

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONO ABAD DEL
CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



TESIS

**MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA
DEL FLUJO SUBTERRÁNEO A LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA
HUANACAHUIRE, SAN JERÓNIMO - CUSCO**

PRESENTADO POR:

Br. ARQUE CAHUANA, WILDE

BUENAVENTURA

Br. QUISPE PARIGUANA, OSWALDO

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

ASESOR:

Mgt. CARDENAS ROQUE JOSE DIONICIO

CUSCO – PERÚ

2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

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

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: "MODELAMIENTOS HIDROGEOLOGICOS PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL FLUJO SUBTERRANEO A LOS ACUIFEROS DE LA CUENCA HUANCACABRE, SAN JERONIMO - CUSCO"
presentado por: ARGQUE CAMANDO WILDE BUENAVENTURA con DNI Nro.: 74413566
presentado por: LUISRE PABIGUANA OSWALDO con DNI Nro.: 74516005
para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO GEÓLOGO

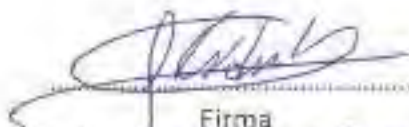
Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 7%.

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

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

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

Cusco, 16 de SEPTIEMBRE de 2023



Firma

Post firma: JOSÉ DIONICIO CÁRDENAS ROQUE

Nro. de DNI: 23873595

ORCID del Asesor: 0000-002-5261-419X

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: 010: 27259: 263457437

NOMBRE DEL TRABAJO

MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO A LOS ACUÍFEROS DE

AUTOR

Wilde Arqqe

RECUENTO DE PALABRAS

43852 Words

RECUENTO DE CARACTERES

236421 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

236 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

31.3MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 14, 2023 8:01 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 14, 2023 8:04 PM GMT-5

● **7% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 6% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 3% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

Dedicatoria

A mi hermano José Arturo, por cuidar y estar al lado de mis padres que son el sustento de mi vida.

A mi padre Laureano Arque, por el apoyo que me ha dado durante estos últimos años.

A mis hermanos Tomi, Hermo, Jesús, Álvaro y Sory; por los consejos que me brindan y por llenar de alegría mis días.

A mi amigo Julio Vocero Guizado Félix, por todo el apoyo en el trabajo de campo y los consejos brindados.

A Rosalin Deyna Aucca Latorre, con tu motivación y apoyo incondicional he podido concluir este trabajo.

Y en especial a mi madrecita linda Eulalia Cahuana, con tu esfuerzo y sacrificio he logrado dar un paso más en mi vida profesional.

Wilde Buenaventura Arque Cahuana

A Dios, por darme de oportunidad de la vida, sabiduría y la salud.

A mi madre Jovita Pariguana Puma que es el principal pilar en mi vida, el motivo y el apoyo incondicional que me dio a lo largo de mis estudios académicos. A mi hermano y hermanas por el apoyo en los momentos más difíciles.

Oswaldo Quispe Pariguana

Agradecimiento

Expresamos nuestra mayor gratitud a nuestro asesor de tesis, el Mgt. José Dionicio Cárdenas Roque, por el tiempo dedicado al trabajo de investigación en los aportes, observaciones y correcciones.

A nuestro gran amigo, el Ing. Oscar Huamán Quispe, por todo el apoyo en gabinete, en los trabajos de campo, y por la motivación brindada de inicio a fin.

Al Dr. Juan Carlos Ascues Cuba, por todo el apoyo, las recomendaciones y tiempo brindado en las correcciones del trabajo de tesis.

Al Mgt. Eddie Edgar Mercado Tejada, por las observaciones y revisión del trabajo de tesis.

Al Ing. Iván Cáceres Angulo, por las observación y revisión del trabajo de tesis.

Y, por último, agradecemos a los señores docentes de nuestra escuela profesional, por los conocimientos y experiencias impartidas a lo largo de nuestra formación profesional.

Presentación

El movimiento del flujo subterráneo en los acuíferos está ligado a las características del medio físico en el que circula, estas características son representadas por las propiedades hidrogeológicas que dependen principalmente del tipo de litología.

Hoy en día, el uso de modelos hidrogeológicos puede ser utilizado como una herramienta necesaria para el cálculo de la dinámica de flujo subterráneo, y entre otras aplicaciones, siempre en cuando se cuente con la información básica necesaria y el modelo cumpla con un proceso de verificación y validez de datos.

En este trabajo de investigación, mediante el uso de un modelo hidrogeológico se busca determinar el movimiento de flujo subterráneo, así como la manera en que este influye a los acuíferos de la zona de estudio; siguiendo una metodología aplicable sistemáticamente que parte de la descripción geomorfológica y geológica, seguido del cálculo de las características hidrológicas e hidrogeológicas; y llegando así, a una definición de modelos conceptual y numérico en base a la información obtenida durante cada proceso. Los resultados que se esperan obtener pueden aportar información y servir como base para futuros proyectos relacionados en temas hidrogeológicos dentro del ámbito de estudio.

Resumen

El trabajo de investigación “Modelamiento hidrogeológico para determinar la influencia del flujo subterráneo a los acuíferos de la cuenca Huanacahuire, San Jerónimo - Cusco” se realizó en el ámbito del distrito de San Jerónimo, provincia del Cusco, región del Cusco, con el objetivo de determinar el movimiento del flujo subterráneo en los acuíferos de la cuenca, aportar información y contribuir en el desarrollo de proyectos de agua subterránea cuya finalidad es el abastecimiento de agua para el consumo humano, la agricultura, la ganadería, etc. en las comunidades y sectores que integran la cuenca.

Los objetivos específicos desarrollados en este trabajo de investigación son: Caracterizar la geomorfología local y geología local, determinar las características hidrológicas e hidrogeológicas, y diseñar el modelo hidrogeológico conceptual - numérico del flujo subterráneo; obtenido de una metodología conformada por etapas las cuales se desarrollaron sistemáticamente

La cuenca Huanacahuire se encuentra al sureste de la ciudad del Cusco, situado entre las comunidades de Suncco y Conchacalla, tiene un área de 32.88 km², un perímetro de 36.94 km con coordenadas UTM del centroide: 189967E, 8495032N, y una altitud media de 3881 m.s.n.m. Geomorfológicamente presenta llanuras aluviales; quebradas, cárcavas, laderas, cimas, montañas, colinas, lomas, y planicies residuales que han sido originadas gracias a la posición tipo de roca (tipo estructural), mientras que la geología local está conformada por las formaciones: Kayra, Soncco, Punacancha, San Sebastian, y los depósitos cuaternarios recientes: aluvial, coluvio aluvial, residual, deluvial y fluvial, donde, según la descripción de la estratigrafía se definen dos zonas de orientación (noreste y suroeste) acompañadas de una discordancia progresiva en la zona sureste presente en la Formación Kayra. Respecto al fracturamiento de las rocas, se realizaron ventanas estructurales para caracterizar las discontinuidades presentes, mediante esto se han definidos las fracturas principales que favorecen el movimiento de flujo subterráneo.

La precipitación calculada de la cuenca es de 691.34 mm/año, con una temperatura media mensual de 12.65 °C, una evapotranspiración real de 536.23.02 mm/año, una escorrentía superficial de 74.42 mm/año y una infiltración de 79.69 mm/año; según estos datos, el balance hídrico indica un valor 155.11 mm de excedente hídrico en la época de lluvias y un déficit de 118.97 mm en la época de estiaje.

Hidrogeológicamente los acuíferos con calidades medias a buenas están conformados por las formaciones Kayra ($k=1.45E-04$ m/s, $n_e= 14\%$), Soncco II ($k=3.09E-04$ m/s, $n_e=15\%$) y Punacancha I ($k=1.52E-04$, $n_e=11\%$); mientras que la Formación Soncco I ($k=7.92E-05$ m/s, $n_e= 8\%$) es considerado como un acuífero pobre. Los depósitos cuaternarios ($k=5.69E-05 - 2.76E-04$ m/s, $n_e= 15 - 25 \%$) han sido definidos como acuíferos detríticos porosos y permeables cuya calidad varia de baja a buena.

El modelo hidrogeológico conceptual ha sido construido en base a tres componentes: modelo geológico, modelo hidrológico y modelo hidráulico; para eso se hizo uso de la información obtenida en los primeros capítulos de la investigación lo que concluye con una idea de un sistema físico donde existe una correlación entre las unidades hidrogeológicas, las entradas y salidas de flujo, y las orientaciones posibles del flujo subterráneo.

En el modelo hidrogeológico numérico la fase de calibración fue realizada en la comparación de valores de carga observada y calculadas por el modelo ModFlow, mediante el diagrama de dispersión se obtuvieron valores aceptables lo cual permitió el paso a la ejecución final. Los resultados mostrados por el modelo constan de mapas de niveles de agua, direcciones de flujo en base las curvas equipotenciales y movimiento de partículas definidas para la observación del destino y trayectorias de los flujos subterráneos.

Palabras clave: Flujo subterráneo, Modelo hidrogeológico, Acuífero.

Abstract

The research work "Hydrogeological modelling to determine the influence of groundwater flow in the aquifers of the Huanacahuire basin, San Jerónimo - Cusco" was carried out in the district of San Jerónimo, province of Cusco, Cusco region, with the aim of determining the movement of groundwater flow in the aquifers of the basin, providing information and contributing to the development of projects related to groundwater whose purpose may be the supply of water for human consumption, agriculture, livestock, etc. in the communities and sectors that make up the basin.

The Huanacahuire watershed is located southeast of the city of Cusco, between the communities of Suncco and Conchacalla, has an area of 32.88 km², a perimeter of 36.94 km with UTM coordinates of the centroid: 189967E, 8495032N, and an average altitude of 3881 meters above sea level.

The specific objectives developed in this research work are: To characterize the local geomorphology and local geology, to determine the hydrological and hydrogeological characteristics, and to design the conceptual-numerical hydrogeological model of groundwater flow in the Huanacahuire basin; followed by a methodology made up of stages which were developed systematically.

. Geomorphological units: Alluvial plains; ravines, gullies, slopes, summits, mountains, hills, hillocks, and residual plains have been originated thanks to the position of strata and type of rock (structural type). The local geology of the basin is made up of the Kayra, Soncco, Punacancha, San Sebastian formations, and the recent Quaternary deposits: alluvial, alluvial colluvial, residual, deluvial and fluvial. According to the description of the stratigraphy, two orientation zones were defined (northeast and southwest) accompanied by a progressive unconformity in the southeast zone of the basin present in the Kayra Formation; with respect to the fracturing of the rocks,

structural windows were carried out to characterise the discontinuities present, by means of which the main fractures that favour the movement of subterranean flow have been defined.

The Huanacahuire watershed has a precipitation of 691.34 mm/year, an average monthly temperature of 12.65 °C, a real evapotranspiration of 536.23.02 mm/year, a surface runoff of 74.42 mm/year and an infiltration of 79.69 mm/year. According to the water balance, there is a water surplus of 155.11 mm in the rainy season and a deficit of 118.97 mm in the dry season.

Hydrogeologically, the aquifers with medium to good quality are formed by the Kayra ($k=1.45E-04$ m/s, $n_e= 14\%$), Soncco II ($k=3.09E-04$ m/s, $n_e=15\%$) and Punacancha I ($k=1.52E-04$, $n_e=11\%$) formations; while the Soncco I Formation ($k=7.92E-05$ m/s, $n_e= 8\%$) is considered a poor aquifer. The Quaternary deposits ($k=5.69E-05 - 2.76E-04$ m/s, $n_e= 15 - 25 \%$) have been defined as porous aquifers whose quality varies from low to good.

The conceptual hydrogeological model has been constructed on the basis of three components: geological model, hydrological model and hydraulic model; for this purpose, use was made of the information obtained in the first chapters of the research, which concludes with an idea of a physical system where there is a correlation between the hydrogeological units, the inflows and outflows, and the possible orientations of the underground flow.

In the numerical hydrogeological model, the calibration phase was carried out by comparing the observed load values and those calculated by the model, using the scatter diagram to obtain acceptable values, which allowed the final execution to be carried out. The results shown by the model consist of maps of water levels, flow directions based on equipotential curves and particle movement defined for the observation of the fate and trajectories of underground flows.

Keywords: Subsurface flow, Hydrogeological model, Aquifer.

CONTENIDO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

PRESENTACIÓN

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES	1
1.1 Ubicación.....	1
1.2 Accesibilidad	2
1.3 Clima y vegetación	5
1.3.1 Matorrales espinosos (MaE)	5
1.3.2 Pajonales (Pj)	6
1.3.3 Bosque ribereño (BRi)	7
1.3.4 Áreas de agricultura andina (Agri).....	7
1.4 Antecedentes.....	9
1.5 Problema.....	12
1.5.1 Descripción del problema	12
1.5.2 Formulación del problema general	13
1.5.3 Formulación de problemas específicos	13
1.6 Objetivos.....	13
1.6.1 Objetivo general	13
1.6.2 Objetivos específicos	13
1.7 Justificación.....	14
1.8 Formulación de hipótesis.....	14
1.9 Metodología de trabajo.....	14
1.9.1 Tipo de investigación:.....	14
1.9.2 Etapas de la elaboración del estudio	17
1.9.3 Equipos y materiales	19
1.9.4 Procesamiento de datos	19
1.10 Variables.....	20
1.10.1 Variables independientes	20
1.10.2 Variable dependiente.....	20

1.11 Marco teórico conceptual	20
CAPÍTULO II: GEOMORFOLOGÍA	41
2.1 Geomorfología regional.....	41
2.2 Geomorfología local.....	43
2.2.1 Llanura aluvial (Lla)	43
2.2.2 Quebrada (Q) / Cárcava (C).....	43
2.2.3 Ladera de montaña (Ldm).....	44
2.2.4 Cima de montaña media - alta (Cdm-Cdma)	45
2.2.5 Colina (Co).....	46
2.2.6 Loma (Lo)	46
2.2.7 Planicie residual (Pr).....	47
2.3 Pendientes.....	49
CAPÍTULO III: GEOLOGÍA	51
3.1 Geología regional	51
3.2 Geología local.....	53
3.2.1 Grupo San Jerónimo (Peo-ky-so).....	53
3.2.2 Formación Punacancha I (Nom-pu I).....	61
3.2.3 Formación San Sebastian (Q-sa).....	61
3.2.4 Depósitos aluviales (Q-al).....	63
3.2.5 Depósitos coluvio aluviales (Q-co-al).....	63
3.2.6 Depósitos deluviales (Q-dl)	65
3.2.7 Depósitos residuales (Q-re).....	65
3.2.8 Depósito fluvial (Q-fl)	66
3.3 Geología estructural regional	72
3.3.1 Falla Cusco.....	72
3.3.2 Falla Tambomachay	73
3.3.3 Falla San Juan de Quihuares	73
3.4 Geología estructural local.....	75
3.4.1 Estructuras primarias.....	75
3.4.2 Estructuras secundarias	80
3.5 Modelo geológico	93
3.6 Dirección de flujo del agua subterránea por fractura	94
CAPÍTULO IV: HIDROLOGÍA	96
4.1 Ubicación hidrográfica de la cuenca	96

4.2 Morfometría de la cuenca	98
4.2.1 Parámetros generales.....	98
4.2.2 Parámetros de forma	99
4.2.3 Parámetros de relieve	100
4.3. Información hidrometeorológica	105
4.3.1 Precipitación (P).....	106
4.3.2 Temperatura (T)	116
4.3.3 Evapotranspiración (EVT)	117
4.4 Escorrentía superficial (ES).....	119
4.5 Infiltración (I)	120
4.6 Balance hidrológico.....	121
CAPÍTULO V: HIDROGEOLOGÍA	123
5.1 Inventario de manantes.....	123
5.2 Parámetros hidrogeológicos de las formaciones geológicas	127
5.2.1 Permeabilidad (K).....	127
5.2.2 Transmisividad (T).....	133
5.2.3 Porosidad (n).....	135
5.2.4 Coeficiente de almacenamiento (S)	136
5.4 Clasificación de unidades hidrogeológicas	137
5.4.1 Acuífero fisurado sedimentario Kayra.....	137
5.4.2 Acuífero fisurado sedimentario Soncco II	138
5.4.3 Acuífero fisurado sedimentario Punacancha I	139
5.4.4 Acuífero pobre fisurado sedimentario Soncco I	140
5.4.5 Acuífero poroso en sedimento no consolidado.....	141
CAPÍTULO VI: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	146
6.1 Aspectos para el modelamiento conceptual	146
6.1.1 Descripción general de la geomorfología y geología.....	146
6.1.2 Descripción hidrológica	146
6.1.3 Descripción hidrogeológica	146
6.1.4 Conceptualización del flujo de agua subterránea.....	147
6.2 Componentes del modelo hidrogeológico conceptual.....	147
6.2.1 Modelo geológico	148
6.2.2 Modelo hidrológico.....	151
6.2.3 Modelo hidráulico	152

6.3 Marco hidrogeológico	154
CAPÍTULO VII: MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO.....	156
7.1 Software utilizado - Visual Modflow Flex	156
7.2 Construcción del modelo	156
7.2.1 Creación del proyecto y configuración de unidades	157
7.2.2 Definición del objetivo del modelo.....	158
7.2.3 Definición del modelo numérico.....	159
7.2.4 Definición de propiedades	163
7.2.5 Definición condición de borde	165
7.2.6 Definición de partículas	169
7.2.7 Primera ejecución.....	170
7.2.8 Proceso de calibración	171
7.2.9 Definición tipo de ejecución	175
7.2.10 Ejecución.....	177
7.2.11 Resultados	178
7.2.12 Análisis de incertidumbre cualitativo	192
CONCLUSIONES	193
RECOMENDACIONES.....	196
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	197
ANEXOS	200

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Coordenadas UTM y centros poblados zona de estudio</i>	1
Tabla 2 <i>Accesibilidad al área de estudio - cuenca Huanacahuire</i>	2
Tabla 3 <i>Distribución de pendientes cuenca Huanacahuire</i>	49
Tabla 4. <i>Distribución de las unidades geológicas cuenca Huanacahuire</i>	67
Tabla 5 <i>Coordenadas UTM de las ventanas estructurales</i>	81
Tabla 6 <i>Parámetros de las discontinuidades ventana estructural Kayra sur</i>	81
Tabla 7 <i>Parámetros de las discontinuidades de la ventana estructural Kayra norte</i>	83
Tabla 8 <i>Parámetros de las discontinuidades de la ventana estructural Soncco I</i>	85
Tabla 9 <i>Parámetros de las discontinuidades de la ventana estructural Soncco II</i>	87
Tabla 10 <i>Propiedades de las discontinuidades de la ventana estructural Punacancha I</i>	89
Tabla 11 <i>Ubicación de fallas locales</i>	90
Tabla 12 <i>Codificación de la cuenca Huanacahuire según Pfafstetter</i>	96
Tabla 13 <i>Geometría de la cuenca</i>	98
Tabla 14 <i>Altitudes de la cuenca</i>	98
Tabla 15 <i>Parámetros de forma de la cuenca Huanacahuire</i>	99
Tabla 16 <i>Áreas parciales de la cuenca Huanacahuire</i>	100
Tabla 17 <i>Pendiente media cuenca Huanacahuire</i>	102
Tabla 18 <i>Hidrografía de la cuenca Huanacahuire</i>	104
Tabla 19 <i>Coordenadas de la estación meteorológica Kayra</i>	106
Tabla 20 <i>Completación de datos de precipitación estación Granja Kayra</i>	107
Tabla 21 <i>División de periodos</i>	115
Tabla 22 <i>Cálculo de parámetros de cada periodo</i>	115
Tabla 23 <i>Evaluación de consistencia en la media</i>	115
Tabla 24 <i>Evaluación de la consistencia en la desviación estándar</i>	116

Tabla 25 <i>Temperatura media mensual</i>	117
Tabla 26 <i>Evapotranspiración potencial cuenca Huanacahuire</i>	119
Tabla 27 <i>Balance hídrico cuenca Huanacahuire</i>	121
Tabla 28 <i>Inventario de manantes captados cuenca Huanacahuire</i>	124
Tabla 29 <i>Clasificación de manantes por su productividad</i>	125
Tabla 30 <i>Resultados del ensayo de permeabilidad en depósito residual sector Ccescce</i>	129
Tabla 31 <i>Resumen de ensayos de permeabilidad para materiales no consolidados</i>	130
Tabla 32 <i>Valores de la apertura y espaciado de la ventana estructural Soncco I</i>	131
Tabla 33 <i>Resumen de valores de permeabilidad efectiva en materiales consolidados</i>	132
Tabla 34 <i>Valores de permeabilidad efectiva según la litología</i>	133
Tabla 35 <i>Valores de transmisividad en los puntos de manantes captados</i>	133
Tabla 36 <i>Valores de transmisividad para puntos de caudales</i>	134
Tabla 37 <i>Unidades hidrogeológicas cuenca Huanacahuire</i>	144
Tabla 38 <i>Manantes con régimen permanente</i>	172

Índice de figuras

Figura 1 <i>Ubicación política del área de estudio</i>	3
Figura 2 <i>Accesibilidad al área de estudio - cuenca Huanacahuire</i>	4
Figura 3 <i>Vegetación de matorrales espinosos</i>	6
Figura 4 <i>Pajonales en las partes altas sector Conchacalla</i>	6
Figura 5 <i>Vegetación herbácea y arbustiva parte baja</i>	7
Figura 6 <i>Áreas de cultivo en terrazas bajas</i>	8
Figura 7 <i>Áreas de cultivo en laderas</i>	8
Figura 8 <i>Flujograma del modelo hidrogeológico conceptual</i>	15
Figura 9 <i>Flujograma del modelo hidrogeológico numérico</i>	16
Figura 10 <i>Modelo hidrogeológico conceptual</i>	21
Figura 11 <i>Modelo hidrogeológico numérico</i>	21
Figura 12 <i>Formaciones geológicas frente al agua</i>	28
Figura 13 <i>Acuíferos según sus circunstancias hidráulicas y estructurales</i>	29
Figura 14 <i>Unidades geomorfológicas</i>	32
Figura 15 <i>Estratigrafía de los dominios morfoestructurales regionales</i>	33
Figura 16 <i>Tipos de falla</i>	34
Figura 17 <i>Tipos de diaclasas</i>	35
Figura 18 <i>Tipos de cuenca</i>	36
Figura 19 <i>Ciclo hidrológico</i>	37
Figura 20 <i>Geomorfología regional</i>	42
Figura 21 <i>Llanura aluvial en la parte baja de la cuenca Huanacahuire</i>	43
Figura 22 <i>Quebrada (Q) principal de la Cuenca Huanacahuire</i>	44
Figura 23 <i>Cárcavas (C) y quebradas (Q) vista frontal comunidad de Conchacalla</i>	44
Figura 24 <i>Laderas con pendiente abrupta y suave</i>	45

Figura 25 <i>Cimas de montaña parte sur de la cuenca</i>	46
Figura 26 <i>Colinas en la parte media de la cuenca</i>	46
Figura 27 <i>Lomeríos ligeramente disectados</i>	47
Figura 28 <i>Planicies eluviales vista sureste de la cuenca</i>	47
Figura 29 <i>Geomorfología local</i>	48
Figura 30 <i>Pendientes</i>	50
Figura 31 <i>Geología regional</i>	52
Figura 32 <i>Afloramiento Fm. Kayra zona noroeste</i>	53
Figura 33 <i>Afloramiento en corte de carretera de la Fm. Kayra al sur de la zona de estudio</i>	54
Figura 34 <i>Contacto entre las formaciones Kayra y Soncco</i>	54
Figura 35 <i>Vista del contacto entre los miembros I y II de la Formación Soncco</i>	55
Figura 36 <i>Intercalación de areniscas y lutitas Formación Soncco I</i>	56
Figura 37 <i>Formación Soncco I en corte de carretera ruta Cusco-Rondocan</i>	57
Figura 38 <i>Contacto entre los miembros I y II de la Formación Soncco</i>	58
Figura 39 <i>Afloramiento de areniscas feldespáticas de la Fm. Soncco II Sector Llulluchayoc</i>	58
Figura 40 <i>Areniscas de grano fino a medio parte basal de la Fm. Soncco II.</i>	59
Figura 41 <i>Areniscas feldespáticas de grano grueso de la Fm. Soncco II zona basal</i>	59
Figura 42 <i>Afloramiento de areniscas y conglomerados en la parte media de la Fm. Soncco II.</i> ..	60
Figura 43 <i>Vista de conglomerados de clastos volcánicos de la Fm. Soncco II</i>	60
Figura 44 <i>Lutitas de la Fm. Punacancha I en corte de carretera ruta Cusco-Punacancha</i>	61
Figura 45 <i>Lente de grava en secuencia de arcillas y limolitas de la Fm. san Sebastian</i>	62
Figura 46 <i>Cantera de gravas y arenas de la Fm. San Sebastián, salida de la cuenca</i>	62
Figura 47 <i>Depósito de material aluvial en terrazas</i>	63
Figura 48 <i>Depósito coluvio aluvial en corte de carretera ruta Cusco-Rondocan</i>	64
Figura 49 <i>Depósito coluvio aluvial con presencia de bloques subredondeados</i>	64

Figura 50 <i>Depósitos deluviales en laderas</i>	65
Figura 51 <i>Vista sureste de la cuenca Huanacahuire, se observan planicies residuales</i>	66
Figura 52 <i>Cauce antiguo del río Huanacahuire, bancos de gravas con matriz de arena</i>	67
Figura 53 <i>Columna estratigráfica de la sección A-A'</i>	68
Figura 54 <i>Columna estratigráfica de la sección C-C'</i>	69
Figura 55 <i>Geología local cuenca Huanacahuire</i>	70
Figura 56 <i>Sección geológica A-A' dirección NE-SW</i>	71
Figura 57 <i>Sección geológica B-B' dirección NE-SW</i>	71
Figura 58 <i>Sección geológica C-C' dirección NE-SW</i>	72
Figura 59 <i>Mapa geológico estructural regional</i>	74
Figura 60 <i>Interpolación de buzamientos</i>	75
Figura 61 <i>Estratificación cuenca Huanacahuire sección A-A'</i>	77
Figura 62 <i>Estratificación cuenca Huanacahuire sección B-B'</i>	78
Figura 63 <i>Estratificación cuenca Huanacahuire sección C-C'</i>	79
Figura 64 <i>Cuadro de los parámetros de fracturas medidos en campo</i>	80
Figura 65 <i>Ventana estructural de la Formación Kayra en el sur</i>	82
Figura 66 <i>Planos de fractura de la Formación Kayra en el sur</i>	82
Figura 67 <i>Ventana estructural de la Formación Kayra al norte</i>	84
Figura 68 <i>Planos de fractura de la Formación Kayra en el sur de la zona de estudio</i>	84
Figura 69 <i>Ventana estructural Formación Soncco I</i>	86
Figura 70 <i>Planos de fractura Formación Soncco I</i>	86
Figura 71 <i>Ventana estructural Formación Soncco II</i>	88
Figura 72 <i>Planos de fractura de la Formación Soncco II</i>	88
Figura 73 <i>Ventana estructural Formación Punacancha I</i>	89
Figura 74 <i>Planos de fractura de la Formación Soncco II</i>	90

Figura 75 <i>Falla de rumbo inferida</i>	91
Figura 76 <i>Falla normal presente en la Formación Soncco</i>	91
Figura 77 <i>Falla lístrica presente en la Formación Soncco miembro I</i>	92
Figura 78 <i>Falla normal presente en lutitas de la Formación Kayra</i>	92
Figura 79 <i>Modelo geológico cuenca Huanacahuire vista al norte</i>	93
Figura 80 <i>Direcciones de flujo subterráneo por fractura</i>	95
Figura 81 <i>Codificación de la cuenca Huanacahuire según Pfafstetter</i>	97
Figura 82 <i>Áreas parciales cuenca Huanacahuire</i>	101
Figura 83 <i>Curva hipsométrica y polígono de frecuencia cuenca Huanacahuire</i>	103
Figura 84 <i>Hidrografía de la cuenca Huanacahuire</i>	104
Figura 85 <i>Pendiente del río principal</i>	105
Figura 86 <i>Ubicación de la estación Granja Kayra</i>	106
Figura 87 <i>Diagrama de precipitación media mensual estación Granja Kayra</i>	110
Figura 88 <i>Metodología para el análisis de consistencia</i>	111
Figura 89 <i>Series históricas de precipitación de la estación Granja Kayra</i>	112
Figura 90 <i>Diagrama análisis de doble masa estación Granja Kayra, Pisac y Paruro</i>	113
Figura 91 <i>Diagrama de análisis de doble masa estación Granja Kayra</i>	114
Figura 92 <i>Diagrama de temperaturas media, mínima y máxima</i>	117
Figura 93 <i>Diagrama de balance hídrico cuenca Huanacahuire</i>	122
Figura 94 <i>Inventario de manante captado sector Quircas</i>	123
Figura 95 <i>Inventario de manante captado sector Quircas</i>	124
Figura 96 <i>Diagrama de clasificación de manantes por su productividad</i>	126
Figura 97 <i>Distribución de manantes captados en la cuenca Huanacahuire</i>	126
Figura 98 <i>Valores de parámetros hidrogeológicos</i>	127
Figura 99 <i>Valores de permeabilidad para material consolidado</i>	128

Figura 100 <i>Ensayo de permeabilidad Lefranc de carga variable</i>	130
Figura 101 <i>Valores de porosidad para materiales consolidados y no consolidados</i>	136
Figura 103 <i>Acuífero fisurado sedimentario Kayra, sector Conchacalla</i>	138
Figura 104 <i>Acuífero fisurado sedimentario Soncco II</i>	139
Figura 105 <i>Acuífero fisurado sedimentario Punacancha I, sector Quircas grande</i>	140
Figura 106 <i>Acuífero pobre fisurado sedimentario Soncco I, Comunidad Suncco</i>	141
Figura 107 <i>Acuífero poroso deluvial, sector Lloquemocco</i>	142
Figura 108 <i>Acuífero poroso aluvial, sector Lloquemocco</i>	142
Figura 109 <i>Acuífero poroso coluvio aluvial, sector Llulluchayoc</i>	143
Figura 110 <i>Acuífero poroso en secuencia de gravas de la Formación San Sebastián</i>	143
Figura 111 <i>Unidades hidrogeológicas cuenca Huanacahuire</i>	145
Figura 112 <i>Esquema visual gráfico componentes del modelo hidrogeológico conceptual</i>	147
Figura 113 <i>Esquema visual gráfico del modelo geológico</i>	148
Figura 114 <i>Vista norte del modelo geológico 3D cuenca Huanacahuire</i>	149
Figura 115 <i>Vista sureste del modelo geológico 3D cuenca Huanacahuire</i>	150
Figura 116 <i>Esquema visual gráfico del modelo hidrológico</i>	151
Figura 117 <i>Modelo hidrológico - perfil transversal de la cuenca SW - NE</i>	152
Figura 118 <i>Esquema visual gráfico del modelo hidráulico</i>	153
Figura 119 <i>Modelo hidráulico</i>	153
Figura 120 <i>Modelo hidrogeológico conceptual cuenca Huanacahuire</i>	155
Figura 121 <i>Creación del proyecto y configuración de unidades</i>	158
Figura 122 <i>Definición de objetivos para el modelo</i>	159
Figura 123 <i>Vista 3D horizontes definidos para el modelo</i>	160
Figura 124 <i>Vista 3D de las zonas para el modelo (cuerpos de unidades hidrogeológicas)</i>	160
Figura 125 <i>Enmallado del modelo (discretización)</i>	161

Figura 126 <i>Definición de la extensión del modelo en base a la cuenca</i>	162
Figura 127 <i>Vista 3D de enmallado del modelo en base a la cuenca</i>	162
Figura 128 <i>Definición de las propiedades hidráulicas (k y n_e)</i>	163
Figura 129 <i>Valores de conductividad hidráulica</i>	164
Figura 130 <i>Valores de porosidad total y efectiva</i>	164
Figura 131 <i>Vista de valores ingresados para cada zona</i>	164
Figura 132 <i>Definición de las condiciones de borde</i>	166
Figura 133 <i>Condiciones de borde para el modelo (Carga)</i>	166
Figura 134 <i>Ingreso de inventario de manantes (pozos)</i>	167
Figura 135 <i>Vista de la distribución de manantes</i>	167
Figura 136 <i>Vista 3D de la distribución de manantes y condición de borde</i>	168
Figura 137 <i>Ingreso condición de borde (recarga y evapotranspiración)</i>	168
Figura 138 <i>Definición de partículas</i>	169
Figura 139 <i>Distribución de partículas destino y trayectoria</i>	170
Figura 140 <i>Primera ejecución del modelo</i>	170
Figura 141 <i>Ingreso de pozos de observación (manantes)</i>	171
Figura 142 <i>Definición de los pozos de observación</i>	173
Figura 143 <i>Ajuste de ítems para las cargas de los pozos de observación</i>	173
Figura 144 <i>Ejecución de datos observados y calculados</i>	174
Figura 145 <i>Diagrama de dispersión - valores de carga observados y calculados</i>	175
Figura 146 <i>Definición tipo de ejecución para la simulación de flujo y partícula</i>	176
Figura 147 <i>Traducción del modelo</i>	176
Figura 148 <i>Ultima ejecución del modelo</i>	177
Figura 149 <i>Curvas de nivel de agua cuenca Huanacahuire</i>	179
Figura 150 <i>Vista 3D niveles de agua cuenca Huanacahuire</i>	179

Figura 151 Nivel freático fila 10.....	180
Figura 152 Nivel freático fila 20.....	181
Figura 153 Nivel freático fila 37.....	182
Figura 154 Nivel freático fila 52.....	183
Figura 155 Nivel freático columna 21	184
Figura 156 Nivel freático columna 11	185
Figura 157 Descenso de nivel de agua cuenca Huanacahuire	186
Figura 158 Vista 3D descenso de nivel de agua	187
Figura 159 Líneas de flujo subterráneo cuenca Huanacahuire	188
Figura 160 Vista 3D carga hidráulica cuenca Huanacahuire.....	189
Figura 161 Distribución de partículas definidas	190
Figura 162 Movimiento de partículas destino y trayectoria.....	191

Capítulo I: Aspectos generales

1.1 Ubicación

El área de investigación se encuentra situado al sureste de la ciudad del Cusco, entre la comunidad de Conchacalla y el centro poblado de Paqchayoq Suncco del distrito de San Jerónimo, provincia de Cusco, región de Cusco (ver figura 1). La coordenada UTM en la zona 19L y con datum WGS_1984 es la siguiente (Tabla 1).

Tabla 1

Coordenadas UTM y centros poblados zona de estudio

		Coordenada este	Coordenada norte
		190000	8495000
Numero	Provincia	Distrito	Nombre
1	Cusco	San Jerónimo	Comunidad Suncco
2	Cusco	San Jerónimo	Sector Callacancha
3	Cusco	San Jerónimo	Comunidad Quircas
4	Cusco	San Jerónimo	Sector Lloquemocco
5	Cusco	San Jerónimo	Sector Punkuhuaylla
6	Cusco	San Jerónimo	Comunidad Conchacalla
7	Cusco	San Jerónimo	Sector Ccesce
8	Cusco	San Jerónimo	Sector Ccachopata
9	Cusco	San Jerónimo	Sector Llulluchayoc

Fuente: www.regioncusco.gob.pe

1.2 Accesibilidad

Para acceder al área de investigación desde la ciudad del cusco, se debe llegar al puente Chimpahuaylla ubicado en la vía de evitamiento, cerca de la plaza Chimpahuaylla en el distrito de San Jerónimo; después seguir el desvío por la vía auxiliar (trocha carrozable) que se dirige al sur hacia la comunidad de Conchacalla.

Para poder llegar al puente Chimpahuaylla se pueden tomar los transportes públicos urbanos “Correcaminos” y “El dorado”, los cuales tienen como paradero final el puente Chimpahuaylla. En la siguiente (Tabla 2) se detalla la ruta y tiempo de acceso.

Tabla 2

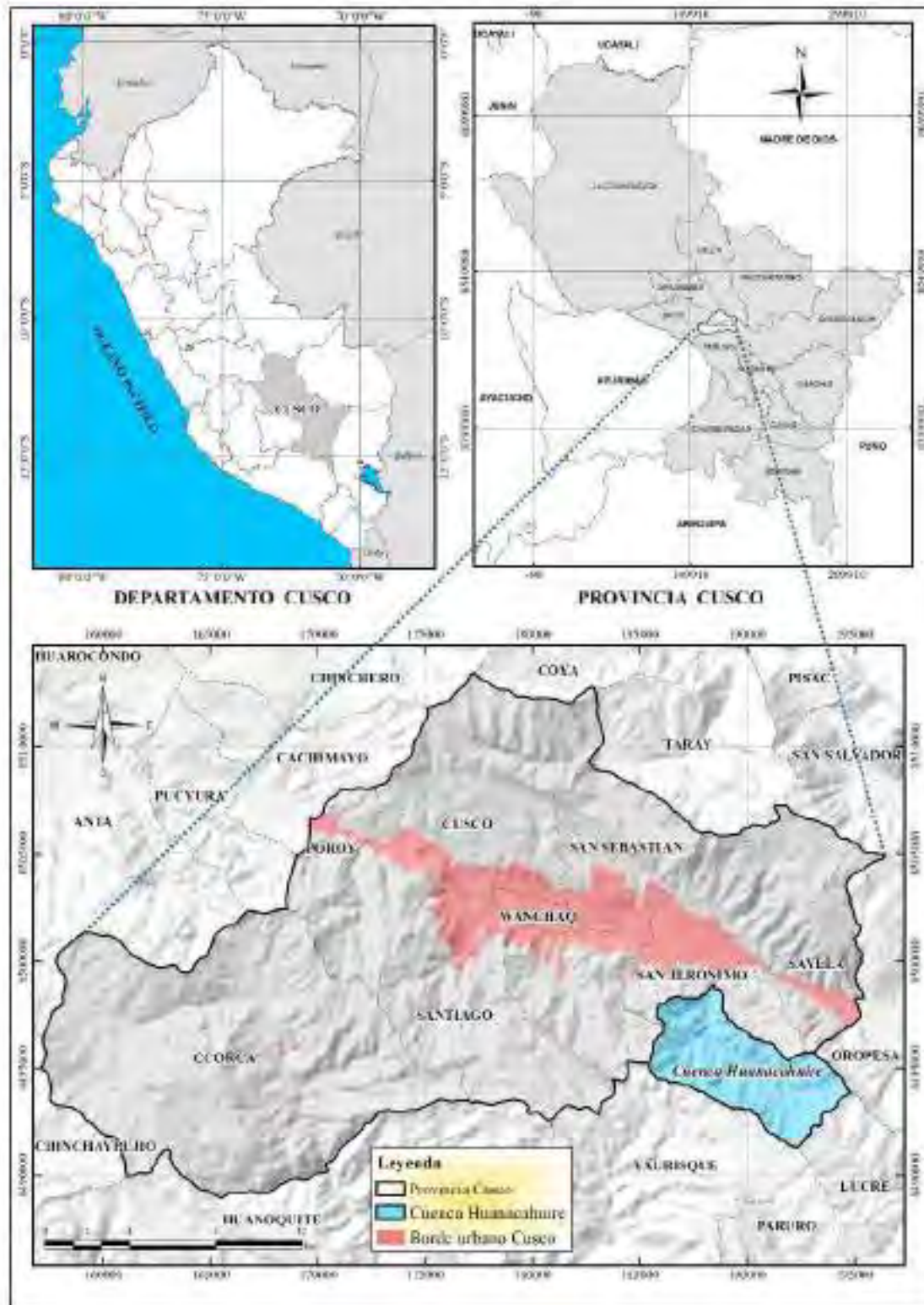
Accesibilidad al área de estudio - cuenca Huanacahuire

Inicio	Distancia	Tiempo	Tipo de vía
Cusco (puerta principal UNSAAC)			
tomar transporte urbano Correcaminos o El Dorado - Puente Chimpahuaylla	10.8 km	30 min aprox.	Concreto - asfaltado
Puente Chimpahuaylla - Zona de estudio (Entrada hacia la cuenca Huanacahuire)	1.5 km	10 - 40 min aprox.	Trocha carrozable

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1

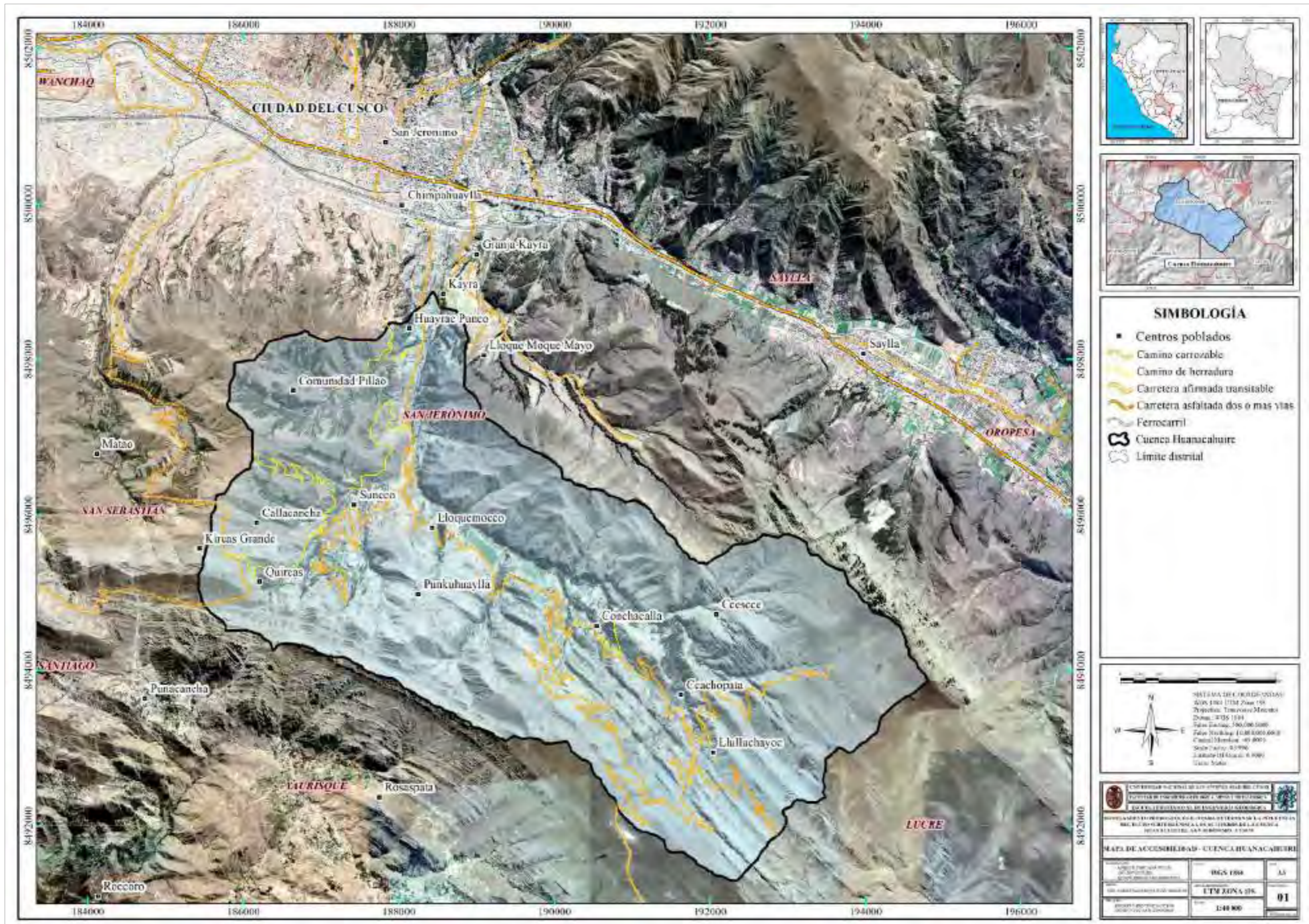
Ubicación política del área de estudio



Fuente. Elaboración propia.

Figura 2

Accesibilidad al área de estudio - cuenca Huanacahuire



Fuente: Elaboración propia.

1.3 Clima y vegetación

La zona de investigación presenta un patrón estacional bimodal a lo largo del año, con dos estaciones bien diferenciadas: una seca (de abril a octubre) y otra lluviosa (de noviembre a marzo). La zona de estudio tiene una temperatura moderada de 15°C en las secciones inferiores y un clima frío de 8°C en las zonas superiores.

La temperatura varía con las estaciones del año; durante la estación lluviosa, depende de si llueve o no (máximas al mediodía con cielos despejados), mientras que, durante la estación seca, la temperatura media desciende (mínima al amanecer), registrándose mínimas por debajo de los cero grados centígrados. La humedad relativa media de la zona de investigación oscila entre el 62% y el 78%. (Elorrieta et al., 2017).

La capa vegetal natural que cubre la superficie terrestre y las coberturas vegetales inducidas, producto de la actividad humana, conforman la cobertura vegetal en la cuenca del Huanacahuire. En el área de estudio se tienen las siguientes unidades de cobertura vegetal.

1.3.1 Matorrales espinosos (MaE)

“Los matorrales espinosos presentan un tipo de vegetación xerofítica que se desarrolla en suelos muy pedregosos” (Elorrieta et al., 2017, p. 196); se extienden en la parte sur de la cuenca desde la última línea de cultivo hasta los afloramientos rocosos o en la mayoría de los lugares que han sufrido previamente procesos degradativos y no están siendo utilizados por los lugareños; también los encontramos sobre las cárcavas y quebradas.

Figura 3

Vegetación de matorrales espinosos



1.3.2 Pajonales (Pj)

En el extremo norte de la cuenca Huanacahuire están ubicados por encima de las quebradas boscosas, mientras que en el lado sur se encuentran cubriendo las laderas empinadas y cimas de las montañas. Los pajonales se localizan por encima de los 3200 msnm.

Figura 4

Pajonales en las partes altas sector Conchacalla



1.3.3 Bosque ribereño (BRi)

Los suelos son profundos, equilibrados y contienen arcilla arenosa y materia orgánica. Está situada a lo largo de arroyos.

La cantidad de agua que ingieren los ríos y arroyos en los momentos de mayor caudal determina en gran medida la humedad del suelo. La vegetación es típicamente herbácea y arbustiva y se encuentra presente principalmente en la quebrada Huanacahuire. (Elorrieta et al., 2017).

Figura 5

Vegetación herbácea y arbustiva parte baja



1.3.4 Áreas de agricultura andina (Agri)

Dentro de estas áreas se consideran las áreas agrícolas.

1.3.4.1 Área de agricultura en terraza (Agri-t).

Esta cobertura incluye todas las regiones con actividad agrícola extensiva, que se concentra principalmente en las zonas estrechas y llanas del fondo de los valles. Comprenden cultivos de regadío anuales y perennes.

Figura 6

Áreas de cultivo en terrazas bajas



1.3.4.2 Área de agricultura en secano (Agri-s).

La producción agrícola tiene lugar en tierras de secano, entre 3600 y 4200 metros sobre el nivel del mar, y se destina al autoconsumo. Estas zonas suelen tener un periodo de descanso de dos o tres años, durante el cual suelen utilizarse para el pastoreo, lo que afecta al proceso de regeneración. (Elorrieta et al., 2017).

Figura 7

Áreas de cultivo en laderas



1.4 Antecedentes

1.4.1 Saavedra (2020) en su artículo titulado “**Modelado de agua subterránea en el valle de Cochabamba utilizando Modflow**” cuyo objetivo de estudio fue monitorear el nivel freático y establecer un modelo hidrogeológico utilizando Visual ModFlow Flex para mejorar el conocimiento del flujo de aguas subterráneas en un acuífero no consolidado de origen aluvial.

Muestra como resultado que en el proceso de calibración se encontró que la conductividad hidráulica es el parámetro más sensible. Una vez que se calibraron los parámetros del modelo, se logró un coeficiente de correlación aceptable de 0,76 y RMS (m) de 6,2. El proceso de validación se realizó en otro período y se encontró un RMS de 6.81m.

En este artículo de investigación el modelo identificó precisamente un flujo de agua subterránea que se mueve de norte a sur, influenciado por ríos y pozos en operación.

1.4.2 Donado (2002) en su artículo titulado “**Aplicación de Visual ModFlow en la simulación numérica de flujo de la zona de recarga del acuífero Morroa Sucre – Córdova**” indica que el Visual ModFlow se encarga de mostrar de una manera gráfica estos resultados mediante líneas de contornos de igual carga hidráulica y también calcula las velocidades de flujo de agua subterránea. Las líneas de contornos de igual carga hidráulica dan información relacionada con las líneas piezométricas, es decir niveles y abatimientos. Mientras que las velocidades muestran la dirección de flujo.

La simulación de flujo demuestra tener éxito solo en aquellas áreas en las que se dispone de datos, respecto a las áreas donde no se contaban con datos, se utilizó la teoría de variable regional esto con el propósito de estimar las condiciones iniciales en las ubicaciones en las que no se contaba con datos.

1.4.3 En la tesis con título “**Modelo hidrogeológico numérico conceptual de la microcuenca Huancarqui, distrito Yaurisque**” el autor Aguirre (2018), hizo la caracterización de unidades hidrogeológicas de la zona; y mediante el aforo de fuentes de agua subterránea se realizó una clasificación de estas unidades, llegando a observar: los acuíferos Kayra, Soncco II Y Paruro II; los acuitardos Soncco I y Paruro I, estos últimos considerados como acuíferos pobres por los resultados de pruebas de permeabilidad y porosidad realizadas en las muestras de roca.

Para el modelado numérico, la calibración tuvo como resultado la modificación de las conductividades hidráulicas, generando así una diferencia de medias 5.7825 y un RMS 8.2032 y una variación de 8.2865. obteniéndose así una calibración aceptable para el modelo.

Se observa que para la ejecución del modelo numérico se consideraron constantes los valores de recarga y la descarga de la quebrada Huancarqui esto en un régimen estacionario; mientras que para el régimen transitorio se consideró como variante en el tiempo a la recarga para cada unidad hidrogeológica y el caudal de salida de la quebrada.

1.4.4 Medina (2021) en su estudio “**Peligros geológicos por movimientos en masa e inundación fluvial en la ciudad de Cusco**” muestra la clasificación de unidades hidrogeológicas en la cuenca del Huatanay según su capacidad de almacenar y transmitir, donde la mayor extensión pertenece a acuíferos con un área de 62.39% seguido de los acuitardos con un área de 37.01%.

Dentro de la cuenca se han distinguido acuíferos del tipo fisurado sedimentario pertenecientes a las formaciones Punacancha, Soncco, Kayra y Huancané; acuíferos porosos no consolidados como materiales cuaternarios y; otros como el tipo fisurado kárstico y volcánico sedimentario que ocupan un área muy mínima. Respecto a los acuitardos la mayor extensión está siendo ocupada por el tipo sedimentario y con un área mínimo, los acuitardos intrusivos, no consolidado y volcánico.

1.4.5 Fluquer & Boris (2018) En su trabajo de investigación titulada “**Estudio hidrogeológico para determinar perímetros de protección de la zona de recarga de la galería filtrante de Pillao Matao**” presenta el mapa geológico local de la región, donde se han identificado los principales tipos de roca, suelos y estructuras con las mejores condiciones para la transmisión y el almacenamiento de aguas subterráneas.

Este reconocimiento permitió diferenciar las propiedades hidrogeológicas de las formaciones geológicas, así como interpretar el flujo y el movimiento de las aguas subterráneas. Según el estudio, las areniscas cuarzo-feldespáticas de las formaciones Kayra y Soncco de la microcuenca de Pillao Matao, donde se sitúa la galería filtrante, presentan rocas fisuradas por las que fluye el agua subterránea.

1.4.6 Benavente (2013) en su trabajo de investigación “**Neo tectónica y peligro sísmico en la región Cusco**” muestra trabajos de campo y gabinete donde se evidencia más de 55 estructuras Plio-cuaternarias, gracias a esto se puede redefinir los sistemas de fallas Plio-cuaternarias. Los sistemas de fallas más importantes que se han reconocido son: de Zurite-Cusco-Urcos-Sicuani; de Casacunca-Acomayo-Langui-Layo; de Chinchajpujio-Paruro-Acomayo; de Ocongate; del río Vilcanota; de la cordillera Oriental y fallas de la zona subandina.

La dirección de estas estructuras es noroeste - sureste y este - oeste que marca una deflexión en la cadena andina.

1.4.7 Carlotto (2011) en la carta “**Geología regional del cuadrángulo de Cusco, hoja 28-S-IV**” menciona la existencia de algunos yacimientos menores de areniscas cupríferas en el Altiplano. Sin embargo, aquí se encuentra el mayor tramo de afloramientos de areniscas del Grupo San Jerónimo, consideradas como buenos acuíferos sedimentarios fisurados tanto por la cantidad como por la calidad de sus reservas de agua. Actualmente estos son aprovechados mediante galerías filtrantes como las de Tancarpatá, Marashuayco o Saylla.

1.5 Problema

1.5.1 Descripción del problema

Una parte importante de la masa de agua del planeta es el agua subterránea, que se mantiene en los acuíferos, esos depósitos subterráneos de los que de vez en cuando brota a la superficie en forma de manantiales. (Momiya et al., 2017). El desplazamiento de estas aguas a través de las diferentes formaciones geológicas está representado por el flujo subterráneo, y es este, el que permite comprender el comportamiento del sistema acuífero.

Actualmente, gracias a la demanda creciente de agua en lugares cuya única fuente de abastecimiento es el agua subterránea, se desarrollan modelos hidrogeológicos que utilizan parámetros necesarios como el tiempo, espacio y características hidrogeológicas (Kresic, 2007). Estos modelos hidrogeológicos permiten conocer la dinámica del flujo subterráneo, esto a su vez permite analizar, interpretar y entender el comportamiento hidrogeológico de un acuífero, predecir su respuesta y generar información clave para la toma de decisiones. (Ingol & Castañeda, 2017).

En la cuenca del Cusco y al igual que en la zona de estudio, los acuíferos que se conocen son de origen sedimentario fisurado y poroso principalmente, desde el punto de vista textural. (Carlotto et al., 2011b), en estos tipos de acuíferos el movimiento del flujo subterráneo depende principalmente de condiciones geológicas y geomorfológicas, las cuales cambian dependiendo del cuerpo geológico que este atraviese; este cambio mencionado en alguna de las condiciones indica una variación en la dinámica del flujo, como por ejemplo en la dirección y/o velocidad y, por lo tanto, también implica una variación en el comportamiento del sistema acuífero. Sin embargo, tener una idea conceptual de estas variaciones y mencionarlas de manera cualitativa, podría no ser la mejor manera de entenderlas y explicarlas.

