caudales base producto del drenaje de aguas subterráneas por parte del sistema de galerías proyectadas podemos indicar que existen pérdidas en el caudal superficial de hasta 10.4 l/s en el trimestre marzo-mayo de un año promedio, y el caudal base presenta pérdidas de hasta 4.4 l/s en el periodo junio-agosto (véase el **Cuadro N°054**). Al deprimirse el nivel de agua subterránea se producen dos efectos en los cursos de agua superficial, el primero es el aumento de la recarga del río al sistema acuífero (especialmente en las zonas más altas), lo cual repercute en un descenso del caudal superficial, y la segunda es el descenso de la recarga del acuífero hacia las quebradas (caudal base) que también evidencia un descenso del nivel de agua en el sistema hídrico del área de estudio. La disminución del caudal se estima alrededor del 3% del caudal medio anual.

Cuadro N° 054 Variaciones en el caudal base producto del drenaje de las galerías subterráneas para un año promedio

Trimestre	Caudal Superficial (l/s)	Caudal Base (l/s)
Set-Nov	-1.890	-1.647
Dic-Feb	-5.525	-2.868
Mar-May	-10.424	-4.228
Jun-Ago	-5.365	-4.392

Fuente: Elaboración propia.

Otro efecto del drenaje de las galerías subterráneas es el cambio en los volúmenes de almacenamiento del acuífero, incrementándose la recarga del acuífero entre el 50% y 100% en los trimestres modelados, lo cual indica la disminución de las reservas del acuífero (evidenciado en el abatimiento descrito anteriormente). También se incrementa el flujo de entrada desde las cuencas aledañas, especialmente del río San Pablo, y disminuye el flujo de salida del área de estudio hacia las cuencas aledañas.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- En la subdivisión La Florida la longitud del cauce principal es superior a la longitud máxima de la cuenca y la de desagüe, lo que indica una sinuosidad mayor a la de las otras delimitaciones; lo cual también se puede apreciar en el factor de elongación. La forma de las subdivisiones en su mayoría es oval oblonga (una pera alargada), y en el caso de la U.H. La Plata Media es rectangular, de acuerdo al índice de compacidad. Según el factor de forma las delimitaciones son alargadas salvo La Plata que es asimétrica.
- El punto más alto del Área de Estudio se encuentra en la subdivisión Estero Alambique y el más bajo en La Plata Media. Las pendientes de las subdivisiones varían entre 46.97% para La Florida y 56.87 para La Guatuzza Alta, clasificándose el relieve como fuerte a muy fuerte; en todos los casos las pendientes de los cauces son mucho menores. Los valores del coeficiente orográfico nos indican que las subdivisiones presentan erosión media/baja.
- Las curvas hipsométricas adimensionales de las subdivisiones analizadas muestran que la subdivisión Estero Alambique se encuentra en un estado de madurez con actividad erosiva media, y el resto en estado de transición a la vejez y hacia una actividad erosiva baja.
- Los valores de la razón de bifurcación nos indica que las subdivisiones presentan un relieve medio con poca influencia del entorno geológico en la forma del drenaje. Las delimitaciones presentan valores medios de densidad de drenaje, lo que se corresponde con un buen drenaje y tasas de infiltración medias.
- La quebrada Estero Alambique cuenta con el mayor rendimiento medio anual (68.15 l/s/km²) seguido de las quebradas La Guatuzza (62.83 l/s/km²) y La Florida (58.38 l/s/km²). La quebrada La Plata (que drena las aguas de las quebradas Estero Alambique y La Florida) en el punto PC-02 presenta un rendimiento medio anual de 62.82 l/s/km².
- El rendimiento medio anual en cuanto al caudal base varía entre 18.90 l/s/km² y 22.12 l/s/km² en las quebradas La Florida y Estero Alambique respectivamente. El caudal base medio anual representa el 32.4 % del caudal medio anual, lo cual evidencia la influencia del medio subterráneo en la descarga de las quebradas del Área de Estudio.
- Para el año seco la ETR representa el 57.91% de la precipitación, la escorrentía el 42.09%

y no hay infiltración profunda. Para el año promedio la ETR es igual al 35.05% de la precipitación, la escorrentía al 60.75% y la infiltración profunda es el 4.20%. Finalmente, para el año húmedo la ETR es el 15.99% de la precipitación, la escorrentía es el 76.37% y la infiltración profunda es el 7.64%.