Por este motivo, esta investigación busca determinar la influencia del flujo subterráneo a los acuíferos de la cuenca Huanacahuire; interpretando y analizando los resultados que se

obtendrán a partir del modelado hidrogeológico conceptual y numérico basados en métodos de diferencias finitas.

1.5.2 Formulación del problema general

¿Cuál es el modelo hidrogeológico y cómo influyen los flujos subterráneos en los acuíferos de la cuenca Huanacahuire?

1.5.3 Formulación de problemas específicos

- ¿Cuáles son las características geomorfológicas y geológicas locales de la cuenca Huanacahuire?
- ¿Cómo son las características hidrológicas e hidrogeológicas de la cuenca Huanacahuire?
- ¿Cuál es el modelo hidrogeológico conceptual y numérico del flujo de agua subterránea en la cuenca Huanacahuire?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Realizar el modelo hidrogeológico para determinar la influencia del flujo subterráneo en los acuíferos de la cuenca Huanacahuire.

1.6.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la geomorfología local y geología local de la cuenca Huanacahuire.
- Determinar las características hidrológicas e hidrogeológicas de la cuenca Huanacahuire.
- Diseñar el modelo hidrogeológico conceptual y numérico de flujo de agua subterránea en la cuenca Huanacahuire.

1.7 Justificación

Esta investigación beneficiará a las comunidades de Conchacalla y Suncco Grande, como también a los centros poblados menores que se encuentran dentro de la zona de estudio, en el desarrollo de proyectos de extracción de agua subterránea cuya finalidad puede ser, el abastecimiento de agua para el consumo humano, la agricultura, la ganadería, etc. Por otra parte, con los objetivos planteados, se espera poder aportar información en el desarrollo de investigación de fuentes de agua subterránea, así como propagar su práctica para futuras investigaciones a nivel regional y nacional.

1.8 Formulación de hipótesis

El modelo hidrogeológico conceptual y numérico, determina la dinámica de flujo subterráneo que influye a los acuíferos de la cuenca Huanacahuire.

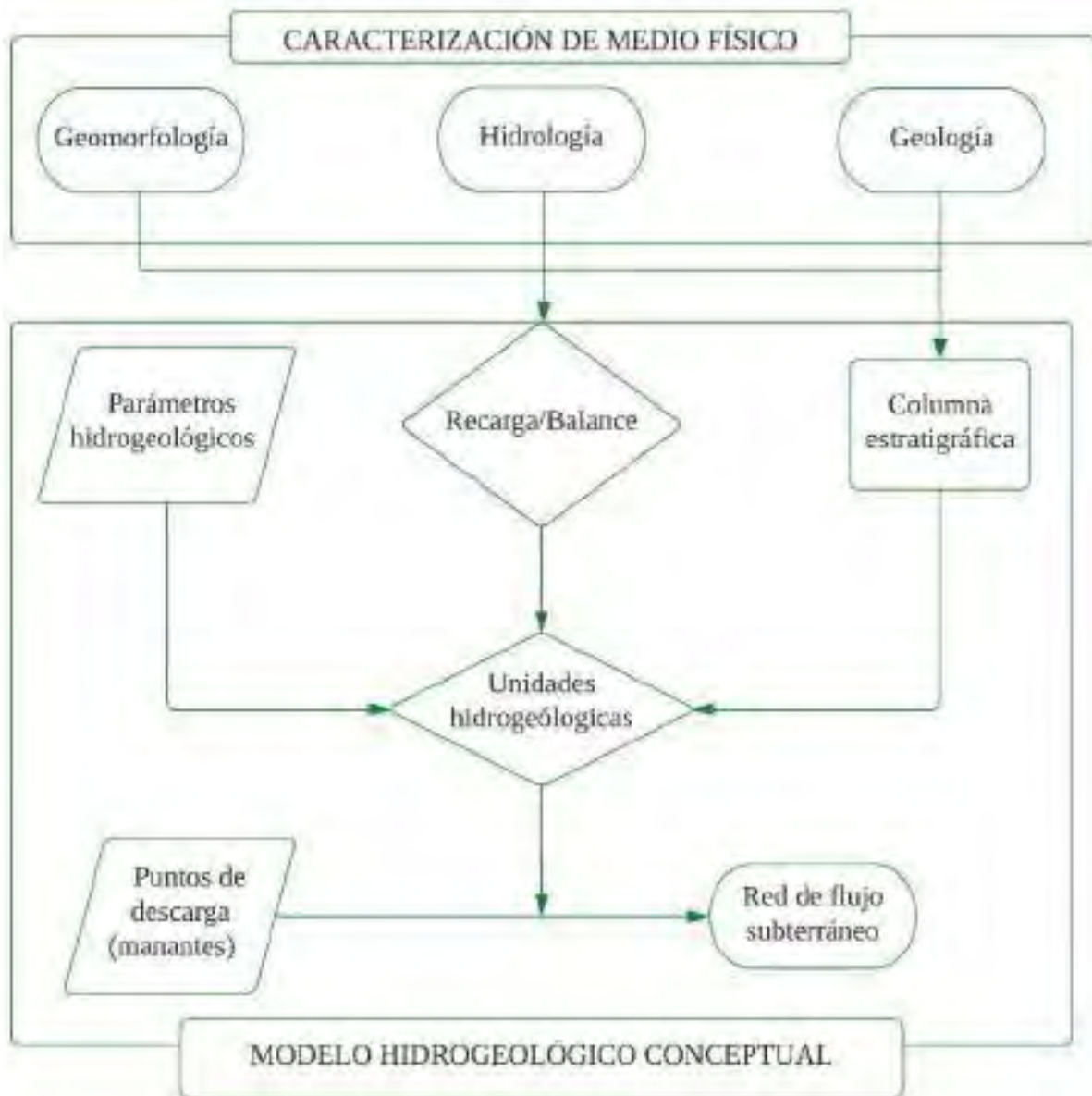
1.9 Metodología de trabajo

1.9.1 Tipo de investigación:

- Tipo de investigación: Mixta
- Clase de investigación: Aplicada
- Método: Hipotético, inductivo y deductivo
- Nivel de investigación: “Descriptivo” se trata de identificar, describir, analizar y clasificar las características geológicas, geológico estructurales, hidrológicas e hidrogeológicas de la cuenca Huanacahuire y; “explicativo - correlacional”, porque permite determinar el modelo hidrogeológico para ver la influencia del flujo subterráneo en los acuíferos.

Figura 8

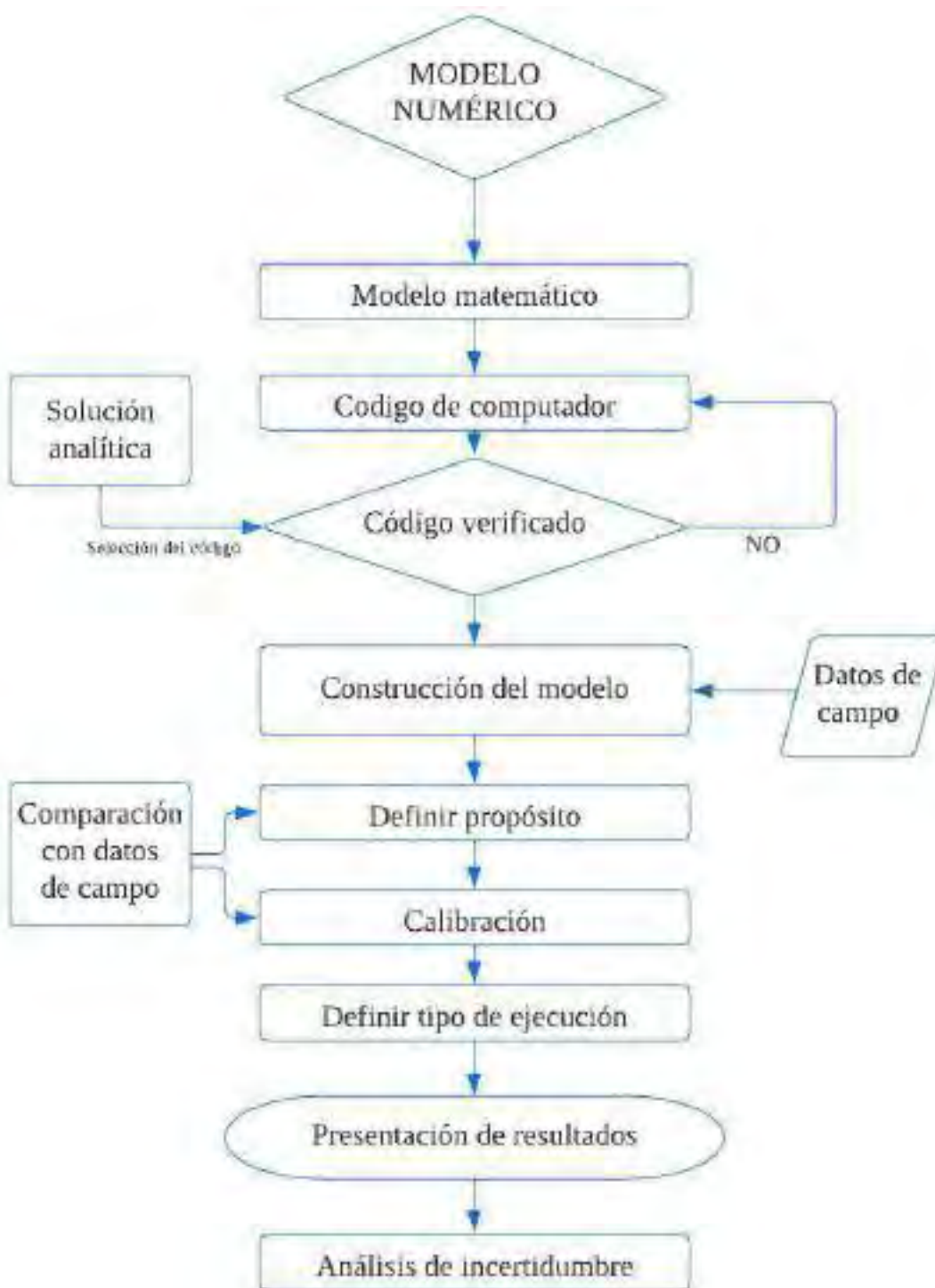
Flujograma del modelo hidrogeológico conceptual



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9

Flujograma del modelo hidrogeológico numérico



Fuente: Elaboración propia.

1.9.2 Etapas de la elaboración del estudio

1.9.2.1 Etapa de pre campo.

- Planificar y coordinar con las autoridades de las comunidades y sectores que se encuentran dentro del área de estudio, presentando el plan de trabajo.
- Recopilación de información (bibliografía y antecedentes), mapas, datos de campo y laboratorio, informes, tesis, papers, relacionados al tema de investigación.
- Preparación de mapas base para los trabajos de campo (mapa base topográfico, satelital, geológico regional y geomorfológico regional).
- Salida preliminar a campo.

1.9.2.2 Etapa de campo.

- Identificación y delimitación de la geomorfología local y geología local de la cuenca Huanacahuire (obtención de muestras de manos representativas de cada Formación geológica existente en la zona de estudio y levantamiento de columnas estratigráficas).
- Identificación y delimitación de la geología estructural local (discontinuidades y deformaciones).
- Realización de ventanas estructurales considerando los parámetros de las familias de discontinuidades.
- Identificación e inventariado de fuentes de agua subterránea (manantes). Medida de caudales.
- Realización de pruebas de campo (permeabilidad, porosidad, infiltración, etc.)
- Caracterización de unidades hidrogeológicas de las formaciones geológicas a partir del cartografiado.
- Toma de fotos para complementar la elaboración de tesis.

1.9.2.3 Etapa de post campo I.

Esta etapa está compuesta por fases que se desarrollarán secuencialmente, las cuales son mencionadas a continuación.

1.9.2.3.1 Fase preliminar.

Esta primera fase se centra en la clasificación y organización de toda la información recopilada anteriormente.

1.9.2.3.2 Fase de consolidación de datos.

En esta segunda fase se generan las capas de información SIG, archivos de puntos, líneas, polígonos, superficies, tablas y los formatos necesarios que el modelo necesite.

1.9.2.3.3 Fase de diseño conceptual.

La fase de diseño conceptual es muy importante para el paso de diseño numérico, en esta fase se llega a tener una idea del sistema hidrogeológico general, esta fase puede estar acompañada de revisiones bibliográficas y comparación con otros modelos conceptuales que se asemejen al de la zona de estudio.

1.9.2.3.4 Fase de diseño numérico.

El diseño del modelo numérico es el uso e integración de datos al paquete informativo Visual ModFlow Flex.

1.9.2.3.5 Fase de calibración.

Esta fase se centra en la correlación que existe entre los datos observados en campo y los datos brindados por el modelo.

1.9.2.3.6 Fase de ejecución y resultados.

Esta última fase muestra la simulación y resultados del modelo numérico, estos resultados se encuentran en forma de mapas, y valores que pueden ser interpretados.

1.9.2.4 Etapa de post campo II.

- Elaboración y digitalización de mapas detallados según los objetivos de la investigación.
- Elaboración de anexos según los capítulos de la investigación, donde se presentan fotografías, cuadros, tablas y otros documentos de la zona de estudio.
- Análisis e interpretación de resultados.
- Redacción de tesis.

1.9.3 Equipos y materiales

- Brújula, Picota, GPS
- Cinta métrica, cronómetro
- Cámara fotográfica
- Tubos PVC, etc.
- Imagen satelital
- Mapas base: Topográfico, Geológico, Satelital
- Tableros, colores, portaminas, regla
- Papel milimetrado, tableros
- Bolsas para recolección de muestras
- Ácido clorhídrico
- Lupa, rayador, protector, escalímetro, Ácido clorhídrico
- Chaleco, ponchos de agua

1.9.4 Procesamiento de datos

Para el procesamiento de los datos obtenidos en campo y gabinete, se utilizarán los siguientes programas informáticos: ArcGIS, Google Earth, Leapfrog Geo, SAS Planet, Dips, Microsoft Office, Visual ModFlow Flex, AutoCAD.

1.10 Variables

Para este estudio se han definidos las siguientes variables.

1.10.1 Variables independientes

Modelo hidrogeológico numérico y conceptual

1.10.1.1 Dimensiones.

- Geomorfología
- Geología
- Hidrología
- Hidrogeología

1.10.2 Variable dependiente

Flujo subterráneo

1.11 Marco teórico conceptual

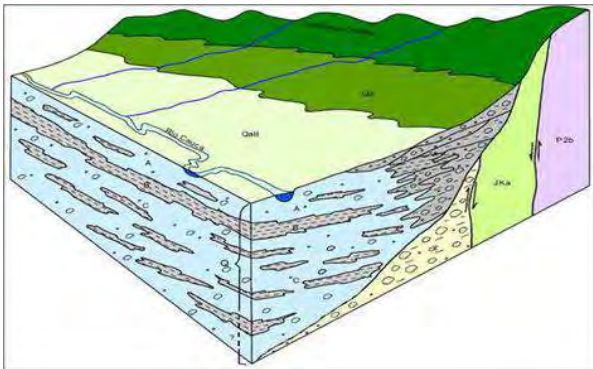
Modelo conceptual

El modelo conceptual, que es una descripción del sistema de aguas subterráneas, sirve de marco para el proceso de modelización. En él se incluyen los procesos de modelización más significativos, como las fronteras, la conceptualización del flujo, los componentes del balance hídrico y los parámetros hidráulicos del acuífero, junto con la interpretación de las condiciones geológicas e hidrológicas.

El modelo conceptual debe proporcionar una justificación cuantitativa y cualitativa del comportamiento de las aguas subterráneas observado en la zona de estudio. (Ingol & Castañeda, 2017).

Figura 10

Modelo hidrogeológico conceptual



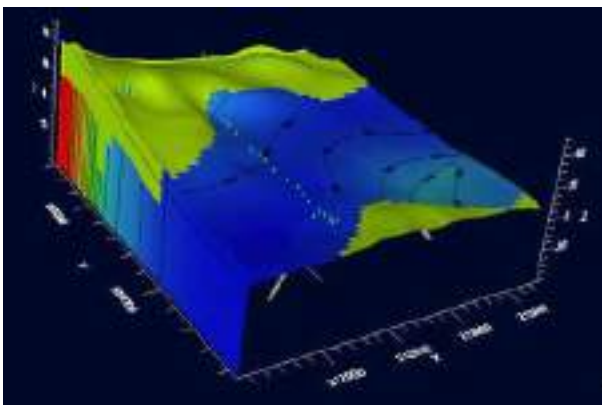
Fuente: Tomado de Donado (2002).

Modelo numérico

Un modelo matemático o numérico es una versión condensada de la realidad que se utiliza con frecuencia para simular y prever el comportamiento de los sistemas acuíferos, el impacto del bombeo de aguas subterráneas en sus niveles, la eficacia de las prácticas de gestión, etc. Combinando la Ley de Darcy con la ecuación de continuidad, se puede obtener el movimiento del agua subterránea (fluido incompresible) en tres dimensiones para un acuífero anisótropo e inhomogéneo. (Ingol & Castañeda, 2017).

Figura 11

Modelo hidrogeológico numérico



Fuente: <https://groups.google.com/g/modflow/c/tZa5yAINGXI>

Métodos numéricos

Son usos de algoritmos que permiten formular y resolver cuestiones matemáticas con menos operaciones aritméticas implicadas. También se denominan técnicas indirectas. El análisis numérico desarrolla formas de aprobar rápida y eficazmente soluciones a problemas con expresiones matemáticas. El objetivo principal del análisis numérico es identificar aproximaciones de soluciones a cuestiones difíciles. (Araujo, 2017).

Diferencias finitas

Las ecuaciones diferenciales pueden resolverse numéricamente mediante el método de diferencias finitas (MDF), que utiliza ecuaciones en diferencias con diferencias finitas que se asemejan mucho a las derivadas para aproximarlas. Los FDM son, por tanto, técnicas de discretización. La discretización de la rejilla es un componente clave del enfoque de diferencias finitas. (Araujo, 2017).

Visual ModFlow Flex

Es una interfaz gráfica para MODFLOW. La interfaz gráfica de usuario permite el preprocesamiento de datos para desarrollar un modelo de flujo de agua subterránea, y luego gráficamente visualiza los datos de salida. El programa se basa en otros módulos más allá de MODFLOW-2005 mediante la incorporación otros módulos de MODFLOW. El software se ha utilizado en una amplia variedad de aplicaciones, incluida la simulación y predicción de las condiciones del agua subterránea, interacciones acopladas de agua subterránea / superficial y manejo de aguas subterráneas. (“Groundwater Flow & Contaminant Transport Modeling Software,” 2022).

Aspectos para el modelamiento numérico (Ingol & Castañeda, 2017)

Dominio y discretización.

Los límites del dominio computacional se modifican de acuerdo con el modelo conceptual, y el proceso de discretización permite transformar el dominio en una malla de nodos con el fin de convertir la ecuación diferencial parcial que describe el flujo en medios porosos, las condiciones iniciales y de contorno, en un sistema de ecuaciones algebraicas.

Condición de borde.

Las condiciones de contorno son importantes. En general, permiten establecer los límites físicos e hidráulicos del dominio computacional.

Condiciones iniciales.

El modelizador debe especificar las circunstancias iniciales en un modelo de flujo, que representan los niveles freáticos al comienzo de una simulación. Si las cargas iniciales supuestas (niveles freáticos) se definen incorrectamente para una simulación en estado estacionario, la eficacia y la velocidad de la solución numérica podrían verse afectadas negativamente; no obstante, la solución final no se vería afectada. Los modelos de flujo en estado transitorio suelen requerir condiciones iniciales.

Parámetros del modelo.

La conductividad hidráulica, la porosidad efectiva, las características de almacenamiento, son los parámetros más usados en el modelado de aguas subterráneas. Las simulaciones de flujo transitorio también requieren parámetros temporales, como las unidades de tiempo, el número de pasos temporales, la duración y el número de periodos.

Calibración del modelo.

En el proceso de calibración, los parámetros del modelo, como la conductividad hidráulica, se modifican hasta que los resultados del modelo coinciden o son muy similares a las mediciones

registradas anteriormente. El modelo puede considerarse una representación del sistema físico investigado cuando los valores simulados son razonablemente similares a los observados.

Análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad es el proceso de analizar los parámetros de entrada y su impacto en los resultados del modelo (como cargas y caudales). En otras palabras, este estudio permite comprobar la resistencia del modelo a los cambios en los parámetros del proceso de calibración. Por ejemplo, el análisis de sensibilidad en la calibración manual (ensayo y error) consiste en modificar adecuadamente un parámetro del modelo, volver a ejecutarlo y determinar cómo cambian las predicciones (cargas y caudales).

Validación del modelo.

Para determinar si el modelo calibrado puede utilizarse como herramienta de predicción, se lleva a cabo la validación. Esta técnica consiste esencialmente en comparar las predicciones del modelo calibrado con un periodo de medición que no se ajuste a los parámetros del periodo utilizado para calibrar el modelo.

Análisis de incertidumbre.

Lo que no sabemos sobre un sistema es incertidumbre. Las fuentes de incertidumbre en los modelos de aguas subterráneas incluyen los parámetros del modelo, la incertidumbre resultante de los errores de medición, los modelos conceptuales y la calibración del modelo. Una fuente importante de incertidumbre en la modelización de las aguas subterráneas es la falta de comprensión de los parámetros de entrada, como la conductividad hidráulica, la recarga, las tasas de bombeo, la geometría del acuífero, etc.

Predicción / escenarios.

Una vez calibrado, un modelo que capte fielmente el comportamiento del sistema puede utilizarse para simular situaciones predictivas con el fin de promover los objetivos de la

modelización. Los modelos predictivos deben ser capaces de dar cuenta de los cambios en la recarga futura de las aguas subterráneas, la extracción y, si es necesario, las condiciones de contorno; como resultado, éstas podrían diferir del modelo calibrado.

Flujo subterráneo

El flujo subterráneo, en hidrología, es el flujo de agua debajo de la superficie de la tierra como parte del ciclo del agua. En el ciclo del agua, cuando la precipitación cae sobre el suelo terrestre, parte del agua fluye en la superficie formando arroyos y ríos. El agua restante, a través de la infiltración, penetra en el suelo viajando bajo tierra, hidratando el suelo de la zona vadosa, recargando los acuíferos, con el exceso fluyendo en la escorrentía subterránea. En hidrogeología se mide por la ecuación de flujo de agua subterránea. (*Flujo Subterráneo*, 2020).

Ley de Darcy

Afirma que el gradiente de niveles piezométricos entre la entrada y la salida del flujo en el medio permeable, y el área de paso del medio permeable A , normal al flujo, determinan el caudal Q que es capaz de fluir a través del medio permeable i . (González, 2002).

$$Q = -kAi$$

Donde:

Q = Caudal de paso

k = Permeabilidad de Darcy

A = Área de paso

$i = \frac{\partial h}{\partial x}$ = Gradiente piezométrico

Aplicando conjuntamente las leyes de Darcy y del flujo, es sencillo determinar la velocidad v a la que se desplaza el flujo a través del medio permeable. Por lo tanto, se tendría:

$$v = -ki$$

Esta velocidad, también conocida como velocidad de Darcy o velocidad de flujo, representa la velocidad a la que se movería un fluido a través de una sección libre abierta de valor A .

En tres dimensiones, el vector v constará normalmente de tres partes:

$$v_x = -k \frac{\partial h}{\partial x}; v_y = -k \frac{\partial h}{\partial y}; v_z = -k \frac{\partial h}{\partial z}$$

Régimen estacionario

La idea de flujo estacionario sugiere que no hay fluctuaciones en el nivel piezométrico, ya que la cantidad de agua que entra y sale de un recinto delimitado es idéntica, sin cambios en la cantidad de agua almacenada en el recinto. Dicho de otro modo, el nivel es independiente del tiempo y la cantidad de agua entrante y saliente es igual. (González, 2002).

Ecuación de la continuidad para flujo estacionario (régimen permanente):

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Régimen transitorio

Cuando un sistema está en equilibrio, la alteración de este estado requiere acciones sistémicas particulares, como el bombeo o la recarga. El sistema evoluciona hasta que vuelve a establecerse el correspondiente estado de equilibrio; mientras se alcanza esta nueva situación, se suceden en el tiempo una serie de circunstancias conocidas como régimen transitorio. (González, 2002).

Ecuación de la continuidad para flujo transitorio (régimen no permanente):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{R(x, y, t)}{T}$$

$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$: Suma de caudales entrantes por las caras laterales.

$\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$: Volúmenes desalmacenados en la unidad de tiempo.

$\frac{R(x,y,t)}{T}$: Bombeos o recargas en la unidad de tiempo.

Hidrogeología

Examina cómo se almacenan, se desplazan y se distribuyen las aguas subterráneas en las zonas saturadas y no saturadas de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus características físicas y químicas, sus interacciones con los entornos naturales y artificiales circundantes y sus respuestas a la actividad humana. (Ordoñez, 2011a).

Acuífero

La mejor manera de pensar en los acuíferos es como formaciones geológicas subterráneas permeables que pueden almacenar y transportar agua. (Gonzáles, 2002)

Clasificación de las formaciones geológicas desde el punto de vista hidrogeológico (Gonzáles, 2002).

Acuíferos. Capaces de almacenar y transmitir el agua (gravas, arenas, materiales, etc.).

Acuitardos. A menudo se denominan formaciones semipermeables porque pueden almacenar cantidades significativas de agua, pero tienen dificultades para transportarla (limos, arenas limosas, arenas arcillosas, etc.).

Acuicludos. En ellas se pueden almacenar grandes cantidades de agua, pero son incapaces de transportarla porque el agua queda atrapada en los poros de la estructura y no puede liberarse (arcillas, arcillas plásticas, limos arcillosos, etc.).

Acuífugos. formaciones desprovistas de la capacidad de retener o transferir agua; están representadas por rocas compactas como granitos y gneises, y ocasionalmente incluso calizas no carstificadas muy compactas.

Figura 12

Formaciones geológicas frente al agua

	Capacidad de almacenar	Capacidad de drenar	Capacidad de transmitir	Formaciones características
ACUÍFEROS	ALTA	ALTA	ALTA	gravas, arenas, calizas
ACUITARDOS	ALTA	MEDIA/BAJA	BAJA	limos, arenas limosas y arcillosas
ACUICLUDOS	ALTA	MUY BAJA	NULA	arcillas
ACUÍFUGOS	NULA	NULA	NULA	granitos, gneises, mármoles

Fuente: Tomado de Gonzáles (2002).

Clasificación de los acuíferos desde el punto de vista textural (Gonzáles, 2002).

Acuíferos porosos. Las gravas, arenas, arcosas y, en general, todos los materiales detríticos con un tamaño de grano de al menos arena son ejemplos de materiales cuya permeabilidad se debe a su porosidad intergranular.

Acuíferos cársticos y fisurados. Cuya permeabilidad está causada por fisuras y grietas, tanto de origen mecánico como de disolución, y que se encuentran en materiales como el basalto, el granito, la dolomita, la caliza, etc.

Acuíferos cársticos y porosos. Su porosidad intergranular y las fisuras o grietas son la causa de su permeabilidad. Las calcarenitas son típicas.

Clasificación de los acuíferos según sus circunstancias hidráulicas y estructurales (González, 2002).

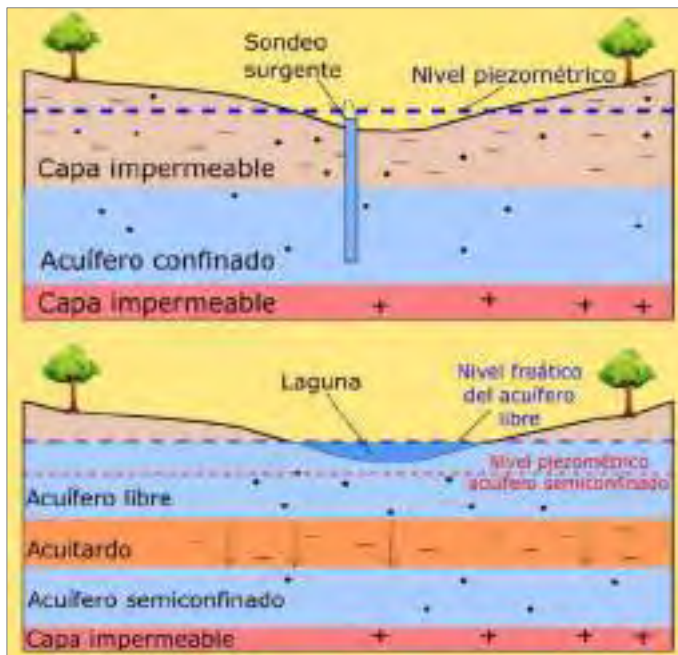
Acuíferos libres. Son los casos en que el nivel freático está más bajo que la cima de la formación permeable. La desaturación hace que pierdan agua.

Acuíferos confinados o cautivos. Son los que están aislados en el subsuelo y encerrados por todos lados por materiales impermeables. El nivel del agua en los acuíferos cautivos es superior al techo del material acuífero; como consecuencia del peso de los materiales suprayacentes, están realmente bajo presión o carga.

Acuíferos semiconfinados. El paquete superior o semiconfinado está formado por formaciones semipermeables que permiten el paso del agua de otros acuíferos superiores al acuífero semiconfinado inferior, ya que los materiales circundantes no son todos impermeables.

Figura 13

Acuíferos según sus circunstancias hidráulicas y estructurales



Fuente: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/acuiferos/>

Manante

Es el agua subterránea que fluye a la superficie en forma natural y puntual. Los manantiales contribuyen al riego en varios lugares y proporcionan agua potable a numerosos asentamientos. (López et al., 2009).

Parámetros hidrogeológicos de las formaciones geológicas (González, 2002).

Para evaluar hidrológicamente las formaciones, es preciso cuantificar la capacidad de un acuífero para retener y transportar agua.

Porosidad. La relación entre el volumen de huecos y el volumen total de una roca se denomina porosidad n . Es un parámetro adimensional que depende exclusivamente de la composición de la roca o del suelo, o de su textura distintiva, y no se ve afectado por la estructura geométrica, la resistencia o el funcionamiento hidráulico de la formación.

$$n = \text{volumen de los poros} / \text{volumen total}$$

$$n_e = \text{volumen de poros conectados} / \text{volumen total (Porosidad eficaz)}$$

Permeabilidad. El criterio denominado permeabilidad permite evaluar la capacidad de una formación para transferir agua en función de su textura y no de su estructura o forma geométrica. El caudal que puede atravesar una porción unitaria del acuífero, normal al flujo, bajo un gradiente piezométrico unitario se conoce como permeabilidad efectiva, o k . Por tanto, depende tanto de las propiedades del medio físico (el acuífero) como del fluido que lo atraviesa (el agua).

$$k = K \cdot \frac{y_w}{u}$$

Donde:

k = Permeabilidad efectiva

K = Permeabilidad intrínseca

γ_w = Peso específico del agua

μ = Viscosidad dinámica

Transmisividad. La transmisividad T es el parámetro utilizado para evaluar la capacidad de un acuífero para transmitir agua teniendo en cuenta factores estructurales o geométricos, además de las propiedades fluidas y texturales del acuífero. Se describe como el resultado del espesor del acuífero (b) y de la conductividad hidráulica (k).

$$T = k \cdot b$$

Coefficiente de almacenamiento. La capacidad de liberar agua de un acuífero está representada por este coeficiente. Se describe como la cantidad de agua que la altura de un acuífero y un prisma de base unitaria pueden liberar cuando el nivel piezométrico desciende 1 m. Por consiguiente, es un parámetro físico que, como la porosidad, no tiene dimensiones y se refiere al volumen liberado por unidad de volumen del acuífero. La porosidad efectiva n_e y el coeficiente de almacenamiento S' en acuíferos libres están relacionados.

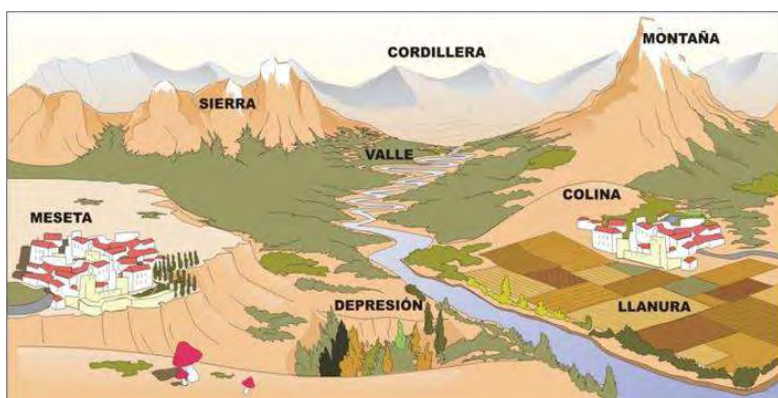
$$S' = n_e$$

Geomorfología

Es la investigación de cómo se crean los accidentes geográficos. Tres palabras griegas: geo (tierra), morphe (forma) y logos (estudio), son el origen del nombre. Es un componente de la fisiografía o geografía física. La superficie de la Tierra está formada por una gran variedad de formas que, cuando se caracterizan e interpretan con precisión, pueden aislarse y organizarse de forma coherente. La combinación de estas formas en un determinado lugar confiere un carácter único a los variados paisajes que constituyen el telón de fondo de las actividades humanas.(Gutiérrez, 2004).

Figura 14

Unidades geomorfológicas



Fuente: <https://wikisabio.com/geomorfologia/>

Pendientes

En las cuencas pequeñas, en las que los procesos de flujo superficial pueden ser el principal elemento que defina la forma del hidrograma, la pendiente del terreno desempeña un papel importante en el proceso de flujo superficial y es, por tanto, un parámetro hidrológico interesante. (Gutiérrez, 2004).

Geología

Es la ciencia que persigue la comprensión del planeta Tierra. La geología física y la geología histórica son dos divisiones tradicionales de la ciencia geológica. Mientras que la geología histórica se esfuerza por comprender la génesis de la tierra y su evolución a largo plazo, la geología física investiga los elementos que componen el planeta y pretende comprender los diversos procesos que operan por encima y por debajo de la superficie del planeta. (Tarbuk & Lutgens, 2005).

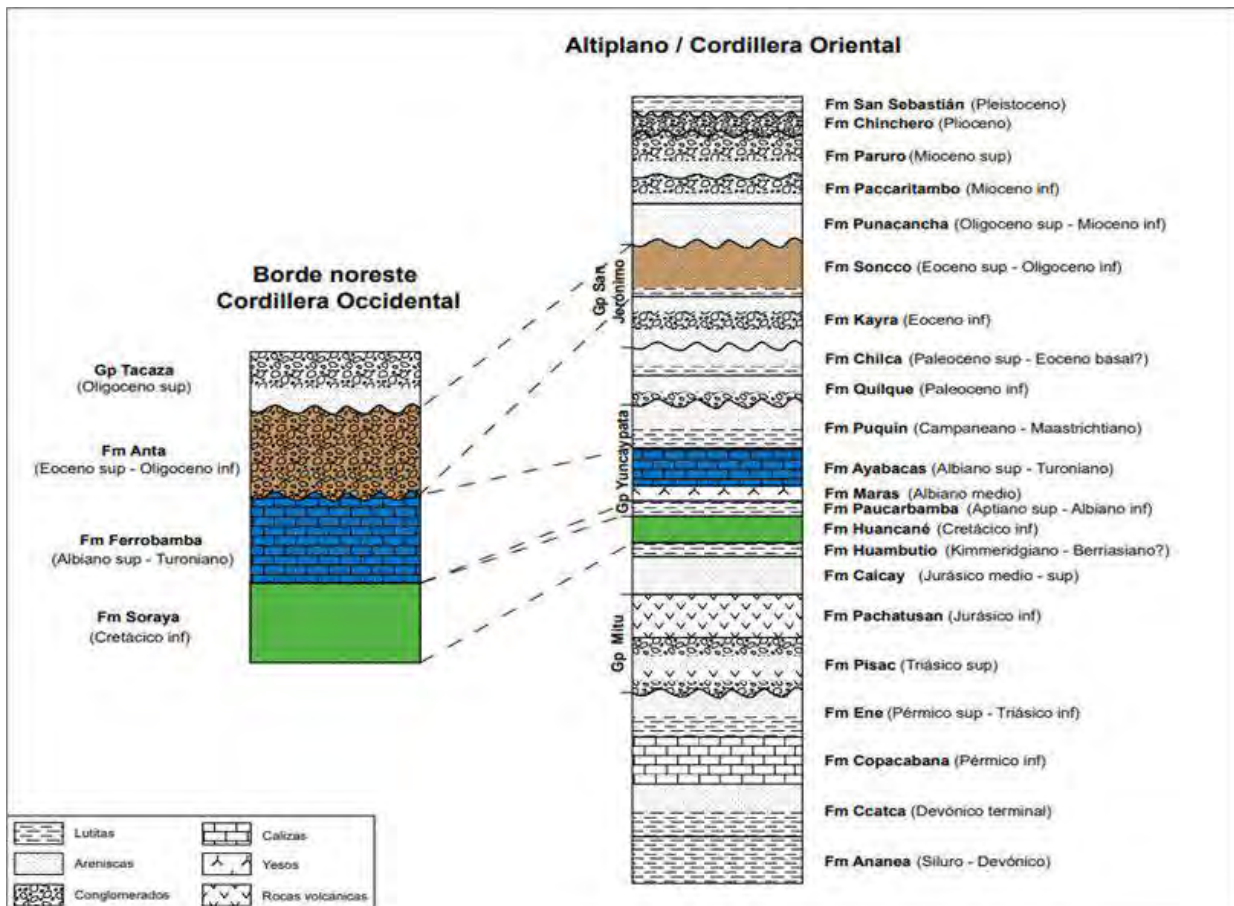
Estratigrafía

Área de la geología que se ocupa de la investigación e interpretación de rocas estratificadas dispuestas tanto vertical como horizontalmente; también se ocupa de la cartografía y correlación

de estas unidades rocosas para determinar la secuencia y cronología de los acontecimientos durante un periodo geológico concreto de la historia de la Tierra. (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

Figura 15

Estratigrafía de los dominios morfoestructurales regionales



Fuente: Tomado de Carlotto et al., (2011a).

Geología estructural

El estudio de la geología estructural se centra en la aparición, creación y evolución de pliegues, fallas y otras estructuras de deformación relacionadas con la litosfera. Estas formaciones, cuyo tamaño varía desde detalles microscópicos hasta elementos de cientos de kilómetros de longitud, se encuentran en diversos hábitats y han soportado cambios de tensión y deformación. (Fossen, 2016).

Estructuras geológicas secundarias

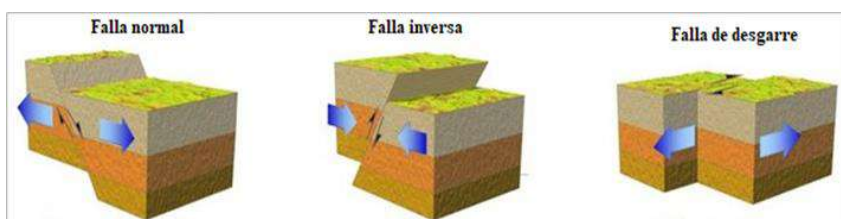
Son las que se producen como resultado del proceso de deformación de la roca tras su formación. Se tiene: pliegues, fallas, diaclasas.

Pliegue. Cuando una superficie plana se inclina o curva debido a una deformación dúctil heterogénea, que se manifiesta como una o varias ondulaciones de sus partes básicas, se crea un pliegue como estructura secundaria. El rasgo precedente más frecuente es la estratificación. Cuando esto ocurre, las rocas sufren una alteración en su geometría, que se reconoce cuando los cuerpos rocosos exhiben alguna estructura rectilínea plana o lineal antes de la deformación. (Arellano et al., 2002).

Falla. Se considera que cualquier superficie o zona estrecha con desplazamiento aparente de cizalla a lo largo de la zona tiene una falla. Como este concepto es tan similar al de fractura por cizalladura, algunos geólogos intercambian los dos nombres. Incluso las fracturas por cizalladura con desplazamientos a escala centimétrica o milimétrica son denominadas a veces microfallas por los geólogos. Sin embargo, la mayoría de los geólogos reservan el término "falla" para las estructuras de pequeña escala y restringen el término "fractura por cizalladura" a las mismas formaciones. Reservan el término "falla" para estructuras más grandes y compuestas con desplazamientos de al menos un metro y evitan utilizarlo para estructuras más pequeñas y sencillas. (Fossen, 2016).

Figura 16

Tipos de falla

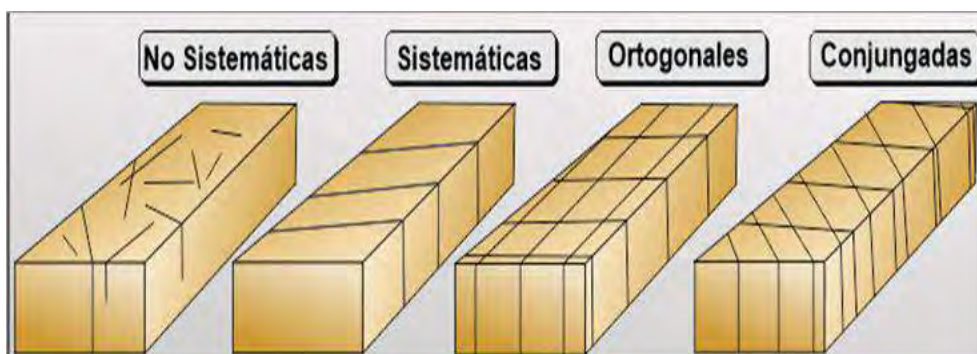


Fuente: <https://steemit.com/geology/>

Diaclasas. Las rocas se rompen a lo largo de superficies relativamente planas cuando son deformadas por fuerzas frágiles. Cuando no hay desplazamiento entre los dos dominios definidos por la superficie de discontinuidad, que es paralela a la propia superficie, las superficies de ruptura se denominan superficies de clivaje. Los bloques de roca están separados por fracturas, que son discontinuidades esencialmente planas con desplazamiento perpendicular al plano de ruptura. (Arellano et al., 2002).

Figura 17

Tipos de diaclasas



Fuente: Mattauer (1976).

Hidrología

La ciencia de la hidrología es el estudio de cómo se distribuye y se mueve el agua a través de los continentes en su entorno natural. Se centra en la investigación de la hidrosfera, incluyendo su tamaño, distribución regional, cambios y procesos asociados. (Giai, 2008).

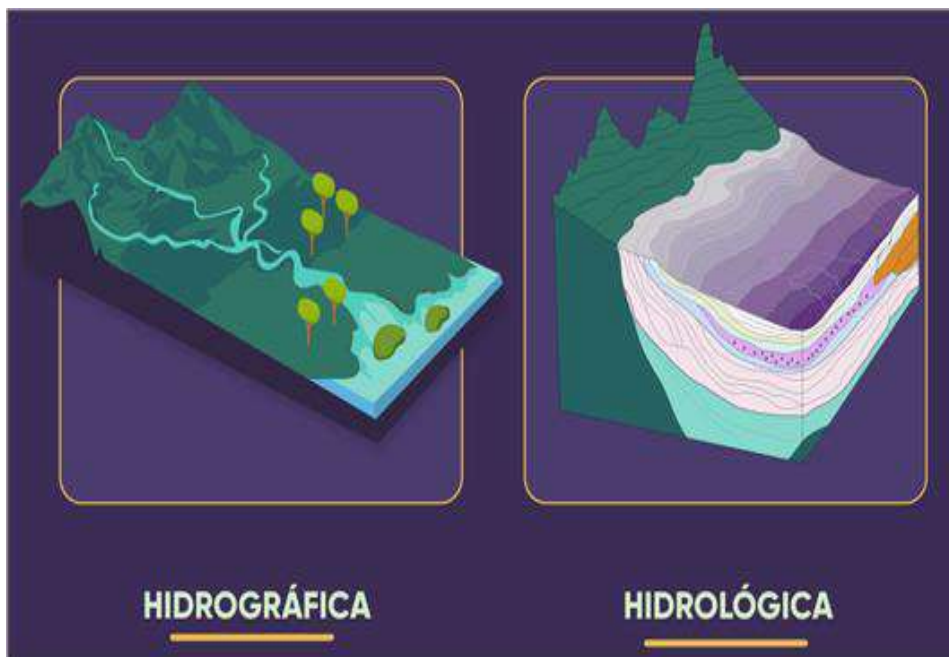
Cuenca

En primer lugar, es importante definir la cuenca topográfica y la cuenca real desde una perspectiva hidrológica. El término "cuenca topográfica" se refiere a la región que drenan un curso de agua y sus afluentes. Sus límites son las divisorias de aguas superficiales, que son crestas topográficas. Cuenca hidrográfica y cuenca fluvial son lo mismo.

La cuenca real puede coincidir o no con la cuenca topográfica, en cuyo caso puede ser mayor o menor. La cuenca topográfica y las tierras que desaguan en ella por debajo constituyen la cuenca real. (Giai, 2008).

Figura 18

Tipos de cuenca



Fuente: <https://mastergis.com/>

Ciclo hidrológico

En este sistema, alimentado por la energía solar, la atmósfera es el nexo crucial entre los océanos y los continentes.

El agua de los océanos y, en mucha menor medida, el agua de la tierra se evapora en la atmósfera. Este aire húmedo es transportado por los vientos a distancias considerables, con frecuencia, hasta que las circunstancias atmosféricas inducen a la humedad a condensarse en nubes y caer en forma de precipitaciones. El ciclo de precipitaciones que entran en el océano se ha completado, y uno nuevo está a punto de comenzar. (Tarbuk & Lutgens, 2005).

Figura 19

Ciclo hidrológico



Fuente: Servicio Geológico de los Estados Unidos (2019).

Balance hídrico

Se trata de medir el ciclo hidrológico. Puesto que la hidrosfera está en movimiento y su volumen se considera constante, cualquier porción que salga de una zona debe entrar en otra, y viceversa, desde el punto de vista de la física, es una aplicación del mismo principio de conservación de la masa. (Giai, 2008).

$$\text{INGRESOS} - \text{PÉRDIDAS} = \pm \text{ALMACENAMIENTO}$$

$$P = \text{Evt} + R + I + Q \pm \Delta V$$

Donde:

P: Precipitación

Evt: Evapotranspiración

R: Escorrentía

I: Infiltración

Q: Bombeo o consumo urbano

ΔV : Variación en el almacenamiento

Precipitación (P)

Se denomina precipitación, a toda agua meteórica que cae en la superficie de la tierra, tanto en forma líquida (llovizna, lluvia, etc.) y sólida (nieve, granizo, etc.) y las precipitaciones ocultas (rocío, la helada blanca, etc.). Ellas son provocadas por un cambio de la temperatura o de la presión. (Ordoñez, 2011b).

Escorrentía (R)

El agua que corre por los cauces de los ríos se conoce como escorrentía. En el lugar del cauce donde se miden, los volúmenes de agua que fluyen en intervalos de tiempo cortos (a menudo segundos) se denominan caudales instantáneos del río, y el volumen de agua se suele indicar en metros cúbicos. Normalmente hablamos de caudales afluentes durante periodos de tiempo más largos (días, semanas, meses o años), y el volumen de agua equivalente se suele indicar en horas por metro cúbico. (Martínez et al., 2006).

$$R = \frac{31,536 * Q}{A}$$

Donde:

R = Escorrentía en mm

Q = Caudal en m³/s

A = Área de drenaje km²

Evapotranspiración (EVT)

La cantidad de agua que se evapora directamente del estado sólido o líquido a la atmósfera o que transpiran las plantas se denomina evapotranspiración. Para un tiempo concreto, suele expresarse en milímetros. (Martínez et al., 2006).

Evapotranspiración potencial. Según el método Hargreaves:

$$ETP = 0,0023 (T_{med} + 17,78) R_o * (T_{max} - T_{min})^{0,5}$$

Donde:

ETP: evapotranspiración potencial diaria en mm/día

T_{med} : temperatura media diaria en °C

R_o : Radiación solar extraterrestre en mm/día (tabulada)

T_{max} : temperatura diaria máxima

T_{min} : temperatura diaria mínima

Evapotranspiración real. Por las siguientes razones, la evapotranspiración real es inferior a la evapotranspiración potencial:

- Falta de agua en determinadas épocas del año.
- Variaciones de la evapotranspiración en función de la fase de desarrollo de la planta.
- Variaciones de la humedad, la temperatura y otros aspectos de la atmósfera.

Por todo ello:

$$\text{Evapotranspiración real} = K * \text{Evapotranspiración potencial}$$

Donde el coeficiente K es variable y oscila entre 0,10 y 0,90, aproximándose a 1 cuando la planta está en su máximo desarrollo de foliación y fruto.

Infiltración (I)

La cantidad de agua procedente de las precipitaciones que penetra en la superficie del suelo y llena parcial o totalmente los poros del suelo y del subsuelo se denomina infiltración. (Martínez et al., 2006). La siguiente expresión algebraica puede utilizarse para calcular la infiltración mensual de la precipitación (P_i) en el suelo:

$$P_i = (C_i) * (P - R_{et})$$

Donde:

P_i : Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes.

C_i : Coeficiente de infiltración (adimensional).

P : Precipitación mensual en mm/mes.

R_{et} : Retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes.

Temperatura

Medida del poder calorífico potencial del agua. Se mide en grados Celsius. En las aguas subterráneas, rara vez se producen cambios importantes en el mismo punto del acuífero. Su valor suele corresponder al aumento medio anual de la temperatura ambiente del gradiente geotérmico (aproximadamente 1 °C por cada 30 m de profundidad del sondeo). (Martínez et al., 2006).

Capítulo II: Geomorfología

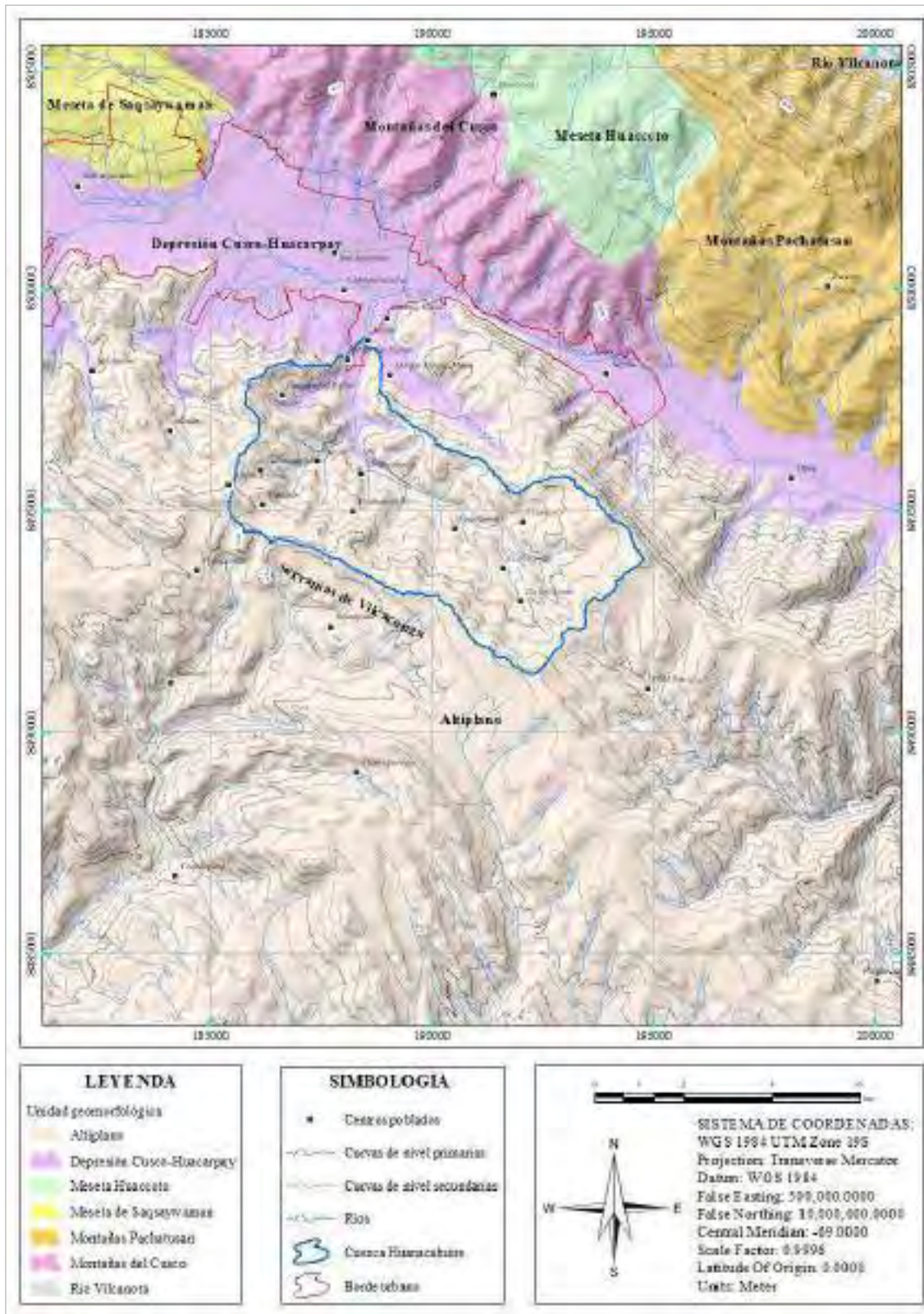
2.1 Geomorfología regional

El área de investigación se ubica en la zona occidental del Altiplano, al sureste de la depresión Cusco – Huacarpay, según (Carlotto et al., 2011a) se caracteriza por ser una altiplanicie con altitudes que varían entre 3800 y 4000 msnm, aunque localmente algunas montañas pueden superar fácilmente los 4400 msnm. Los estratos rojos continentales del Terciario son especialmente fuertes en el afloramiento de rocas mesosóicas del altiplano, como el grupo de San Jerónimo (>5000 m), que también presenta la mayor superficie de afloramiento.

En el altiplano de Cusco se han distinguido las siguientes unidades geomorfológicas: la meseta de Saqsaywaman, meseta de Huaccoto, las montañas de Pachatusan, las montañas de Cusco, la depresión de Cusco – Huacarpay y las serranías de Vilcaonga; justamente nuestra zona de estudio está ubicada en estas dos últimas unidades mencionadas anteriormente, situadas al sur de la depresión de Cusco y conformados por cumbres alineadas en dirección noroeste - sureste. Cuyas laderas al norte son bastante abruptas por el desnivel en relación al río Vilcanonta. (Carlotto et al., 2011a).

Figura 20

Geomorfología regional



Fuente: Modificado de Carlotto et al., (2011a).

2.2 Geomorfología local

2.2.1 Llanura aluvial (Lla)

Una zona deposicional que se observa en la parte más baja en el extremo norte de la cuenca (salida de cuenca), se encuentra a una altura promedio de 3300 msnm aproximadamente, donde el terreno ha sido aprovechado para la agricultura y el asentamiento poblacional.

Figura 21

Llanura aluvial en la parte baja de la cuenca Huanacahuire



2.2.2 Quebrada (Q) / Cárcava (C)

Estas geoformas han sido originadas por la erosión (acción del agua). La quebrada de mayor extensión tiene una dirección sureste – noroeste, la cual coincide con la dirección de longitud de la cuenca, influenciado por la dirección y buzamiento de los estratos. Desde una vista en planta las cárcavas presentes son del tipo detrítico; muestran un inicio estrecho que va incrementando a lo largo de su extensión conectándose unas con otras y formando parte de las quebradas.

Figura 22

Quebrada (Q) principal de la Cuenca Huanacahuire

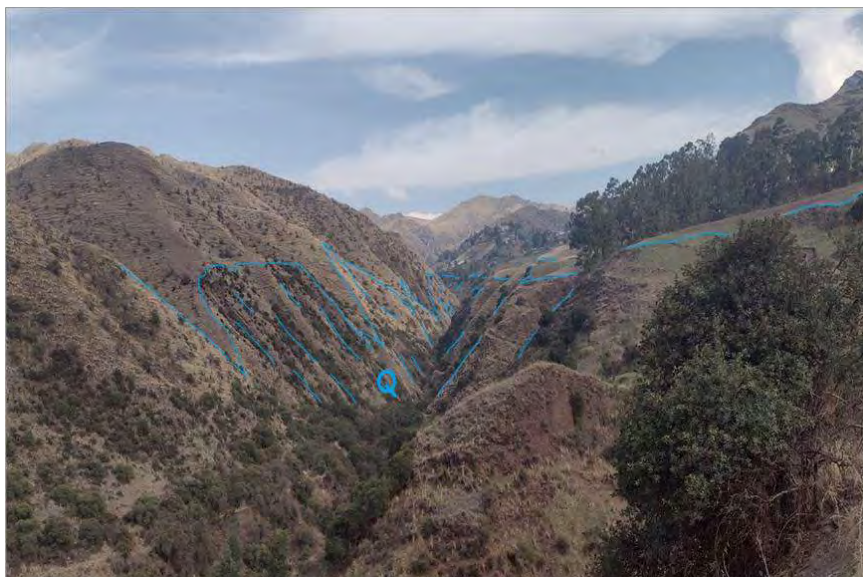


Figura 23

Cárcavas (C) y quebradas (Q) vista frontal comunidad de Conchacalla



2.2.3 Ladera de montaña (Ldm)

2.2.3.1 Ladera de montaña con pendiente suave (Ldmcps).

Laderas con inclinación rectilínea y uniforme, se encuentran en el lado sur de la cuenca caracterizadas por presentar una disección muy baja y dispersa con pendientes menores al 30%,

que se son aprovechado en gran parte para la agricultura. Se encuentran a una altitud que varía entre los 3600 y 3800 msnm.

2.2.3.2 Ladera de montaña con pendiente abrupta (Ldmcpa).

Con pendientes mayores al 30% (escarpado), las laderas de montaña con pendiente abrupta están a una altitud que supera los 3800 msnm donde se encuentran los afloramiento de rocas. Estas laderas presentan una disección ligera.

Figura 24

Laderas con pendiente abrupta y suave

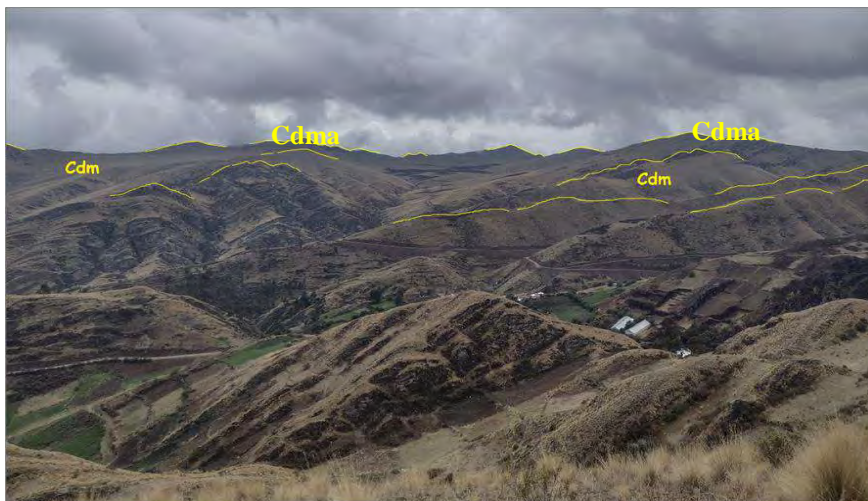


2.2.4 Cima de montaña media - alta (Cdm-Cdma)

Conformada por las partes mas altas de las montañas, se encuentran formando geoformas en relación con las laderas de montaña. En el lado sureste las montañas están fuertemente disectadas, favorecida principalmente por la inclinación de los estratos. Estas cimanas tiene una altura que sobrepasa los 3850 msnm alcanzando los 4200 msnm.

Figura 25

Cimas de montaña parte sur de la cuenca



2.2.5 Colina (Co)

Estas elevaciones tienen una apariencia ondulada y se encuentran ligeramente disectadas, la altura aproximada a la que se encuentran es de 3750 msnm.

Figura 26

Colinas en la parte media de la cuenca



2.2.6 Loma (Lo)

Esta unidad geomorfológica ha sido originada por la erosión de los estratos que se encuentran inclinados por encima de los 65° , presentan una forma redondeada y alargada paralelas

a las direcciones de los estratos aflorantes. Las lomas están situadas en el lado sur de la cuenca, donde se observa la mayor presencia de laderas de montaña con pendiente suave.

Figura 27

Lomeríos ligeramente disectados



2.2.7 Planicie residual (Pr)

Estas unidades se encuentran en las partes más altas de la cuenca, son superficies planas con pendientes menores al 10% y están a una altitud promedio de 4100 msnm. Las planicies no presentan disección.

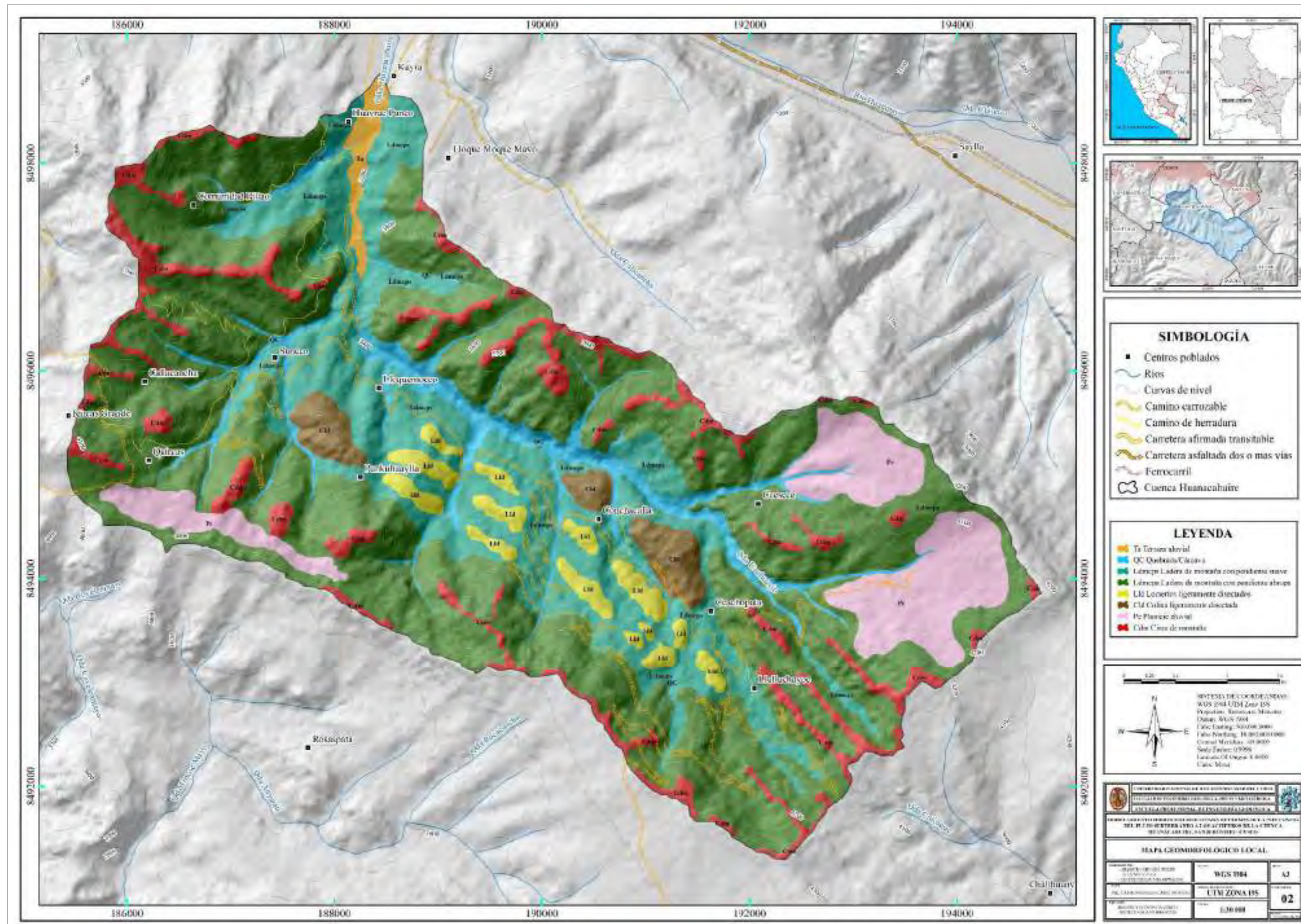
Figura 28

Planicies eluviales vista sureste de la cuenca



Figura 29

Geomorfología local



Fuente. Elaboración propia

2.3 Pendientes

La cuenca Huanacahuire está sometido a procesos erosivos que originan diferentes tipos de superficie, desde superficies con pendientes muy fuertes hasta superficies con pendientes muy bajas o casi planas.

Para la elaboración del mapa de pendientes se ha tomado en cuenta la clasificación que presenta la Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO), que considera seis tipos de pendientes: Ligeramente inclinado (0-5 %), inclinado (5-10 %), fuertemente inclinado (10-15 %), moderadamente escarpado (15-30 %), escarpado (30-60 %) y muy escarpado (>60 %).

Tabla 3

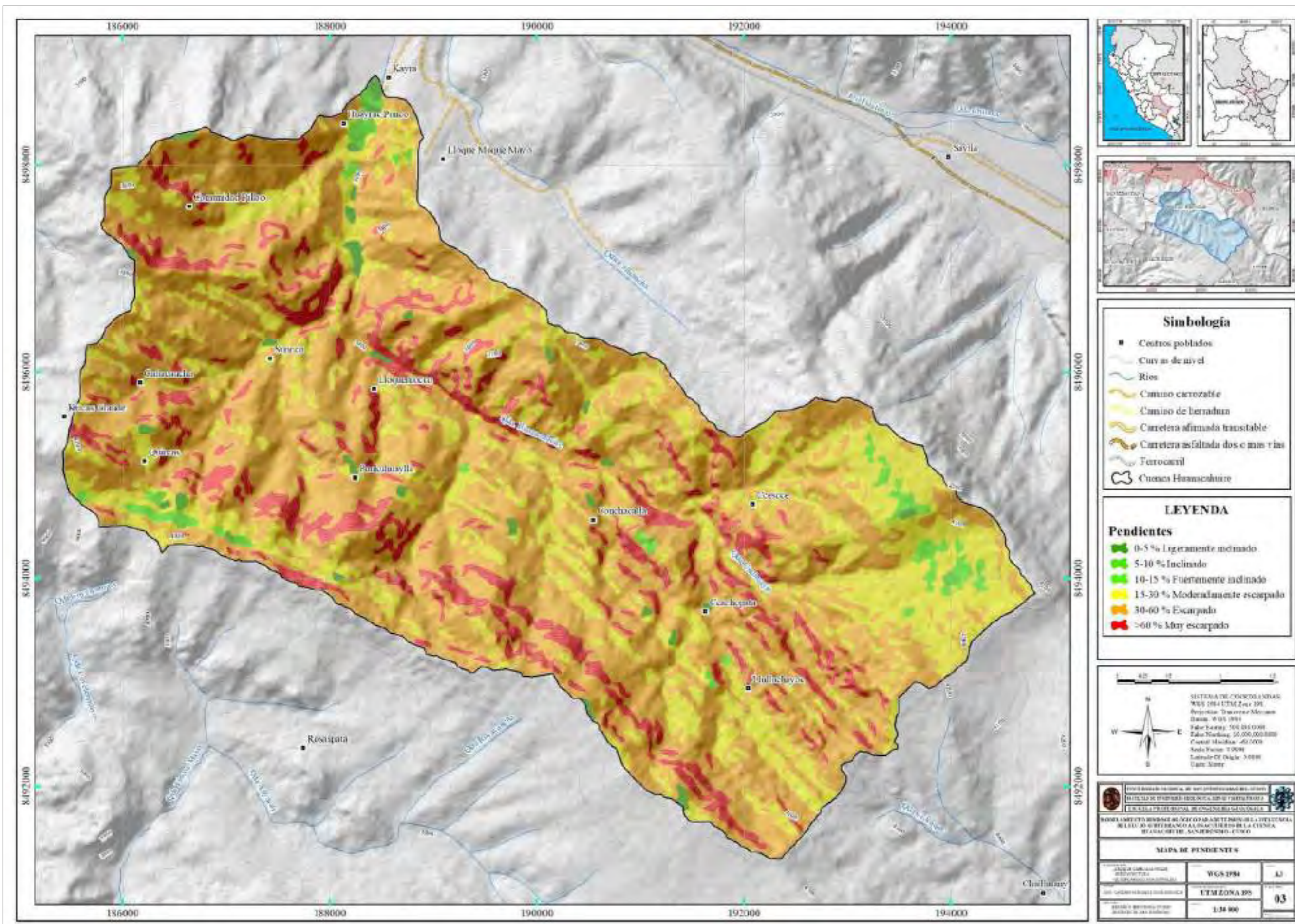
Distribución de pendientes cuenca Huanacahuire

Rango	Descripción	Área (km ²)	Área (%)
0-5 %	Ligeramente inclinado	0.33043	1.007
5-10 %	Inclinado	0.13863	0.423
10-15 %	Fuertemente inclinado	0.43040	1.312
15-30 %	Moderadamente escarpado	7.66966	23.381
30-60 %	Escarpado	20.43459	62.295
>60 %	Muy escarpado	3.79947	11.583

Fuente: Elaboración propia.

Figura 30

Pendientes



Fuente: Elaboración propia

Capítulo III: Geología

3.1 Geología regional

Regionalmente la zona de estudio alberga las siguientes unidades litoestratigráficas: El grupo San Jerónimo conformado por la Formación Kayra y Soncco; la Formación Punacancha y la Formación San Sebastián.

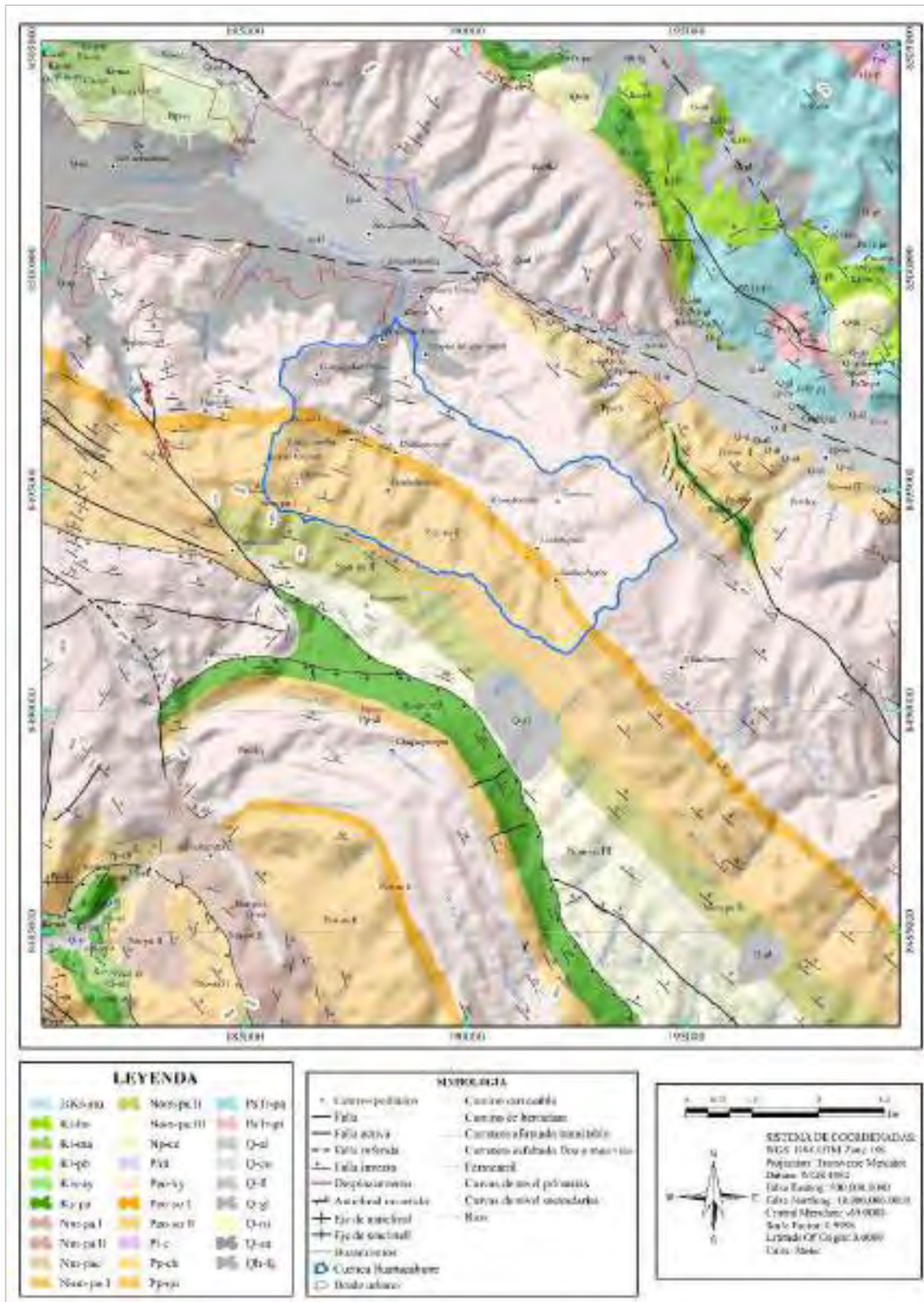
El grupo San Jerónimo aflora ampliamente en la región del Cusco. Se apoya en las formaciones Kayra y Soncco y se compone principalmente de areniscas feldespáticas de origen fluvial, de edades comprendidas entre el Eoceno inferior y el Oligoceno inferior, intercaladas con limolitas y ocasionales bancos de conglomerado. (Carlotto et al., 2011a).

Al sureste de la ciudad del Cusco, aflora la Formación Punacancha del Oligoceno Superior-Mioceno Inferior que descansa en concordancia o pequeña discordancia angular con la Formación Soncco. Esta Formación está compuesta de cuatro miembros. El miembro I que se encuentra albergada en la zona de estudio, está conformado por lutitas y limolitas rojas de llanura de inundación y microconglomerados fluviales.

Según Carlotto et al. (2011a), en el sureste de la depresión de Cusco, la Formación San Sebastián, del Pleistoceno, se asienta sobre la Formación Kayra. Las dos secuencias que componen esta unidad son granos decrecientes de conglomerados y areniscas de conos-terrazas fluvio-torrenciales, así como areniscas fluviales y lutitas lacustres o palustres en la primera.

Figura 31

Geología regional



Fuente: Modificado de Carlotto et al., (2011a).

3.2 Geología local

De acuerdo al cartografiado de campo en la zona de estudio se encontraron las formaciones Kayra, Soncco, Punacancha y algunos depósitos cuaternarios que se detallan a continuación.

3.2.1 Grupo San Jerónimo (Peo-ky-so)

3.2.1.1 Formación Kayra (Peo-ky).

La Formación Kayra aflora en la parte norte y noreste de la cuenca, esta formación ocupa la mayor extensión de área en la cuenca Huanacahuire con 14.473 km² siendo este el 43.76% del total de área (ver tabla N°4). Esta Formación está constituida por areniscas feldespáticas intercaladas con niveles de lutitas rojas de espesores menores a 10 cm, formadas en un ambiente fluvial entrelazado y llanura de inundación. Las areniscas de esta formación pertenecientes a facies areno pelíticas son de coloración rojiza. En la parte superior, el contacto con la Formación Soncco presenta buzamientos de 60° a 65° y se pueden observar presencia de malaquitas (corte de la vía Cusco – Occopata, UTM: 175919E – 8497235N.) a lo largo del contacto en la parte norte y noreste de la cuenca Huanacahuire.

Figura 32

Afloramiento Fm. Kayra zona noroeste



Figura 33

Afloramiento en corte de carretera de la Fm. Kayra al sur de la zona de estudio



Figura 34

Contacto entre las formaciones Kayra y Soncco



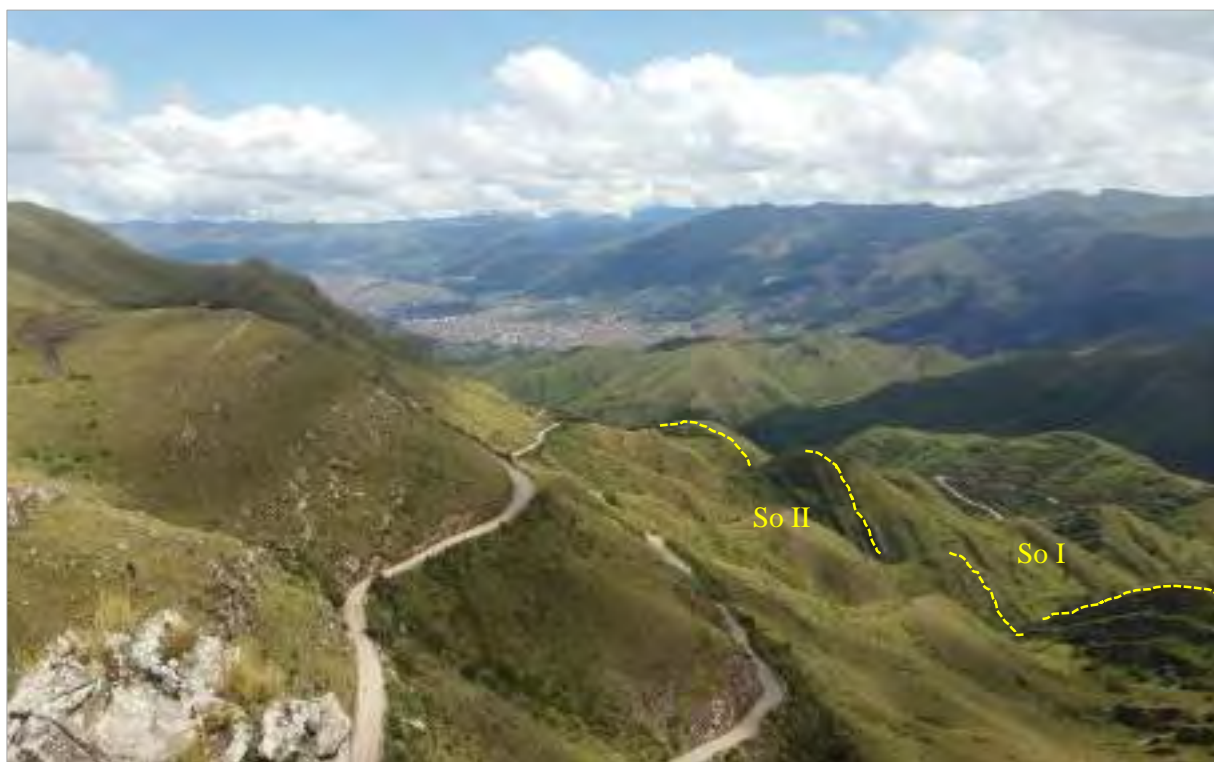
Nota. La figura 34.1 muestra la presencia de malaquita a lo largo del contacto.

3.2.1.2 Formación Soncco (Peo-so)

La Formación Soncco aflora al sur y sureste de la cuenca Huanacahuire, los afloramientos se pueden observar en los cortes de carreteras entre las comunidades de Suncco y Conchacalla. Esta Formación sobreyace en discordancia progresiva a la Formación Kayra, es decir el contacto entre estas formaciones es concordante pero los estratos superiores cambian ligeramente su inclinación.

Figura 35

Vista del contacto entre los miembros I y II de la Formación Soncco



La Formación Soncco se divide en dos miembros:

3.2.1.2.1 Formación Soncco miembro I (Peo-so I).

En este miembro se observan secuencias de lutitas rojas de llanura de inundación intercaladas con niveles de areniscas de grano medio a grueso de coloración grisácea; en la parte basal del miembro se observan malaquitas en los niveles de areniscas de grano medio.

Este miembro ocupa un área de 2.343 km² siendo el 7.36 % del total de área; y cuenta con un espesor que varía entre 200 metros al noroeste y 300 metros al suroeste de la zona de estudio.

Figura 36

Intercalación de areniscas y lutitas Formación Soncco I



Nota. Las líneas celestes representan las areniscas y las zonas erosionadas están representadas por una intercalación de areniscas y lutitas con mayor presencia de lutitas.

Figura 37

Formación Soncco I en corte de carretera ruta Cusco-Rondocan



Nota. La figura 37.1 muestra areniscas con laminación paralela de grano medio; y en la figura 37.2 se observan lutitas rojizas muy fracturadas.

3.2.1.2.2 Formación Soncco miembro II (Peo-so II).

Este miembro está compuesto por areniscas grisáceas y conglomerados cuya coloración varía de gris a gris oscuro.

En la base y contacto con la Formación Soncco I este miembro está compuesto por areniscas de grano medio a grueso y areniscas con clastos blandos que están intercaladas con areniscas de gran fino; mientras que en la parte media se observan intercalaciones de conglomerados con areniscas de grano medio a grueso pertenecientes a un sistema fluvial. En la parte superior se observan conglomerados de clastos volcánicos. Este miembro tiene un espesor aproximado de 1000 metros y ocupa un área de 7.573 km² siendo este el 22.90 % del área total de la zona de estudio.

Figura 38

Contacto entre los miembros I y II de la Formación Soncco



Nota. En la figura 38.1 se observan las areniscas feldespáticas de grano medio a grueso y en la figura 38.2 areniscas con clastos blandos, ambos pertenecientes a la Formación Soncco II.

Figura 39

Afloramiento de areniscas feldespáticas de la Fm. Soncco II Sector Lulluchayoc



Figura 40

Areniscas de grano fino a medio parte basal de la Fm. Soncco II.



Nota. En la figura 40.1 se observan las areniscas de grano fino y en la figura 40.2, areniscas de grano medio.

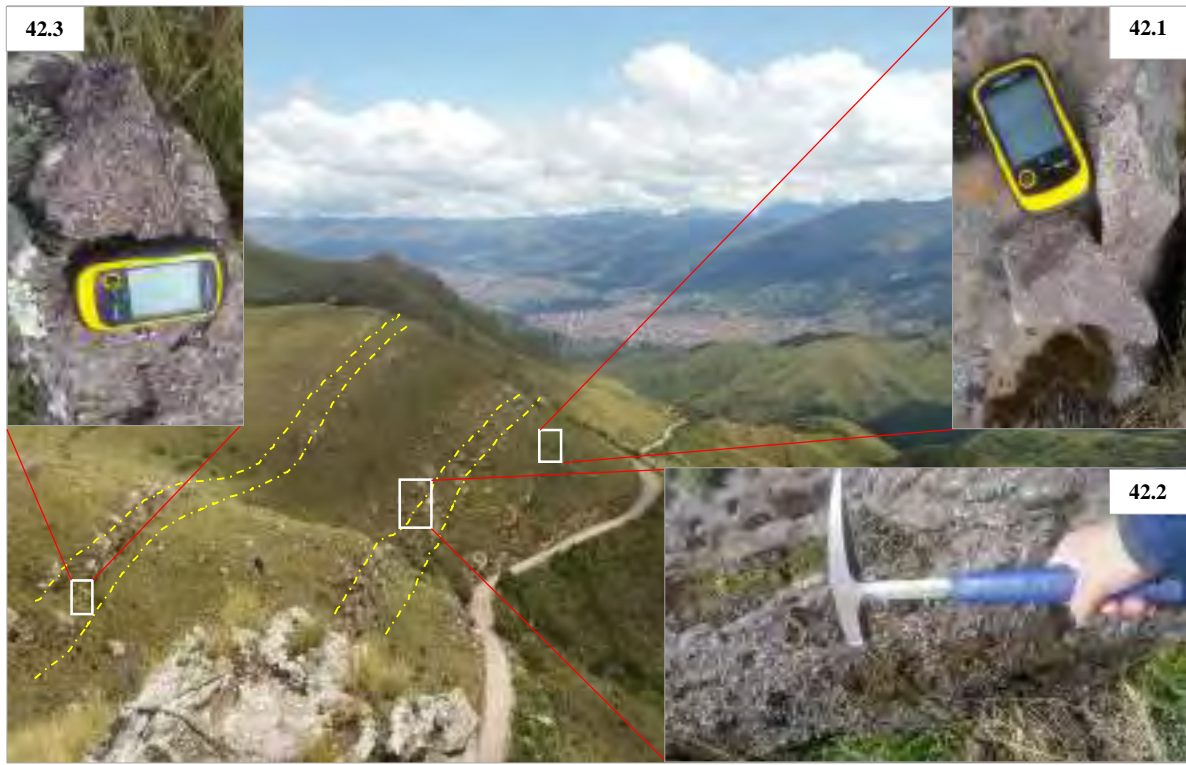
Figura 41

Areniscas feldespáticas de grano grueso de la Fm. Soncco II zona basal



Figura 42

Afloramiento de areniscas y conglomerados en la parte media de la Fm. Soncco II



Nota. En la figura 42.1. se observa la arenisca de grano medio a grueso, en la figura 42.2 la transición de areniscas a conglomerados y en la foto 42.3 se observan los conglomerados.

Figura 43

Vista de conglomerados de clastos volcánicos de la Fm. Soncco II



3.2.2 Formación Punacancha I (Nom-pu I)

La Formación Punacancha aflora al suroeste de la cuenca y sobreyace en ligera discordancia angular a la Formación Soncco. En la zona de estudio solo se observa el miembro I constituido por lutitas gris rojizas y areniscas finas grisáceas de un ambiente de llanura de inundación. El espesor de este miembro es de 400 y 500 metros y ocupa un área de 1.158 km² correspondiente al 3.50 % del área total.

Figura 44

Lutitas de la Fm. Punacancha I en corte de carretera ruta Cusco-Punacancha



3.2.3 Formación San Sebastian (Q-sa)

Esta Formación aflora en la parte baja de la cuenca en contactos con la Formación Kayra y otros depósitos cuaternarios; según Santos & Arriola (2018), en la Formación San Sebastián se tienen 5 secuencias sedimentarias de las cuales solo se observan dos de ellas en la zona de estudio; Las arcillas, limolitas y lentes de gravas pertenecientes a la secuencia III y también gravas con

clastos soportados con arenas finas a gruesas de secuencias correspondientes a un medio aluvial pertenecientes a la secuencia V. El área que ocupa esta Formación es de 0.466 km² con un 1.41 % del total de área de la zona de estudio.

Figura 45

Lente de grava en secuencia de arcillas y limolitas de la Fm. san Sebastian



Figura 46

Cantera de gravas y arenas de la Fm. San Sebastián, salida de la cuenca



3.2.4 Depósitos aluviales (Q-al)

Estos depósitos se hallan en los cauces antiguos y en la parte baja de la cuenca donde se han asentado centros poblados ocupando un área de 1.003 km² que representa el 3.03 % del área total de la cuenca Huanacahuire. Estos depósitos están conformados en su mayoría por torrenteras de huaycos antiguos que está constituido por gravas y bloques redondeados con matriz limo arenosa y que conforman terrazas aluviales. El espesor de estos depósitos se encuentra entre los 5 metros en las terrazas bajas y 20 metros en las terrazas altas.

Figura 47

Depósito de material aluvial en terrazas



3.2.5 Depósitos coluvio aluviales (Q-co-al)

Estos depósitos se hallan al pie de laderas que delimitan las quebradas y en los cortes de talud para la construcción de carreteras. Litológicamente está constituido por gravas y bloques subangulosos a angulosos con una matriz limo arcillosa con poca presencia de arena. Estos depósitos están poco consolidados, el área que ocupan es de 1.108 km² y representan el 3.35 % del área total de la cuenca y su espesor puede variar de 2 a 10 metros.

Figura 48

Depósito coluvio aluvial en corte de carretera ruta Cusco-Rondocan



Figura 49

Depósito coluvio aluvial con presencia de bloques subredondeados



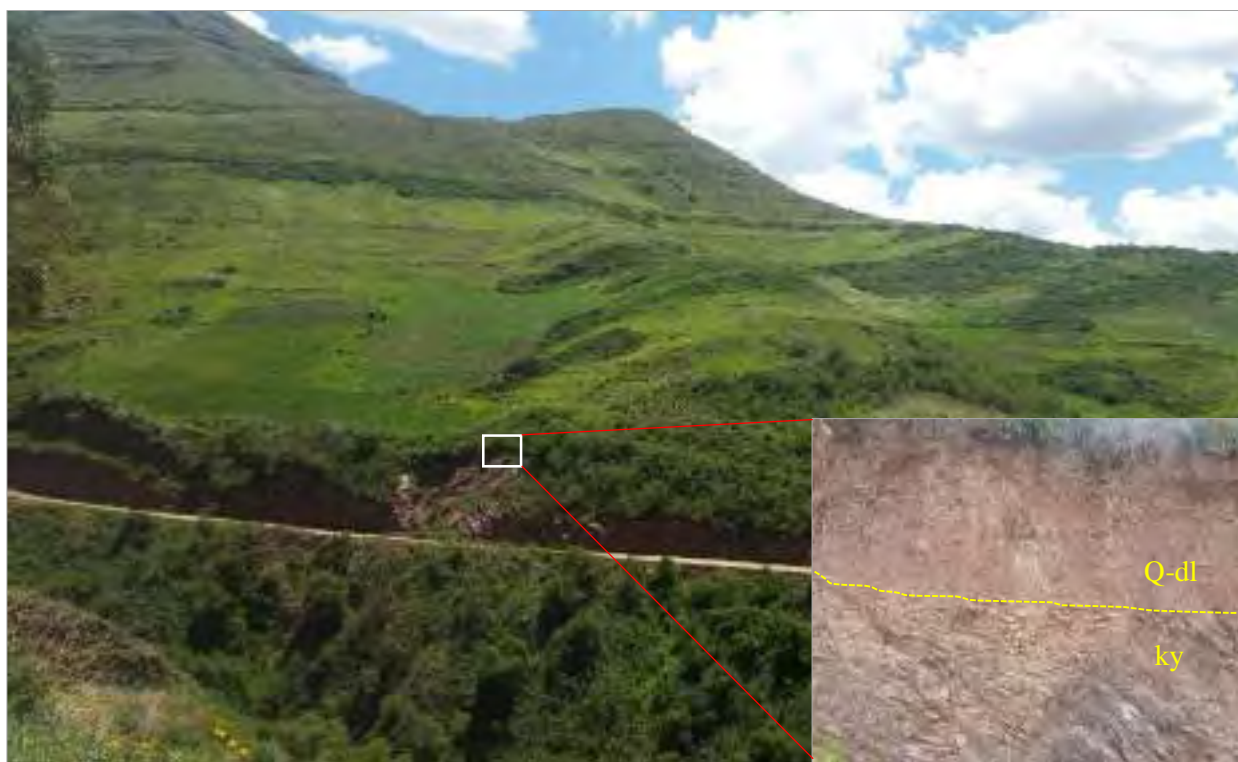
Nota. Los bloques subredondeados presentan diámetros de hasta 1 metro.

3.2.6 Depósitos deluviales (*Q-dl*)

Estos depósitos se hallan principalmente en las laderas de baja pendiente aprovechadas en su mayoría por la agricultura, litológicamente están constituidas por limoarcillas con pequeños clastos dispersos y pueden alcanzar espesores de 2.5 metros. Estos depósitos ocupan un área de 2.619 km² que representa el 7.92 % del área total de la zona de estudio.

Figura 50

Depósitos deluviales en laderas



3.2.7 Depósitos residuales (*Q-re*)

Estos depósitos se hallan en las planicies de la parte alta de cuenca ubicadas al sureste de la cuenca y están constituidos por arcillas y limos de coloración oscura. El espesor de estos depósitos es menor a 1.5 metros y ocupan un área de 2.231 km² y representan el 6.75 % del área total de la zona de estudio.

Figura 51

Vista sureste de la cuenca Huanacahuire, se observan planicies residuales



3.2.8 Depósito fluvial (Q-fl)

Este depósito se halla en el curso del antiguo río Huanacahuire y las pequeñas corrientes aportantes al río, esta caracterizado por la presencia de bloques, gravas, arenas y limos con formas redondeadas. Este material se encuentra en muy poca proporción ocupando un área de 0.011 km² y representa el 0.03 % del área total de la zona de estudio.

Figura 52

Cauce antiguo del río Huanacahuire, bancos de gravas con matriz de arena



Tabla 4.

Distribución de las unidades geológicas cuenca Huanacahuire

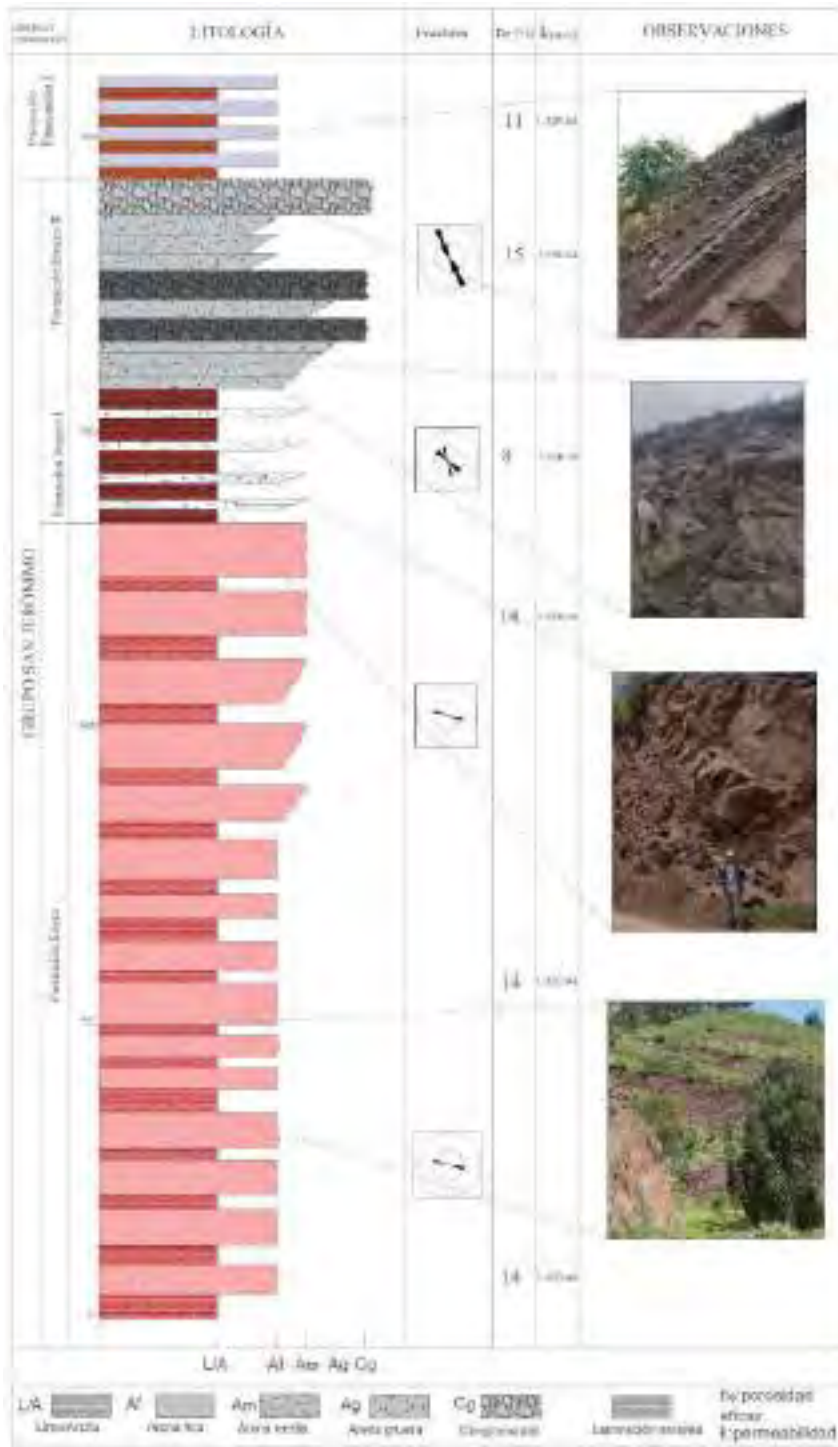
Ítem	Unidad geológica	Área (km ²)	Área (%)
1	Formación Kayra	14.473	43.76
2	Formación Soncco-miembro I	2.434	7.36
3	Formación Soncco-miembro II	7.573	22.90
4	Formación Punacancha-miembro I	1.158	3.50
5	Formación San Sebastian	0.466	1.41
6	Depósito eluvial	2.231	6.75
7	Depósito coluvio aluvial	1.108	3.35
8	Depósito deluvial	2.619	7.92
9	Depósito fluvial	0.011	0.03
10	Depósito aluvial	1.003	3.03
Total		33.076	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Para una mejor comprensión de la geología presente en la zona de estudio se han realizado dos columnas estratigráficas pertenecientes a las secciones A-A' y C-C' (ver figura 55).

Figura 53

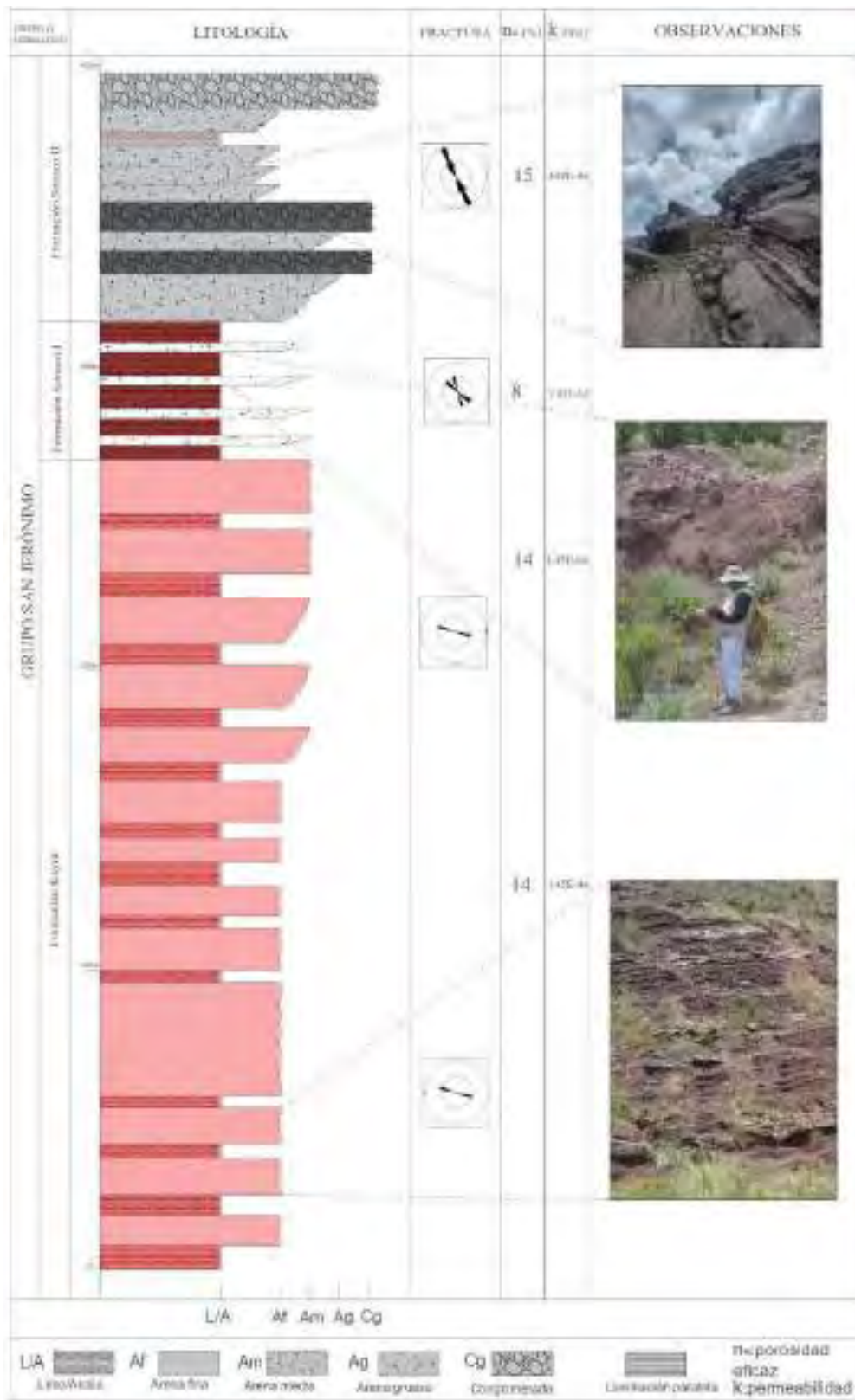
Columna estratigráfica de la sección A-A'



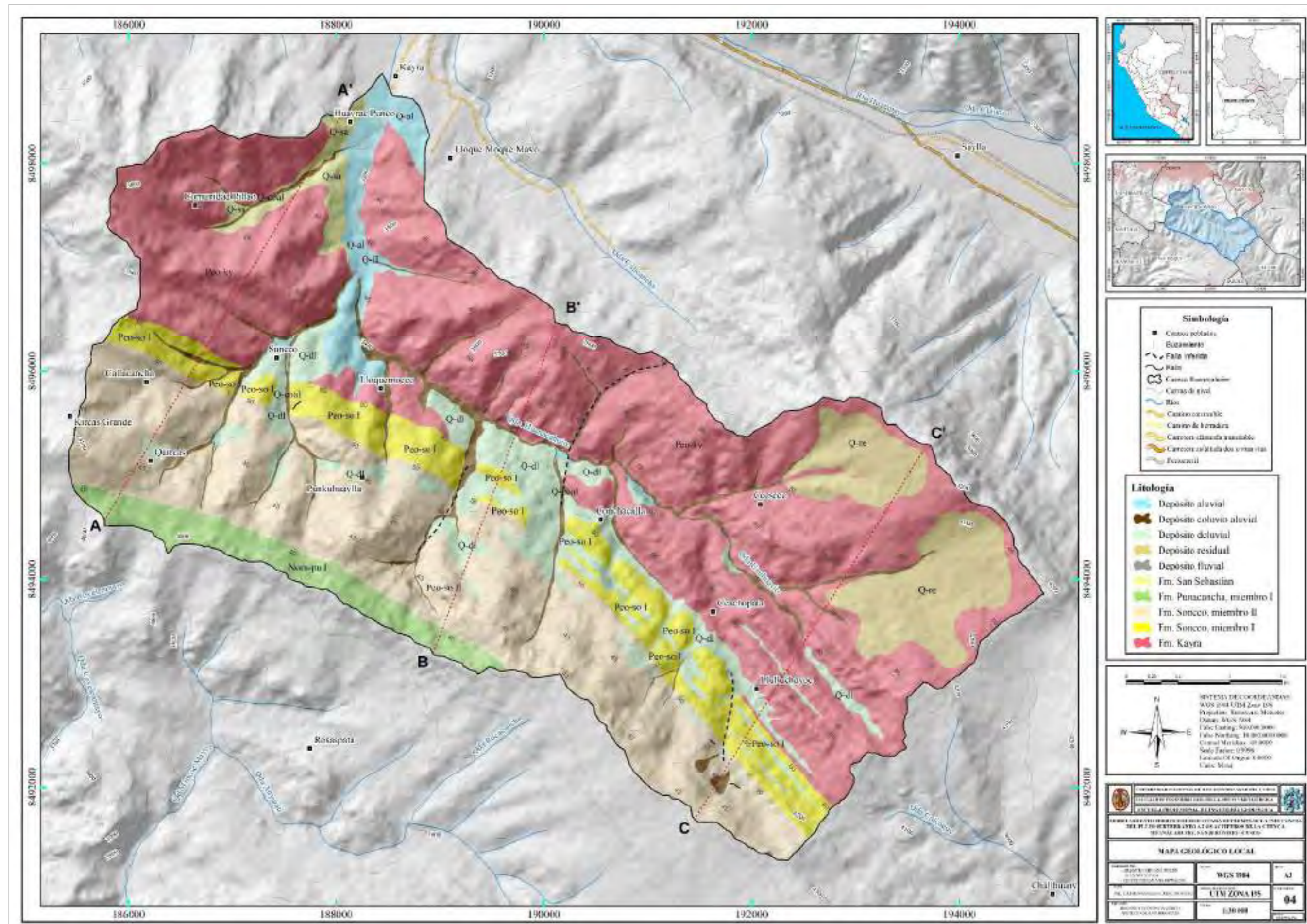
Fuente: Elaboración propia

Figura 54

Columna estratigráfica de la sección C-C'



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia.

Figura 56

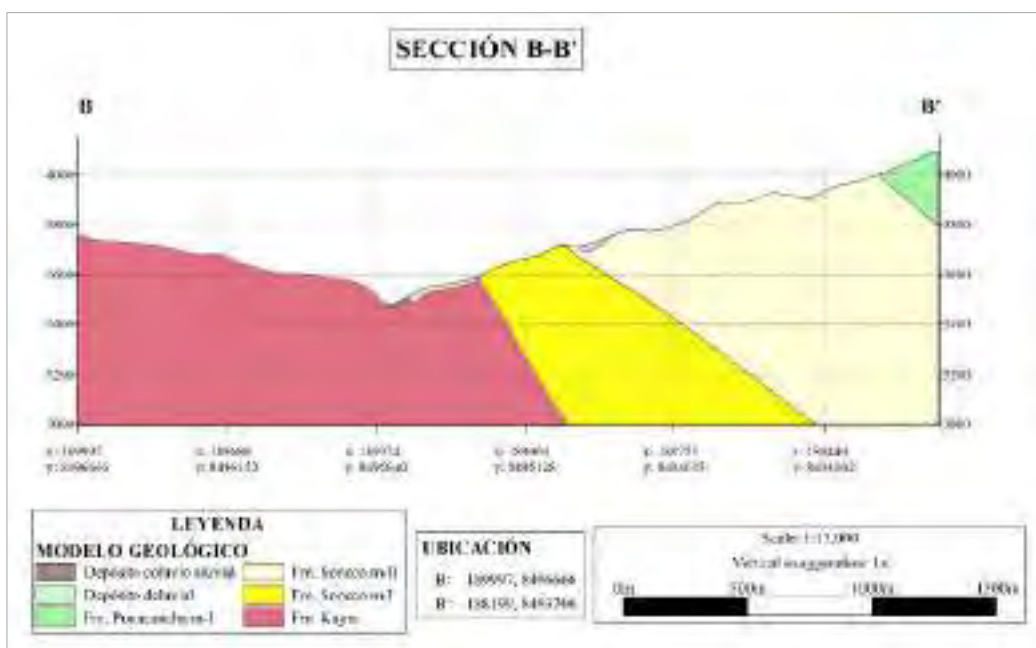
Sección geológica A-A' dirección NE-SW



Fuente. Elaboración propia

Figura 57

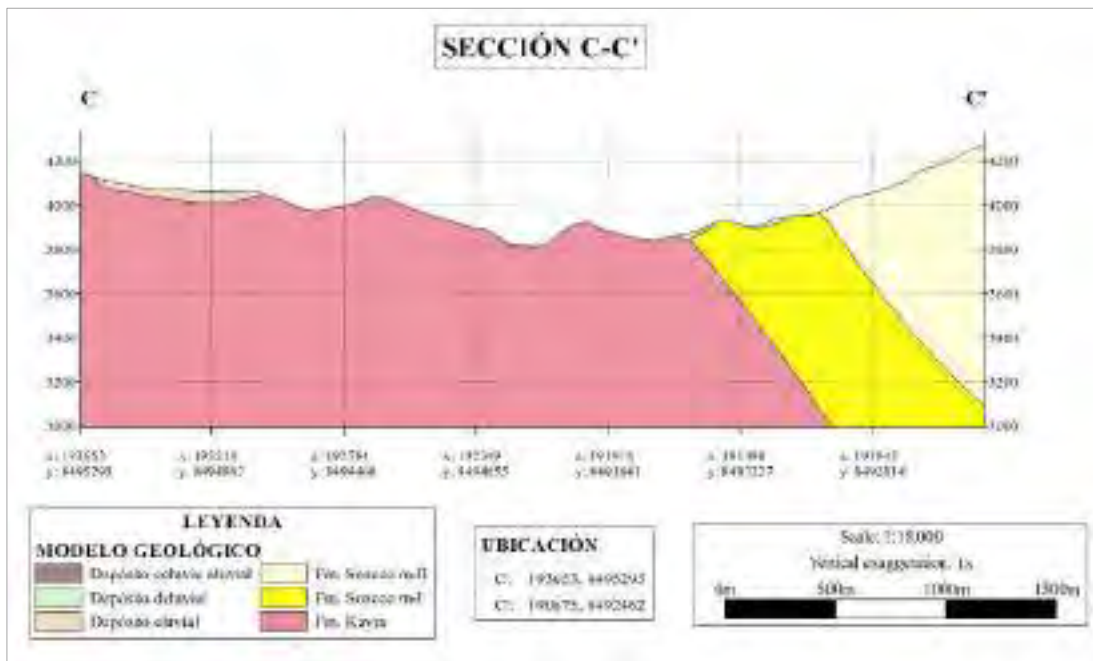
Sección geológica B-B' dirección NE-SW



Fuente. Elaboración propia

Figura 58

Sección geológica C-C' dirección NE-SW



Fuente: Elaboración propia.