- Regionalmente el Área de Estudio se encuentra en la unida Macuchi, formada por materiales volcano-sedimentarios con intrusiones adiabáticas.
- Localmente la geología del Área de Estudio está conformada por depósitos coluvio-aluviales y aluviales que cubren el 98.6% de la superficie. El basamento rocoso presenta rocas volcánicas, sedimentarias e intrusivas.
- El sistema hidrogeológico está conformado por un acuífero mixto (intergranular y roca con fuerte fracturamiento) superior y un acuitardo subyaciéndolo.
- El modelo cuenta con tres estratos principales, el primero formado por material cuaternario de espesor medio igual a 32.2 m. El segundo estrato está formado por rocas fracturadas, con profundidades variables (50-90 m, medidos desde el contacto suelo-roca) y el tercer estrato está formada por roca más competente y catalogada como acuitardo con una profundidad que alcanza los 400-500 m. Se considera como límite de flujo la cota 1100 msnm.
- La recarga de agua subterránea se realiza principalmente por infiltración de precipitación controlada por la permeabilidad del macizo rocoso y la porosidad de los materiales no consolidados. Se estima que la recarga promedio para el área de estudio es del 4.2% de la precipitación media anual (102.6 mm).
- Las zonas de recarga se ubican principalmente en las partes altas del Área de Estudio y las zonas de descarga preferente se ubican en las quebradas y en menor medida en zonas de laderas (manantiales).
- La descarga de agua subterránea se refleja como flujos base en las quebradas del área de estudios (en promedio representa el 32.40% del caudal medio anual).
- Los sistemas de flujo del agua subterránea somera imitan de cerca las microcuencas de agua superficial y siguen los gradientes topográficos, descargando su flujo en la red hídrica del área de estudio con una dirección preferente NE.
- El flujo profundo presenta direcciones preferentes NE, SE y E, influenciado por los ríos Toachi y en menor medida por el río Damas.

- El acuífero superior y el acuitardo se encuentran interconectados mediante recarga vertical descendente y zonas de descarga comunes (partes medias y bajas de las quebradas principales).
- El mayor flujo de agua subterránea ocurre en los horizontes de macizo rocoso de mayor intemperización.
- Las condiciones de frontera principales son los ríos Toachi, San Pablo y en menor medida el río Damas.
- Las fallas se consideran sistemas de flujo preferencial.
- El modelo estacionario ha sido calibrado para un año promedio, con una raíz media cuadrática normalizada es igual a 5.96%. Los residuales varían entre -0.37 m (CMLP-17-76) y -27.70 m (CMLP-16-16), el residual medio es igual a -2.20 m y el residual absoluto es de 12.31 m.
- El modelo transitorio tiene una raíz media cuadrática normalizada, es igual a 6.16%. Los residuales varían entre -1.10 m (CMLP-17-76) y -29.9 m (P-15/1), el residual medio es igual a -3.60 m y el residual absoluto es de 12.70 m.
- Los drenes existentes descargan entre 26.584 l/s en el trimestre setiembre-noviembre y 34.272 l/s en el trimestre marzo-mayo.
- En los primeros 90 días las partículas contaminadas no presentan mayor avance. A los 180 días de iniciado el proceso de contaminación las partículas procedentes de la escombrera N° 1 llegan a la quebrada Estero Alambique. Al año de contaminación las partículas contaminantes llegan a las quebradas La Florida y el Afluente del río La Plata ubicado al norte del Área de Estudio. Finalmente, a los 5 años de producida la contaminación las partículas contaminantes llegan hasta el río La Plata.
- Se esperan flujos entre 2.40 l/s/km y 12.28 l/s/km en las galerías proyectadas para un año promedio.
- El abatimiento llega hasta los 50 m aproximadamente en las zonas aledañas a las galerías proyectadas y su extensión es local, afectando los recursos hídricos de esta parte del área de estudio; en promedio existe una reducción de 2.43 m en el nivel freático del área de estudio.
- En la zona de captación de agua se prevé un abatimiento de 1.60 m en la celda

modelada y valores de hasta 10 m de abatimiento en zonas cercanas por lo que se espera una reducción del caudal utilizado actualmente.

- Se espera una disminución del 3% en el caudal medio anual del área de estudio producto del drenaje de las galerías subterráneas.