3.3 Geología estructural regional

Regionalmente la zona de estudio se encuentra cerca de fallas regionales las cuales tienen influencia sobre las formaciones geológicas presentes y estas se ven reflejadas en el grado y modo de su fracturamiento como menciona Carlotto et al. (2011a).

3.3.1 Falla Cusco

Las fotografías aéreas y las imágenes de satélite muestran una alineación NO-SE que discurre paralela al fondo del valle del río Huatanay desde Cusco hasta Saylla-Oropesa. Los geólogos la consideran una antigua falla que fue sellada por sedimentos cuaternarios de la Formación San Sebastián. El Altiplano y la zona intermedia con la Cordillera Oriental están divididos en parte por esta falla. Aunque actualmente no hay indicios de que esta estructura se haya activado recientemente, la Formación San Sebastián se vio afectada por desplazamientos recientes del terreno durante el terremoto del 21 de mayo de 1950. Según la ilustración de Ericksen

et al. (1954), las estructuras serían el resultado de la reactivación de la falla de Cusco. (Carlotto et al., 2011a).

3.3.2 Falla Tambomachay

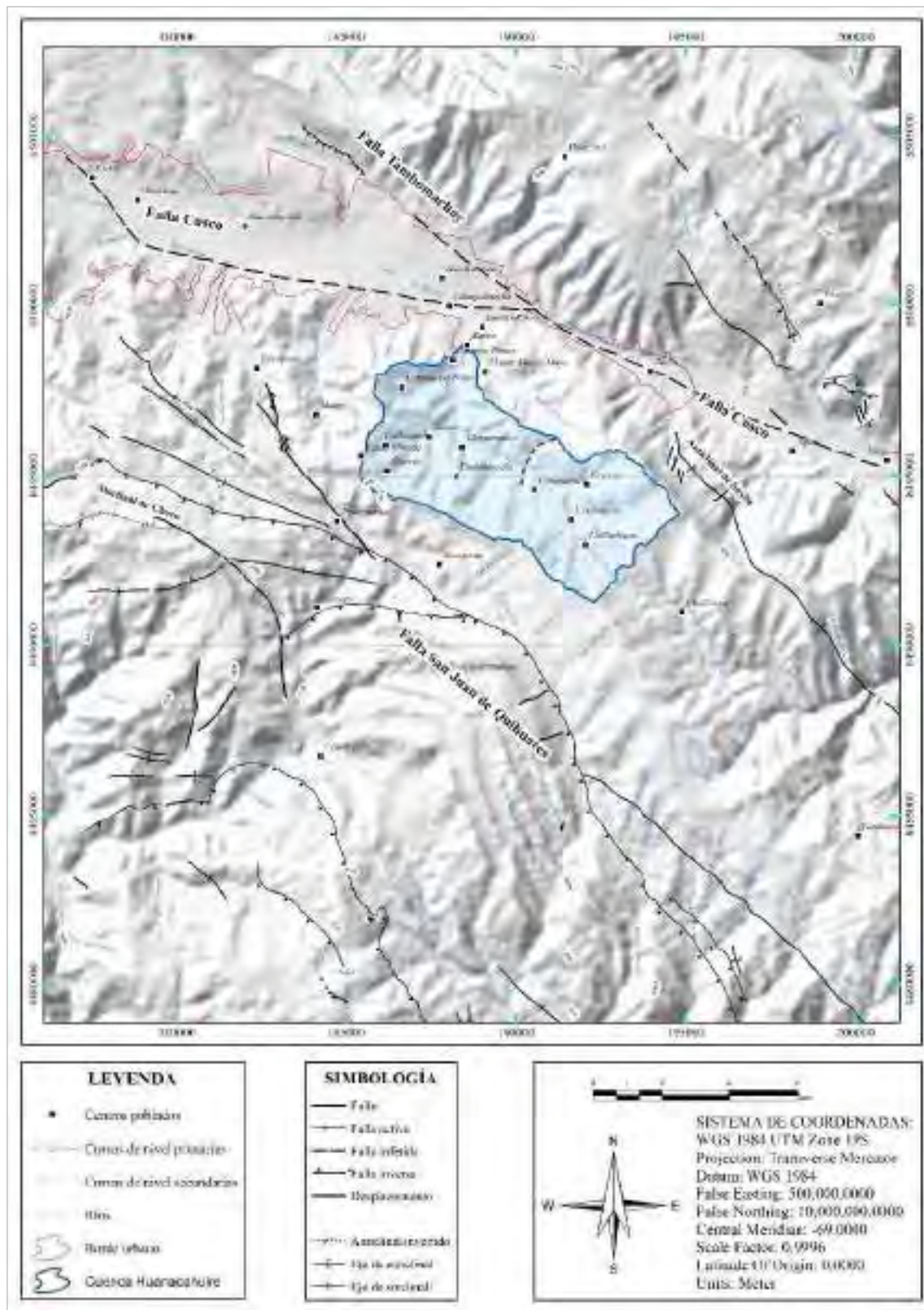
Une las rocas del Grupo Yuncaypata (Cretácico) con las del Grupo San Jerónimo (Eoceno-Oligoceno) y se sitúa al norte de la ciudad del Cusco. Divide la Meseta de Saqsaywaman de la Cordillera del Cusco. Esta antigua falla, que corre de NW-SE a WNW-ESE, ha estado involucrada en varias interacciones al menos desde el Mesozoico, y durante el Cenozoico exhibió movimientos de deslizamiento y reversos (Carlotto, 1988). De hecho, la disposición actual de las rocas sugiere que se trata de una falla inversa. Sin embargo, esta falla muestra signos de un desplazamiento de 400 m del Cuaternario que se caracterizó por facetas triangulares. El plano de falla se inclina entre 60 y 70 grados hacia el sur, y los escombros de talud de los conos de eyección lo han enterrado parcialmente (Cabrera, 1988). En la base de la escarpa, recientes reactivaciones han producido estructuras facetadas que forman patrones en V y muestran claramente un reciente movimiento normal hacia el sur de la falla de Tambomachay. A una elevación de 3400 msnm, la falla activa desaparece bajo los conos aluviales de San Jerónimo hacia el este. La falla termina al oeste, cerca de la falla N-S de Tamboray (cuadrángulo de Urubamba). (Carlotto et al., 2011a).

3.3.3 Falla San Juan de Quihuares

La falla de San Juan de Quihuares, que tiene un buzamiento de 70° hacia el SO y una tendencia NO-SE, tiene la falla activa de San Juan de Quihuares en su esquina sureste. Tanto los depósitos coluviales cuaternarios como los depósitos de la Formación Paruro que están en contacto con la Formación Ayabacas son impactados por esta falla. Contiene hasta dos trazas paralelas e irregulares con desplazamientos de más de dos metros. (Carlotto et al., 2011a).

Figura 59

Mapa geológico estructural regional



Fuente: Modificado de Carlotto et al., (2011a).

3.4 Geología estructural local

3.4.1 Estructuras primarias

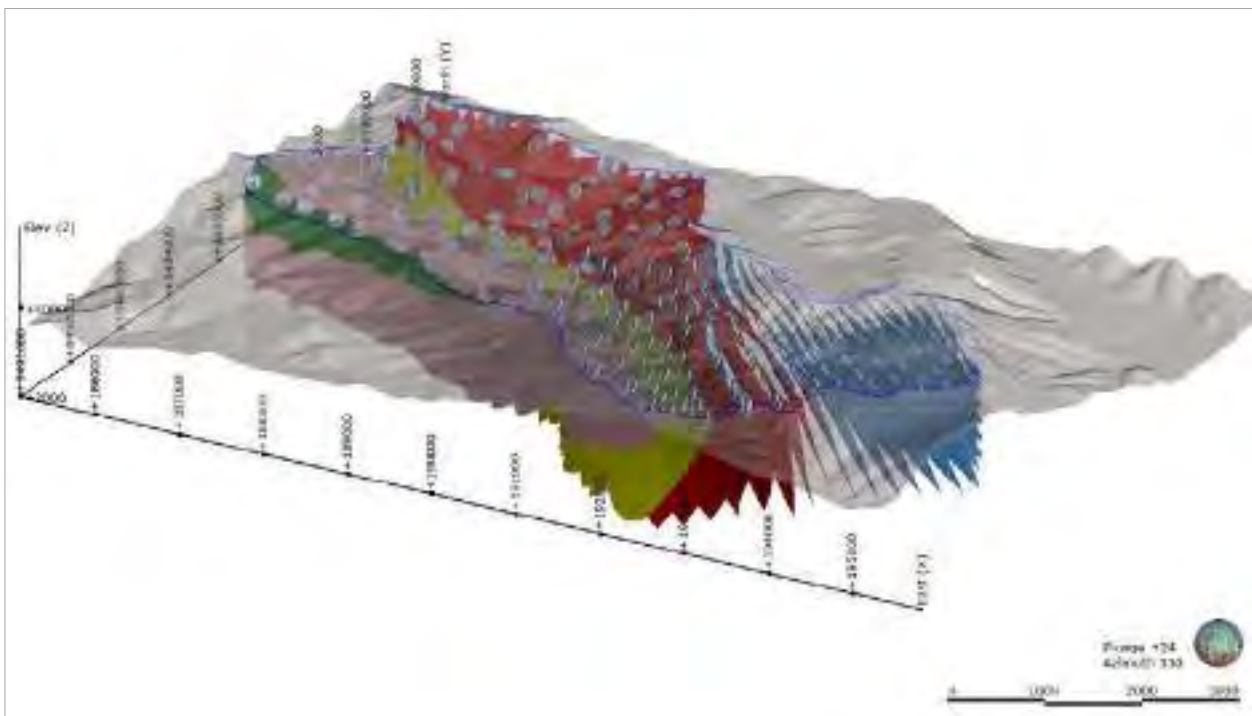
3.4.1.1 Estratificación.

Los planos de estratificación son considerados como discontinuidades naturales que podrían tener cierto control sobre la dinámica del flujo de agua subterránea.

Para determinar las direcciones de buzamientos de los planos de estratificación se realizó una interpolación de todos los datos de buzamientos de los estratos de las formaciones geológicas en la zona de estudio, estos datos son solo superficiales, sin embargo, es posible hacer una proyección por debajo de la superficie ya que estos materiales son sedimentarios.

Figura 60

Interpolación de buzamientos



Fuente: Elaboración propia.

Sección A-A'.

La sección A-A' (ver figura 61) está ubicada al oeste de la cuenca con una orientación NE-SW y una longitud de 4440 metros que corta las formaciones Kayra, Soncco, Punacancha y San Sebastian. en esta sección se observa que la estratificación de todas las formaciones con excepción de la Formación San Sebastian se encuentra en dirección SW con buzamientos que varían entre 40° y 60° teniendo una muy ligera discordancia progresiva hacia el sur.

Sección B-B'.

La sección B-B' (ver figura 62) atraviesa la parte central de la cuenca con una orientación NE-SW y una longitud de 3480 metros que corta las formaciones Kayra, Soncco y Punacancha. En esta sección se observa que la estratificación a partir de la Formación Kayra presenta una discordancia progresiva hacia el NE con buzamientos entre 70° a 80° y las formaciones Soncco y Punacancha mantienen su discordancia progresiva hacia el SW con buzamientos entre 40° y 60°.

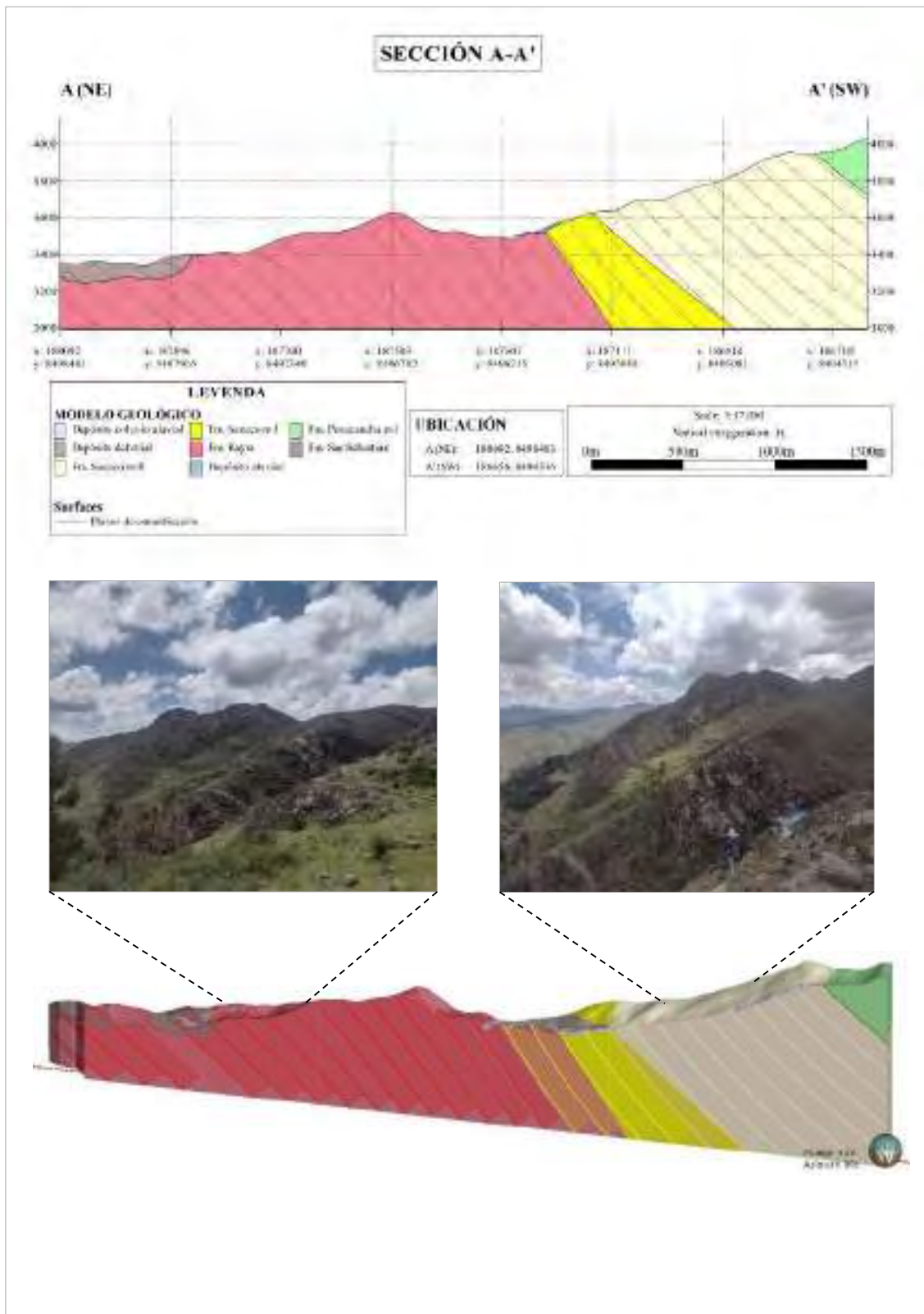
Sección C-C'.

La sección C-C' (ver figura 63) está ubicada en la parte sur de la cuenca con una orientación NE-SW y una longitud de 4135 metros que corta las formaciones Kayra y Soncco. En esta sección se observa un cambio de dirección de buzamiento.

En la parte NE de la sección los estratos de la Formación Kayra presentan buzamientos que van entre 50° y 60° al NE, mientras que en la parte central y contacto con la Formación Soncco los buzamientos van de 80° a 90° hacia el SW generando con ello la discordancia progresiva. Respecto a la Formación Soncco, esta presenta buzamientos de 60° a 70° al SW.

Figura 61

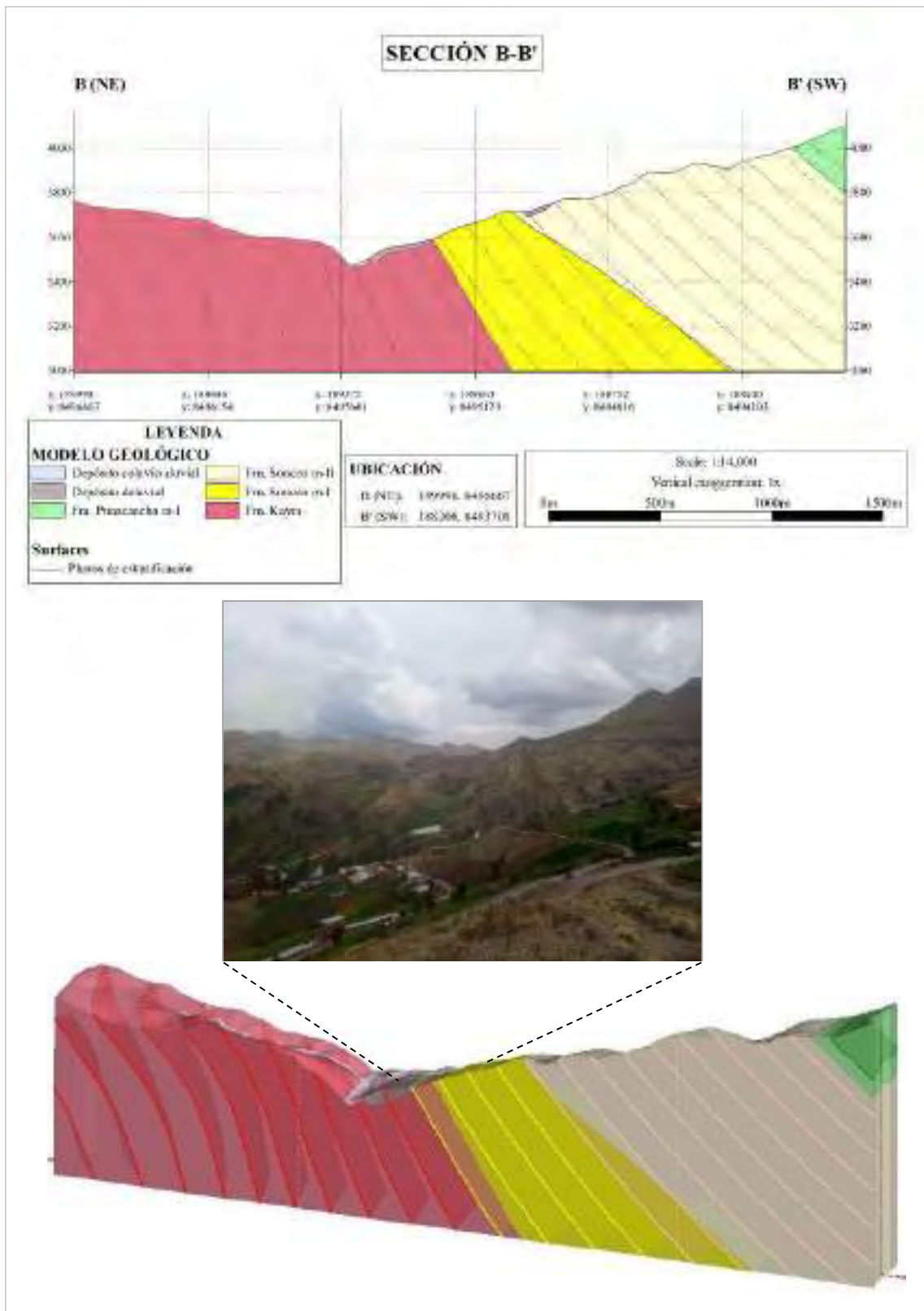
Estratificación cuenca Huanacahuire sección A-A'



Fuente: Elaboración propia

Figura 62

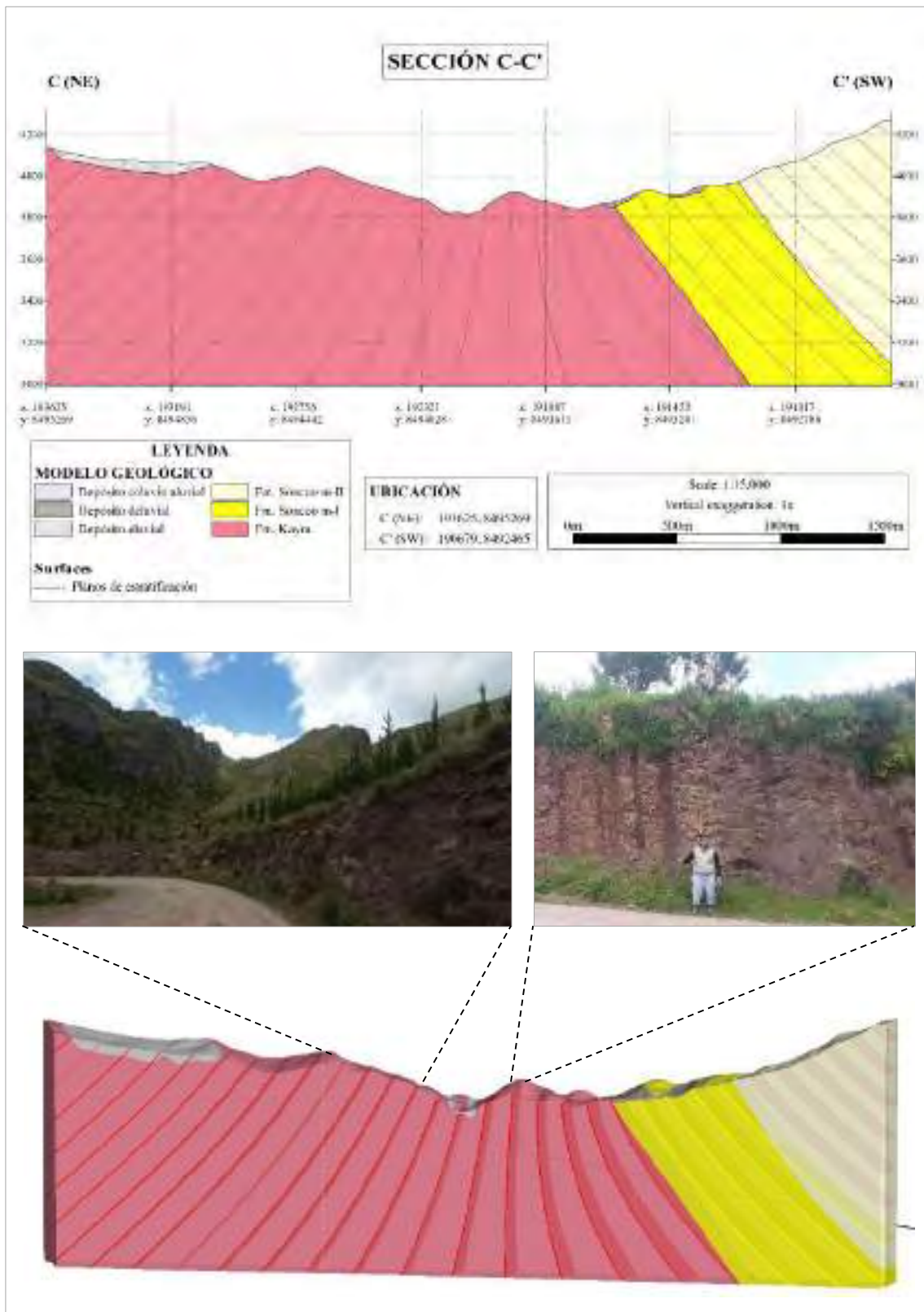
Estratificación cuenca Huanacahuire sección B-B'



Fuente: Elaboración propia.

Figura 63

Estratificación cuenca Huanacahuire sección C-C'



Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Estructuras secundarias

Un factor muy importante que está relacionado con la dinámica del flujo subterráneo en la cuenca Huanacahuire son las fracturas presentes, por medio de estas las aguas fluyen y se transportan a otras zonas. Describir las características que presentan estas fracturas es de vital importancia para un mayor entendimiento. En la zona de estudio se han identificados fracturas en la Formación Kayra, Soncco y Punacancha, entre diaclasas y algunas pequeñas fallas.

3.4.2.1 Diaclasas.

Para la descripción de diaclasas en la zona de estudio se hicieron ventanas estructurales en las diferentes unidades litológicas cuyas coordenadas se muestran en la (Tabla 5), y con la descripción de los parámetros se pasó a graficar los planos de fractura para cada una de las familias de discontinuidades mediante el programa Dips.

Figura 64

Cuadro de los parámetros de fracturas medidos en campo

Nota: Elaboración propia

Tabla 5*Coordenadas UTM de las ventanas estructurales*




Formación Geológica	Coordenada X	Coordenadas Y
Kayra (lado sur)	191265	8493952
Kayra (lado norte)	189358	8495115
Soncco miembro I	191807	8492000
Soncco miembro II	191424	8492290
Punacancha miembro I	185840	8494907

Fuente: Elaboración propia.

Formación Kayra (sur de la cuenca).

La Formación Kayra al sur de la zona de estudio que presenta una litología de areniscas y lutitas intercaladas presenta tres familias de discontinuidades principales. La familia 1 correspondiente a la estratificación con azimut de N305° y buzamiento de 78°NE, en la familia 2 el azimut es de N105° y el buzamiento 40°SW, y la familia 3 con azimut N20° y buzamiento 15°NW. En esta zona las fracturas de F2 es las más importantes ya que sus parámetros descritos (ver tabla 6) son favorables para el movimiento de flujo de agua subterráneo.

Tabla 6*Parámetros de las discontinuidades ventana estructural Kayra sur*

N°	Tipo de discontinuidad	Espaciado	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato 	120cm	>20m	<1mm	ligeramente rugoso	sin relleno	no presenta
F2	Diaclasa 	15cm	2m	1mm-1.5mm	rugoso	sin relleno	no presenta
F3	Diaclasa 	3.5cm	<1m	<1mm	ligeramente rugoso	sin relleno	no presenta

Fuente: Elaboración propia.

Figura 65

Ventana estructural de la Formación Kayra en el sur

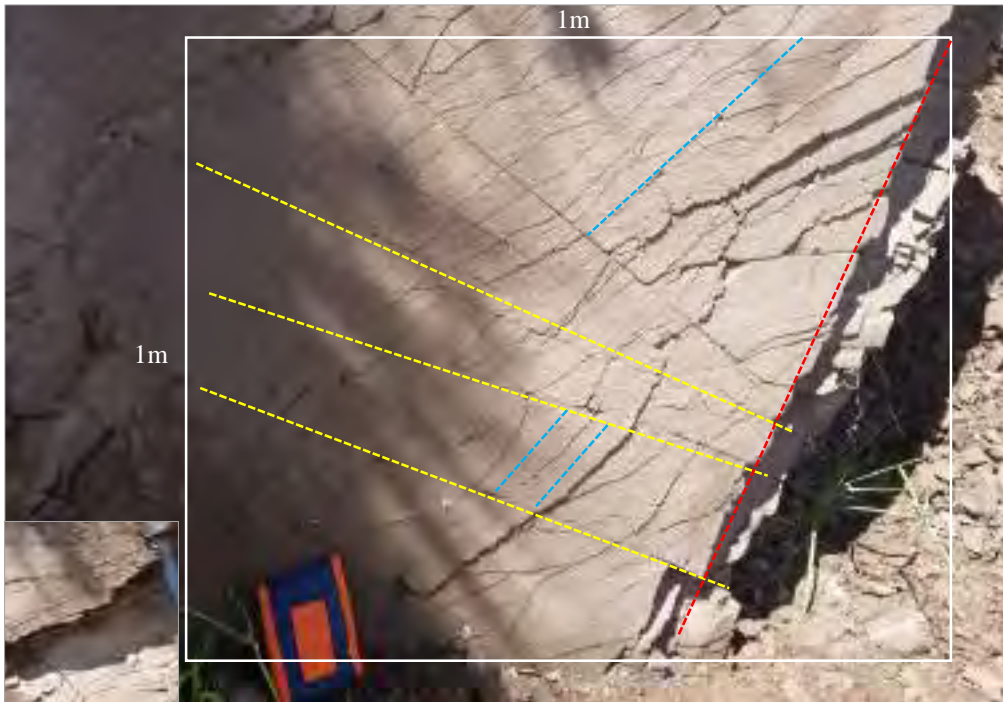
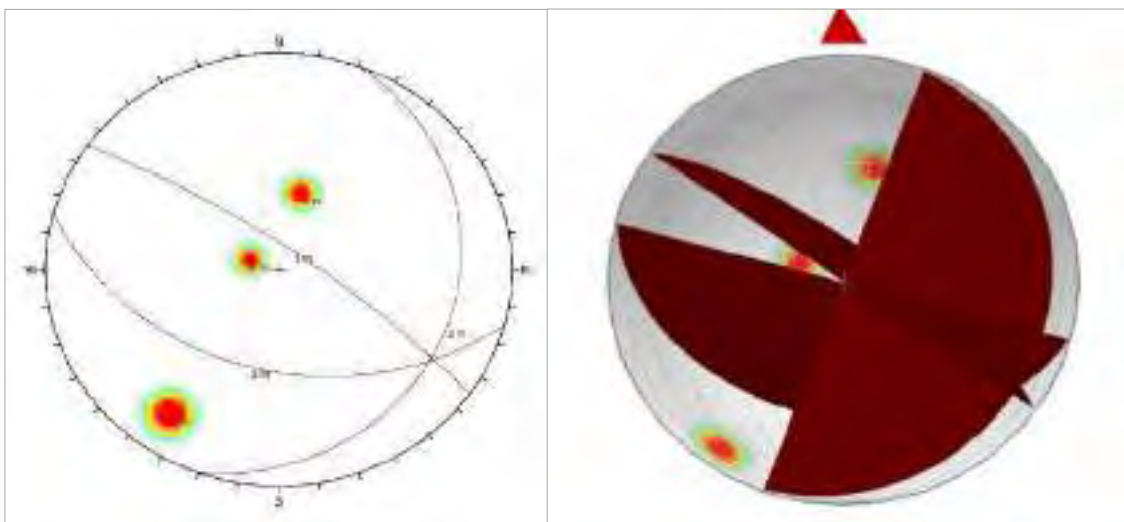


Figura 66

Planos de fractura de la Formación Kayra en el sur






Fuente: Elaboración propia.

Formación Kayra (norte de la cuenca).

La Formación Kayra al norte de la cuenca que presenta una litología de areniscas y lutitas intercaladas presenta tres familias de discontinuidades principales. La familia 1 correspondiente a la estratificación con azimut de N150° y buzamiento de 80°SW, en la familia 2 el azimut es de N115° y el buzamiento 40°SW, y la familia 3 con azimut N30° y buzamiento 10°SE. En esta zona las fracturas de F3 es son las más importantes ya que sus parámetros descritos (ver tabla 7) son favorables para el movimiento de flujo de agua subterráneo.

Tabla 7

Parámetros de las discontinuidades de la ventana estructural Kayra norte

N°	Tipo de discontinuidad	Espaciado	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato 	10cm-40cm	>20m	<1mm	ligeramente rugoso	sin relleno	no presenta
F2	Diaclasa 	<5cm	30cm	1mm	rugoso	relleno blando	no presenta
F3	Diaclasa 	15cm	50cm	1mm	ligeramente rugoso	sin relleno	no presenta

Fuente: Elaboración propia.

Figura 67

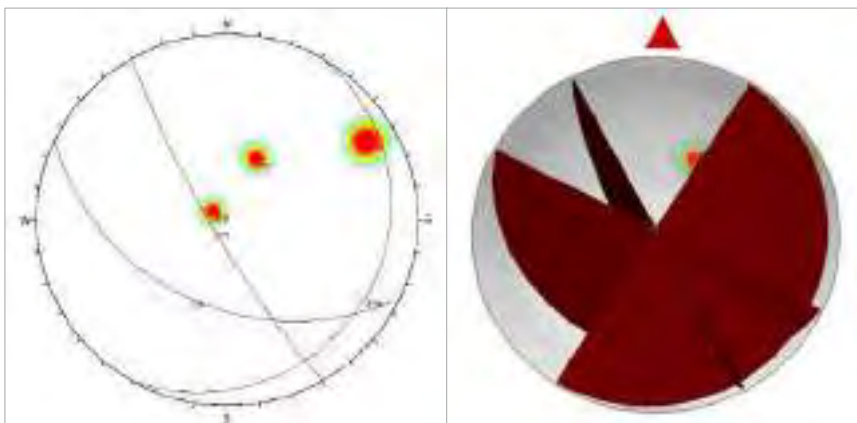
Ventana estructural de la Formación Kayra al norte



Fuente: Elaboración propia.

Figura 68

Planos de fractura de la Formación Kayra en el sur de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.





Formación Soncco I.

La Formación Soncco I que presenta una litología de lutitas intercaladas con areniscas presenta cuatro familias de discontinuidades principales. La familia 1 correspondiente a la estratificación con azimut de N140° y buzamiento de 79°SW; en la familia 2 el azimut es de N200° y el buzamiento 40°SE; la familia 3 con azimut N25° y buzamiento 35°SE; y la familia 4 con azimut N310° y buzamiento 40° NE.

En la Formación Soncco I las fracturas de F1 y F2 son las más importantes ya que sus parámetros descritos (ver tabla 8) son favorables para el movimiento de flujo de agua subterráneo, siendo la abertura el parámetro más representativo.

Tabla 8

Parámetros de las discontinuidades de la ventana estructural Soncco I

N°	Tipo de discontinuidad	Espaciado	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato 	22cm	>20m	2mm	rugoso	sin relleno	no presenta
F2	Diaclasa 	23cm	50cm	1mm	ligeramente rugoso	sin relleno	no presenta
F3	Diaclasa 	14cm	2m	1mm	rugoso	duro (cuarzo)	no presenta
F4	Diaclasa 	4cm	10cm	<1mm	ligeramente rugoso	sin relleno	no presenta

Fuente: Elaboración propia.

Figura 69

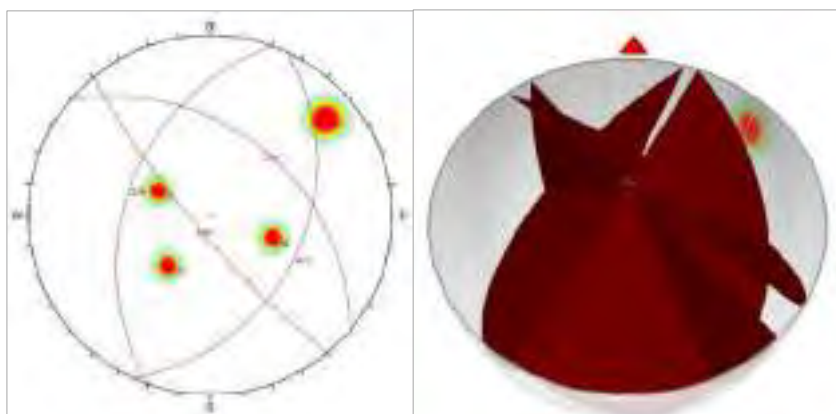
Ventana estructural Formación Soncco I.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 70

Planos de fractura Formación Soncco I






Fuente: Elaboración propia

Formación Soncco II.

La Formación Soncco II que presenta una litología de areniscas y conglomerados presenta tres familias de discontinuidades principales. La familia 1 correspondiente a la estratificación con azimut N160° y buzamiento de 62°SW; en la familia 2 el azimut es de N70° y el buzamiento 79°NW; y la familia 3 con azimut N30° y buzamiento 50°SE. En la Formación Soncco II las fracturas de F2 presentan una apertura y persistencia favorables (ver tabla 9) para el movimiento de flujo de agua subterráneo.

Tabla 9

Parámetros de las discontinuidades de la ventana estructural Soncco II

N°	Tipo de discontinuidad	Espaciado	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato 	5cm	>20m	1mm	rugoso	sin relleno	no presenta
F2	Diaclasa 	27cm	50cm	5mm	rugoso	sin relleno	no presenta
F3	Diaclasa 	12cm	20cm	1mm	ligeramente rugoso	sin relleno	no presenta

Fuente: Elaboración propia.

Figura 71

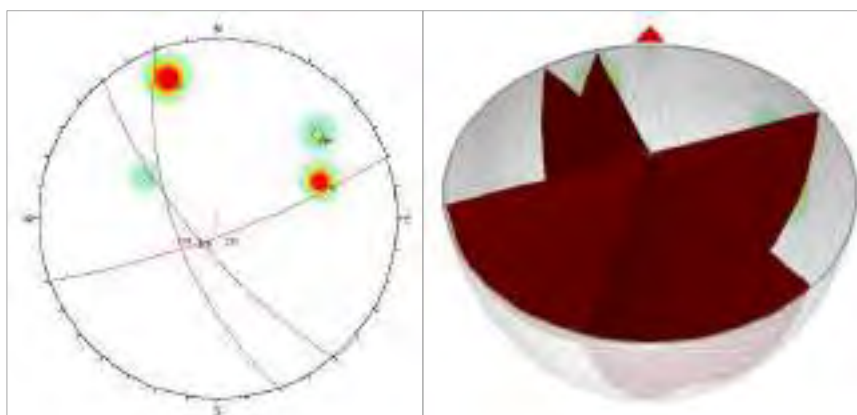
Ventana estructural Formación Soncco II



Fuente: Elaboración propia.

Figura 72

Planos de fractura de la Formación Soncco II



Fuente: Elaboración propia.

Formación Punacancha I.

La Formación Punacancha que presenta una litología de lutitas y areniscas finas presenta dos familias de discontinuidades principales. La familia 1 correspondiente a la estratificación con azimut N170° y buzamiento de 50°SW; en la familia 2 el azimut es N60° y el buzamiento 83°NW. En la Formación Punacancha I Se observa las lutitas muy fracturadas, pero aquí el movimiento del flujo de agua depende de la estratificación.

Tabla 10

Propiedades de las discontinuidades de la ventana estructural Punacancha I

N°	Tipo de discontinuidad	Espaciado	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	5cm	>20m	<1mm	liza	sin relleno	no presenta
F2	Diaclasa	<5cm	5cm	1mm	rugoso	sin relleno	no presenta

Fuente: Elaboración propia.

Figura 73

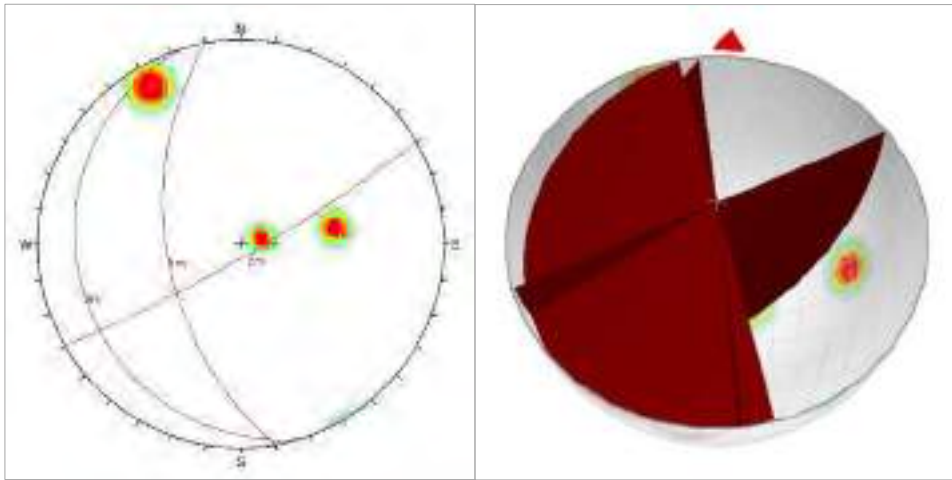
Ventana estructural Formación Punacancha I.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 74

Planos de fractura de la Formación Soncco II



Fuente: Elaboración propia.

3.5.2.2 Fallas locales.

Se han identificado algunas fallas locales ubicadas principalmente en la Formación Soncco I y estas estructuras forman parte de una familia de discontinuidades perpendiculares a la estratificación. A continuación, se muestran las fallas cartografiadas:

Tabla 11

Ubicación de fallas locales

N°	Coordenada X	Coordenada Y	Azimut	Buzamiento
Falla 1	190515	8495786		
Falla 2	191804	8492005	N75°	38°SE
Falla 3	191633	8492444	N305°	60°NE
Falla 4	187598	8495962	N63°	30°SE

Fuente: Elaboración propia.

Falla 1. Esta falla de rumbo inferida se encuentra dividiendo a la Formación Kayra con dirección noreste a suroeste, teniendo como evidencia el cambio brusco de buzamiento.

Figura 75

Falla de rumbo inferida



Falla 2. Esta falla se encuentra en el punto de contacto de los miembros I y II de la Formación Soncco donde se observa un salto de falla de 2 metros.

Figura 76

Falla normal presente en la Formación Soncco



Nota. Fotografía tomada en corte de carretera ruta Cusco-Rondocan.

Falla 2. Esta falla normal lístrica se encuentra en las intercalaciones de las areniscas y lutitas de la Formación Soncco donde se observa la caída del bloque techo con un arrastre generando un plegamiento.

Figura 77

Falla lístrica presente en la Formación Soncco miembro I



Falla 3. Esta falla se ubica en el corte de carretera de la comunidad de Sunco, en las intercalaciones de areniscas y lutitas de la Formación Soncco miembro I donde se observa un salto de falla de 20 centímetros.

Figura 78

Falla normal presente en lutitas de la Formación Kayra.

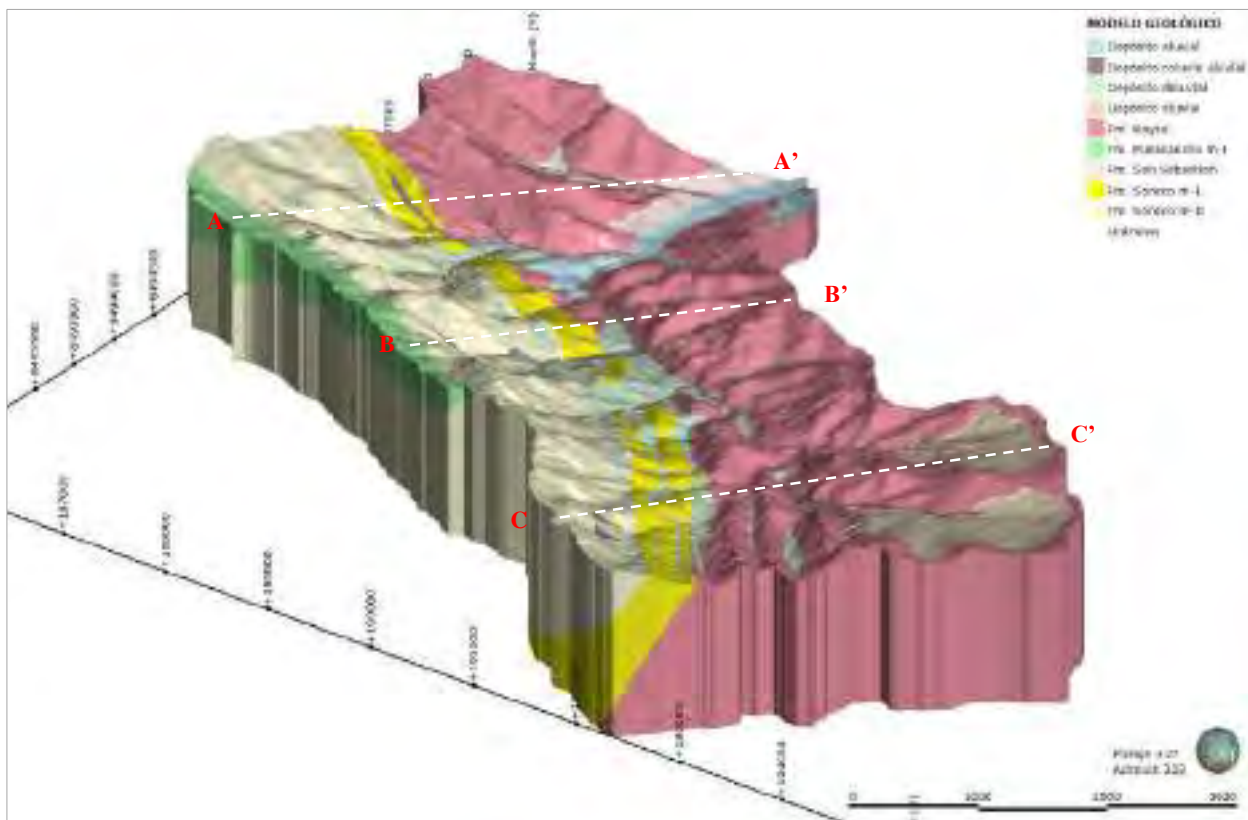


3.5 Modelo geológico

El modelo geológico de la cuenca Huanacahuire muestra de mejor manera la morfología de las formaciones y depósitos geológicos, esta representación tiene que ser la más cercana a la realidad posible. En el modelo se han utilizado datos estructurales como los buzamientos de los contactos entre formaciones geológicas tomados en superficie, al igual que para los depósitos cuaternarios considerando la morfología de cada depósito; de esta manera es posible entender de mejor manera la geología de la cuenca Huanacahuire.

Figura 79

Modelo geológico cuenca Huanacahuire vista al norte



Fuente. Elaboración propia.

3.6 Dirección de flujo del agua subterránea por fractura

La dinámica de flujo de agua subterránea ha sido determinada considerando las direcciones de las fracturas principales y los planos de estratificación dentro de la zona de estudio. Las fracturas presentes están ligadas a la tectónica regional presente como fallas, plegamientos que dependiendo del tipo de esfuerzo generado y el tipo de roca se originan estos tipos de fracturas.

Desde el punto de vista de la estratigrafía de las formaciones geológicas de la zona de estudio, las direcciones que toman los flujos de agua subterránea van orientados hacia el suroeste en gran parte de la cuenca a excepción de la zona este en la Formación Kayra cuya orientación está dirigida al noreste y que es causado por la discordancia progresiva presente en dicha Formación.

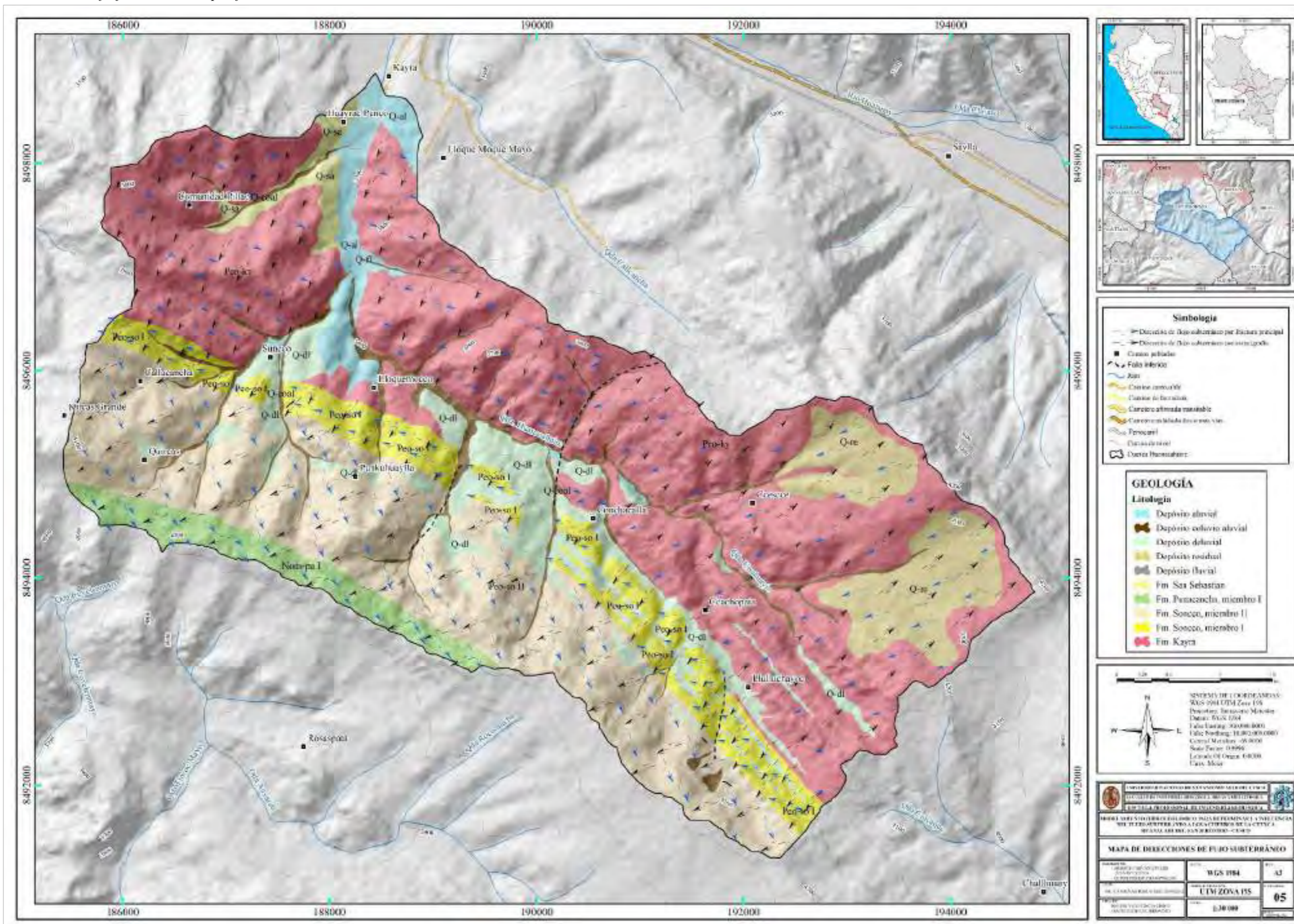
Por otra parte, el flujo de agua subterránea al que se debe tomar más importancia va dirigido por las fracturas principales presentes en la cuenca.

En la Formación Kayra el movimiento de flujo subterráneo va dirigido hacia el sureste en la zona de salida de cuenca, pero las ventanas estructurales tomadas en la zona este definen que el flujo va orientado hacia el suroeste.

En el lado sur de la cuenca, donde se observa la mayor parte de afloramientos de manantes, se encuentra la Formación Soncco I, con direcciones de flujo orientados hacia el oeste; la Formación Soncco II y Punacancha cuyo movimiento de flujo es más conformable orientados hacia el sureste.

Figura 80

Direcciones de flujo subterráneo por fractura



Fuente: Elaboración propia.

Capítulo IV: Hidrología

4.1 Ubicación hidrográfica de la cuenca

Para ubicación hidrográfica de la cuenca Huanacahuire se utiliza el criterio de Otto Pfafstetter que indica que existen tres tipos de unidades de drenaje: cuenca, intercuenas y cuencas internas. De acuerdo al sistema de codificación Pfafstetter, el Perú se encuentra en tres grandes cuencas o vertientes hidrográficas de Sudamérica del primer nivel, las cuales son: La cuenca interna del Titicaca con código 0, La intercuenca del Pacífico con código 1 y la cuenca del Amazonas con código 4 (ver figura 80).

Tabla 12

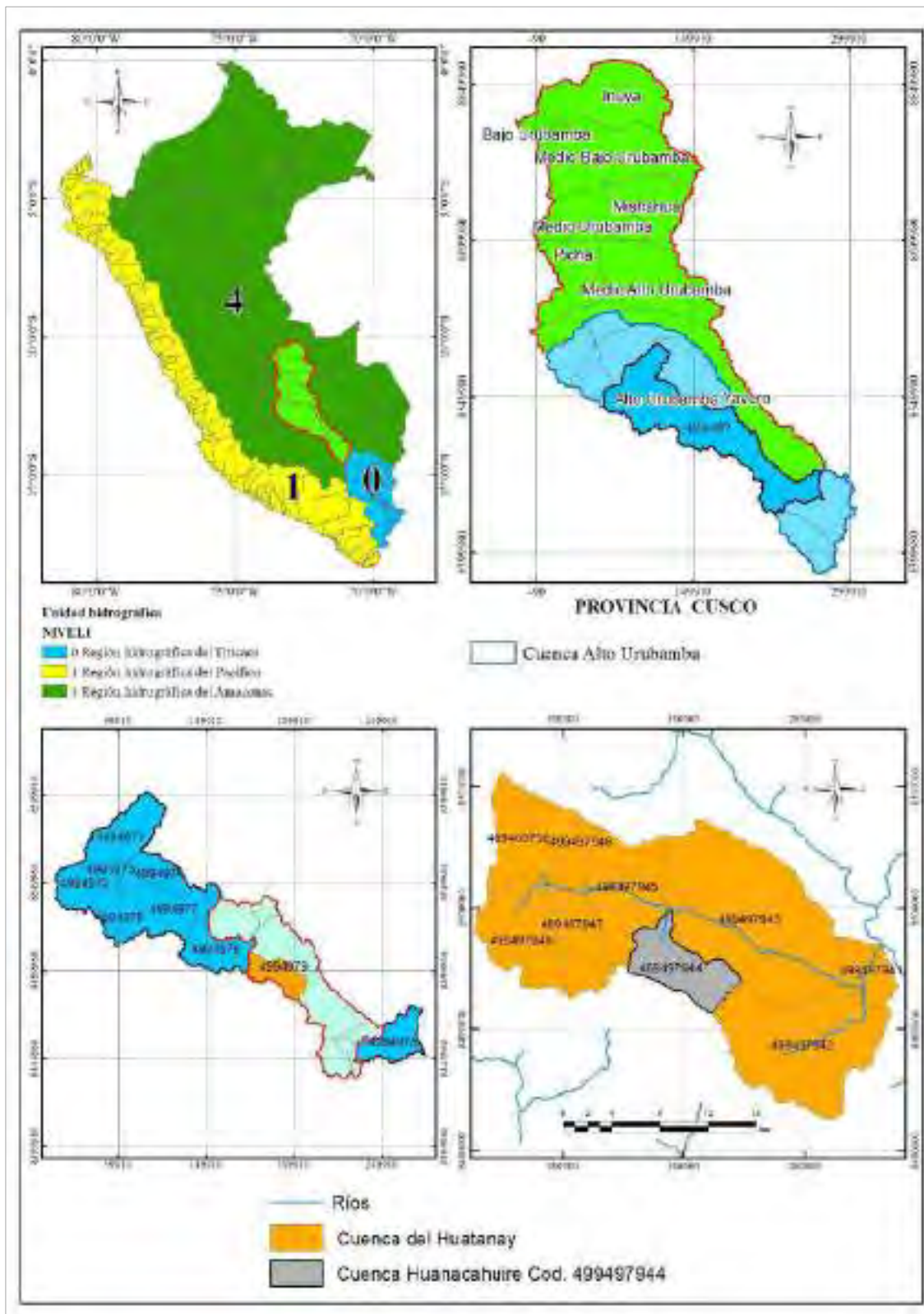
Codificación de la cuenca Huanacahuire según Pfafstetter

Nivel	Nombre	Código
9	Cuenca del río Huanacahuire	499497944
8	Cuenca del río Huatanay	49949794
7	Unidad hidrográfica	4994979
6	Cuenca del Vilcanota	499497
5	Cuenca cabecera del río Urubamba	49949
4	Cuenca del río Urubamba	4994
3	Cuenca del río Ucayali	499
2	Cuenca cabecera del río Amazonas	49
1	Región hidrográfica del Amazonas	4

Fuente: Elaboración propia en base SENAMHI.

Figura 81

Codificación de la cuenca Huanacahuire según Pfafstetter



Fuente: Elaboración propia en base a SENAMHI.

4.2 Morfometría de la cuenca

4.2.1 Parámetros generales

Estos parámetros constituirán la información mínima que se debe conocer para formar una primera idea de la naturaleza y comportamiento de la cuenca Huanacahuire. Los parámetros generales según Ibáñez et al. (2011) son la geometría, centroides y altitudes de la cuenca.

Tabla 13

Geometría de la cuenca

Geometría de la cuenca		
Área	km ²	32.88
Perímetro	km	36.94
Ancho	km	3.86
Largo	km	8.52
Centroide X	m	189967
Centroide Y	m	8495032
Centroide Z	msnm	3881

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14

Altitudes de la cuenca

Altitudes de la cuenca		
Cota mínima	msnm	3274
Cota Máxima	msnm	4340
Altitud Media	msnm	3881
Altitud más frecuente	msnm	3800

Altitud de frecuencia	msnm	3819.02
(1/2)		

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Parámetros de forma

Dado que la forma de una cuenca afecta a su comportamiento hidrológico (cuencas con la misma superficie, pero formas diferentes responderán de forma distinta a una lámina de precipitación de igual tamaño y desarrollo, lo que dará lugar a hidrogramas diferentes), algunos parámetros intentan cuantificar las características morfológicas mediante índices o coeficientes. (Ibáñez et al., 2011).

El coeficiente Gravelious y el rectángulo equivalente son los dos principales parámetros de forma.

Tabla 15

Parámetros de forma de la cuenca Huanacahuire

Nombre del Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Factor Forma	F	0.45	S/N
Índice de Gravelious (Compacidad)	K	1.80	S/N
Rectángulo Equivalente (Lado Mayor)	L	16.47	km
Rectángulo Equivalente (Lado Menor)	l	2.00	km
Densidad de Drenaje	Dd	1.96	u/km ²
Índice de pendiente	Ip	0.73	S/N

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Parámetros de relieve

Son muy significativos porque el relieve de una cuenca tiene un mayor impacto en la respuesta hidrológica que su forma; en términos generales, cuanto mayor es el relieve o la pendiente, más escorrentía se genera en menos tiempo. La pendiente media del cauce, la pendiente media de la cuenca, la curva hipsométrica, el histograma de frecuencias altimétricas y la altura media son las principales métricas del relieve. (Ibáñez et al., 2011).

Tabla 16

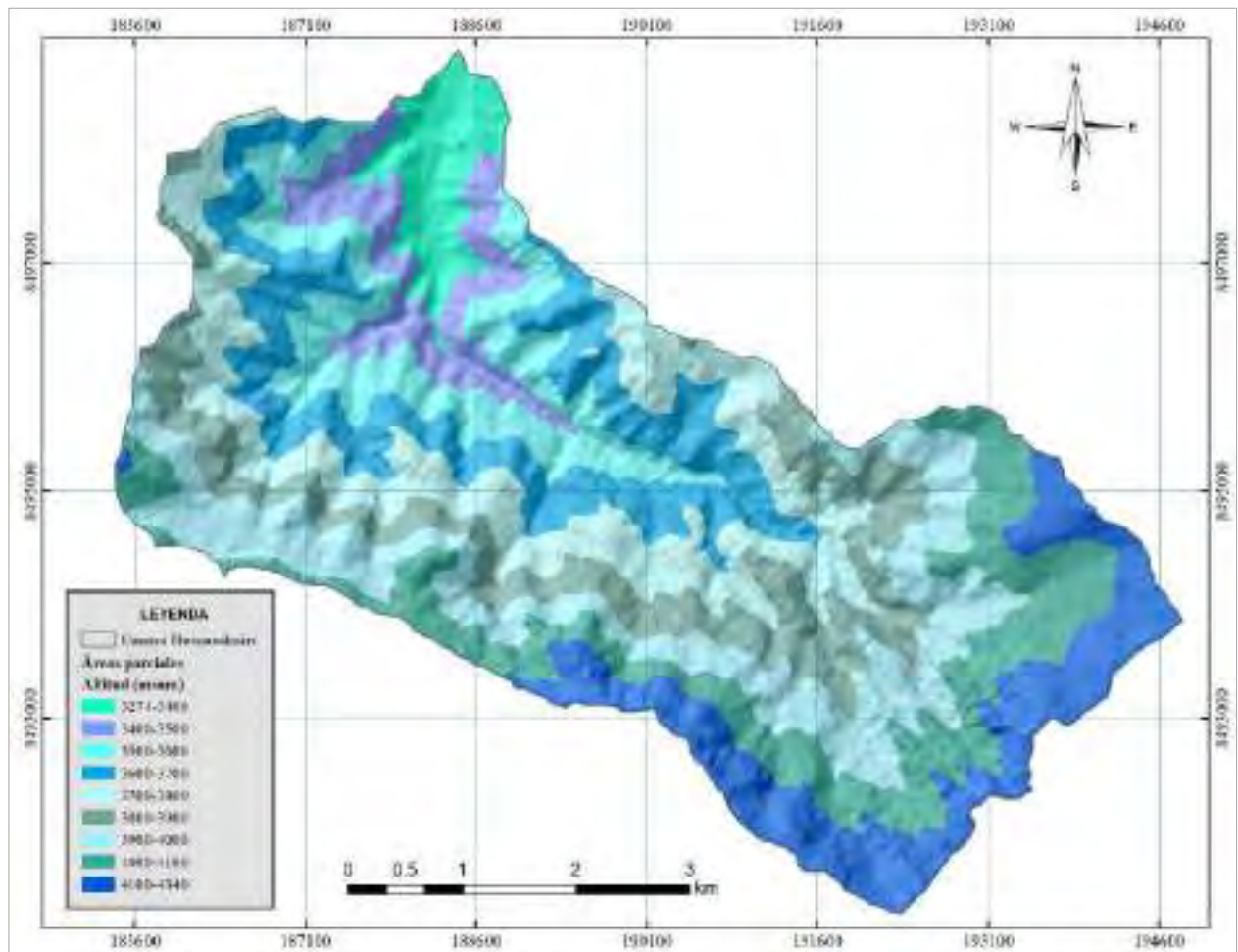
Áreas parciales de la cuenca Huanacahuire

Min	Max	Promedio	Áreas (km ²)	Área Acumulada	Área sobre la curva	Áreas (%)	Área sobre la Curva (%)
3274	3400	3337	1.46	1.46	31.61	4.41	95.59
3400	3500	3450	1.91	3.37	29.70	5.78	89.81
3500	3600	3550	3.19	6.56	26.51	9.64	80.17
3600	3700	3650	4.52	11.07	22.00	13.66	66.52
3700	3800	3750	4.77	15.85	13.15	14.44	52.08
3800	3900	3850	4.07	19.92	13.15	12.31	39.77
3900	4000	3950	4.68	24.60	8.47	14.17	25.61
4000	4100	4050	4.57	29.17	3.90	13.81	11.79
4100	4340	4220	3.90	33.07	0.00	11.79	0.00
total			33.07			100	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 82

Áreas parciales cuenca Huanacahuire



Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.1 Pendiente de la cuenca.

La pendiente de la cuenca fue determinada en base las áreas parciales que se determinaron anteriormente. Considerándose 10 rangos cuyos promedios de pendiente y ocurrencia muestra un valor promedio aproximado de la pendiente de la cuenca.

Tabla 17

Pendiente media cuenca Huanacahuire

Pendientes (%)		Promedio (P)	Ocurrencia (O)	P*O
Min	Max			
0	10	5	37671	188355
10	20	15	124021	1860315
20	30	25	109926	2748150
30	40	35	44875	1570625
40	50	45	9559	430155
50	60	55	1609	88495
60	70	65	345	22425
70	80	75	95	7125
80	90	85	16	1360
90	100	95	5	475
Total			328122	6917480
Pendiente promedio de la Cuenca			21.08 %	

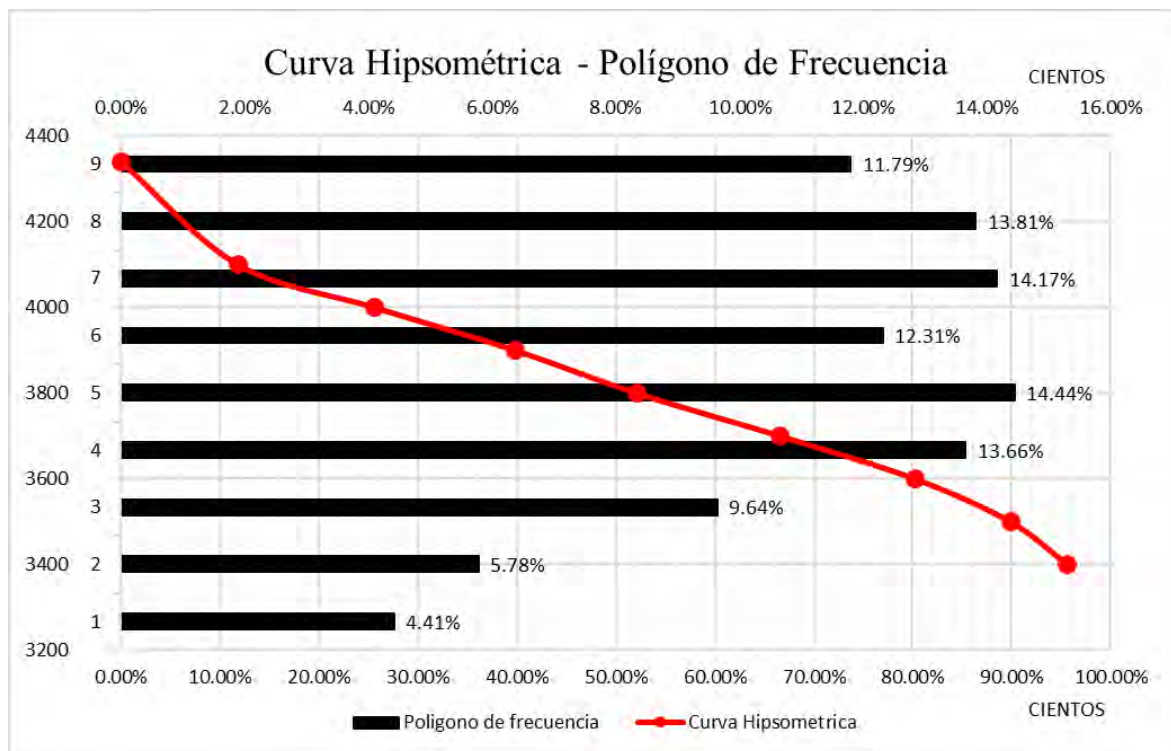
Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.2 Curva hipsométrica y polígono de frecuencias.

La curva hipsométrica indica que la cuenca Huanacahuire se encuentra en una fase de equilibrio (etapa madura), respecto al polígono de frecuencias se tiene una mayor área (14.44%) a una altura de 3800 msnm. (ver figura 82).

Figura 83

Curva hipsométrica y polígono de frecuencia cuenca Huanacahuire



Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.3 Características de la red de drenaje.

La clasificación ayuda a aclarar la evolución y complejidad del sistema de drenaje de la cuenca. El caudal relativo de un segmento de canal afecta al orden. (Ibáñez et al., 2011). Para la jerarquización de la red fluvial se utiliza el método de Strahler (1952).

Tabla 18

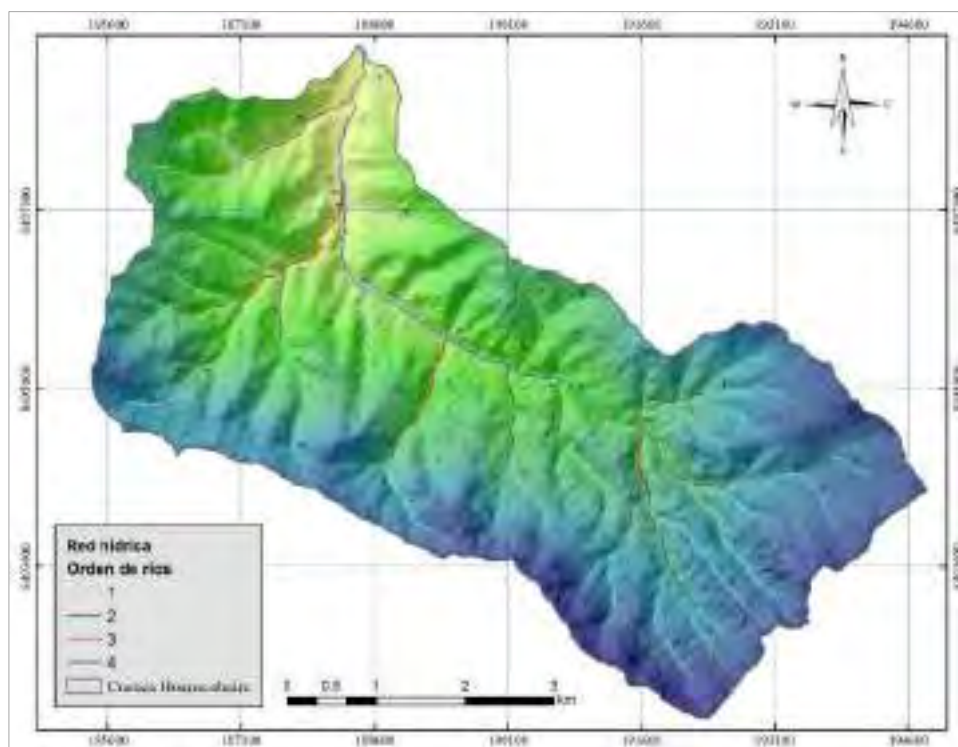
Hidrografía de la cuenca Huanacahuire

Orden	Cantidad	Longitud Km	Coincidencias (C)	Pendiente promedio (P)	C*P
1	58	39.72	4306	22.781511	98097.19
2	12	14.24	1472	17.139095	25228.75
3	4	3.76	421	18.582034	7823.04
4	1	6.76	734	13.23387	9713.66
Longitud Total		64.48	6933		140862.63
Pendiente promedio				<u>20.32</u>	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 84

Hidrografía de la cuenca Huanacahuire



Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.4 Perfil longitudinal del río principal.

El perfil longitudinal del río principal de la zona de estudio representa las diferentes alturas desde su nacimiento a su desembocadura (ver figura 84). Se realizó mediante la interpolación de alturas de la línea de drenaje que representa el río principal con el dem (modelo de elevación digital), la interpolación se realizó en ArcGis.

Figura 85

Pendiente del río principal



Fuente: elaboración propia.

4.3. Información hidrometeorológica

Los datos de precipitación y temperatura han sido obtenidos de la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) www.senamhi.gob.pe utilizando datos de la estación meteorológica Granja Kayra (ver figura 85). El uso de la única estación meteorológica Kayra es por la cercanía que esta tiene a la zona de estudio (prácticamente en la misma zona), ya que las otras estaciones están muy alejadas (Estación Paruro y estación Pisac).

Tabla 19

Coordenadas de la estación meteorológica Kayra

Estación meteorológica Granja Kayra						
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco	Distrito:	San Jerónimo	Código:
Latitud:	13°33'24.3''	Longitud:	71°51'30.4''	Altitud:	3214	100044

Fuente: Elaboración propia.

Figura 86

Ubicación de la estación Granja Kayra



Fuente: Google Earth, Elaboración propia.

4.3.1 Precipitación (P)

4.3.1.1 Análisis de precipitación.

En la estimación de la precipitación en la cuenca Huanacahuire se evalúan los datos de precipitación total mensual registrado solo en la estación Granja Kayra ya que esta se encuentra muy cercana a la cuenca, sin embargo, para el análisis es necesario usar datos de dos estaciones adicionales Paruro y Pisac para poder llevar a cabo la comparación de confiabilidad de datos.

El periodo de los datos brindados por SENAMHI va desde el año 1971 hasta el año 2021.

4.3.1.2 Completación de datos meteorológicos.

El procedimiento mediante el cual se rellenan los "vacíos" de un registro de datos se conoce como exhaustividad de los datos. Esto se hace para crear series periódicas tan completas, fiables y uniformes como sea posible. Algunas de estas técnicas son la media aritmética, la relación normal y la interpolación.

Para completar los datos mensuales de precipitación de la estación de Granja Kayra se ha utilizado el método de interpolación lineal.

$$y_x = y_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} (y_1 - y_0)$$

Donde:

y_x = Valor a buscar

y_0 = Límite inferior de la variable y

y_1 = Límite superior de la variable y

x = Promedio entre límite superior e inferior de la variable y

x_0 = Límite inferior de la variable x

x_1 = Límite superior de la variable x

Tabla 20

Completación de datos de precipitación estación Granja Kayra

Precipitación media mensual - cuenca Huanacahuire (mm/año)					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco	Distrito:	San Jerónimo
Este:	189967	Norte:	8495032	Altitud:	3881

“MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO A LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA HUANACAHUIRE, SAN JERÓNIMO, CUSCO 2023”

N°	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Pp anual	Prom. anual
1	1971	128.9	161.6	83.6	40.0	1.5	0.1	0.0	5.7	3.5	55.7	51.0	127.5	659.10	54.92
2	1972	192.1	64.5	57.2	29.7	3.4	0.0	6.5	27.3	12.2	7.9	50.2	100.2	551.20	45.93
3	1973	221.3	120.9	99.6	75.2	14.0	0.0	9.1	11.8	14.5	65.1	88.8	96.5	816.80	68.07
4	1974	102.5	157.7	121.5	34.5	3.6	8.2	1.0	34.6	5.9	43.3	60.9	108.0	681.70	56.81
5	1975	124.7	131.0	55.3	66.8	22.5	0.7	0.3	0.6	51.1	47.5	51.0	170.1	721.61	60.13
6	1976	119.6	80.2	123.1	42.9	13.0	8.7	0.7	2.5	26.8	25.3	47.8	66.8	557.43	46.45
7	1977	116.7	122.8	69.3	47.6	7.9	0.0	4.4	0.0	29.9	65.0	71.5	78.0	613.10	51.09
8	1978	175.4	106.1	88.5	48.7	11.4	0.0	3.4	0.0	13.7	12.3	86.7	117.9	664.10	55.34
9	1979	101.1	131.6	108.8	46.8	6.2	0.0	0.9	8.1	11.5	18.4	85.6	81.8	600.80	50.07
10	1980	106.2	122.0	135.0	23.2	3.7	0.0	5.3	1.0	12.6	62.9	60.2	83.1	615.24	51.27
11	1981	225.4	80.8	124.4	56.9	1.8	3.9	0.0	9.8	45.9	108.9	120.8	144.3	922.90	76.91
12	1982	178.9	115.5	143.1	58.8	0.0	9.2	3.4	4.9	14.0	37.9	122.5	98.6	786.80	65.57
13	1983	128.4	84.0	54.5	29.8	3.4	6.2	0.5	0.9	5.5	26.0	44.3	100.2	483.70	40.31
14	1984	198.6	137.5	71.0	82.8	0.0	2.0	1.3	11.4	4.2	114.6	68.5	102.8	794.69	66.22
15	1985	129.1	119.4	74.2	33.2	15.6	11.6	0.9	0.0	43.3	62.1	116.5	126.5	732.35	61.03
16	1986	178.9	92.2	125.7	65.5	6.2	0.0	1.8	4.2	7.5	17.3	69.6	102.7	671.60	55.97
17	1987	224.3	87.9	48.6	13.1	2.1	1.3	9.2	0.0	8.2	26.5	101.8	107.6	630.60	52.55
18	1988	163.8	81.4	166.5	108.9	4.6	0.0	0.0	0.0	9.9	36.2	47.6	103.7	722.59	60.22
19	1989	151.4	126.8	119.3	38.6	6.4	9.1	0.0	6.1	30.7	39.5	60.7	88.5	677.06	56.42
20	1990	157.6	90.5	60.2	47.4	7.5	31.8	0.0	5.8	13.3	73.7	86.9	66.5	641.22	53.43
21	1991	97.6	163.8	105.2	45.1	11.0	5.1	1.5	0.0	21.4	49.3	83.6	99.0	682.61	56.88
22	1992	114.1	98.9	104.0	14.9	0.0	19.4	0.0	21.4	8.0	50.7	117.4	57.0	605.77	50.48
23	1993	206.7	110.5	75.8	18.8	0.9	0.0	2.7	6.9	18.0	46.2	111.9	201.5	799.90	66.66
24	1994	177	164.1	173.9	45.5	11.8	0.0	0.0	0.0	25.7	40.2	40.5	119.9	798.61	66.55
25	1995	122	94.8	95.3	17.8	0.0	0.0	0.6	1.2	28.8	26.7	70.2	102.6	560.00	46.67
26	1996	131.9	94.6	70.5	32.3	11.0	0.0	0.0	6.3	20.3	57.3	112.3	129.3	665.77	55.48
27	1997	123.3	127.7	104.8	31.0	4.8	0.0	0.0	7.1	12.3	44.4	201.5	148.4	805.30	67.11
28	1998	116.3	156.4	22.6	31.0	1.6	1.9	0.0	1.6	4.3	49.8	49.7	58.9	494.08	41.17
29	1999	89.3	92.3	92.0	42.8	1.3	3.4	1.0	0.0	43.1	18.8	39.7	119.5	543.21	45.27
30	2000	197.4	132.6	119.5	10.9	2.6	5.8	2.7	4.5	10.7	49.3	29.3	82.0	647.27	53.94
31	2001	233	173.1	137.4	36.4	11.5	0.0	17.4	10.2	20.6	38.3	96.8	89.4	864.10	72.01

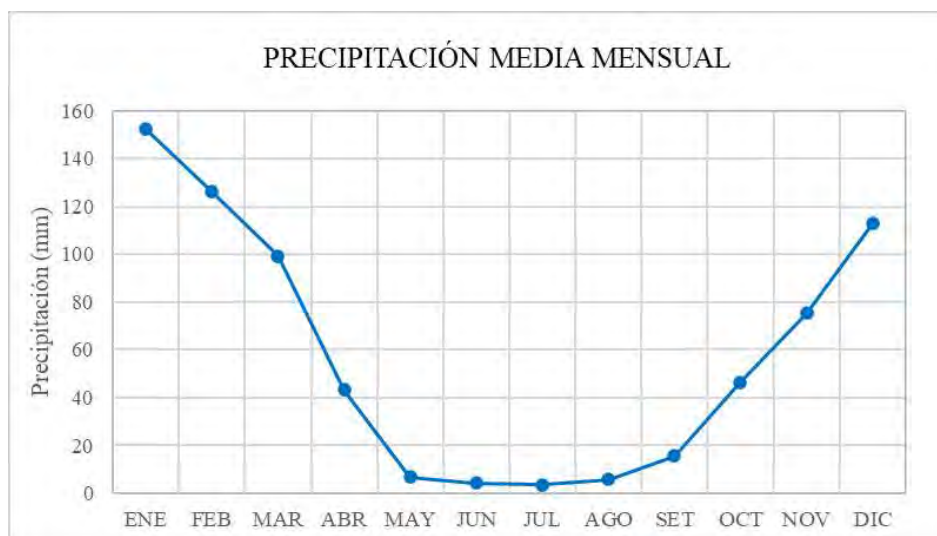
“MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO A LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA HUANACAHUIRE, SAN JERÓNIMO, CUSCO 2023”

32	2002	134.5	184.8	112.7	21.6	16.2	2.5	27.1	3.7	10.3	78.7	97.8	132.4	822.34	68.53
33	2003	163.9	135.9	142.9	56.5	2.0	6.4	0.0	21.3	3.7	34.6	23.1	123.8	714.06	59.50
34	2004	173.7	121.5	66.5	21.0	2.4	20.5	17.0	9.0	21.7	25.6	60.9	87.9	627.66	52.31
35	2005	145.5	125.8	120.2	33.1	3.2	0.4	1.2	4.0	4.5	39.1	59.3	102.5	638.77	53.23
36	2006	203.4	155.8	145.9	40.9	0.2	4.9	0.0	10.5	7.8	72.5	67.8	147.2	856.89	71.41
37	2007	140.8	128.8	107.3	93.6	5.8	0.0	4.0	0.0	1.0	49.4	74.0	88.4	693.07	57.76
38	2008	108.8	105.4	64.4	7.6	8.7	2.1	0.0	3.9	13.9	51.7	90.2	128.8	585.55	48.80
39	2009	112.5	108.4	79.1	21.3	5.3	0.0	3.3	0.7	15.1	8.3	88.7	82.9	525.63	43.80
40	2010	268.5	168.5	129.2	16.6	1.3	0.0	1.4	4.7	8.2	70.0	40.0	174.1	882.48	73.54
41	2011	103.4	187.0	131.9	67.6	3.9	3.2	3.7	0.0	38.9	38.2	60.2	110.2	748.22	62.35
42	2012	178.9	152.5	41.7	48.1	4.5	1.2	0.0	0.0	18.4	19.5	138.2	179.5	782.46	65.20
43	2013	189.6	137.3	75.5	15.1	25.3	6.1	2.0	12.4	6.3	105.0	86.0	159.4	820.00	68.33
44	2014	161.9	116.8	40.0	35.0	10.1	0.0	3.2	5.8	5.8	0.0	30.6	156.0	565.23	47.10
45	2015	169.8	146.5	66.7	69.8	18.6	3.9	10.3	4.6	16.1	19.1	48.6	113.0	686.97	57.25
46	2016	104	147.8	54.3	24.4	3.0	0.0	4.5	0.5	7.0	79.5	28.0	89.8	542.82	45.24
47	2017	111.2	122.1	122.8	47.5	11.2	5.9	0.0	8.4	19.0	33.7	61.4	101.7	644.94	53.74
48	2018	154.8	162.5	146.3	20.3	0.2	16.0	11.6	7.1	9.1	84.8	80.8	95.0	788.40	65.70
49	2019	127.8	117.2	171.4	30.0	28.2	1.5	3.7	0.0	9.8	82.4	111.7	154.4	838.11	69.84
50	2020	126.7	151.0	138.2	77.4	0.0	0.0	8.2	1.0	5.6	7.5	46.6	138.2	700.34	58.36
51	2021	154.4	127.0	75.7	147.1	8.7	10.7	0.0	4.3	1.5	46.1	101.6	106.1	783.17	65.26
Pp máx.		268.5	187	174	147	28.2	32	27	34.6	51.1	114.6	201.5	201.5	268.5	76.91
Pp mín.		89.3	64.5	22.6	7.6	0	0	0	0	1	0	23.1	57	0	40.31
Desv. Est.		41.95	29.44	36.8	26.6	6.72	6.4	5.3	7.21	12.1	26.4	33.53	31.89	108.739	9.06
Media		152.3	126	99.3	43.4	6.86	4.2	3.4	5.8	15.7	46.33	75.32	112.7	691.34	57.61
N° datos		51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
Coef. Var.		0.275	0.234	0.37	0.61	0.98	1.5	1.5	1.24	0.77	0.57	0.445	0.283	0.15729	0.16

Nota: La precipitación anual es 691.34 mm. *Fuente:* Completado en base a SENAMHI.

Figura 87

Diagrama de precipitación media mensual estación Granja Kayra



Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.3 Análisis de consistencia.

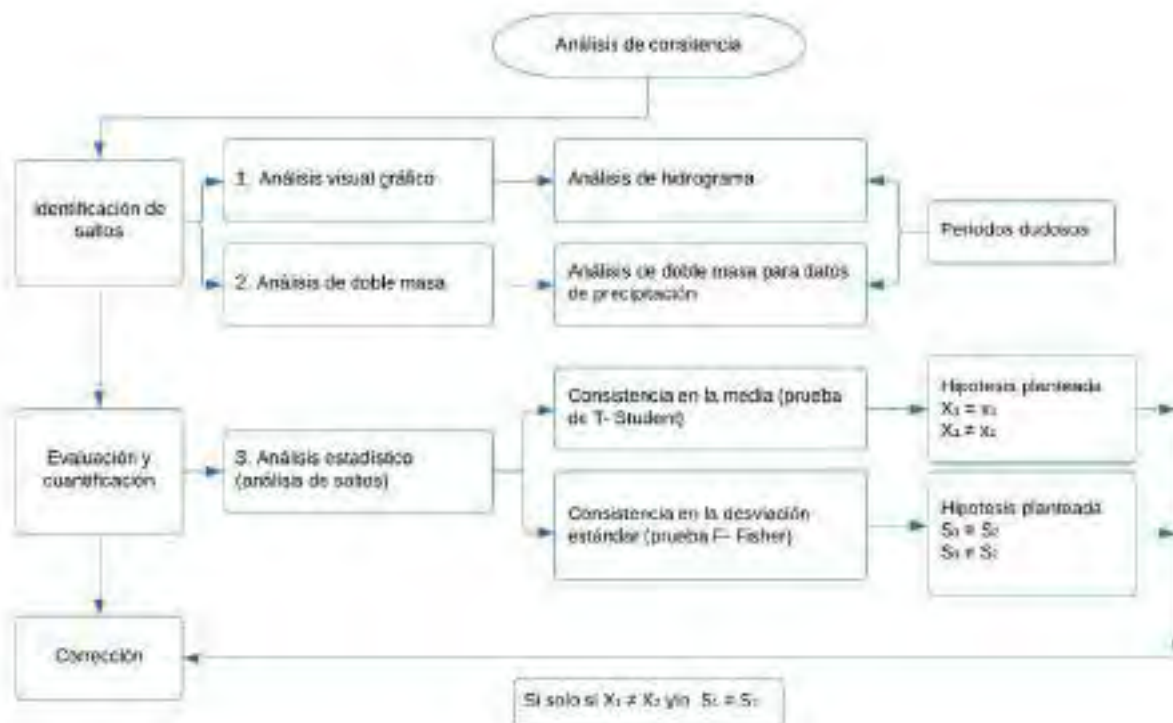
La información hidrológica está sujeta a cambios debidos a la no homogeneidad y la incoherencia; por lo tanto, es crucial comprender estos fenómenos para identificar cualquier posible imprecisión sistémica. El proceso de identificar o detectar, describir y eliminar la no homogeneidad y la incoherencia en una serie temporal hidrológica se conoce como análisis de la consistencia de la información. (Villón Béjar, 2006). Para utilizar la serie histórica, se necesita primeramente efectuar el análisis de consistencia respectivo, con el fin de obtener una serie confiable, es decir, homogénea y consistente.

Según Villon (2006) para el análisis de consistencia de los datos de precipitación se realizan tres procesos cuyo orden tiene que ser considerado. Estos procesos son:

- Análisis Visual grafico
- Análisis de doble masa
- Análisis estadístico

Figura 88

Metodología para el análisis de consistencia



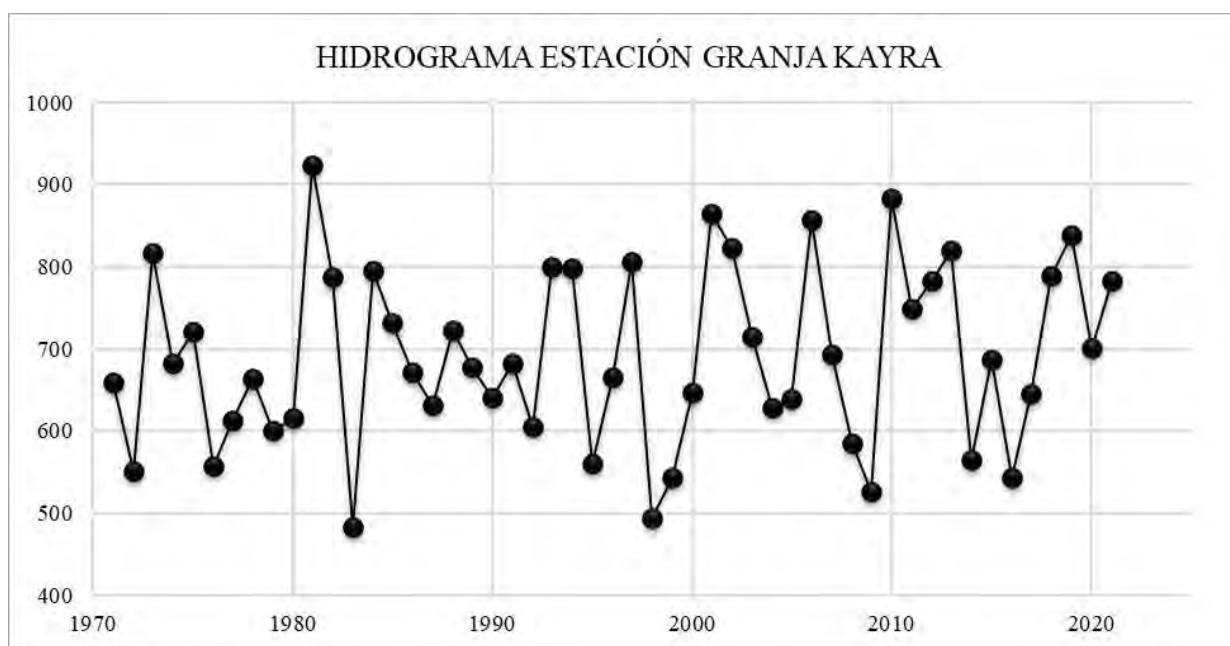
Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.3.1 Análisis visual gráfico.

El primer proceso en el análisis de consistencia de los datos de precipitación en la cuenca Huanacahuire consiste en realizar un gráfico que sirve para analizar la consistencia de estos datos de manera visual, de esta manera se pueden encontrar periodos en los cuales la información es dudosa conocidos como picos y saltos dependiendo si son valores muy altos o muy bajos respectivamente. Si se trabaja solo con una estación, se pueden dividir en periodos y comparar dicha información por periodos diferentes.

Figura 89

Series históricas de precipitación de la estación Granja Kayra



Nota: En el hidrograma se observa un salto en el año 1983 con una precipitación menor a 500 mm, con esta idea se divide en dos periodos. *Fuente:* elaboración propia.

4.3.1.3.2 Análisis de doble masa.

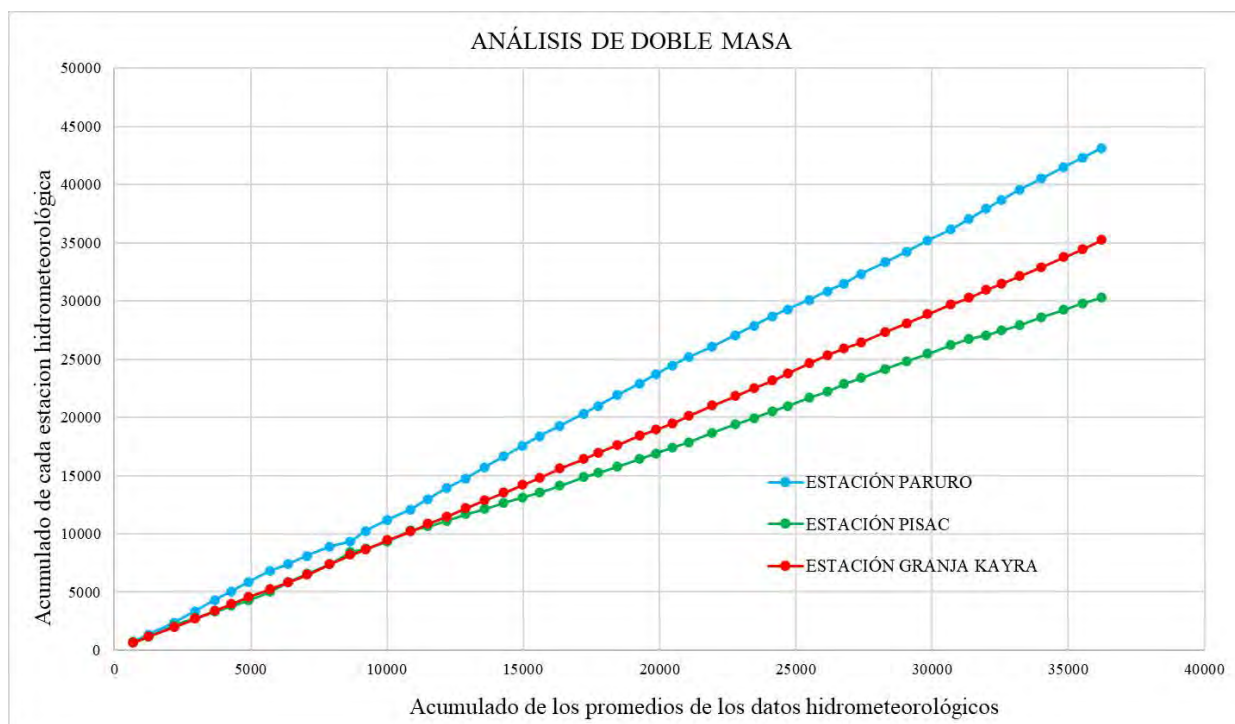
Este proceso se utiliza para tener una idea de la confiabilidad de los datos de precipitación obtenidos, se pueden analizar los datos relacionados a errores que pueden producirse durante la obtención de los mismos, cabe mencionar que en este proceso no se corrigen los datos.

El análisis de doble masa permite conocer las causas de los fenómenos naturales o errores sistemáticos mediante los quiebres que presentan en los diagramas realizados para cada estación, el estación cuyo número de quiebres sea el menor es considerado como una estación base o la más confiable para poder comparar las otras estaciones restantes.

Con respecto a los quiebres, estos son los puntos de separación para considerar distintos periodos n_1 , n_2 , n_3 , y que podrían ser corregidos mediante el último proceso del análisis de consistencia: análisis estadístico.

Figura 90

Diagrama análisis de doble masa estación Granja Kayra, Pisac y Paruro



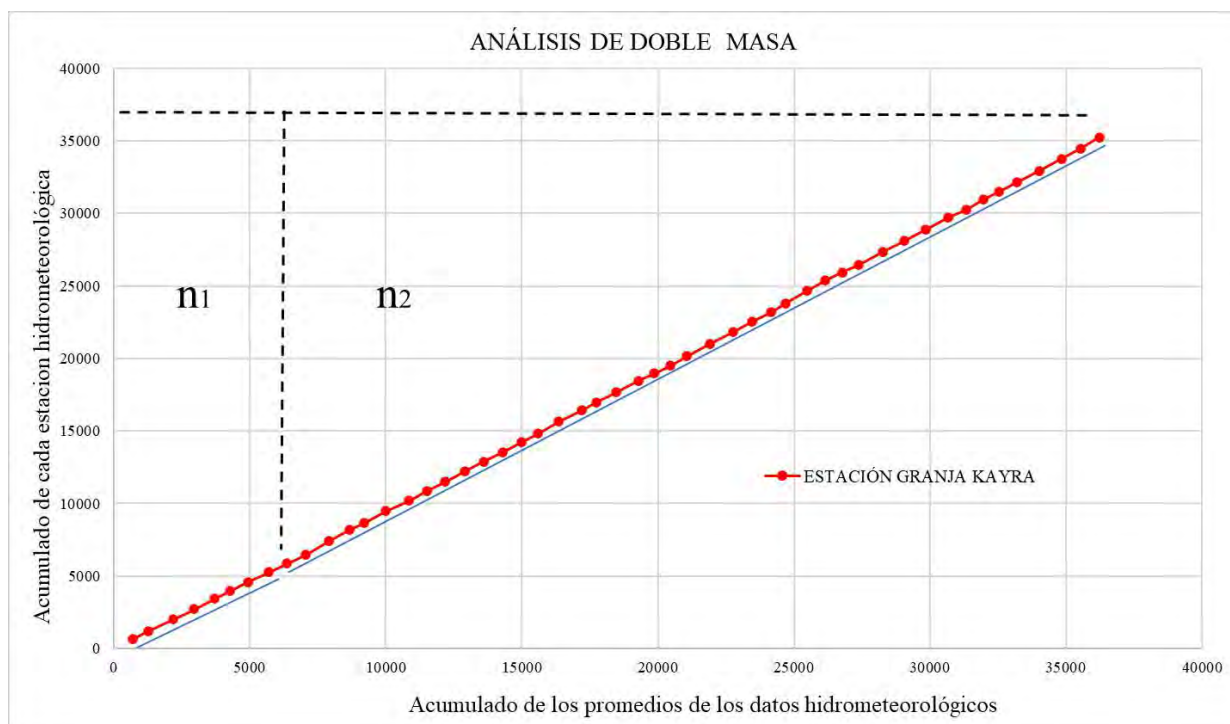
Nota: Se observa la mayor consistencia de datos en la estación Granja Kayra. *Fuente:* Elaboración propia.

4.3.1.3.3 Análisis estadístico.

Una vez obtenidos los gráficos para el análisis visual y de doble masa se pueden observar los periodos de posible corrección, estos periodos mantienen sus datos originales y se procede a realizar el análisis estadístico de saltos, tanto para la media como también para la desviación estándar.

Figura 91

Diagrama de análisis de doble masa estación Granja Kayra



Nota: En el gráfico se observa un quiebre que divide la serie en dos periodos n_1 y n_2 . *Fuente:* elaboración propia.

4.3.1.3.4 Análisis de saltos.

Consistencia de la media (prueba S - Student). El análisis estadístico consiste en probar, mediante la prueba t (prueba de hipótesis), si los valores medios (x_1 , x_2) de las submuestras, son estadísticamente iguales o diferentes con una probabilidad del 95% o con 5% de nivel de significación. (Villón, 2006). La consistencia de la media se realiza mediante cuatro procesos: a) cálculo de la media y de la desviación estándar para las submuestras o periodos n_1 y n_2 , b) cálculo de del t calculado (t_c), c) cálculo del t tabular (t_t). y d) comparación del t_c , con el t_t considerando que: Si t_c es menor o igual a t_t entonces x_1 y x_2 son estadísticamente iguales y no se debe realizar el proceso de corrección, pero, si t_c es mayor t_t entonces x_1 y x_2 son estadísticamente diferentes y se debe corregir la información.

Tabla 21

División de periodos

Periodo	Año
1 (n ₁)	1971-1982
2 (n ₂)	1983-2021

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22

Cálculo de parámetros de cada periodo

Parámetros de cada periodo			
N° datos para n ₁	12	N° de datos para n ₂	39
Promedio (x ₁)	682.57	Promedio (x ₂)	694.04
Varianza (S ₁ ²)	12547.59	Varianza (S ₂ ²)	11894.25
Desv. Estándar (S ₁)	112.02	Desv. Estándar (S ₂)	109.06

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23

Evaluación de consistencia en la media

Consistencia en la media	
t _c =	-0.32
t _t =	1.96
-0.32 < 1.96	

Nota: Como t_c < t_t entonces las medias son estadísticamente iguales por lo tanto no se realiza la corrección. *Fuente:* Elaboración propia.

Consistencia de la desviación estándar (prueba F – Fisher). El análisis estadístico consiste en probar, mediante la prueba F, si los valores de las desviaciones estándar de las submuestras S_1 y S_2 son estadísticamente iguales o diferentes, con un 95% de probabilidad o con un 5% de nivel de significación. (Villón, 2006). La consistencia de la desviación estándar se realiza mediante cuatro procesos: a) cálculo de las varianzas de ambos períodos, b) cálculo del F calculado (F_c), c) cálculo del F tabular (valor crítico de F o F_t) y d) Comparación del F_c con el F_t considerando que: Si F_c es menor o igual a F_t entonces S_1 y S_2 son estadísticamente iguales y no se debe realizar la corrección, pero si F_c es mayor a F_t entonces S_1 y S_2 son estadísticamente diferentes y se debe corregir la información.

Tabla 24

Evaluación de la consistencia en la desviación estándar

Consistencia en la desviación estándar	
$f_c =$	1.06
GDL2	38
GLD1	11
$f_t =$	2.53
1.06 < 2.53	

Nota: Como $f_c < f_t$ entonces las desviaciones estándar son estadísticamente iguales por lo tanto no se realiza la corrección. *Fuente:* Elaboración propia.

4.3.2 Temperatura (T)

La temperatura media mensual de la cuenca Huanacahuire es 12.65°C , teniendo como temperatura media mínima 11.05°C y temperatura media máxima 14.93°C . (Ver tabla 25).

Tabla 25

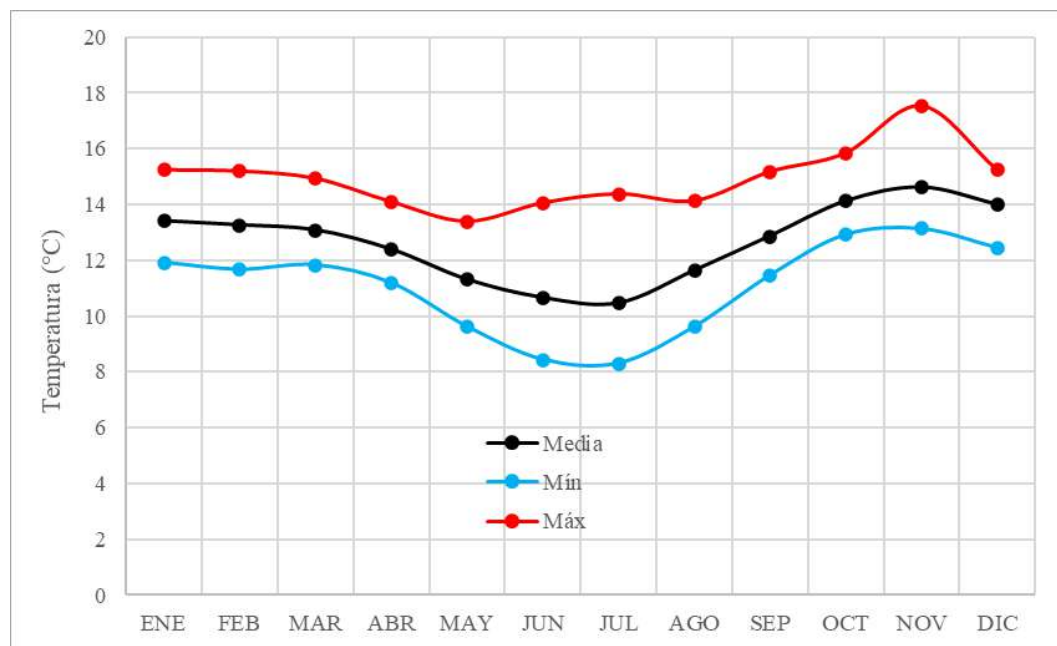
Temperatura media mensual

Temperatura media mensual - cuenca Huanacahuire (C°)														
Departamento:	Cusco				Provincia:	Cusco				Distrito:	San Jerónimo			
Este:	189967				Norte:	8495032				Altitud:	3881			
Mes/T°	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media	
Media	13.41	13.26	13.08	12.39	11.31	10.65	10.46	11.63	12.86	14.11	14.61	14.00	12.65	
Mín	11.92	11.67	11.83	11.19	9.62	8.44	8.30	9.61	11.46	12.92	13.13	12.45	11.05	
Máx	15.23	15.19	14.93	14.09	13.39	14.05	14.38	14.13	15.17	15.84	17.54	15.24	14.93	

Fuente: Calculado en base a SENAMHI.

Figura 92

Diagrama de temperaturas media, mínima y máxima



Fuente: Elaboración propia.

4.3.3 Evapotranspiración (EVT)

La cantidad de agua que se evapora del suelo y transpira a través de la vegetación se conoce como evapotranspiración. Su magnitud viene determinada por la cantidad de agua realmente

disponible, que incluye tanto el agua que las plantas han captado como el agua que el suelo ha podido retener para consumo de las plantas. (Ordoñez, 2011b).

4.3.3.1 Evapotranspiración potencial (ETP).

Thornthwaite introdujo el término evapotranspiración potencial (ETP) para expresar "la cantidad de agua que perderá una superficie completamente cubierta de vegetación en crecimiento activo si en todo momento existe en el suelo humedad suficiente para su uso máximo por las plantas". (Ordoñez, 2011b).

La ETP debe corregirse mediante un coeficiente que, en función de la latitud, tiene en cuenta el número de días del mes y el número de horas de luz de cada día para obtener la ETP de un mes concreto. Para ello, introduzca el índice mensual de luz en incrementos de 12 horas. A continuación, se calcula la ETP final de Thornthwaite (mm/mes) multiplicando el resultado por la ETP.

4.3.3.2 Evapotranspiración real (ETR).

La evapotranspiración está influida por la cantidad de humedad disponible en la superficie que se evapora. La tasa de evaporación disminuye a medida que el suelo se seca, situándose por debajo del nivel que suele mantener en un suelo bien hidratado. El término "evapotranspiración real" se refiere a esta evapotranspiración, que depende del contenido de humedad del suelo. (Ordoñez, 2011b). La cuantificación de la evapotranspiración potencial (ETP) se realizó con el método de Thornthwaite, donde:

$$I = (T / 5) \text{ elevado a } 1,514 \text{ (I representa el índice de calor anual),}$$

$$T = \text{Temperatura media mensual en } ^\circ\text{C,}$$

$$a = \text{función del índice de calor anual (I)}$$

$$a = 0,000000675 \times I^3 - 0,0000771 \times I^2 + 0,01792 \times I + 0,49239,$$

L = factor de corrección del número de días del mes (D) y duración astronómica del día (N) horas de sol y, $L_i = D/30 \times N/12$ (Tablas de L mensuales por latitud). Para la estación Kayra: Latitud sur: $13^{\circ} 33' 24.29''$ o latitud sur: 13.65

Tabla 26

Evapotranspiración potencial cuenca Huanacahuire

Mes	T° media mensual	Índice de calor mensual	ETP (sin corregir)	(N)	(f)=N/12	N° días/mes (D)	D/30	ETP (mm/mes)
ENE	13.41	4.45	57.08	12.81	1.07	31	1.03	62.98
FEB	13.26	4.38	56.29	12.54	1.05	28	0.93	54.91
MAR	13.08	4.29	55.33	12.17	1.01	31	1.03	57.99
ABR	12.39	3.95	51.65	11.80	0.98	30	1.00	50.79
MAY	11.31	3.44	46.01	11.46	0.95	31	1.03	45.39
JUN	10.65	3.14	42.66	11.29	0.94	30	1.00	40.12
JUL	10.46	3.06	41.67	11.39	0.95	31	1.03	40.85
AGO	11.63	3.59	47.65	11.66	0.97	30	1.00	46.29
SEP	12.86	4.18	54.15	12.00	1.00	31	1.03	55.96
OCT	14.11	4.81	60.92	12.44	1.04	31	1.03	65.27
NOV	14.61	5.07	63.65	12.74	1.06	30	1.00	67.59
DIC	14.00	4.75	60.30	12.91	1.08	31	1.03	67.05
Índice de calor anual		49.12	a	1.27				ETP (mm/año) 655.20

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Escorrentía superficial (ES)

La escorrentía directa, que es el agua que llega rápidamente a los cursos de agua superficiales tras las precipitaciones, incluye la escorrentía superficial y la escorrentía subsuperficial (agua que, tras un breve escurrimiento lateral, llega a la superficie sin alcanzar la

zona freática), es el término utilizado para describir el agua procedente de las precipitaciones que no se evapora ni se infiltra. Los cursos de agua superficiales se nutren de la escorrentía basal durante la estación seca.

Para determinar la escorrentía superficial de la cuenca Huanacahuire se toma en cuenta la ecuación de Justin (1914) usado en el trabajo de (Pacheco & Obando, 2016), donde muestra la relación entre la precipitación y escorrentía en una cuenca.

$$ES = \frac{K \cdot S^{0.157} \cdot P^2}{160 + 9T}$$

Donde: K es el coeficiente de escurrimiento adimensional, S es la pendiente de la cuenca, P es la precipitación medial anual en mm y T es la temperatura media anual y ES la escorrentía en mm.

Reemplazando valores:

K toma el valor de 0.15 que está relacionado al tipo de litología general.

$$ES = \frac{0.15 \cdot 0.2108^{0.157} \cdot 691.34^2}{160 + 9(12.65)}$$

$$ES = 75.42 \text{ mm/año}$$

$$ES = 10.9 \%$$

4.5 Infiltración (I)

La cantidad de agua procedente de precipitaciones que penetra en la superficie del suelo y llena parcial o totalmente los poros del suelo y del subsuelo se conoce como infiltración.

Para obtener la infiltración se considera la ecuación del principio de conservación de masas, es decir evaluar la diferencia entre el total de entradas y el total de salidas del sistema.

$$P = ETR + ES + I$$

Donde: (P) es la precipitación, (ETP) es la evapotranspiración potencial, (ES) es la escorrentía superficial e (I) es la infiltración.

Despejando I:

$$I = P - ETR - ES$$

$$I = 691.34 - 536.23 - 75.42$$

$$I = 79.69 \text{ mm/año (cantidad de agua que infiltra anualmente)}$$

$$I = 11.53 \%$$

4.6 Balance hidrológico

Con los datos obtenidos y procesados se realizó el balance hídrico teniendo 155.11 mm de excedente hídrico en la época de lluvias y un déficit de 118.97 mm en la época de estiaje.

Tabla 27

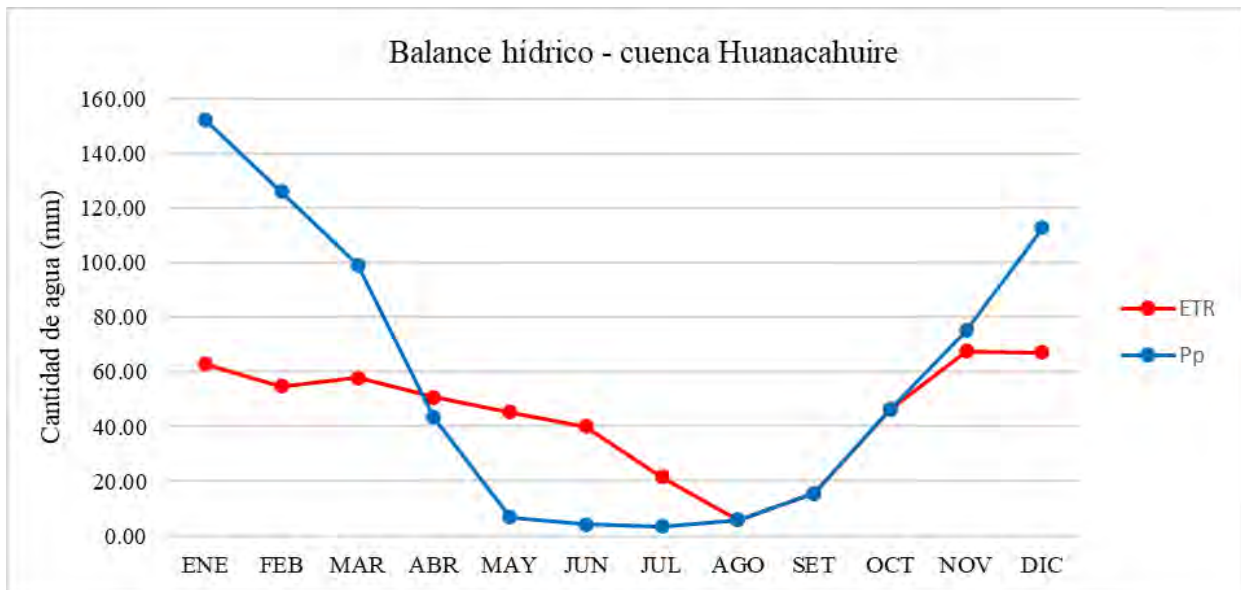
Balance hídrico cuenca Huanacahuire

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
P	152.31	126.00	99.28	43.36	6.86	4.19	3.45	5.80	15.71	46.33	75.32	112.75	691.34
ETP	62.98	54.91	57.99	50.79	45.39	40.12	40.85	46.29	55.96	65.27	67.59	67.05	655.20
VAR. ALM.	46.58	0.00	0.00	7.43	38.53	35.93	18.11	0.00	0.00	0.00	7.73	45.69	
ALM	100.00	100.00	100.00	92.57	54.04	18.11	0.00	0.00	0.00	0.00	7.73	53.42	
ETR	62.98	54.91	57.99	50.79	45.39	40.12	21.56	5.80	15.71	46.33	67.59	67.05	536.23
DÉFICIT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.29	40.49	40.25	18.94	0.00	0.00	118.97
EXCESO	42.74	71.09	41.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	155.11

Fuente: Elaboración propia.