8.2 RECOMENDACIONES

- Continuar con las mediciones del nivel de agua subterránea en los piezómetros instalados después de finalizado el presente estudio, y en los manantiales inventariados, con la finalidad de que en futuras actualizaciones se cuente con una base de datos más robusta. Se sugiere mediciones quincenales como mínimo.
- Realizar los diseños de las galerías considerando mínimamente un espesor de impermeabilización de 1 m.
- Los diseños de los componentes mineros deben considerar sistemas de impermeabilización de la base, con la finalidad de reducir los posibles eventos de contaminación del agua subterránea.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acworth, I. (2019). *Investigating Groundwater*. Boca Raton, Florida: CRC Press & International Association of Hydrogeologists.
- British Geological Survey (BGS) & Corporación de Desarrollo e Investigación Geológico Minero-Metalúrgica (CODIGEM). (1993). *Mapa Geológico de la República del Ecuador, escala 1:100 000*. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey.
- Buenaventura Ingenieros S.A. (BISA). (2015). *NI 43-101 Report: Curibamba Project, El Domo Deposit Amended and Restated Preliminary Economic Assessment*. Ecuador.
- Burbano, N., Becerra, S., & Pasquel, E. (2015). *Introducción a la Hidrogeología del Ecuador 2da edición*. Quito: INAMHI.
- Connell, J. F., & Chapman, Z. (1989). *Statistical and simulation analysis of hydraulic-conductivity data for Bear Creek and Melton Valleys, Oak Ridge Reservation, Tennessee*. Nashville: US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4062.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1976). *Hidrogeología Subterránea Segunda Edición*. Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- Davis, H. (2017). *La Plata Project Structural Geological Review*. Ecuador.
- Deuller, J. (1999). *The Handbook of Groundwater Engineering*. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC.
- Egeuz, A. (1986). *Evolution Cenozoique de la Cordillere Occidentale Septentrionale d' Equateur: Les Mineralisation Associées*. París: Universidad Pierre et Marie Curie.
- Faucher, B., & Savoyat, E. (1973). *Esquema Geológico de los Andes Ecuatorianos*. París: *Revue de Geographie et de Geologie Dynamique (2)*, Fase, 1-2, pp. 115-142.
- Figueras, S., & Gargallo, P. (2003). *Análisis exploratorio de datos*. Obtenido de www.5campus.com/leccion/aed
- Gonzales, A. (s/f). *Tema III: Hidráulica del macizo rocoso*. Huelva: Universidad de Huelva.
- Goodman, R. E., Moye, D. G., Van Schalkwyk, A., & Javandel, I. (1965). *Ground water*

inflow during tunnel driving. Eng. Geolo, 2, 39-56.

- Hazel, C. P. (2009). *Groundwater Hydraulics*. Adelaide.
- Heredia, E. (2018). *La Plata Mining Project Package 2: Hydrogeology and Hydrology*. Ecuador.
- Hubbert, M. K. (1940). *The theory of ground-water motion. Transactions, American Geophysical Union 21: doi: 10.1029/TR02.*
- Hughes, R. A., & Bermudez, R. (1997). *Informe N° 4, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica: Geology of the Western Cordillera of Ecuador between 0-1°S*. Quito: CODIGEM-BGS.
- Hughes, R., Bermúdez, R., & Espinel, G. (1998). *Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 0° y 1° S. Escala 1:200 000*. Ecuador.
- Kresic, N. (2007). *Hydrogeology and groundwater modeling second edition*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Lavado, W. (2013). *Separatas del curso métodos estadísticos en hidrología*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, escuela de Post Grado, maestría en Ingeniería de Recursos Hídricos.
- McCourt, W. J., Duque, P., & Pilatasig, L. F. (1997). *Informe N° 3, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica: Geology of the Western Cordillera of Ecuador between 1-2°S*. Quito: CODIGEM-BGS.
- Padilla, M., Pozo, M. J., Rivadeneira, M., & Caicedo, M. A. (2014). *Elaboración del mapa hidrogeológico a escala 1:250,000*. Quito: Empresa Pública Espol Tech.
- Sigal, J. (1968). *Estratigrafía Micropaleontológica del Ecuador, datos anteriores y nuevos*. Quito: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Singhal, B. S., & Gupta, R. P. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks, 2nd Edition*. Londres: Springer.
- Stearns, H. (1942). *Hydrology of Volcanic Terraines*. New York: Dover Publ. Inc.
- Toth, J. (2009). *Gravitational Systems of groundwater flow: theory, evaluation and utilization*. New York: Cambridge University Press.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley.

- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2006). *Guía metodológica para la evaluación del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y El Caribe*. CAZALAC.
- Wels, C. (2012). *Guidelines for groundwater modelling to assess impacts of proposed natural resource development activities*. Canadá: British Columbia Ministry of Environment.