Figura 93

Diagrama de balance hídrico cuenca Huanacahuire



Fuente: Elaboración propia.

Capítulo V: Hidrogeología

5.1 Inventario de manantes

Se ha realizado el inventariado de manantes captados en la cuenca Huanacahuire para lo cual se ha contado con la colaboración de algunos pobladores de la zona, indicando que algunos de los manantes disminuyen su caudal en temporadas de estiaje.

Se ha tomado registro de 20 aforos en salidas de campo durante el mes de marzo del año 2023; y se ha realizado su clasificación según Meizer (1923) con caudales que van desde los 0.22 l/s hasta los 3.90 l/s (ver tabla 28).

Figura 94

Inventario de manante captado sector Quircas



Nota: Manante captado de uso agrícola con código y caudal. Cod: So II-05 y Q: 0.22 lt/s.

Figura 95

Inventario de manante captado sector Quircas



Nota: Manante captado para consumo humano con código y caudal. Cod: So II-06 Q: 3.79 lt/s.

Tabla 28

Inventario de manantes captados cuenca Huanacahuire

Código	Nombre	Coordenada UTM X, Y		Tipo de manante	Régimen	Uso	Caudal (lt/s)	Fecha
Q-01	Ishoabamba	189405	8495251	Captado	Permanente	Consumo	2.06	22/03/2023
So II-01	Chimaconchacalla	190057	8493659	Captado	Permanente	Riego	1.5	22/03/2023
So II-05	Quircas	186305	8494916	Captado	Permanente	Consumo	0.22	22/03/2023
So II-06	Quircas	186293	8494927	Captado	Permanente	Consumo	3.79	22/03/2023
So II-07	Quircas	186326	8494889	Captado	Permanente	Riego	1.46	22/03/2023
Q-07	Perccacollo	191223	8493114	Captado	Permanente	Consumo	0.9	22/03/2023
Q-05	Llulluchayoc	192179	8492367	Captado	Permanente	Riego	2.4	22/03/2023
Q-03	Quinsacruz	192120	8492738	Captado	Permanente	Consumo	3.6	22/03/2023
Q-04	Fierrocata	191211	8493697	Captado	Permanente	Riego	2.44	22/03/2023
Q-09	Perccacollo	191236	8492914	Captado	Estacionario	Riego	1.2	22/03/2023
Q-06	Perccacollo	191036	8493054	Captado	Estacionario	Riego	0.9	22/03/2023

Código	Nombre	Coordenada		Tipo de manante	Régimen	Uso	Caudal (lt/s)	Fecha
		UTM X,	Y					
Q-08	Perccacollo	191253	8493025	Captado	Permanente	Riego	1.5	22/03/2023
So II-02	Chimacconchacalla	188832	8493902	Captado	Permanente	Riego	3.2	22/03/2023
So II-03	Puncuhuaylla	188864	8494476	Captado	Estacionario	Consumo	3.22	22/03/2023
So II-08	Puncuhuaylla	187706	8494435	Captado	Permanente	Riego	3.9	23/03/2023
Q-10	Suncco	186805	8495342	Captado	Estacionario	Riego	3.5	23/03/2023
Q-02	Ccachopata	191579	8493368	Captado	Estacionario	Riego	3.1	23/03/2023
So I-01	Usphabamba	189420	8494741	Captado	Estacionario	Sin uso	2.45	23/03/2023
So II-04	Puncuhuaylla	188495	8495100	Captado	Estacionario	Riego	1.1	23/03/2023
Ky-01	Collparo Pampa	187911	8497646	Captado	Permanente	Sin uso	2.78	23/03/2023
TOTAL							45.22	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29

Clasificación de manantes por su productividad

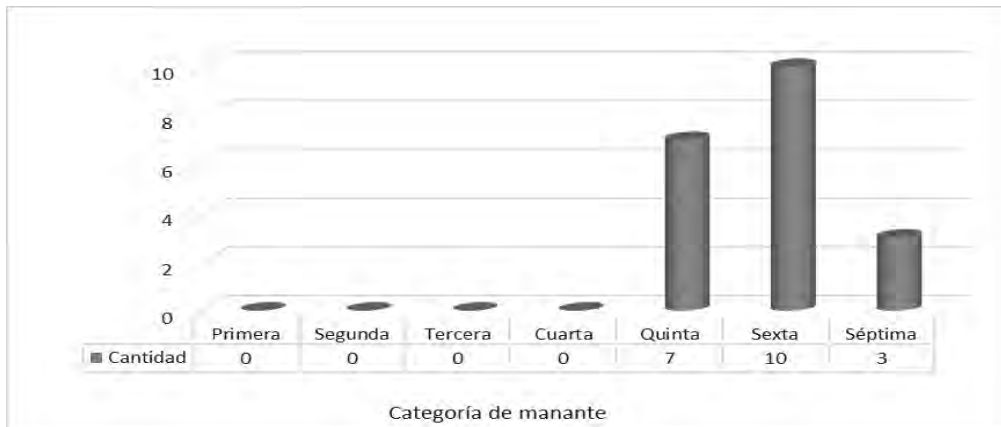
Categoría	Unidad (lt/s)
Primera	Superior a 2830
Segunda	Entre 283 y 2830
Tercera	Entre 28.3 y 283
Cuarta	Entre 10.0 y 28.3
Quinta	Entre 3.0 y 10.01
Sexta	Entre 1.0 y 3.01
Séptima	Menores a 1.01

Nota: Según la tabla 25 se ha clasificado el caudal de 20 manantiales, de los cuales 3 son de séptima categoría, 10 de sexta y 7 son de quinta categoría. *Fuente:* Meizer (1923).

Para una mejor visualización de la descarga se elaboró un diagrama.

Figura 96

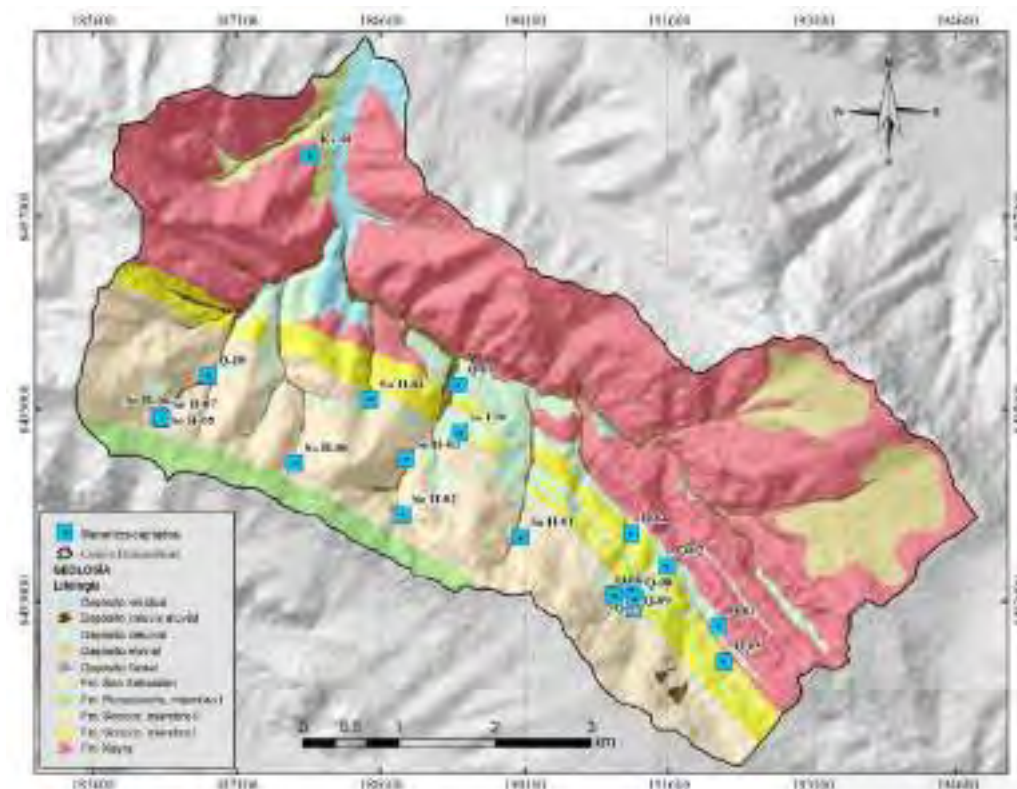
Diagrama de clasificación de manantes por su productividad



Fuente: Elaboración propia.

Figura 97

Distribución de manantes captados en la cuenca Huanacahuire



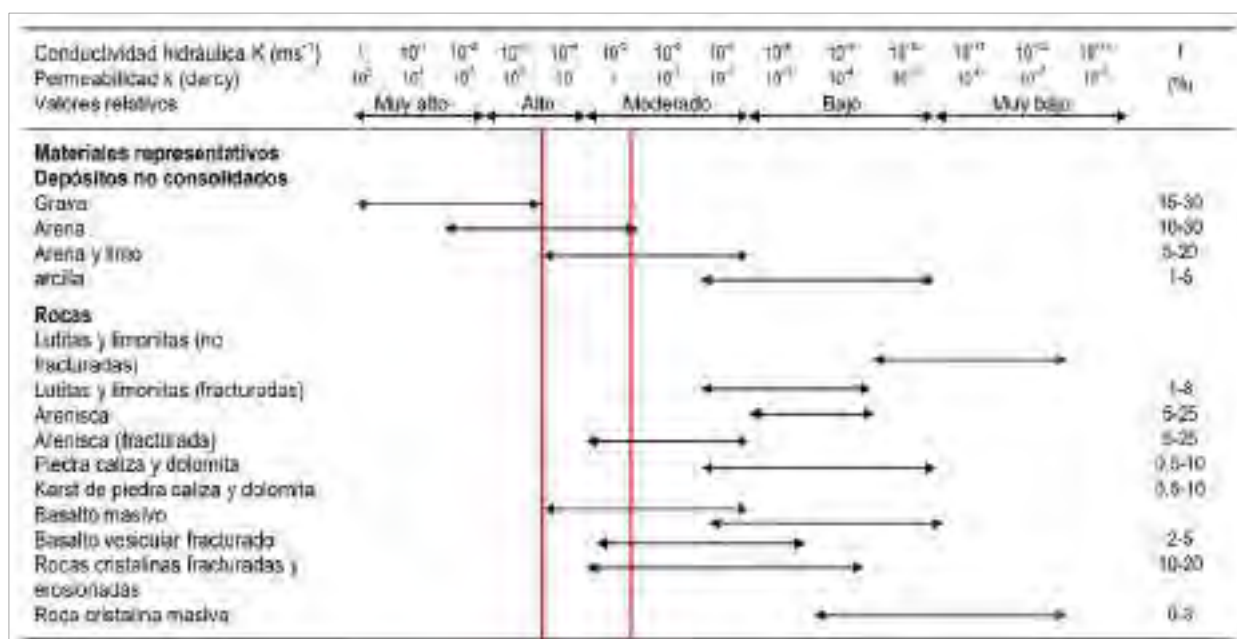
Fuente: Elaboración propia.

5.2 Parámetros hidrogeológicos de las formaciones geológicas

En consecuencia, se asocian a las formaciones cuatro parámetros fundamentales en cuanto a su comportamiento respecto a la cantidad de agua que pueden contener y transmitir: permeabilidad y transmisividad, porosidad y coeficiente de almacenamiento son los cuatro parámetros, dependientes dos a dos, cuya cuantificación es necesaria para realizar una clasificación hidrogeológica de las formaciones geológicas de la zona de estudio.

Figura 98

Valores de parámetros hidrogeológicos



Fuente: Singhal (2010)

5.2.1 Permeabilidad (K)

A través del valor de su coeficiente conocido como conductividad hidráulica (K), el factor de permeabilidad, que es crucial para establecer la velocidad de flujo del agua, ayuda a definir el tipo de acuífero.

Para la obtención de este parámetro se ha realizado ensayos de permeabilidad in situ, utilizando el método de carga variable (Lefranc) para materiales no consolidados, y una valoración de macizos rocosos en afloramientos de roca para luego realizar una transformación a datos de permeabilidad.

Figura 99

Valores de permeabilidad para material consolidado

Permeabilidad de la matriz rocosa sana k (m/s)														
Litología		1E-01	1E-02	1E-03	1E-04	1E-05	1E-06	1E-07	1E-08	1E-09	1E-10	1E-11	1E-12	1E-13
Arenisca														
Caliza y dolomía														
Granito														
Lutita														
Pizarra														
Esquisto														
R. Metamórficas														
R. Volcánicas														
Sal														
Permeabilidad de macizos rocosos fracturados y/o alterados k (m/s)														
Litología		1E-01	1E-02	1E-03	1E-04	1E-05	1E-06	1E-07	1E-08	1E-09	1E-10	1E-11	1E-12	1E-13
Arenisca														
Caliza y dolomía														
Granito alterado														
Lutita														
R. Metamórficas														
R. Volcánicas														
Basalto vacuolar														
Basalto fracturado														
Sal estratificada														
Esquisto fisurado														

Fuente: Hudson y Harrison (2000)

5.2.1.1 Permeabilidad en materiales no consolidados.

Para el cálculo de la permeabilidad se utilizó el método de carga variable de Lefranc que consiste en calcular el descenso de agua en un intervalo de tiempo (variación de nivel piezométrico en una cavidad de infiltración).

$$k = \frac{Q}{\pi dh}$$

Donde k se mide en cm/s, Q es el caudal admitido, d es el diámetro del sondeo (tubo), h es la altura constante del agua por encima del nivel piezométrico.

Tabla 30

Resultados del ensayo de permeabilidad en depósito residual sector Ccescce

Ensayo de permeabilidad: Depósito residual								
Departamento:		Cusco	Provincia:		Cusco	Distrito:		San Jerónimo
Este:		193582	Norte:		8494022	Sector:		Ccescce
Tiempo		Descenso	Volumen	Caudal (Q)		Permeabilidad efectiva (k)		
N°	min	cm	cm ³	cm ³ /s	lt/s	cm/s	m/s	
1	2	1.9	38.51	0.32	0.00032	0.016	1.58E-04	
2	2	1.6	32.43	0.27	0.00027	0.013	1.33E-04	
3	2	1.3	26.35	0.22	0.00022	0.011	1.08E-04	
4	2	1.4	28.37	0.24	0.00024	0.012	1.17E-04	
5	2	1.3	26.35	0.22	0.00022	0.011	1.08E-04	
6	2	1.3	26.35	0.22	0.00022	0.011	1.08E-04	
7	2	1.3	26.35	0.22	0.00022	0.011	1.08E-04	
				Promedio	0.00024	0.012	1.20E-04	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 100

Ensayo de permeabilidad Lefranc de carga variable



Nota: Ensayo realizado en deposito residual sector Ccesce.

Tabla 31

Resumen de ensayos de permeabilidad para materiales no consolidados

Unidad geológica	Caudal (Q)	Permeabilidad efectiva (k)		
		cm/s	m/s	m/d
Depósito Residual	0.00024	0.01202	1.20E-04	10.39
Depósito deluvial	0.00017	0.00819	8.19E-05	7.08
Depósito coluvio aluvial	0.00035	0.01736	1.74E-04	15
Depósito aluvial	0.00012	0.00569	5.69E-05	4.91
Q-San Sebastian	0.00056	0.02764	2.76E-04	23.88

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.2 Permeabilidad en materiales consolidados.

Para determinar la permeabilidad en macizos rocosos se utilizó el sistema de fracturas que es un método indirecto tomado de Hoek y Bray (1981) el cual consiste en realizar la valoración de los macizos rocosos en función al sistema de fracturamiento mediante valores de espacio y abertura.

A continuación, se muestra la ecuación:

$$k = \frac{a^2 \gamma}{12ub}$$

Donde: k está expresado en cm/s, a es el promedio de aberturas de fracturas, b es el promedio de espaciado de fracturas, γ es el peso específico del agua con valor de 0.998 g/cm³ y u es el coeficiente de viscosidad dinámica del agua cuyo valor es 0.01 g/cm.s.

Cabe recalcar que el método la permeabilidad efectiva es altamente sensible a la abertura de las fracturas ya que a mayor abertura se observará un incremento en el valor de permeabilidad efectiva, por otra parte, esto podría resultar inversamente si es que se considera un mayor espaciado en las discontinuidades.

Tabla 32

Valores de la apertura y espaciado de la ventana estructural Soncco I

Sistema de discontinuidades (f1, f2, f3, f4)					
abertura	C1	2	mm	0.2	cm
abertura	C2	1	mm	0.1	cm
abertura	C3	1	mm	0.1	cm
abertura	C4	0.9	mm	0.09	cm
Prom. Abertura			a	0.1225	cm

Espaciado	S1	0.22	m	22	cm
Espaciado	S2	0.23	m	23	cm
Espaciado	S3	0.14	m	14	cm
Espaciado	S4	0.04	m	4	cm
Prom. Espaciado			b	15.75	cm

Fuente: Elaboración propia.

Reemplazando valores en la formula general:

$$k = \frac{a^2\gamma}{12ub}$$

$$k = \frac{0.1225 * 0.998}{12 * 0.01 * 15.75}$$

$$k = 0.007924 \text{ cm/s}$$

$$k = 7.92E-05 \text{ m/s}$$

Tabla 33

Resumen de valores de permeabilidad efectiva en materiales consolidados

Fm. geológica	k (cm/s)	k (m/s)	k (m/d)
Kayra	1.45E-02	1.45E-04	12.49
Soncco I	7.92E-03	7.92E-05	6.85
Soncco II	3.09E-02	3.09E-04	26.67
Punacancha I	1.52E-02	1.52E-04	13.10

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34

Valores de permeabilidad efectiva según la litología

Permeabilidad efectiva (<i>k</i>)											
<i>k</i> (m/d)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴
Considerado	Impermeable	Poco permeable			Algo permeable			Permeable		Muy permeable	
Clasificación	Acuicludo	Acuitardo			Acuífero pobre			Acuífero medio a bueno		Acuífero	
Tipo de material	Arcillas compactas, granito	Limo arenoso, limo, arcilla limosa			Arena fina, arena limosa, caliza fracturada			Arena limpia, grava y arena fina		Grava limpia	

Fuente: Custodio y Llamas (1983).

5.2.2 Transmisividad (*T*)

El calculo de transmisividad se realizó considerando la fórmula experimental de Galofré (experto hidrogeólogo de la Generalitat de Catalunya, fallecido en 2006) que comprobó que:

$$T \text{ (m}^2 \text{ /día)} = 100 * q \text{ (lt/s/m)}$$

Es decir, si el caudal particular de una captación (*q*) se indica en lt/s/m teniendo en cuenta un declive de 10 m, la transmisividad expresada en m²/día es 100 veces *q*.

Tabla 35

Valores de transmisividad en los puntos de manantes captados

Código	Q (lt/s)	q (lt/s.m)	T (m ² /s)
Q-01	2.06	0.21	21
So II-01	1.5	0.15	15
So II-05	0.22	0.02	2
So II-06	3.79	0.38	38

Código	Q (lt/s)	q (lt/s.m)	T (m²/s)
So II-07	1.46	0.15	15
Q-07	0.9	0.09	9
Q-05	2.4	0.24	24
Q-03	3.6	0.36	36
Q-04	2.44	0.24	24
Q-09	1.2	0.12	12
Q-06	0.9	0.09	9
Q-08	1.5	0.15	15
So II-02	3.2	0.32	32
So II-03	3.22	0.32	32
So II-08	3.9	0.39	39
Q-10	3.5	0.35	35
Q-02	3.1	0.31	31
So I-01	2.45	0.25	25
So II-04	1.1	0.11	11
Ky-01	2.78	0.28	28

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36

Valores de transmisividad para puntos de caudales

T (m/d)	Calificación	Posibilidad del acuífero
T<10	Muy baja	Menos de 1 lt/s con 10 m de depresión
10<T<100	Baja	Entre 1 y 10 lt/s con 10 m de depresión
100<T<500	Media a alta	Entre 10 y 50 lt/s con 10 m de depresión

T (m/d)	Calificación	Posibilidad del acuífero
500<T<1000	Alta	Entre 50 y 100 lt/s con 10 m de depresión
T>1000	Muy alta	Más de 100 lt/s con 10 m de depresión

Fuente: Iglesias (2002)

Los valores de transmisividad en los diferentes puntos de caudales, están en la mayoría de los casos en el orden de 2 m²/día hasta los 39 m²/día considerando los valores de transmisividad según Iglesias (2002) en la zona de estudio corresponde a una transmisividad muy baja a baja, lo que significa menor de 100 m² por día.

5.2.3 Porosidad (n)

En las rocas puede observarse una red de fisuras con densidades e intensidades variadas. Las fisuras presentes en las rocas de la zona estudiada no suelen estar distribuidas uniformemente por todo el volumen de la roca, sino que suelen encontrarse junto a regiones sin ningún tipo de fisura. El comportamiento hidrogeológico de este tipo de rocas podría asemejarse al de las rocas con porosidad intergranular cuando la densidad de la red de fracturas es extremadamente alta y homogénea en todo el volumen de la roca (medio continuo).

5.2.3.1 Porosidad eficaz (n_e)

Para la porosidad efectiva, se ha supuesto que las estimaciones de Sanders (1998) serán válidas. Las estimaciones de Sanders se refieren al volumen de poros conectados a través de los cuales es posible el movimiento de fluidos y están relacionadas tanto con las propiedades del fluido como con la textura de la Formación.

Figura 101

Valores de porosidad para materiales consolidados y no consolidados

	total	eficaz
Arcillas	40 a 60	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa o bien clasificada	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Shale intacta	1 a 10	0,5 a 5
Shale fraturada/alterada	30 a 50	
Arenisca	5 a 35	0,5 a 10
Calizas, dolomías NO carstificadas	0,1 a 25	0,1 a 5
Calizas, dolomías carstificadas	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0,01 a 1	0,0005
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10	0,00005 a 0,01

Fuente: Sanders (1998)

5.2.4 Coeficiente de almacenamiento (S)

Dependiendo de dónde se encuentren en el mundo natural y de cómo estén sus niveles piezométricos, las formaciones geológicas permeables vierten agua de diversas maneras. Por ello, pueden distinguirse formaciones acuíferas o acuíferos confinados de los que funcionan libremente. (González de Vallejo, 2002). Dado que el valor del coeficiente de almacenamiento por liberación elástica S es muy pequeño en comparación con el coeficiente de almacenamiento por desaturación o porosidad efectiva n_e , se asume que el coeficiente de almacenamiento (S) coincide con la porosidad efectiva (n_e), teniendo en cuenta las condiciones hidráulicas de los acuíferos de la zona de estudio.

$$S = n_e$$

5.4 Clasificación de unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas han sido definidas en función de sus parámetros hidráulicos que tienen correlación con la dinámica de las aguas subterráneas.

La tarea de identificar acuíferos cuando se tiene estratos definidos, estructuras como lineamientos facilita la interpretación, considerando varios factores como: los valores de permeabilidad, las condiciones litológicas, la morfología del área y la presencia de manantiales. (ver figura 103).

5.4.1 Acuífero fisurado sedimentario Kayra

Esta unidad acuífera tiene la mayor distribución de área en la cuenca con capacidades de almacenamiento y transmisión media a buena. Las formaciones geológicas que conforman esta unidad hidrogeológica son: Kayra, con una permeabilidad efectiva $k=1.45E-04$ y porosidad eficaz $n_e=14$; aunque en esta unidad no se observan muchos afloramientos de manantes, los valores de parámetros indican una alta transmisividad y capacidad de almacenamiento.

Cabe la posibilidad de que en la zona de estudio el hecho de que las fracturas y estratificación no favorezcan con el surgimiento de flujo en superficie, esto puede suceder en otras unidades hidrográficas vecinas.

El movimiento del flujo subterráneo en esta unidad hidrogeológica está ligado al fracturamiento principal y estratificación que presentan las formaciones, la mayor dirección observada (ver figura 101) están dirigidas al sur y suroeste y direcciones de noreste en la zona este de la cuenca que se relaciona con la estratificación de acuerdo a la discordancia progresiva.

Figura 102

Acuífero fisurado sedimentario Kayra, sector Conchacalla



5.4.2 Acuífero fisurado sedimentario Soncco II

Esta unidad acuífera cuenta con capacidades de almacenamiento y transmisión media a buena, una permeabilidad efectiva Soncco II, con una permeabilidad efectiva $k=3.09E-04$ y porosidad eficaz $n_e=15$. En esta unidad el grado de fracturamiento no es tanto como en el acuífero Kayra, así que este depende principalmente de la abertura mayor en comparación con la anterior.

El movimiento del flujo subterráneo en esta unidad hidrogeológica (ver figura 103) está ligado principalmente al fracturamiento principal, las direcciones de flujo en esta unidad van hacia el sureste y suroeste.

Por otra parte, este acuífero es gran aportante de la mayoría de manantes que afloran en esta zona.

Figura 103

Acuífero fisurado sedimentario Soncco II



Nota: Manante captado en arenisca fracturadas del acuífero Soncco II.

5.4.3 Acuífero fisurado sedimentario Punacancha I

Esta unidad hidrogeológica el grado de fracturamiento es bastante alto considerándose así espaciados muy bajos entre las discontinuidades, la lutita encontrada a diferencia de las otras formaciones presenta un comportamiento de hidrogeológico muy favorable para el movimiento de flujo subterráneo. Este acuífero cuenta con capacidades de almacenamiento y transmisión media, con una permeabilidad efectiva $k=1.52E-04$ y porosidad eficaz $n_e=11$.

El movimiento del flujo subterráneo en esta unidad hidrogeológica es coincidente con el acuífero Soncco II, se tiene que dar más consideración a la fractura principal orientada al sureste, ya que cabe la posibilidad que por esta fractura el flujo se transmita hacia el acuífero Soncco II.

Figura 104

Acuífero fisurado sedimentario Punacancha I, sector Quircas grande



5.4.4 Acuífero pobre fisurado sedimentario Soncco I

Esta unidad acuífera presenta capacidades de almacenamiento y transmisión media, conformada por la Formación geológica Soncco I con una permeabilidad efectiva $k=7.92E-05$ y porosidad eficaz $n_e=8$.

El movimiento del flujo subterráneo en esta unidad hidrogeológica este ligado al fracturamiento (con presencia de esquistosidad en las areniscas) y estratificación, la mayor dirección observada (ver figura 105) está dirigida al oeste por parte de las fracturas principales y al sur oeste (estratificación).

Figura 105

Acuífero pobre fisurado sedimentario Soncco I, Comunidad Suncco



5.4.5 Acuífero poroso en sedimento no consolidado

Esta unidad acuífera presenta capacidades de almacenamiento y transmisión baja a buena y las formaciones geológicas que conforman son los materiales cuaternarios cartografiados: Fm. San Sebastian, los depósitos aluviales, coluvio aluviales, deluviales y residuales. Las propiedades hidráulicas en esta unidad van desde $k=5.69E-05$ a $2.76E-04$ respecto a su permeabilidad efectiva y valores de $n_e = 15$ a 25 correspondiente a porosidad efectiva.

El movimiento del flujo subterráneo en esta unidad hidrogeológica este ligado a su porosidad de grano (matriz y clastos) y la pendiente presente. Cabe menciona que gran parte de los manantiales aforados se encuentran aflorando en esta unidad hidrológica y están alimentadas por los acuíferos fisurados a los que sobreyace.

Figura 106

Acuífero poroso deluvial, sector Lloquemocco



Figura 107

Acuífero poroso aluvial, sector Lloquemocco



Figura 108

Acuífero poroso coluvio aluvial, sector Llulluchayoc



Figura 109

Acuífero poroso en secuencia de gravas de la Formación San Sebastián



Tabla 37

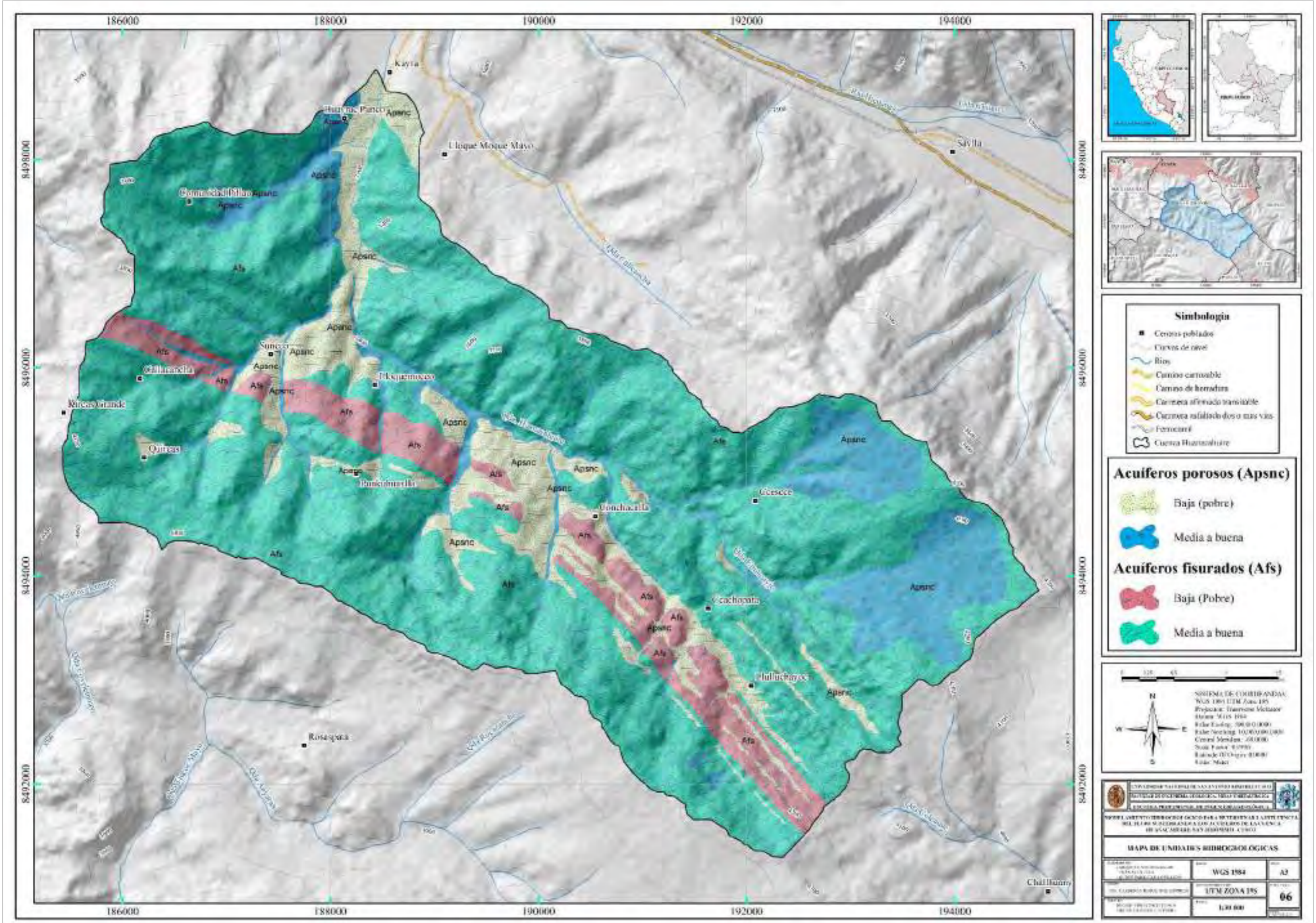
Unidades hidrogeológicas cuenca Huanacahuire

Formación geológica	Litología	Permeabilidad (m/s)	Porosidad Eficaz (%)	Clasificación textural	Clasificación hidráulica y estructural	Clasificación hidrogeológica
Fm. Kayra (Peo-ky)	areniscas feldespáticas intercaladas con niveles de lutitas rojas con espesores menores a 10 cm	1.45E-04	14	Acuífero fisurado sedimentario	Acuífero libre	Acuífero medio a bueno
Fm. Soncco I (Peo-so I)	secuencias de lutitas rojas de llanura de inundación intercaladas con niveles de areniscas de grano medio a grueso de coloración grisácea	7.92E-05	8	Acuífero fisurado sedimentario	Acuífero libre	Acuífero pobre
Fm. Soncco II (Peo-so II)	Compuesto por areniscas grisáceas y conglomerados de origen fluvial y volcánico cuya coloración varía de gris a gris oscuro	3.09E-04	15	Acuífero fisurado sedimentario	Acuífero libre	Acuífero medio a bueno
Fm. Punacancha I (Nom-pu I)	constituido por lutitas gris rojizas, limolitas rojas y areniscas finas grisáceas de un ambiente de llanura de inundación.	1.52E-04	11	Acuífero fisurado sedimentario	Acuífero libre	Acuífero medio a bueno
Dep. Cuaternarios (Q)	Constituido en su mayoría por cantos y bloques y gravas con una matriz limo arcillosa y limo arenoso.	5.69E-05 2.76E-04	- 15 - 25	Acuífero poroso en sedimento no consolidado	Acuífero libre	Acuífero pobre-medio a bueno

Fuente: Elaboración propia

Figura 110

Unidades hidrogeológicas cuenca Huanacahuire



Fuente: Elaboración propia.

Capítulo VI: Modelo hidrogeológico conceptual

6.1 Aspectos para el modelamiento conceptual

En resumen, los aspectos necesarios que se tienen que considerarse en el desarrollo del modelo conceptual de la cuenca Huanacahuire son:

6.1.1 Descripción general de la geomorfología y geología

Corresponde a la descripción de la topografía perteneciente a la zona de estudio, considerando las diferentes geoformas y pendientes, de acuerdo a su origen, a la litología, etc.

En la geología se describe el tipo de material, la posición en la que están puestas y el grado de fracturamiento que tienen.

6.1.2 Descripción hidrológica

Este aspecto considera el estudio de los mecanismos de entradas y salidas de agua en la zona de estudio, tales como la precipitación, la escorrentía superficial, la evapotranspiración y la infiltración.

Todos estos valores han sido estimados mediante metodologías aplicadas acorde a la realidad del sistema de la zona de estudio.

6.1.3 Descripción hidrogeológica

En base a la geología descrita se evalúa los tipos de Formación geológicas y su comportamiento frente al agua. Por otra parte, la descripción de cada zona o grupo y la evaluación de las características de transmisión y almacenamiento del acuífero - conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y porosidad - deben hacerse de acuerdo con las presunciones de valores realizadas según el marco hidrogeológico (litología, geología).

6.1.4 Conceptualización del flujo de agua subterránea

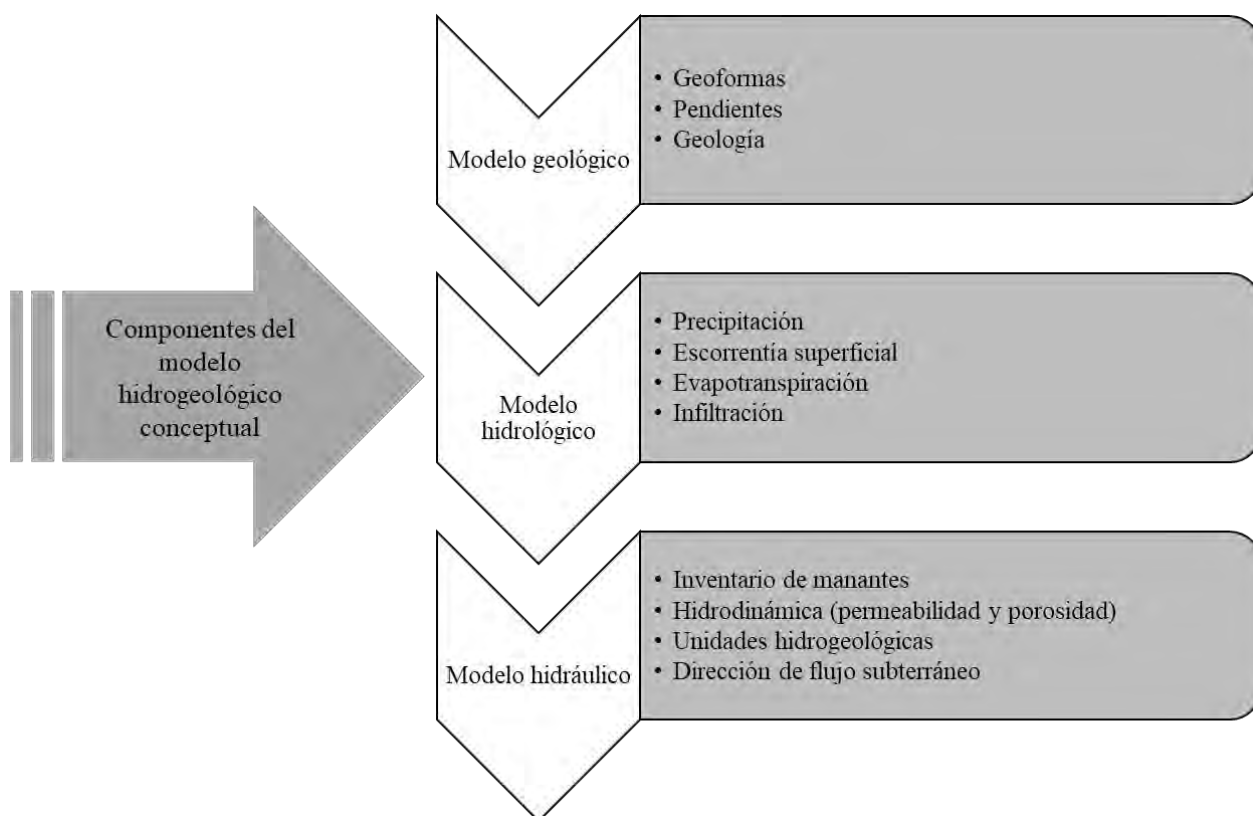
La configuración y la dirección del flujo de agua subterránea en la zona de estudio se evalúan utilizando datos sobre la dirección de la estratificación, las direcciones de las fracturas de la roca y el inventario de manantiales.

Esta sección permite comprender el comportamiento dinámico del acuífero a través del tiempo y el espacio.

6.2 Componentes del modelo hidrogeológico conceptual

Figura 111

Esquema visual gráfico componentes del modelo hidrogeológico conceptual



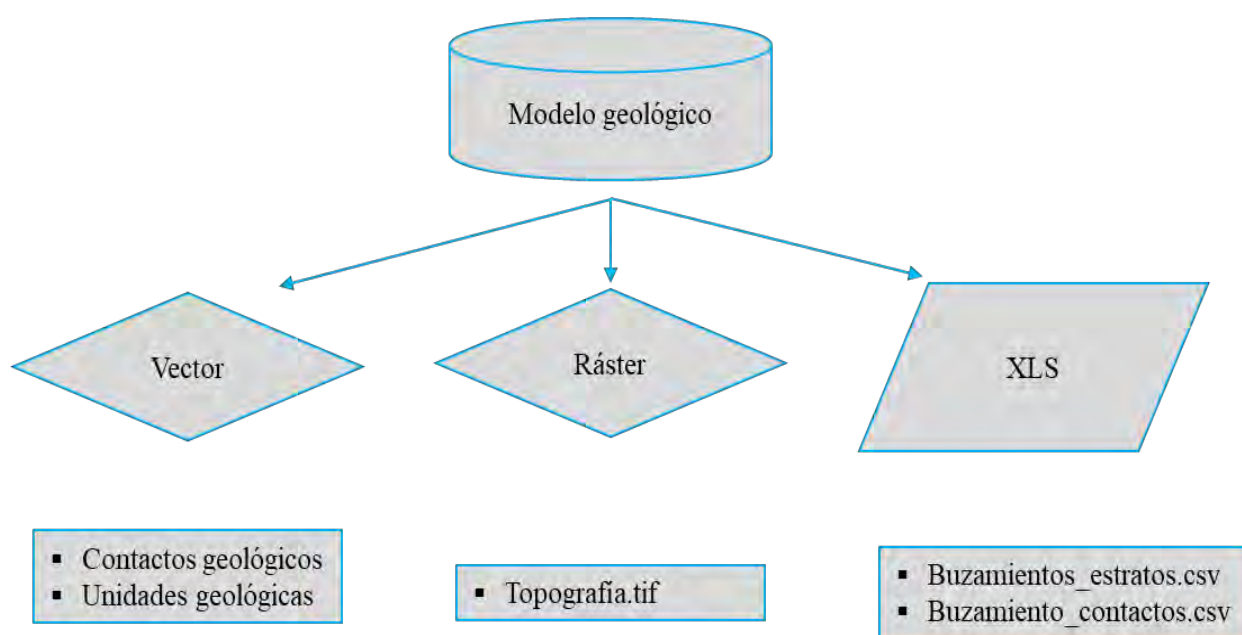
Fuente: Elaboración propia.

6.2.1 Modelo geológico

La construcción del modelo geológico se desarrolló a partir de la información recopilada y generada en el capítulo II y III de geomorfología y geología; donde se utilizaron información tipo vector (shp) para representar los contactos entre las formaciones geológicas mediante polilíneas y polígonos; ráster (dem) para representar la superficie del terreno mediante un modelo de elevación digital, y datos Excel (xls) con información de data estructural para representar las orientaciones de los estratos y contactos de las formaciones geológicas.

Figura 112

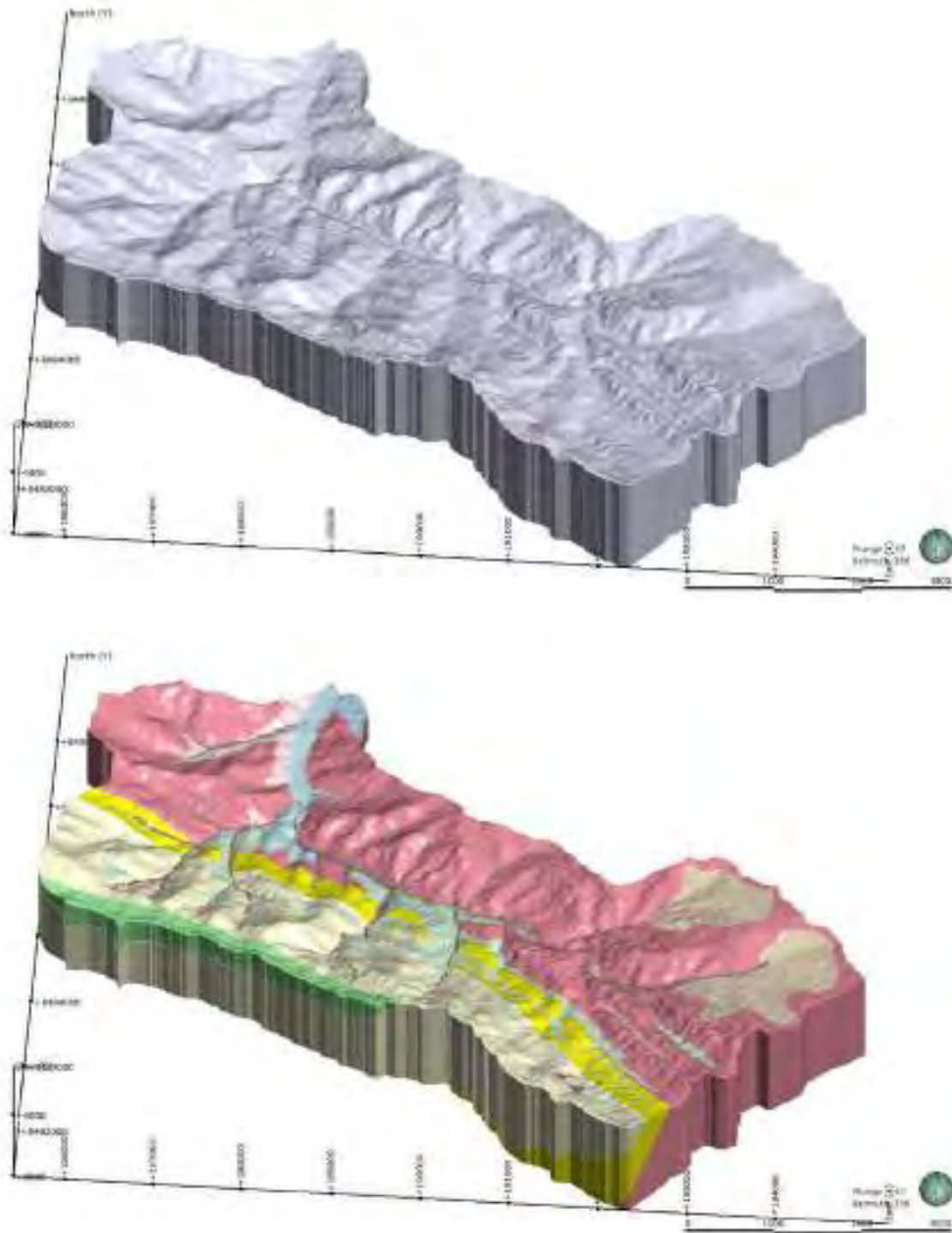
Esquema visual gráfico del modelo geológico



Fuente: Elaboración propia.

Figura 113

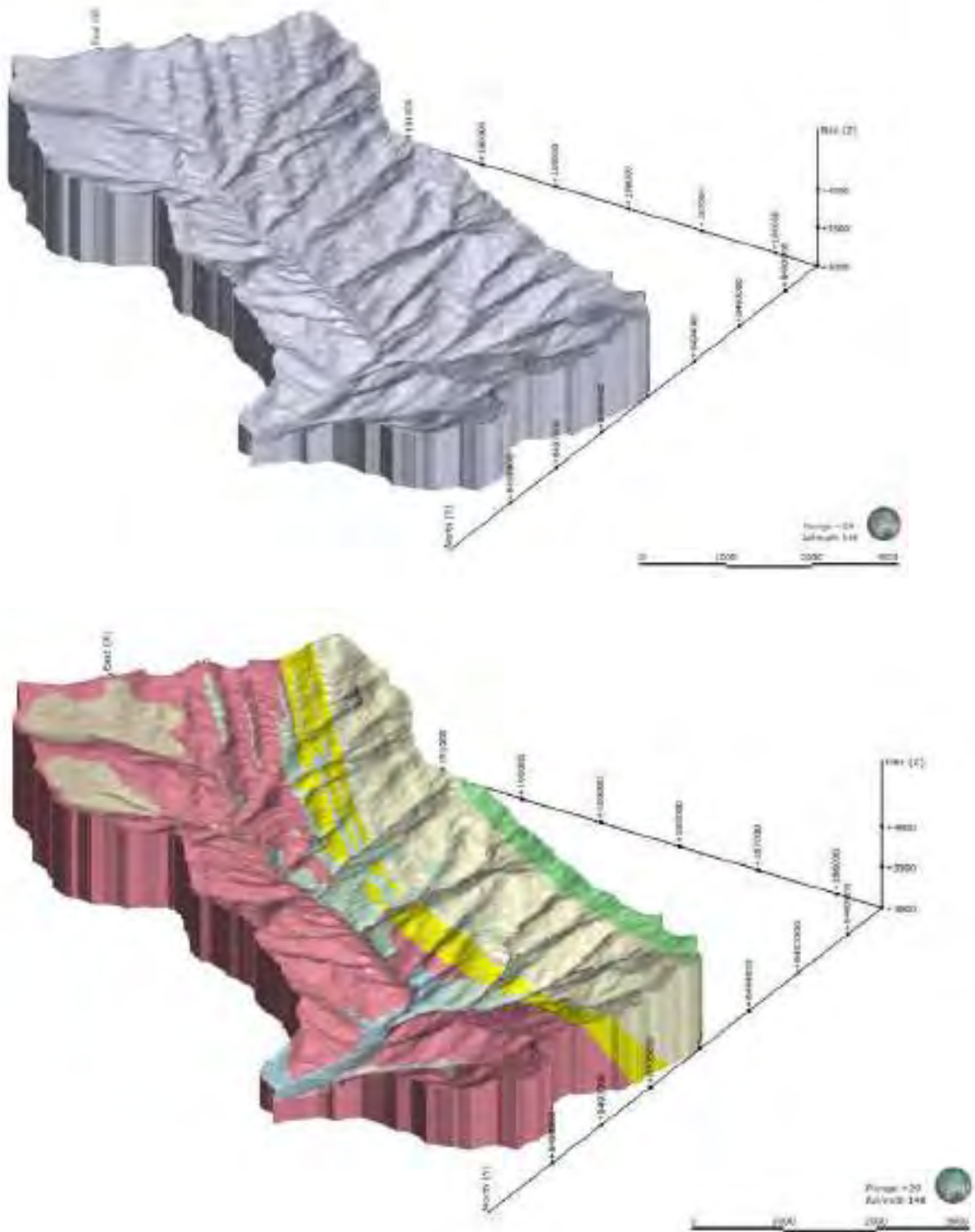
Vista norte del modelo geológico 3D cuenca Huanacahuire



Fuente: Elaboración propia.

Figura 114

Vista sureste del modelo geológico 3D cuenca Huanacahuire



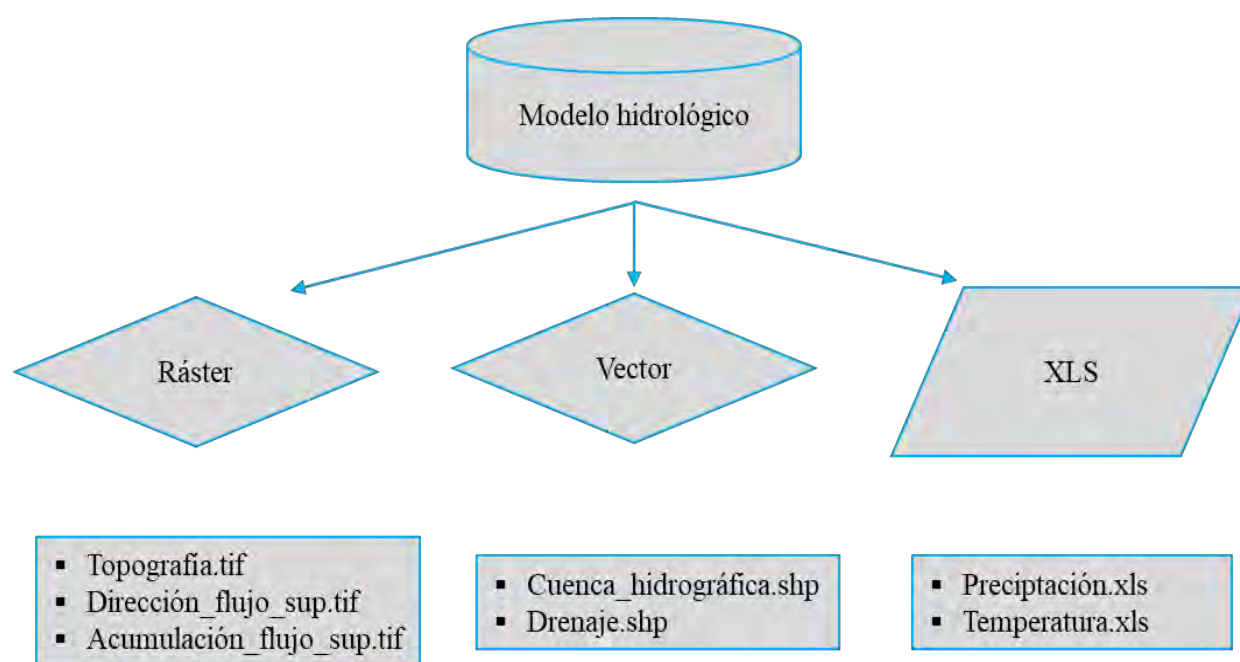
Fuente: Elaboración propia.

6.2.2 Modelo hidrológico

En el modelo hidrológico se utilizó la información descrita en el capítulo IV, partiendo de la delimitación de la cuenca hidrográfica y mediante el modelo de elevación digital de la cuenca se desarrollaron los parámetros morfométricos cuyos resultados representan las dimensión y forma de la cuenca: la red de drenaje existente que representa la escorrentía superficial, las pendientes determinadas, las direcciones de flujo superficial gracias a la topografía; y la información hidrometeorológica se hizo uso para el cálculo del balance hídrico de la cuenca.

Figura 115

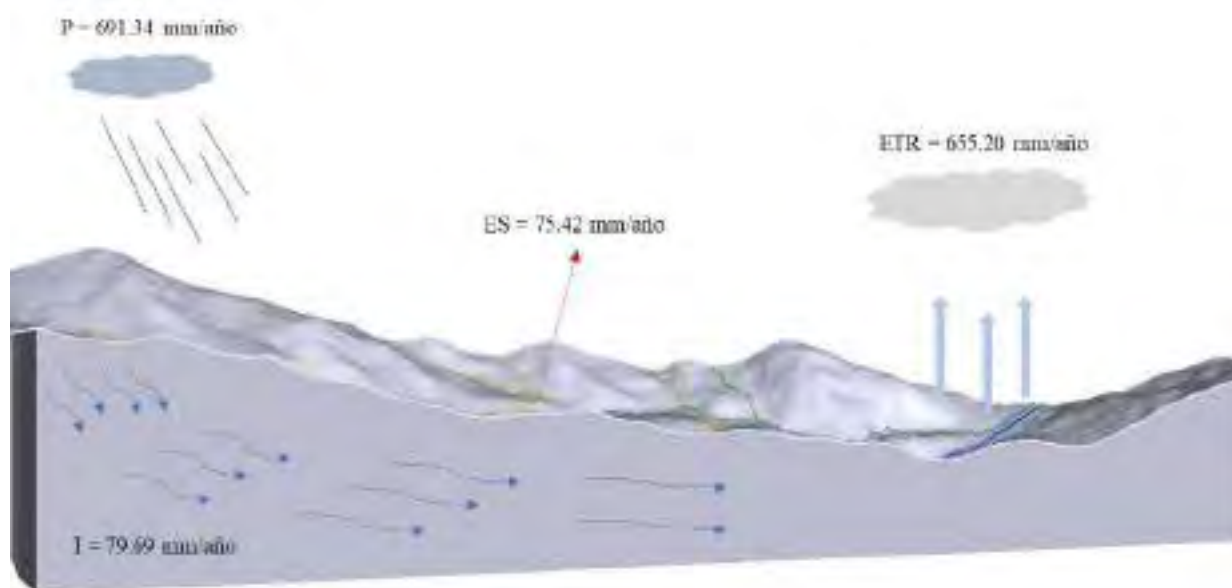
Esquema visual gráfico del modelo hidrológico



Fuente: Elaboración propia.

Figura 116

Modelo hidrológico - perfil transversal de la cuenca SW - NE



Fuente: Elaboración propia.

6.2.3 Modelo hidráulico

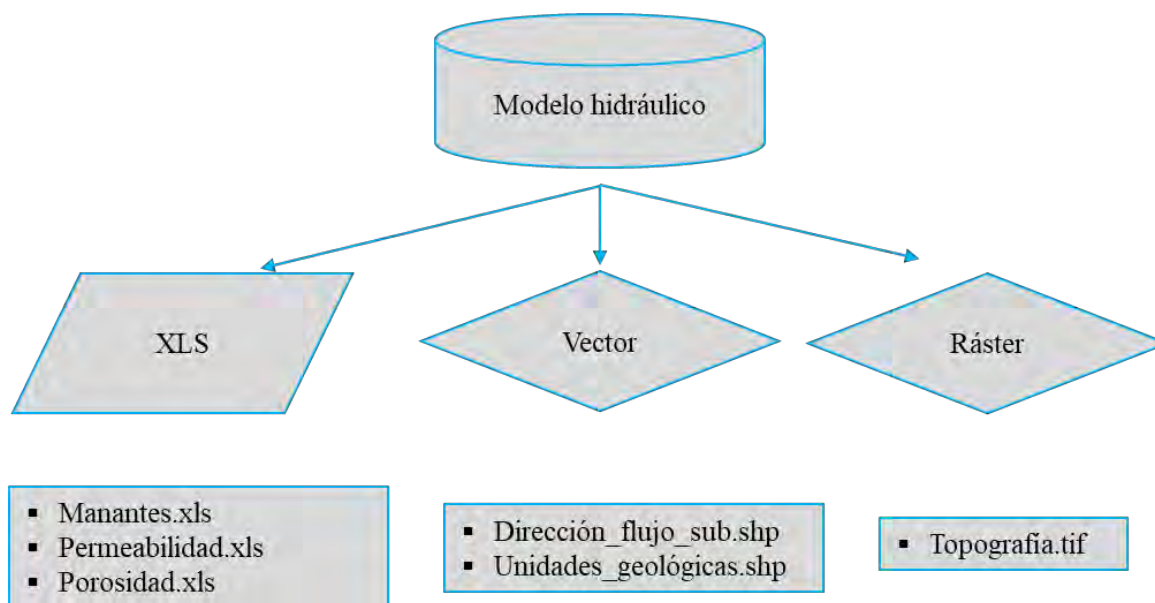
El modelo hidráulico se desarrolla con el fin de conocer las propiedades hidráulicas de la zona de estudio para lo cual se tomó la información del capítulo V.

La información utilizada parte del inventariado de manantes que proporciona la información de los niveles freáticos, esto seguido de los datos teóricos de porosidad (n_e), coeficiente de almacenamiento; los ensayos de permeabilidad efectiva (k) y cálculo de transmisividad para las diferentes formaciones geológicas que corresponde a la determinación de las unidades hidrogeológicas.

Respecto a las direcciones de flujo subterráneo, estas van determinadas por la dirección de buzamiento de la estratificación y fracturas de la zona de estudio.

Figura 117

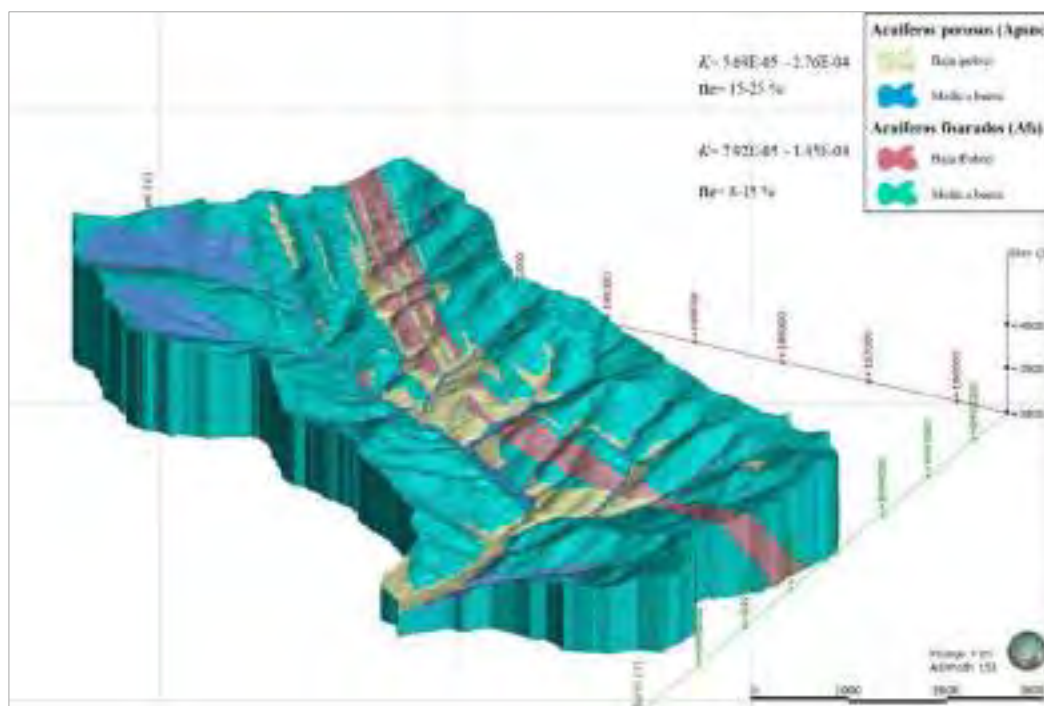
Esquema visual gráfico del modelo hidráulico



Fuente: Elaboración propia.

Figura 118

Modelo hidráulico



Fuente: Elaboración propia.

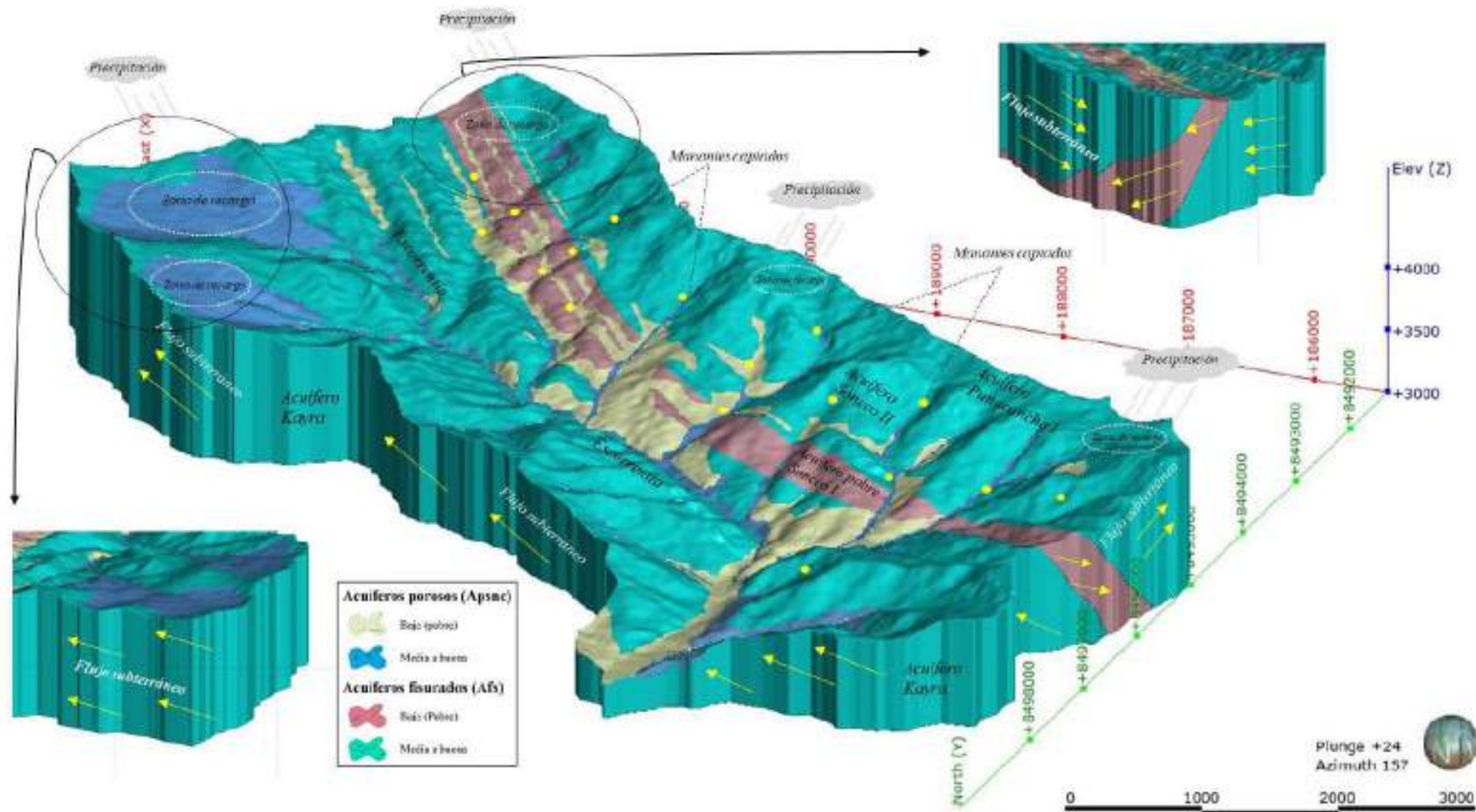
6.3 Marco hidrogeológico

El modelo hidrogeológico conceptual se centra en la forma; los parámetros hidrogeológicos; la capacidad de almacenar, drenar y transmitir; y la dirección de flujo de agua subterránea de las unidades hidrogeológicas. A continuación, se muestran los aspectos para la construcción del modelo hidrogeológico:

- La construcción de la geometría del modelo (topografía y forma de la cuenca).
- La definición de unidades hidrogeológicas (permeabilidad y porosidad).
- La definición de las zonas de recarga y escurrimiento superficial (precipitación y drenaje).
- La dirección de flujo de agua subterránea (fracturas y estratificación).

Figura 119

Modelo hidrogeológico conceptual cuenca Huanacahuire



Fuente: Elaboración propia.

Capítulo VII: Modelo hidrogeológico numérico

7.1 Software utilizado - Visual Modflow Flex

Visual ModFlow Flex es una interfaz gráfica para el motor de modelado de aguas subterráneas de código abierto MODFLOW VMOD y fue desarrollado por “Waterloo Hydrogeologic” en 1994 y lanzando comercialmente en su primera versión en el año 2012.

Para construir el modelo este código efectuó la modelización de agua subterránea por el método de diferencias finitas (discretización), mediante este tipo de discretización se puede especificar el número de filas y columnas, el origen de la cuadrícula y el ángulo de rotación, utilizar objetos de datos de manera importada como tablas, puntos, polilíneas, polígonos, superficies y datos teóricos.

7.2 Construcción del modelo

El objetivo del modelo numérico es determinar el movimiento de flujo subterráneo mediante las superficies equipotenciales en materiales isotrópicos donde no haya muchos cambios en las propiedades hidráulicas de los acuíferos. Para el desarrollo de la construcción del modelo se considerarán solo las unidades hidrogeológicas cuya permeabilidad y porosidad van definidas por las fracturas presentes ya que estos son los aportantes de agua hacia los otros acuíferos en materiales no consolidados.

A partir del modelo conceptual realizado en el anterior capítulo se definieron zonas que pueden considerar como homogéneas e isotrópicas esto en función del tipo de roca y sus propiedades hidráulicas, seguido de las direcciones posibles que toman los flujos de agua subterránea en función de la posición y dirección de las fracturas.

Para la construcción del modelo se utilizarán datos obtenidos en campo: inventario de manantes, cotas del río principal, los datos de precipitación y evapotranspiración, y por supuesto

los datos de polígonos, líneas y puntos creados para la cuenca Huanacahuire; seguido de los pasos sistemáticos que se realizarán y que son mencionados a continuación.

- Creación del proyecto y configuración de unidades
- Definición del objetivo del modelo
- Definición el modelo numérico
- Definición de propiedades
- Definición condición de borde
- Definición de partículas
- Primera ejecución
- Proceso de calibración
- Definición de tipo de ejecución
- Ejecución
- Resultados
- Análisis de incertidumbre cualitativo

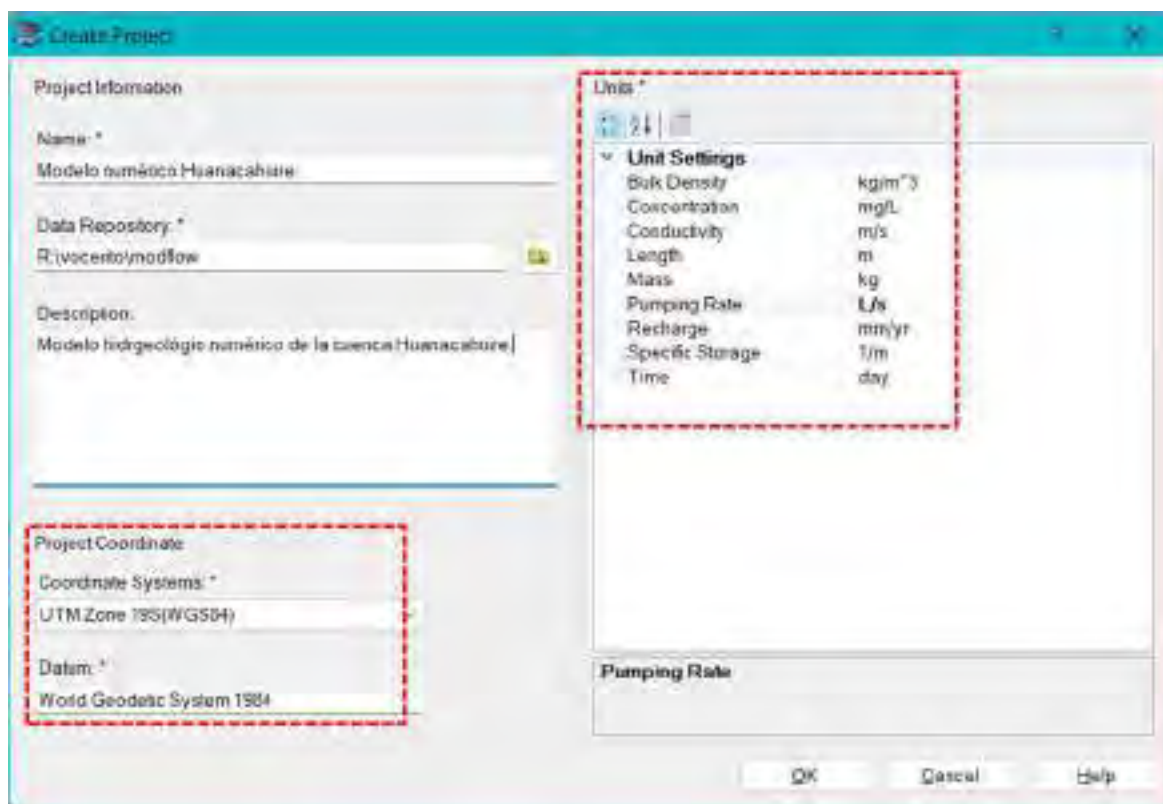
7.2.1 Creación del proyecto y configuración de unidades

El primer paso para empezar con el modelo, es la creación del proyecto con el sistema de coordenadas y la ubicación, la configuración de las unidades, datos como la conductividad hidráulica (m/s), el tiempo (año), el almacenamiento (1/m), los caudales de salida (lt/s), la carga (m).

La configuración de las unidades puede realizarse en base a lo que se trabajó del capítulo V para una mayor facilidad.

Figura 120

Creación del proyecto y configuración de unidades



7.2.2 Definición del objetivo del modelo

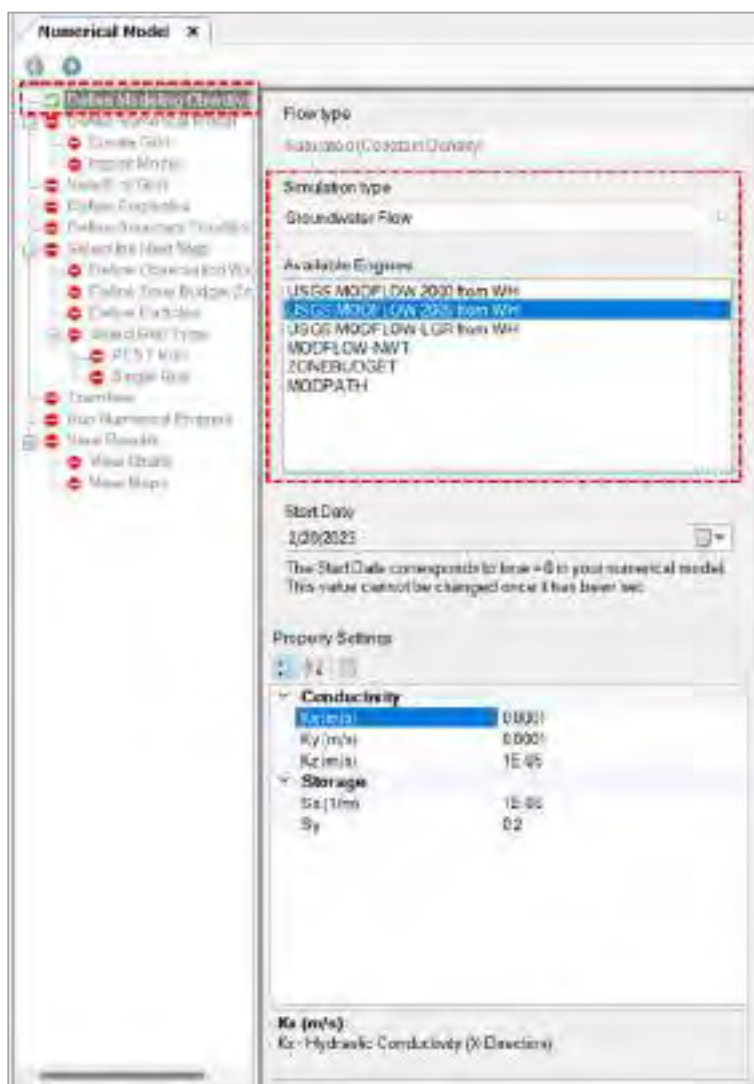
El siguiente paso es definir el objetivo del modelo el cual es realizar la simulación del flujo subterráneo (Groundwater Flow), considerando los motores disponibles, para el caso el motor considerado será USGS MODFLOW perteneciente al año 2005.

En el caso de simulaciones en estado estacionario la información de la fecha (start data) va dirigido al tiempo en el que se tomaron los datos de campo, para una simulación en estado transitorio será importante incluir el rango de tiempo que dure la simulación.

La configuración de propiedades (property settings) puede omitirse por defecto ya que más adelante en el ingreso de las propiedades par cada zona se ingresarán los valores reales calculados.

Figura 121

Definición de objetivos para el modelo



7.2.3 Definición del modelo numérico

7.2.3.1 Área del modelo. La definición del área en el que se trabajará (límites del modelo), van delimitada por los datos importados: polígono de la cuenca, la topografía de la zona, los contactos litológicos entre las formaciones geológicas, para el modelo considerados como “horizontes”. Este paso también puede ser aprovechado para importar los datos de condición de borde que más adelante serán utilizados. Para el modelo se tienen cuatro horizontes pertenecientes a los contactos litológicos entre las formaciones geológicas Kayra, Soncco I, Soncco II, Punacancha I, la superficie topográfica y las base que tendrá una cota de 3100 msnm.

Figura 122

Vista 3D horizontes definidos para el modelo

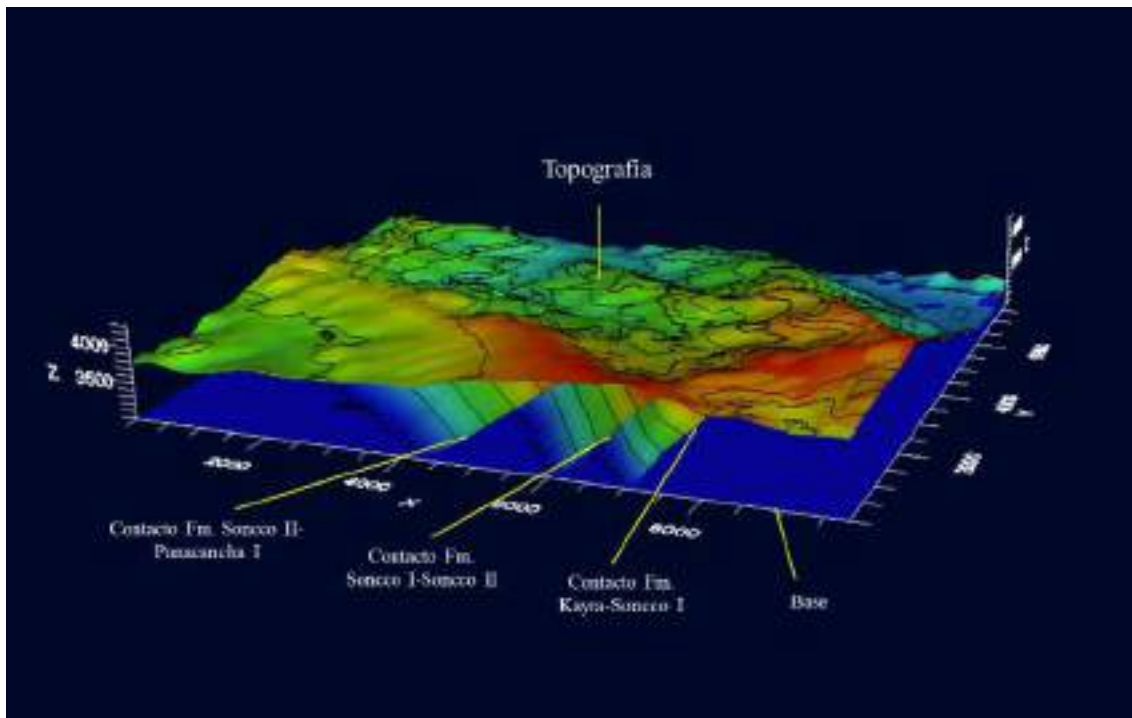
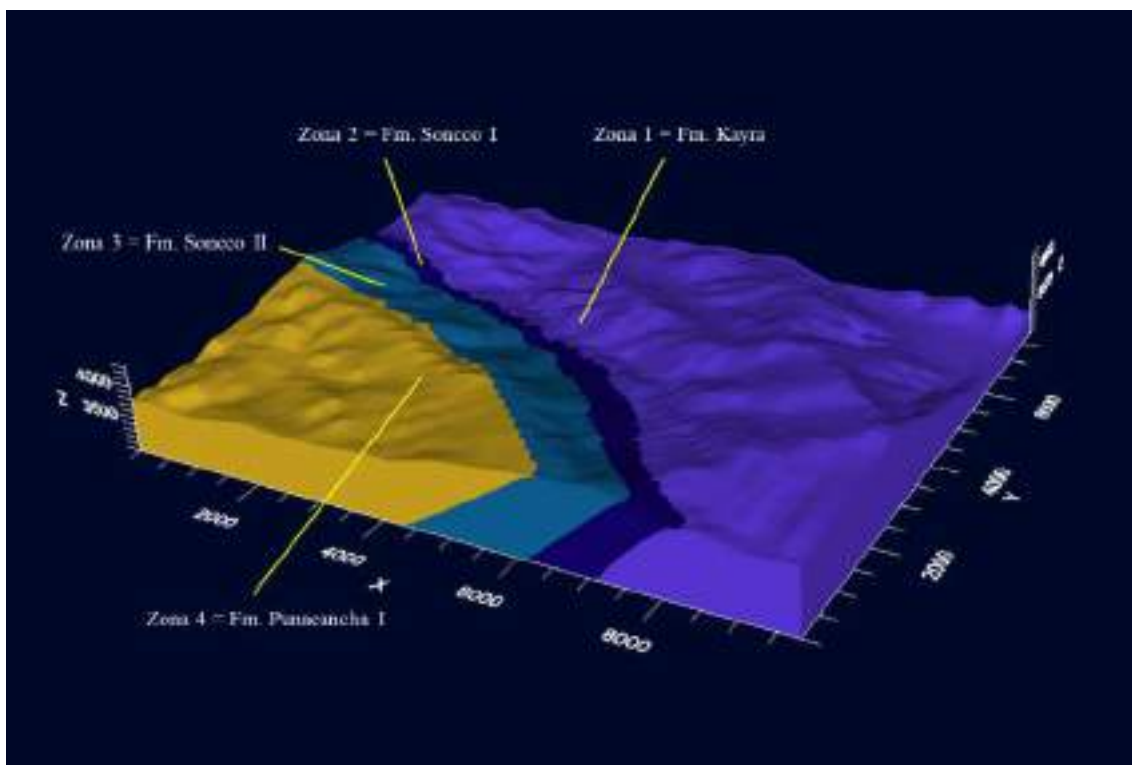


Figura 123

Vista 3D de las zonas para el modelo (cuerpos de unidades hidrogeológicas)



7.2.3.2 Geometría de la red. Una vez definidas las zonas se procedió a enmallar y definir el tipo y geometría de la red (grilla o enmallado), Visual ModFlow utiliza el método de matemático de las diferencias finitas. Una vez definida el tipo de enmallado se ingresa la forma de la extensión del modelo el cual está delimitado por la forma de la cuenca (ver figura 124), En este caso, las celdas encerradas por el polígono corresponderían a una condición de contorno impermeable donde no interactúa con la simulación. Las celdas de potencial constante son aquellas para las que el potencial está predeterminado y se mantiene en ese valor durante toda la simulación. Las celdas inactivas son aquellas para las que no se permite que el flujo entre o salga de ellas en ningún paso de tiempo de la simulación. Nos referiremos al resto de celdas de la red como celdas de "potencial variable". Visual ModFlow Flex, por su parte, gestiona la discretización espacial en sentido horizontal calculando el número de filas y columnas, así como su anchura. Por el contrario, la gestión de la discretización vertical del modelo incluye el espesor de cada zona, el número de capas y los parámetros hidráulicos, en particular la conductancia vertical entre dos celdas verticalmente adyacentes.

Figura 124

Enmallado del modelo (discretización)

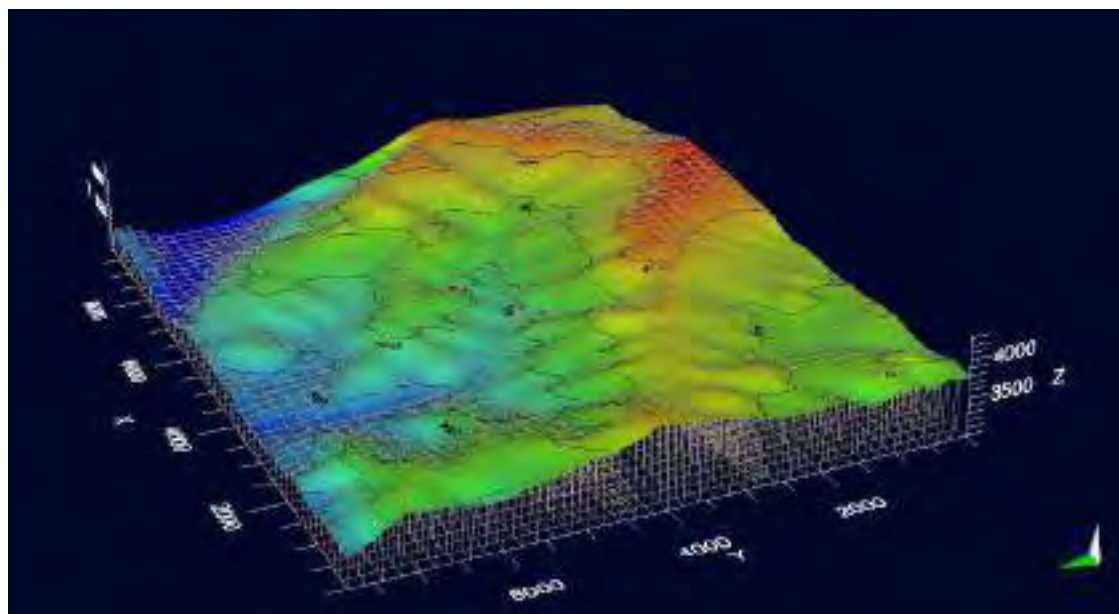


Figura 125

Definición de la extensión del modelo en base a la cuenca

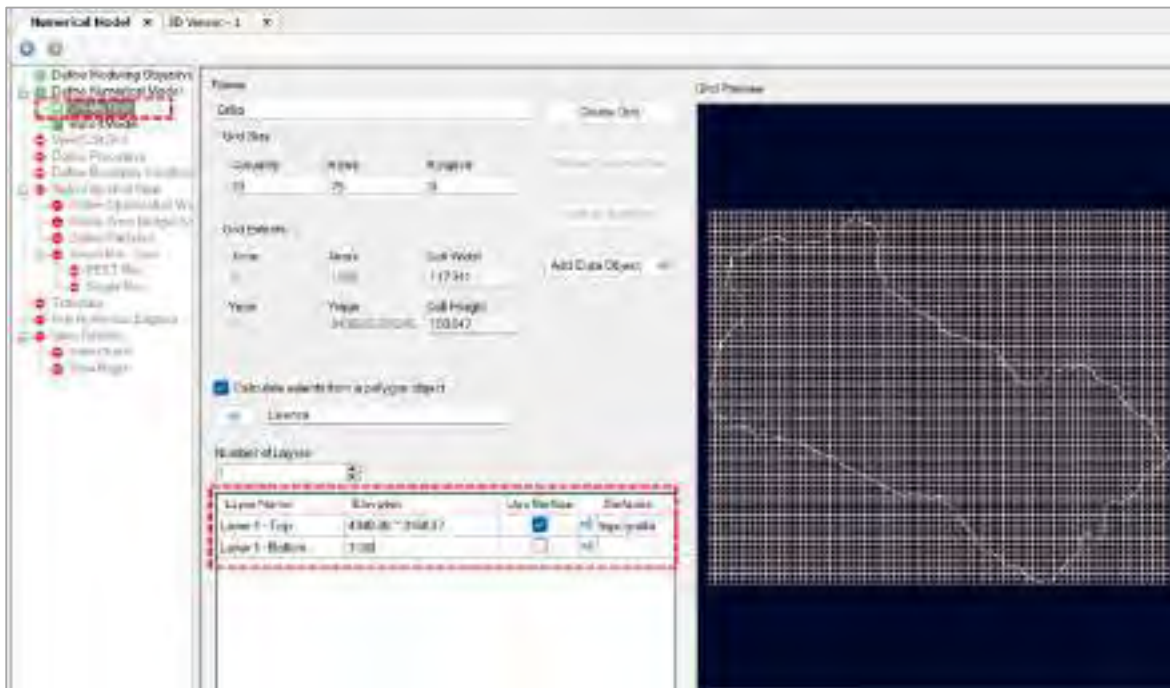
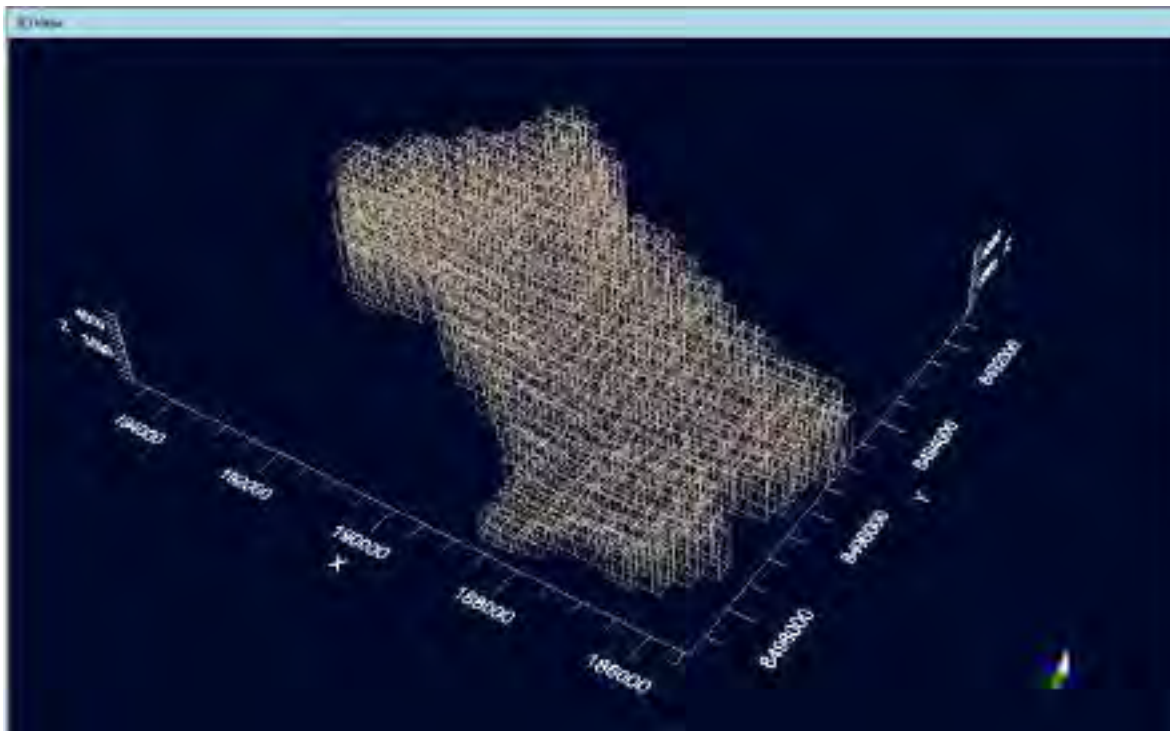


Figura 126

Vista 3D de enmallado del modelo en base a la cuenca



7.2.4 Definición de propiedades

En Modflow, la conductividad hidráulica horizontal es la conductividad a lo largo de las filas de la cuadrícula (K_x). Si el acuífero (capa) es isotrópico, K a lo largo de las columnas del modelo (K_y) será el mismo. De lo contrario, la anisotropía horizontal se especifica con el factor de anisotropía, que multiplica K_x para obtener K_y . (Kresic, 2007).

Las propiedades hidráulicas (k y n_e) se definieron a partir de la información generada en el capítulo V de hidrogeología. Estas propiedades se ingresan en base a las cuatro zonas que se han definido.

Figura 127

Definición de las propiedades hidráulicas (k y n_e)

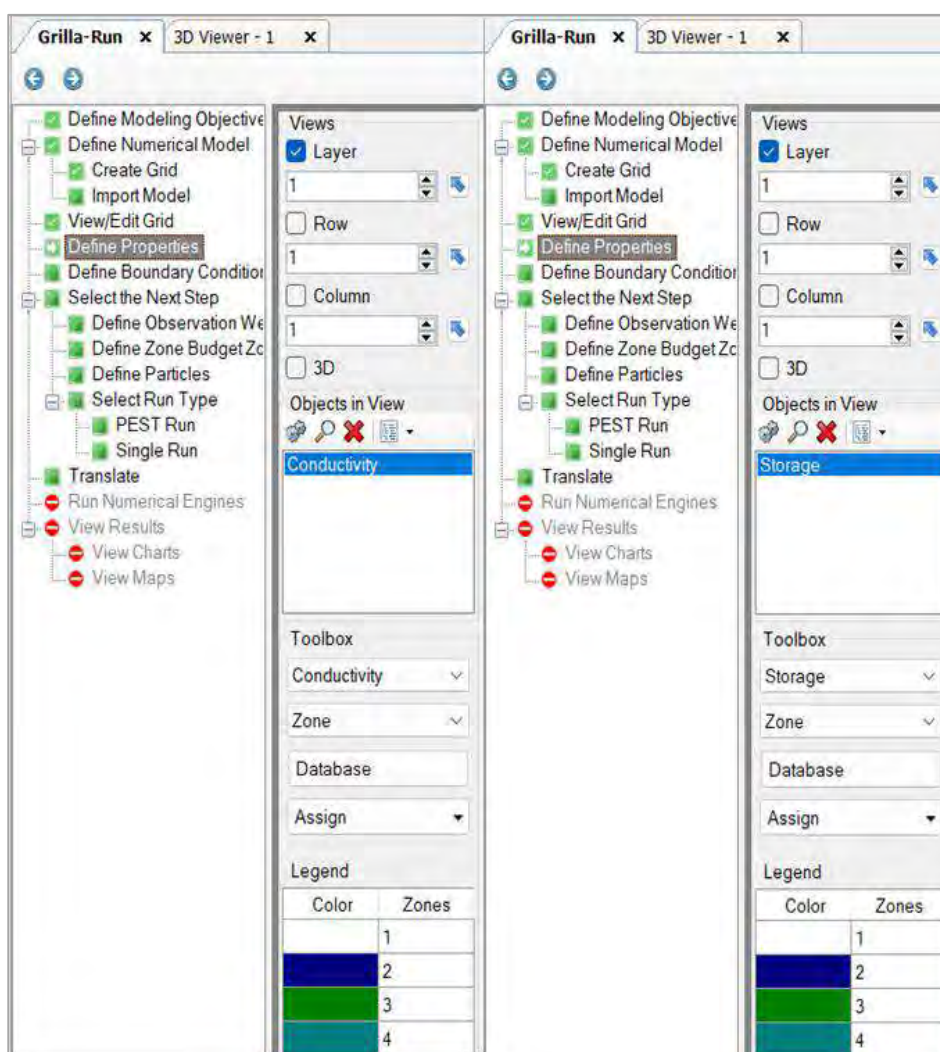


Figura 128

Valores de conductividad hidráulica

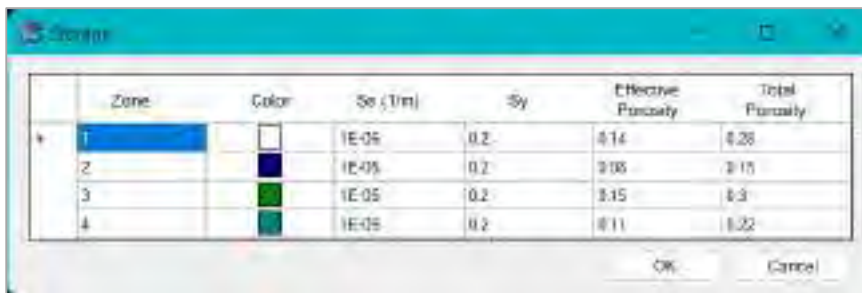


A screenshot of a software dialog box titled 'Propiedades' with a teal header. It contains a table with 5 columns: 'Zona', 'Color', 'Kx (m/s)', 'Ky (m/s)', and 'Kz (m/s)'. There are four rows, each with a different color in the 'Color' column: white, dark blue, green, and teal. The 'Kx' and 'Ky' values are identical for each row, while 'Kz' is a smaller value. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom right.

Zona	Color	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kz (m/s)
1	White	0.00014E	0.00014E	1.4E-05
2	Dark Blue	7.92E-06	7.92E-06	7.92E-06
3	Green	0.000339	0.000339	3.09E-05
4	Teal	0.000152	0.000152	1.52E-05

Figura 129

Valores de porosidad total y efectiva

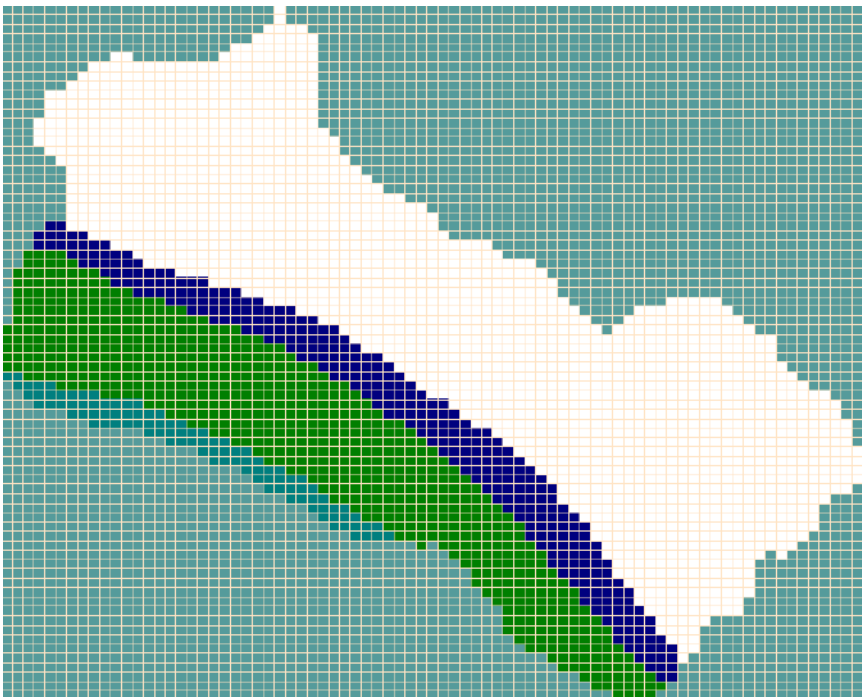


A screenshot of a software dialog box titled 'Propiedades' with a teal header. It contains a table with 7 columns: 'Zona', 'Color', 'Sx (1/m)', 'Sy', 'Effective Porosity', and 'Total Porosity'. There are four rows, each with a different color in the 'Color' column: white, dark blue, green, and teal. The 'Sx' and 'Sy' values are identical for each row, while 'Effective Porosity' and 'Total Porosity' are larger values. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom right.

Zona	Color	Sx (1/m)	Sy	Effective Porosity	Total Porosity
1	White	1E-05	0.2	0.14	0.28
2	Dark Blue	1E-05	0.2	0.08	0.16
3	Green	1E-05	0.2	0.15	0.3
4	Teal	1E-05	0.2	0.11	0.22

Figura 130

Vista de valores ingresados para cada zona



7.2.5 Definición condición de borde

Conocer las condiciones de contorno es necesario para que el modelo numérico resuelva las ecuaciones en diferencias finitas, y se han definido dos tipos distintos de condiciones de contorno:

1. “Condiciones de frontera con carga especificada (condición de Dirichlet, tipo 1)”. En este escenario, la carga hidráulica debe calcularse en función del tiempo y la ubicación en el límite de una celda o nodo. El flujo se calcula en función del tiempo y la ubicación cuando la carga hidráulica se especifica a lo largo de una parte del dominio computacional. (Ingol & Castañeda, 2017).

Para este primer caso se asignaron las cargas hidráulicas en los puntos conocidos como manantiales donde la carga hidráulica es aflorante en la superficie, el nivel del río principal cuyo dren de agua es permanente y va determinada por la conexión con el nivel freático, siendo esta considerada como quebrada ganante alimentado por el flujo subterráneo.

2. “Condiciones de frontera de gradiente-carga especificado (condición Neumann, tipo 2)” En este caso, el flujo de agua subterránea a través de la frontera se define en función del tiempo y de la ubicación, ya que el gradiente de la carga hidráulica se especifica en la frontera. El paquete de recarga, que se representa en unidades de longitud/tiempo, se utiliza para reproducir un flujo específico que se dispersa por la parte superior del modelo. (Ingol & Castañeda, 2017). En el modelo actual se asignó para simular la recarga en el área representado por la precipitación anual y evapotranspiración. La figura 133 muestra el ingreso de los datos de manantes que se encuentran dentro de la cuenca, representados por el tipo de condición de borde “Wells” o “pozos”, en este caso los manantes representan los pozos que cuentan con un caudal de salida medido en campo con su respectivo nivel de agua (superficial). Los datos de caudal asignados van en manera negativa ya que son flujos de salida.

Figura 131

Definición de las condiciones de borde

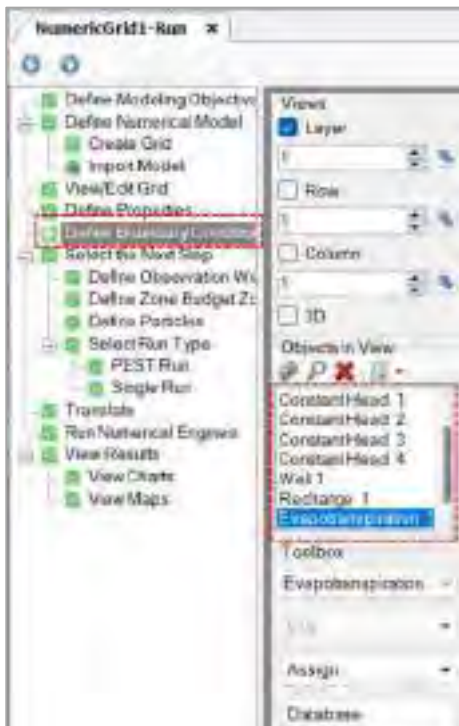


Figura 132

Condiciones de borde para el modelo (Carga)



Figura 133

Ingreso de inventario de manantes (pozos)

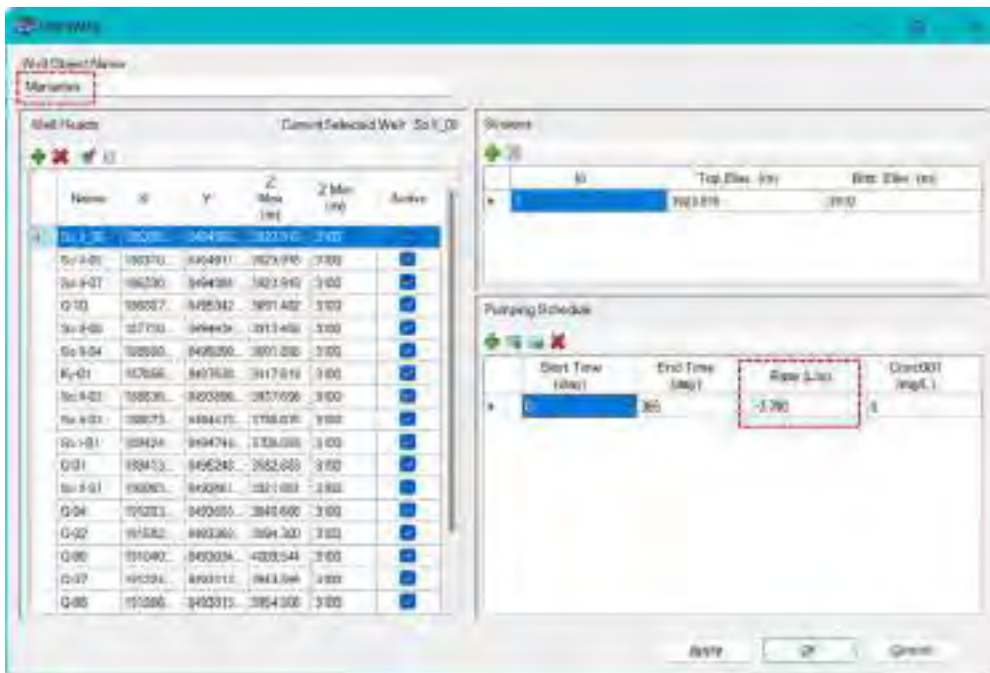


Figura 134

Vista de la distribución de manantes



Figura 135

Vista 3D de la distribución de manantes y condición de borde

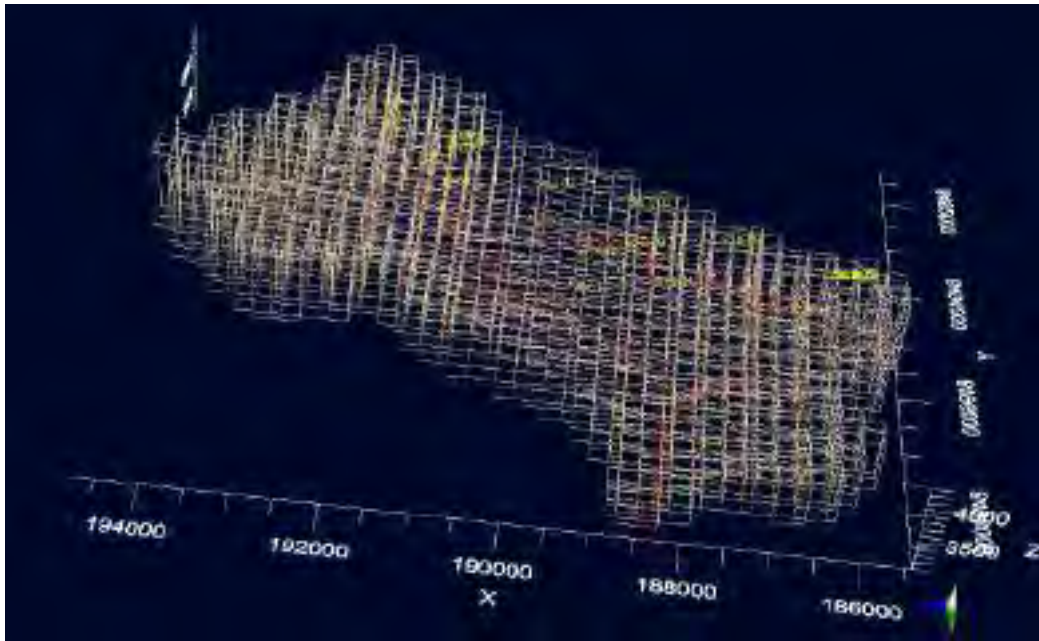
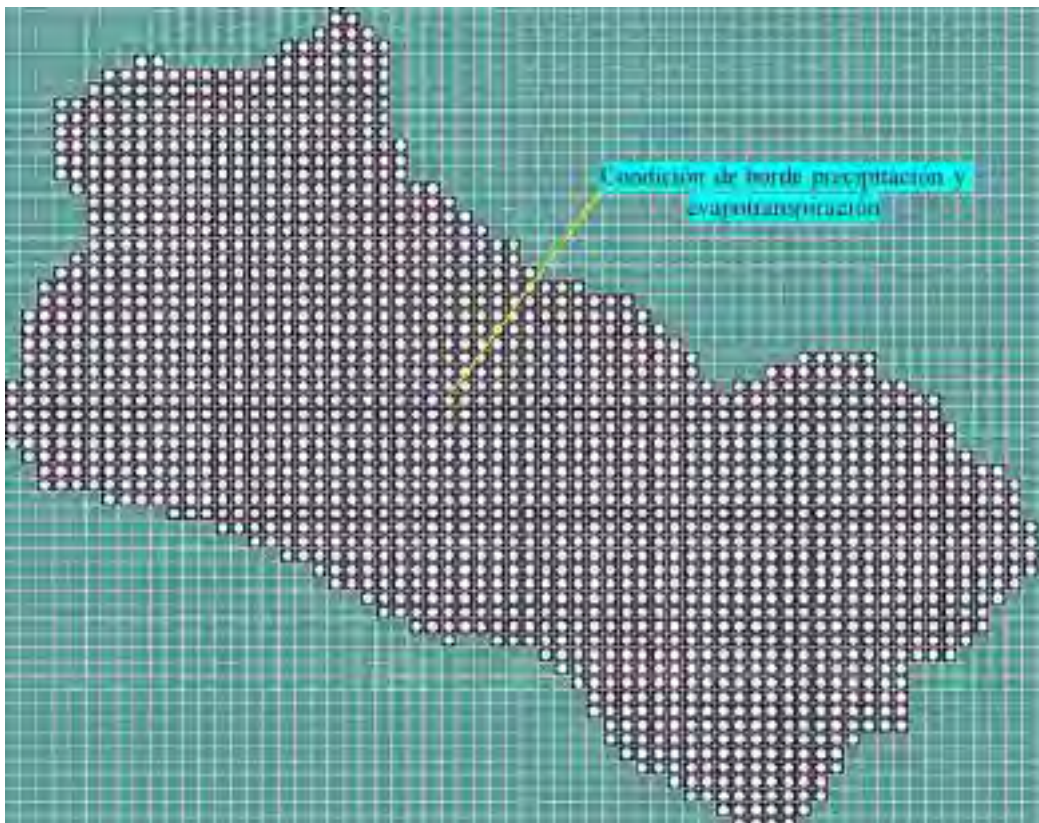


Figura 136

Ingreso condición de borde (recarga y evapotranspiración)



En algunos casos donde los manantes encontrados se encuentran a una distancia que no sea superada por el enmallado (extensión de las celdas), el modelo considera el valor mayor de caudal de salida, siempre en cuando existan en una celda dos o más puntos de salida de flujo.

7.2.6 Definición de partículas

La definición de partículas está relacionada con el transporte de contaminantes en la mayoría de modelos conocidos, mediante ingresos de puntos o zonas que puedan estar afectadas por contaminantes que se transportan junto con el flujo subterráneo y con esto podrían definirse las trayectorias y origen del cual provienen. Para la el modelo presente el ingreso de puntos en celdas permite conocer la trayectoria y destino de una partícula puesta en cualquier punto de la cuenca; en el modelo se asignaron diferentes puntos partícula ubicados en los manantes para poder determinar la trayectoria de las partículas “backward particles” y otros puntos ubicados a criterio de los modeladores para definir el destino de dichas partículas “forward particles”

Figura 137

Definición de partículas

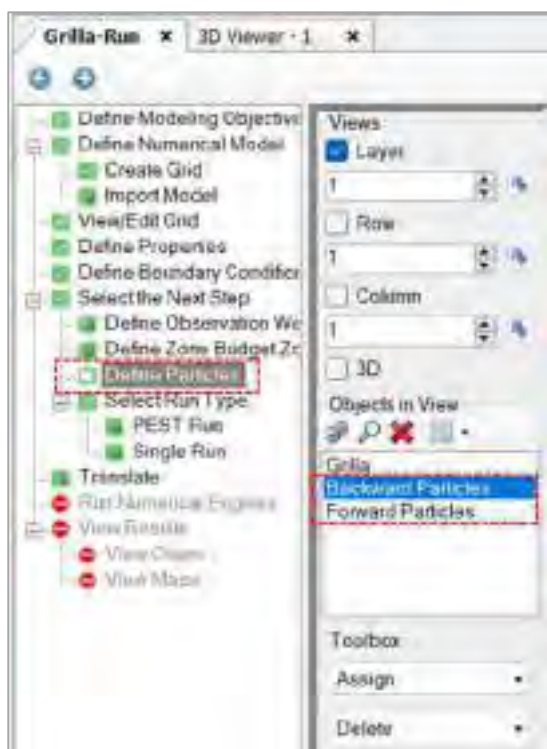


Figura 138

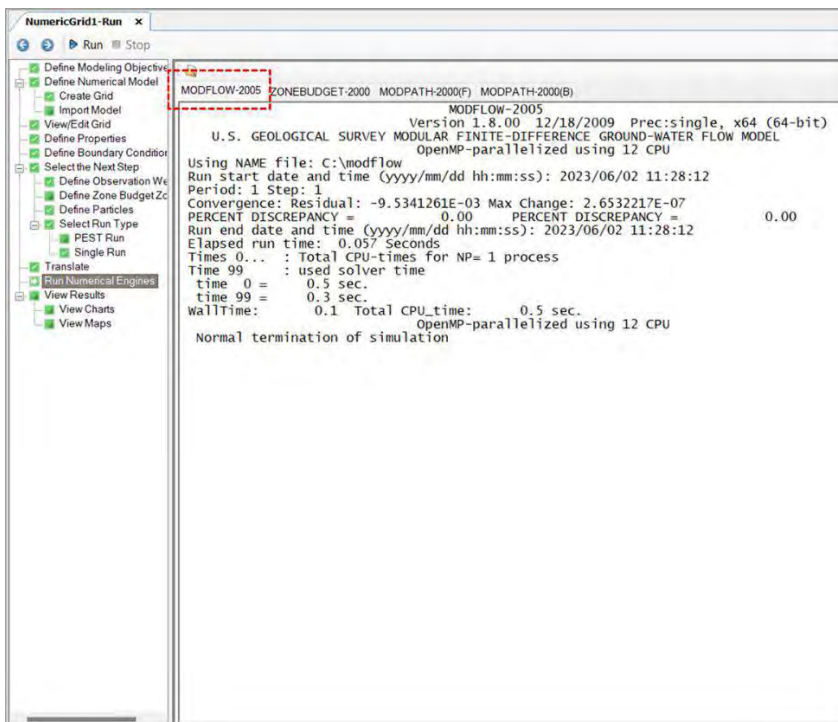
Distribución de partículas destino y trayectoria



7.2.7 Primera ejecución

Figura 139

Primera ejecución del modelo



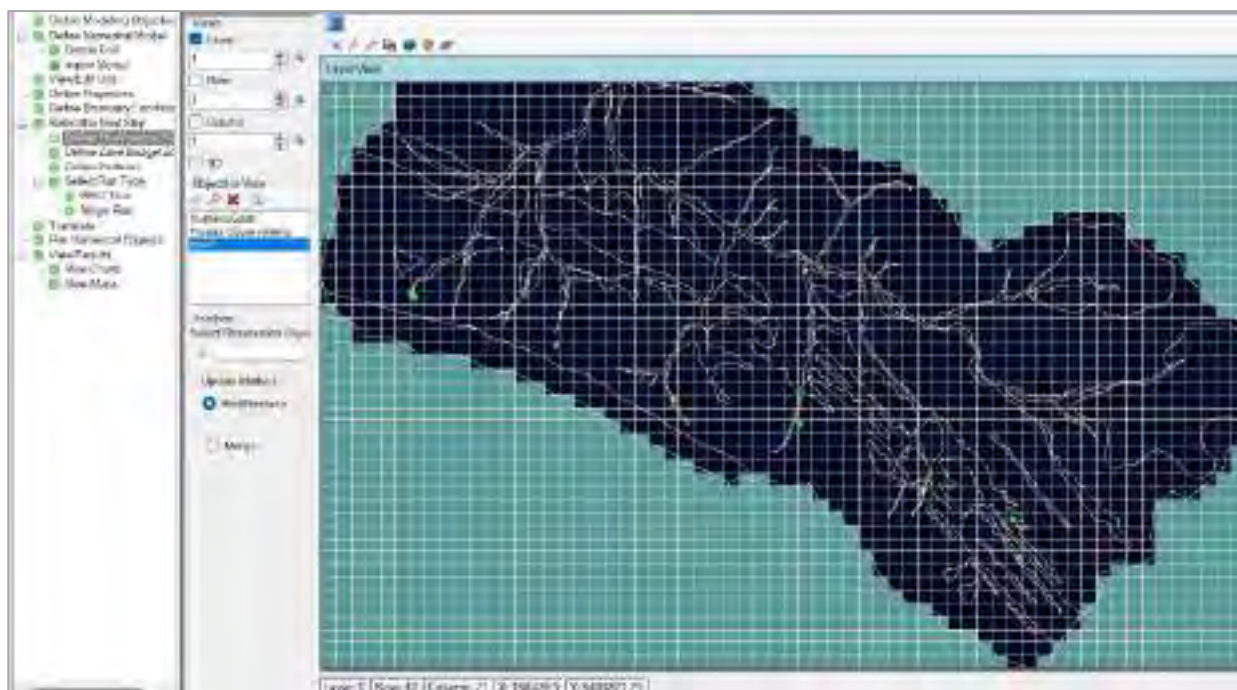
7.2.8 Proceso de calibración

El proceso de calibración del modelo tiene un objetivo, demostrar que la simulación de flujo tenga una aceptación. Este proceso se inicia con la comparación de los valores de carga en la cuenca mediante los manantes considerados para el modelo como “pozos de observación”, si los valores observados tienen coincidencia o similitud con los valores simulados por el modelo, este puede ser aceptado para representar el sistema físico bajo investigación, en caso no se cumpla se procederá a realizar la calibración mediante códigos computacionales.

Para estimar los parámetros óptimos del modelo se puede usar “PEST (Model-Independent Parameter Estimation and Uncertainty Analysis)” que sigue siendo un código muy utilizado en la calibración de parámetros de modelado de agua subterránea.

Figura 140

Ingreso de pozos de observación (manantes)



Para el proceso de calibración se usaron 13 puntos de observación, los cuales corresponden a los manantes dentro del área de estudio, la localización de los puntos de observación utilizados

para la calibración se presenta en la siguiente (figura 140). Cabe recalcar que el uso de estos manantes como pozos de observación está relacionado con la permanencia de flujo que presentan estos manantes, su variabilidad de flujo es considerado como bajo durante temporadas secas y lluviosas. El ingreso de los puntos de observación se realiza importando la data en el archivo de extensión Excel y seguidamente se procede a configurar las unidades, sus coordenadas, datos de carga (Heads), altitud (z), base (botón), y fecha de toma de datos (time).

Tabla 38

Manantes con régimen permanente

Name	ID	Z (m)	Botton (m)	X (m)	Y (m)	Heads (m)	Time
Q-01	1	3583.96	3580.00	189405	8495251	3584	3/20/2023
So II-01	1	3917.79	3915.00	190057	8493659	3918	3/20/2023
So II-05	1	3908.14	3905.00	186305	8494916	3908	3/20/2023
So II-06	1	3908.66	3905.00	186293	8494927	3909	3/20/2023
So II-07	1	3916.56	3914.00	186326	8494889	3917	3/20/2023
Q-07	1	3945.9	3942.00	191223	8493114	3946	3/20/2023
Q-05	1	4005.35	4002.00	192179	8492367	4005	3/20/2023
Q-03	1	3943.28	3940.00	192120	8492738	3943	3/20/2023
Q-04	1	3826.17	3824.00	191211	8493697	3826	3/20/2023
Q-08	1	3958.42	3956.00	191253	8493025	3958	3/20/2023
So II-02	1	3906.66	3904.00	188832	8493902	3907	3/20/2023
So II-08	1	3916.86	3914.00	187706	8494435	3917	3/20/2023
Ky-01	1	3419.68	3417.00	187911	8497646	3420	3/20/2023

Fuente: Elaboración propia.

Figura 141

Definición de los pozos de observación

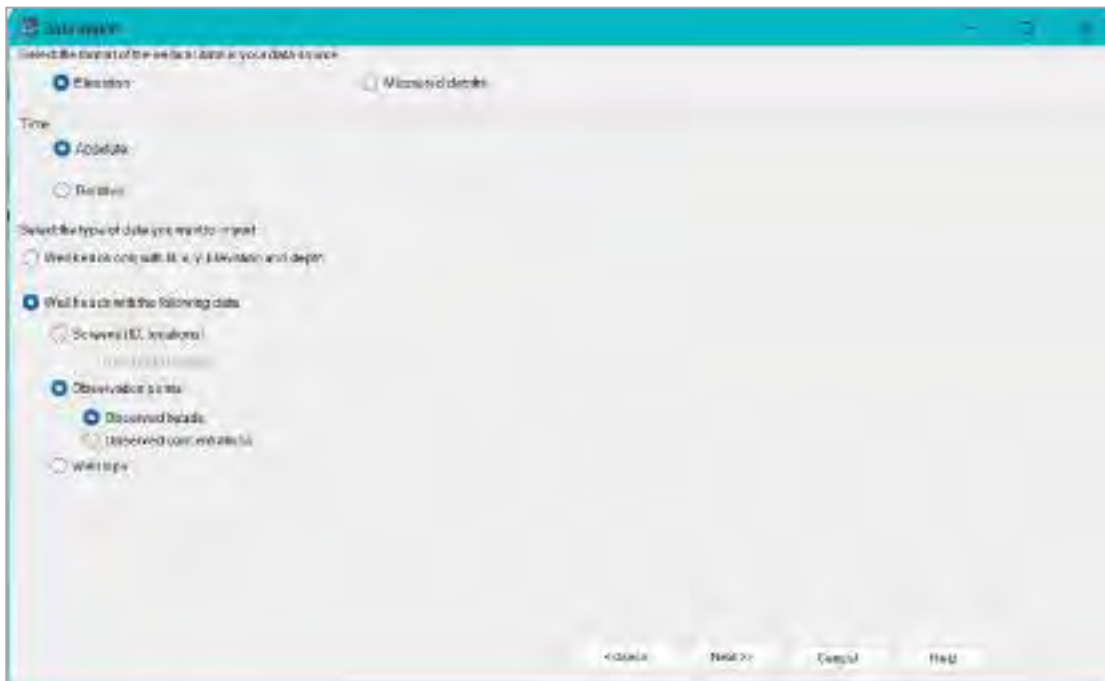


Figura 142

Ajuste de ítems para las cargas de los pozos de observación

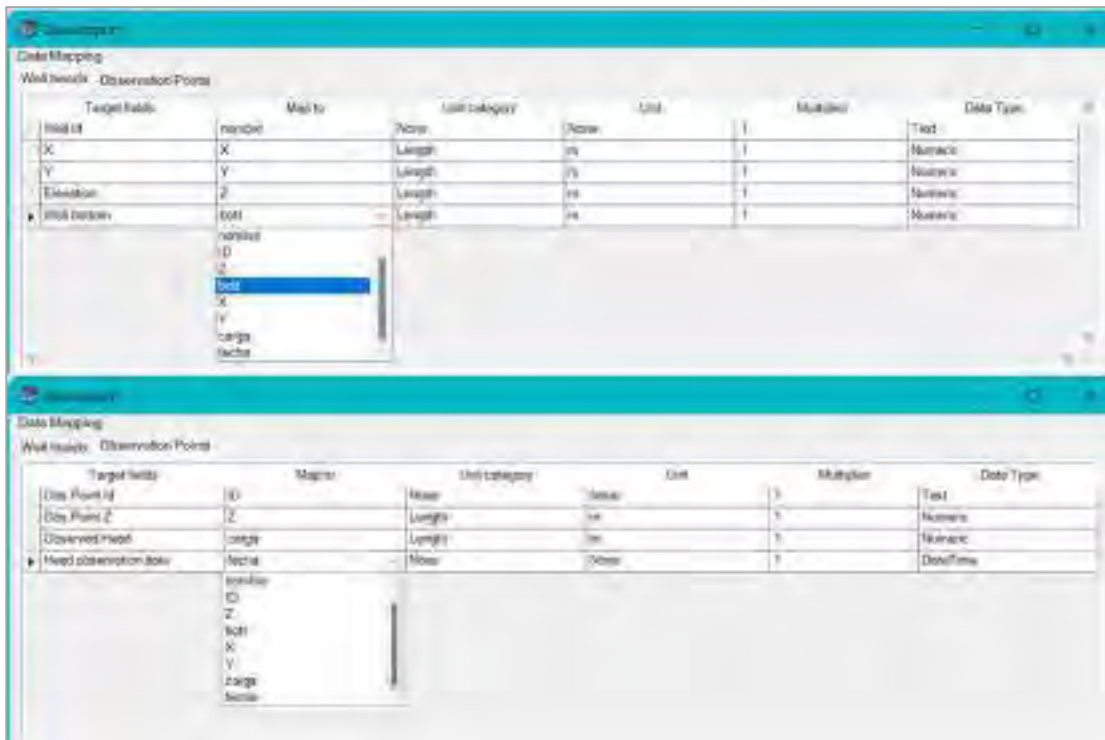
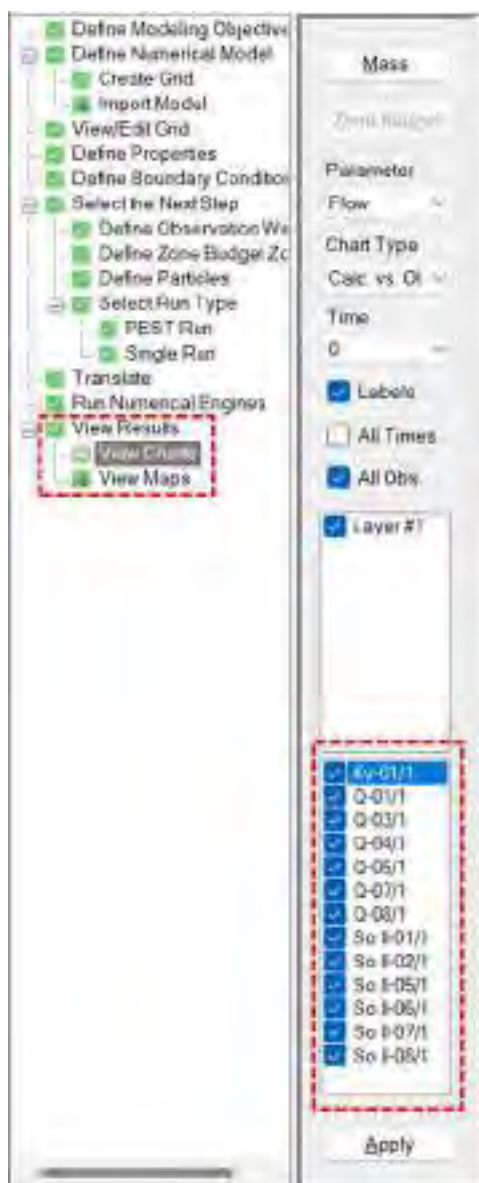


Figura 143

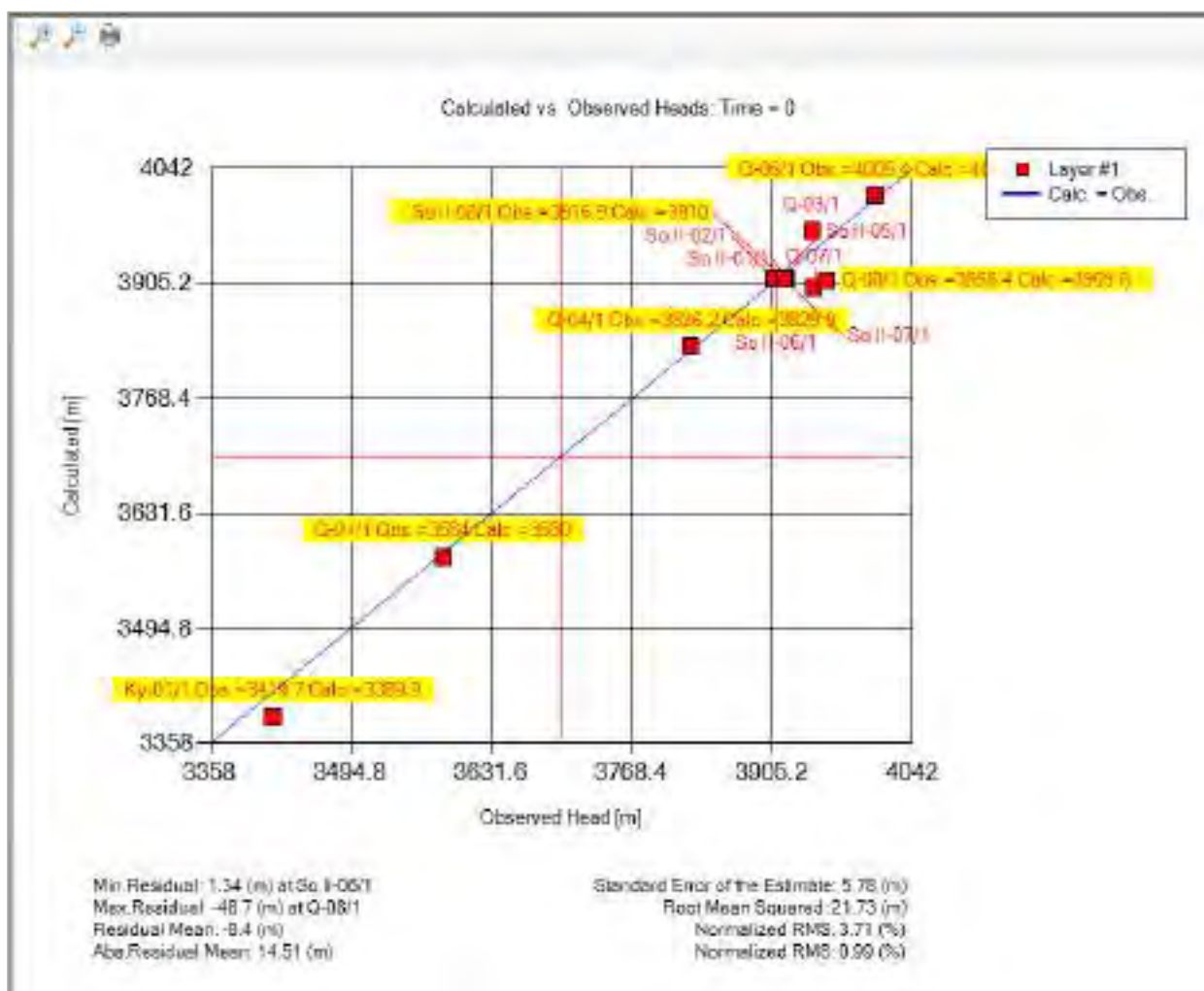
Ejecución de datos observados y calculados



Los resultados que muestra el diagrama de dispersión de cargas observadas en campo con las cargas calculadas por el modelo, son considerados como aceptables. El modelo presentó un valor mínimo residual de 1.34 metros en el manante So II-06, un máximo residual de -48.7 en el manante Q-08, una media residual de -8.4 metros, un error de estimación estándar de 5.78 metros (considerado como bajo), un RMS normalizado de 3.71 % y un coeficiente de correlación normalizado de 0.99 %.

Figura 144

Diagrama de dispersión - valores de carga observados y calculados



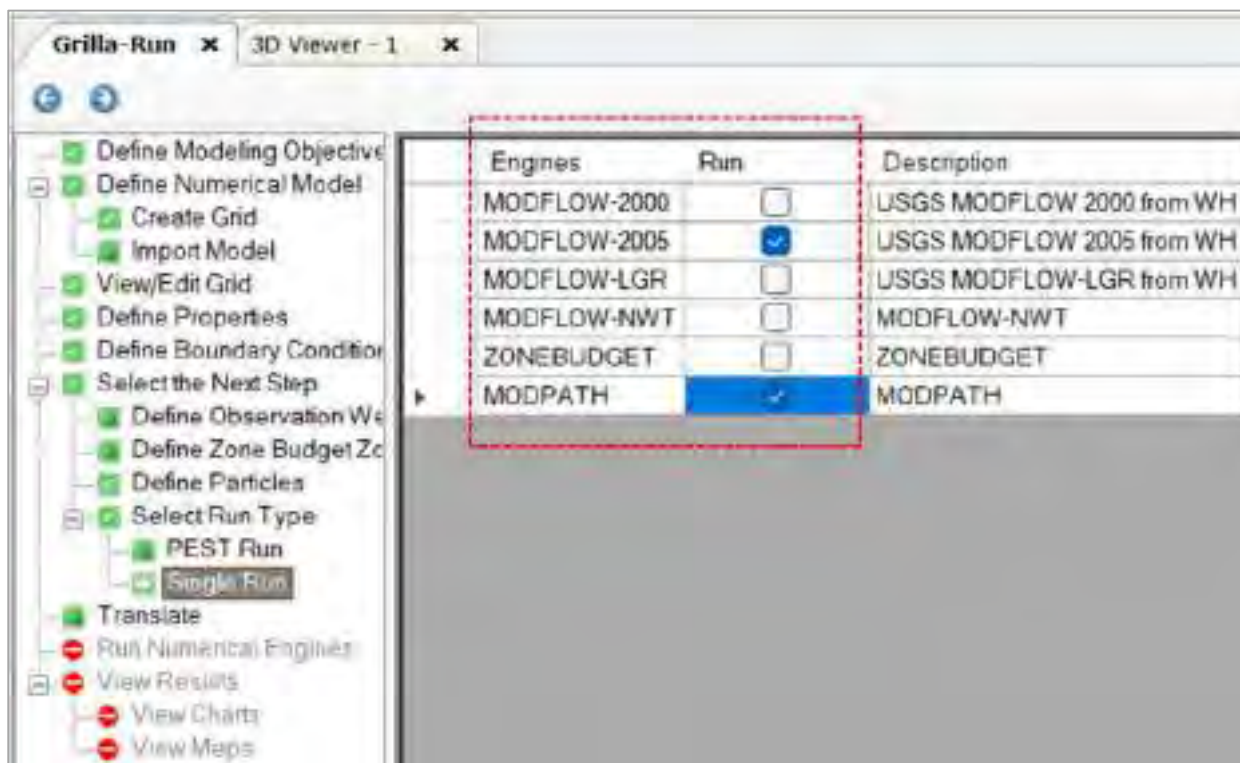
7.2.9 Definición tipo de ejecución

La interfaz de Visual ModFlow Flex tiene varios tipos de solucionadores que dependen del objetivo que se definió para el modelo.

Los solucionadores que se utilizaron para el modelo fueron “USGS MODFLOW 2005 from WH” definido para el flujo subterráneo y “MODPATH” para obtener las trayectorias de las partículas asignadas en el área de estudio. Para el modelo no se utilizó el solucionador ZONEBUDGET, porque la simulación se realizó en un régimen estacionario.

Figura 145

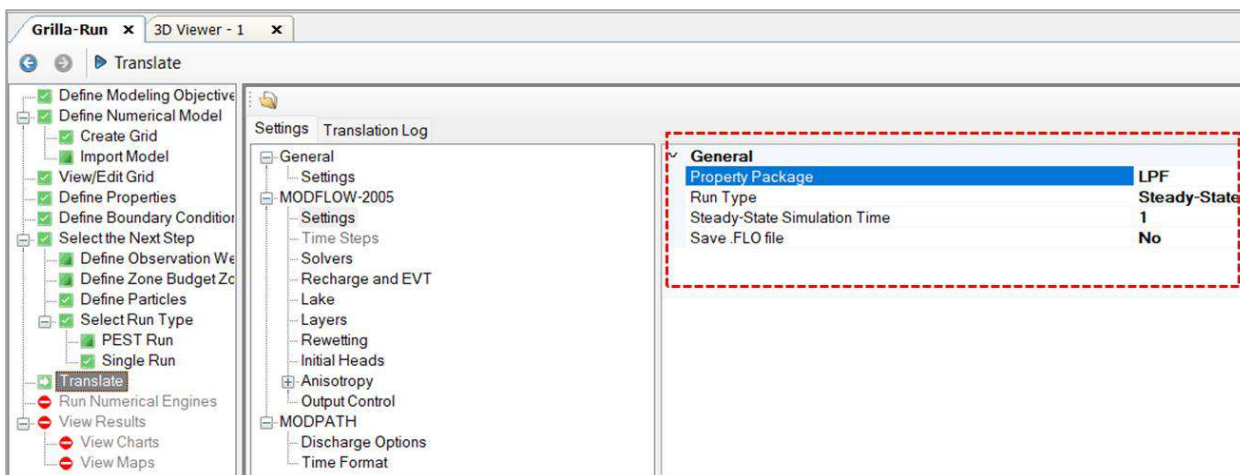
Definición tipo de ejecución para la simulación de flujo y partícula



La traducción de todos los datos ingresados en el modelo es el último paso que se realiza donde los datos son solucionados y expresados en vista de mapas y diagramas.

Figura 146

Traducción del modelo

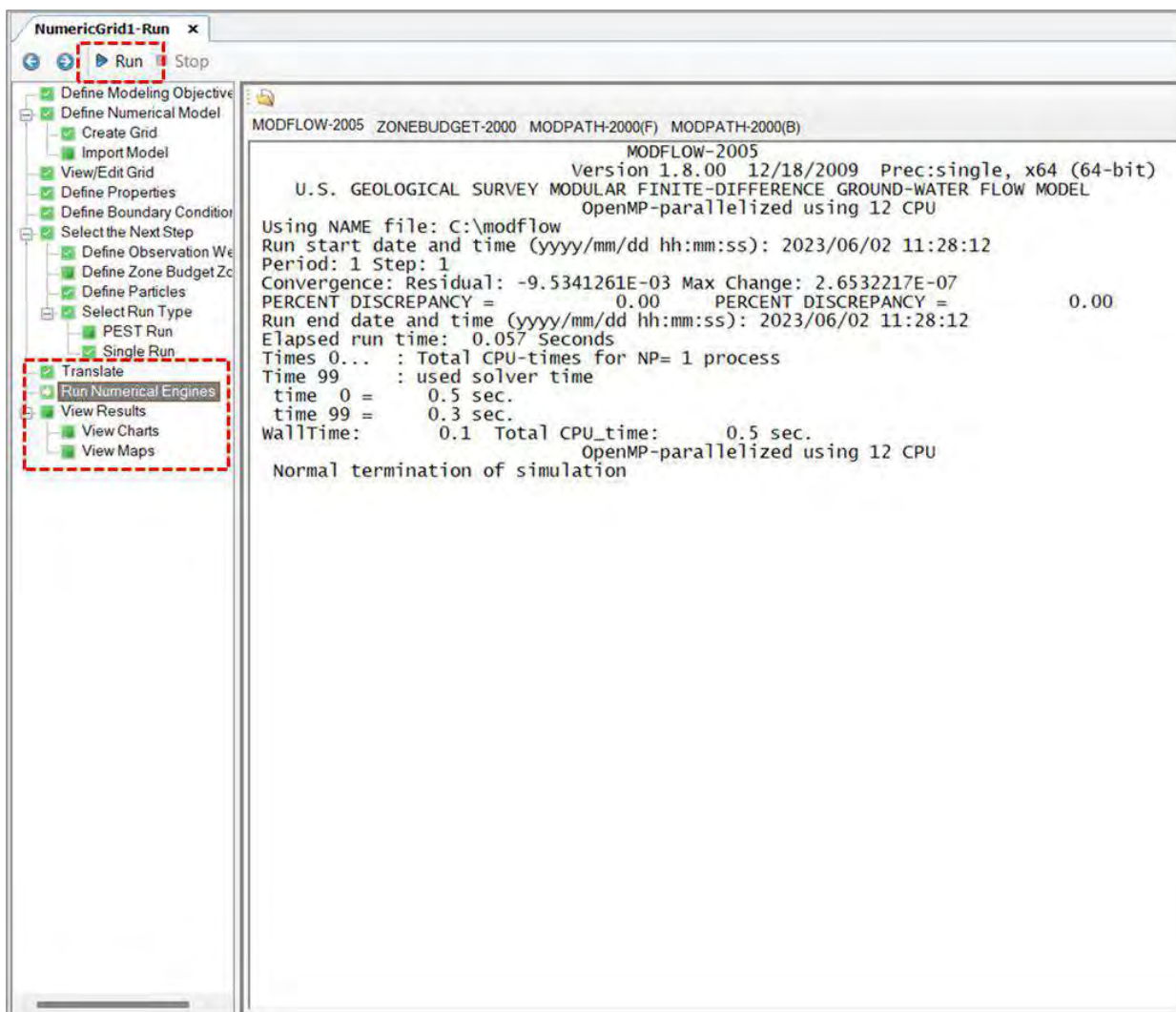


7.2.10 Ejecución

Para visualizar los resultados se procede a ejecutar el modelo “Run” posterior a esto se muestran algunas características de las ejecuciones con éxito en el modelo.

Figura 147

Ultima ejecución del modelo



La figura 145 muestra características de las ejecuciones exitosas hechas por los motores, si se quieren más detalles sobre estas descripciones puede visualizar el archivo en formato texto que se guarda por defecto en la carpeta donde se trabajó.

7.2.11 Resultados

Luego de determinar la confiabilidad de los datos simulados (calibración), se procede a la formulación de escenarios, para la zona de estudio se hizo una simulación en régimen estacionario cuyos resultados se muestran a continuación.

7.2.11.1 Régimen estacionario (steady state).

Para esta simulación en régimen estacionario se considera como valores constantes a las propiedades hidráulicas asignadas y las condiciones de borde, como valores para un año promedio. Esta simulación también es el resultado de la calibración anterior.

7.2.11.1.1 Superficie freática (water table).

Las superficies de nivel de agua (ver figura 148) que se obtuvieron en la simulación muestran rangos que varían entre los 3270 y 4007 metros.

En la parte de la salida de cuenca el nivel de agua está influenciado por el río principal y sus aportantes (ver figura 150), de manera que, como el río es permanente durante todo el año, este es considerado ganante y que por eso el nivel de agua se encuentra al mismo nivel del drenaje de salida. Hacia el sur, donde inicia el primer aportante del río principal (Quebrada Pumahuanca) en la comunidad de Suncco, se observa que el nivel freático coincide con el nivel del río solo en el ancho que presenta y una elevación progresiva por los laterales pero que no supera la altura de la superficie (ver figura 151)

Los niveles freáticos observados en los puntos de manantes captados (ver figura 152) son superficiales y casi superficiales, esto debido a las geoformas que se presentan como las cimas de las lomas donde el nivel freático se encuentra metros abajo y en las laderas de los depósitos cuaternarios donde se encuentra al mismo nivel de estos. Por último, al sureste de la cuenca (entre las comunidades de Quinsacruz y Perccacollo) se tienen los niveles freáticos superficiales solo en el área donde afloran algunos manantes en depósitos cuaternarios (Q-6, Q-7, Q-8, Q-9), fuera de

esta área de influencia el nivel disminuye gradualmente hacia los límites sur de la cuenca. (ver figura 155)

Figura 148

Curvas de nivel de agua cuenca Huanacahuire

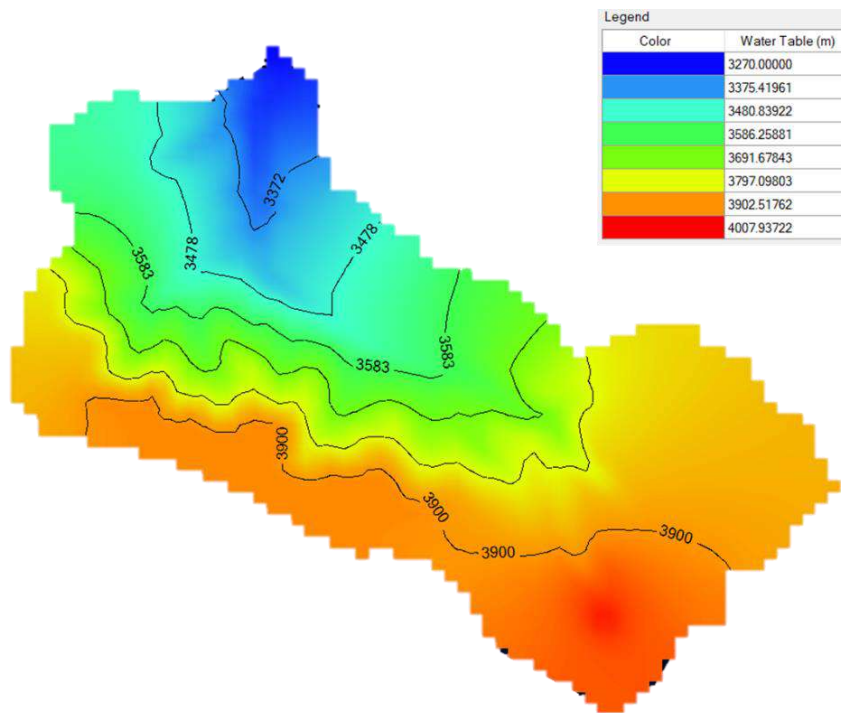


Figura 149

Vista 3D niveles de agua cuenca Huanacahuire

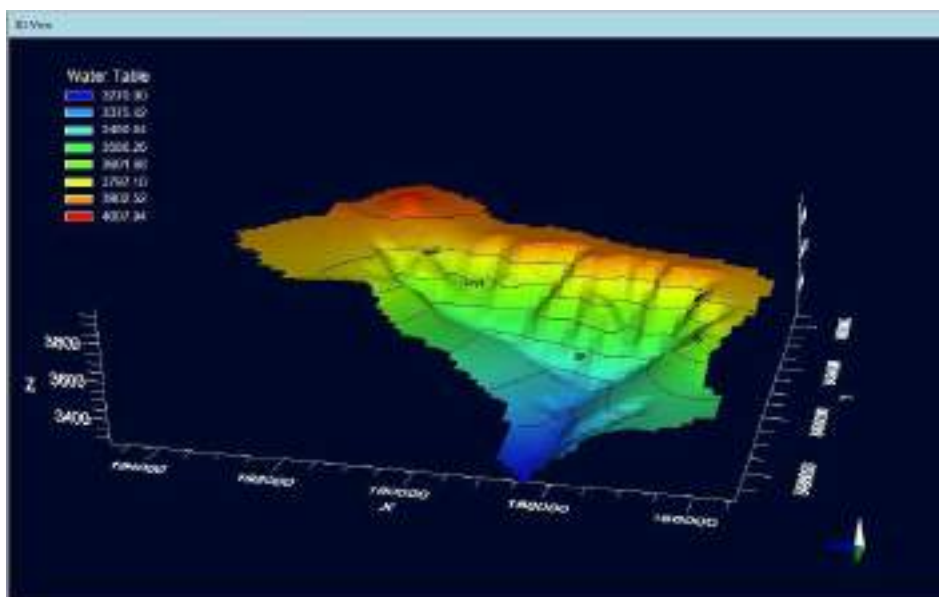


Figura 150

Nivel freático fila 10

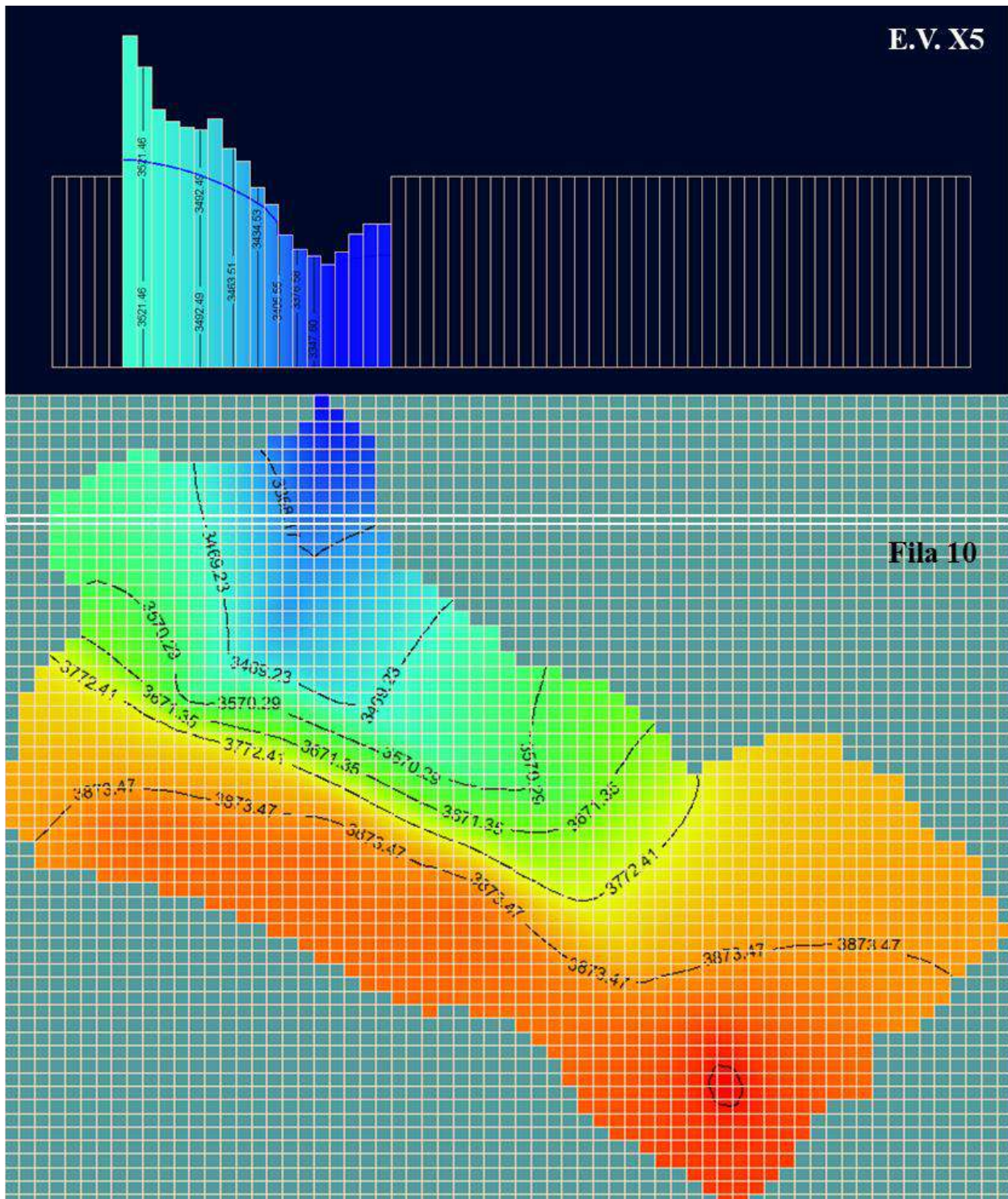


Figura 151

Nivel freático fila 20

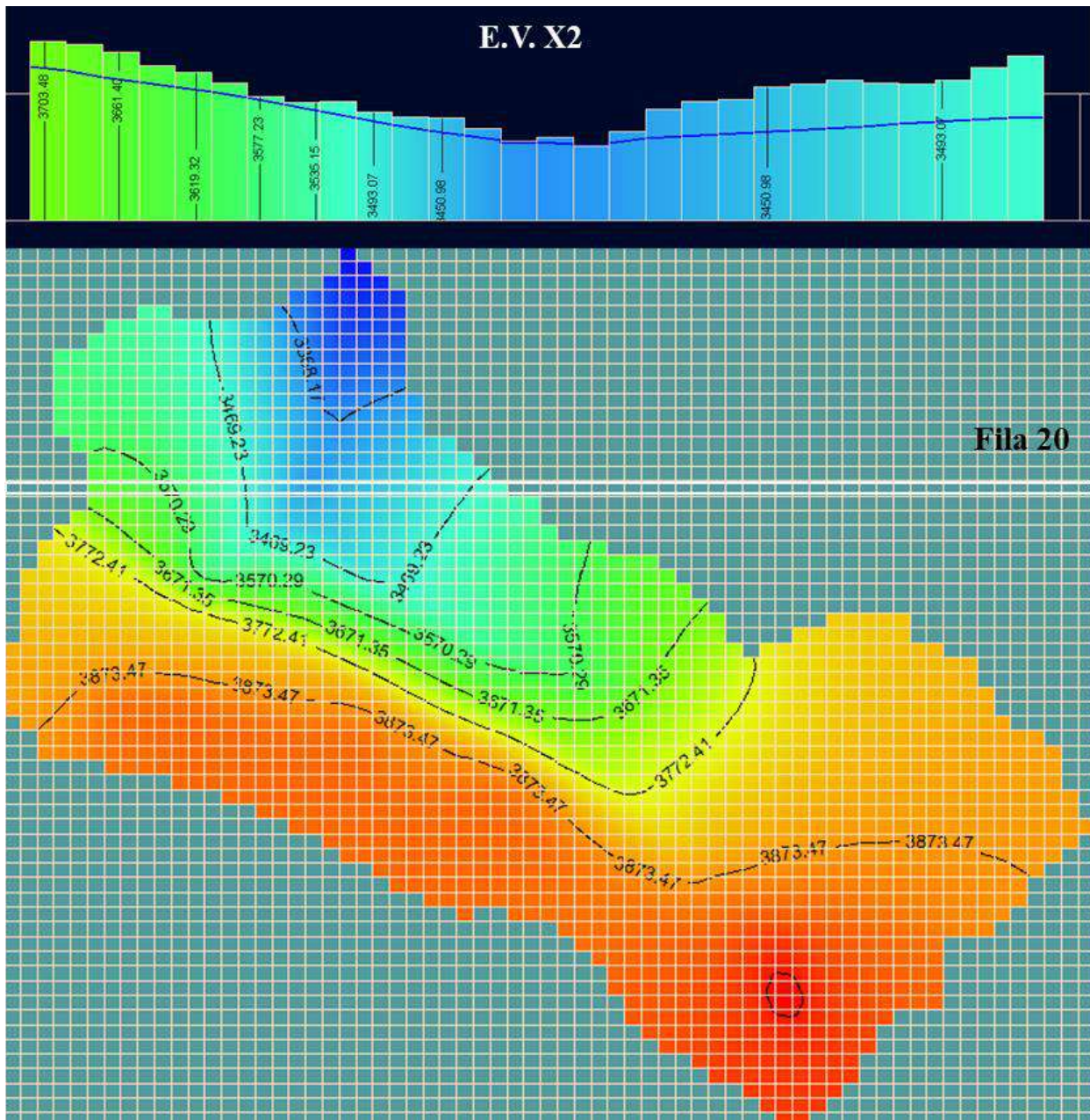


Figura 152

Nivel freático fila 37

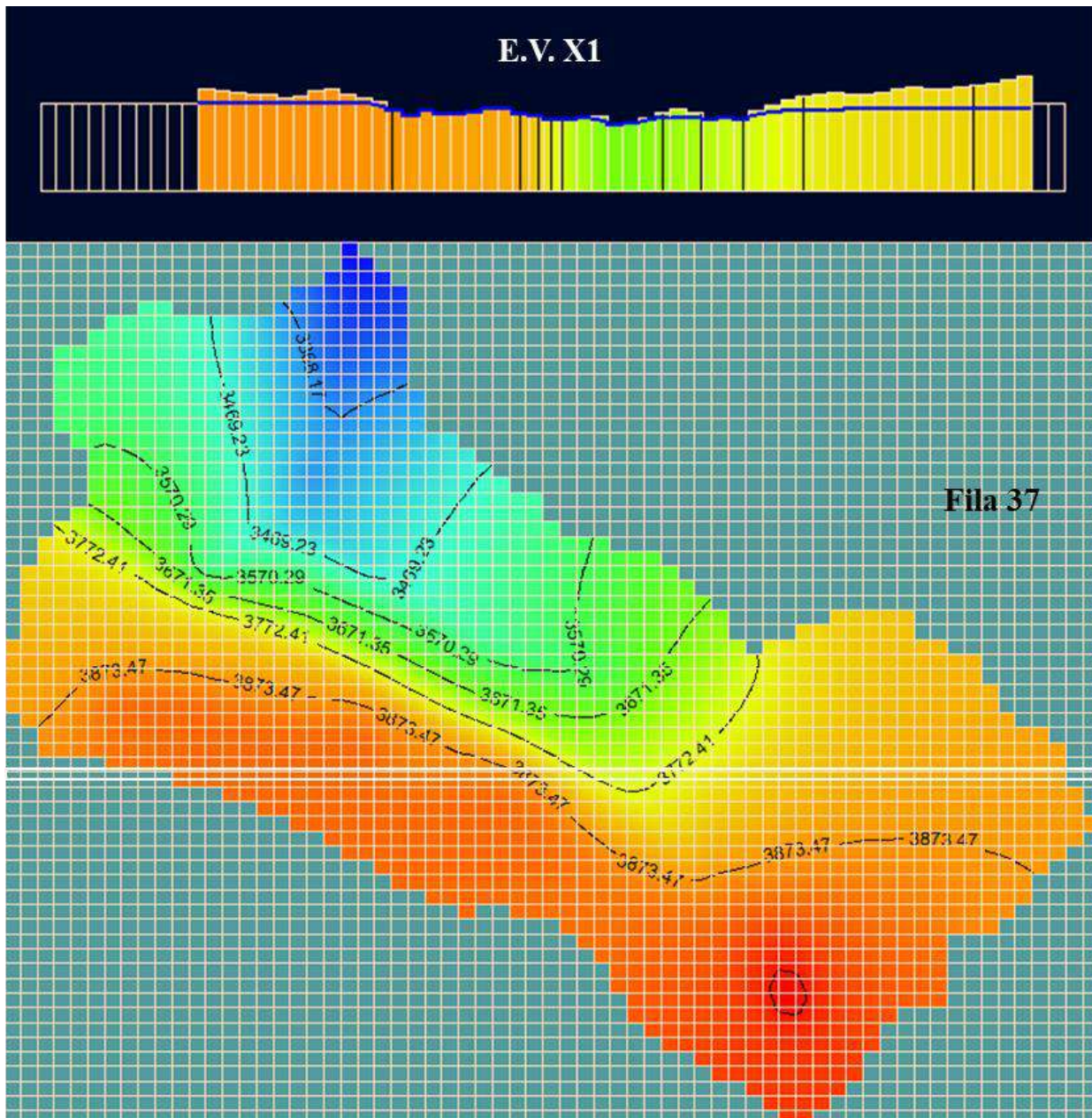


Figura 154

Nivel freático columna 21

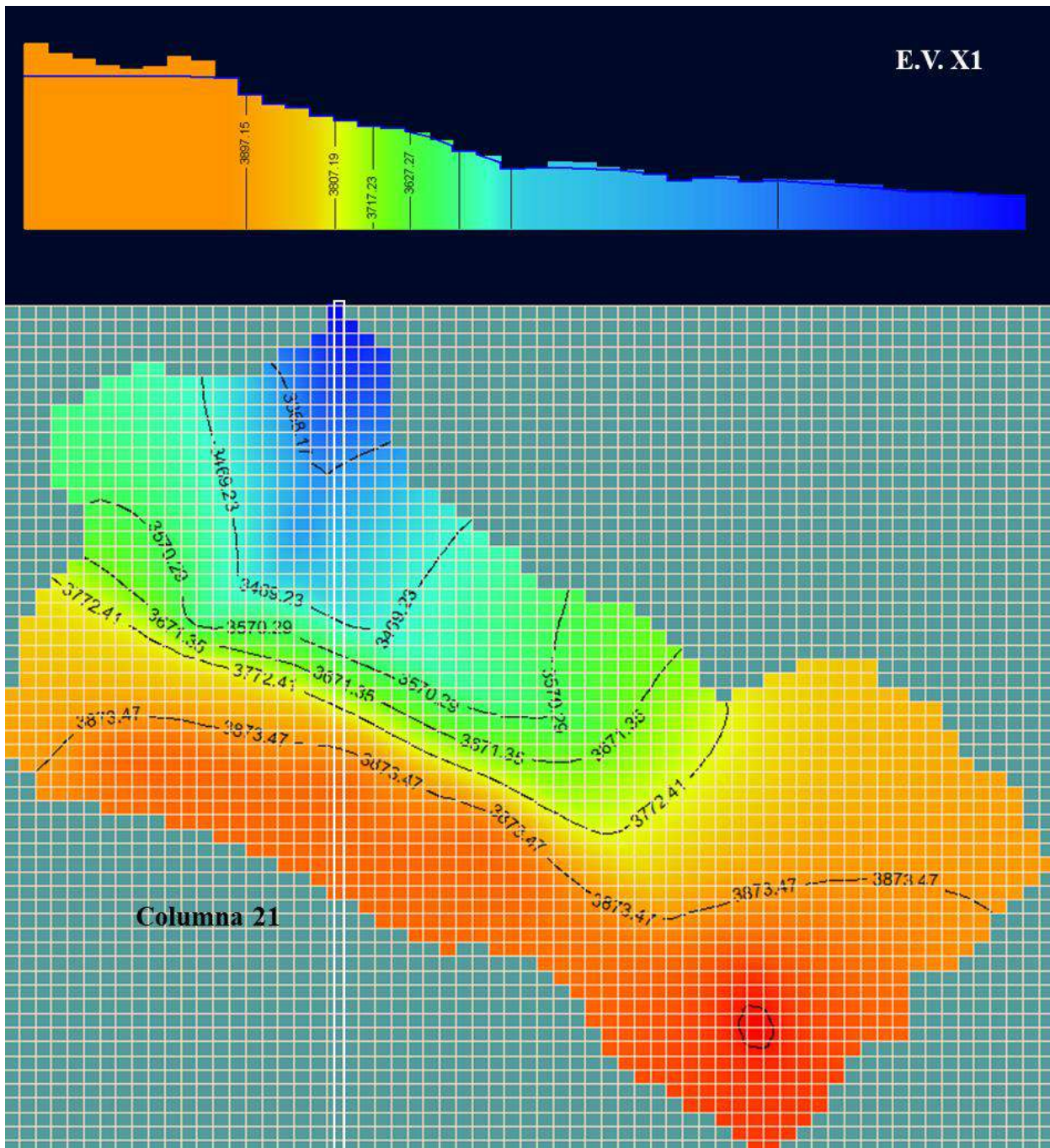
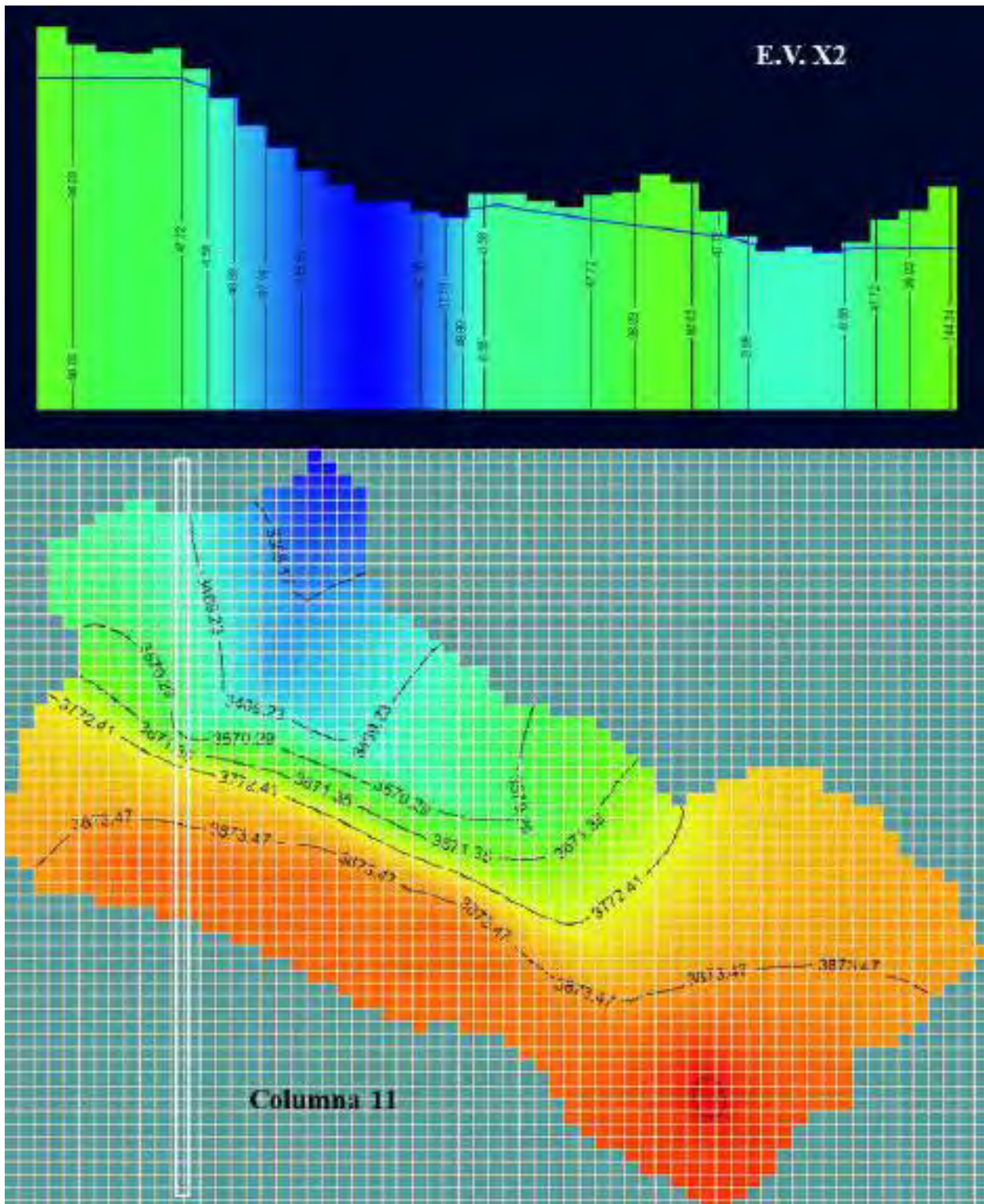


Figura 155

Nivel freático columna 11



7.2.11.1.2 Abatimiento o descenso del nivel (drawdown).

Se obtuvieron descensos de nivel distintos en la distribución de la cuenca donde la tabla de agua no se muestra afectada en las mismas proporciones, la zona suroeste (Suncco y Conchacalla) presentan abatimientos generales entre -37 y -118 metros, mientras que los pozos (manantes captados) del lado sur este (sector Ccachopata y Llulluchayoc) no afectan de manera dramática a los niveles de agua.

Las zonas de mayor abatimiento están ubicadas alrededor de los manantes So II – (02,05,06,07,08).

Figura 156

Descenso de nivel de agua cuenca Huanacahuire

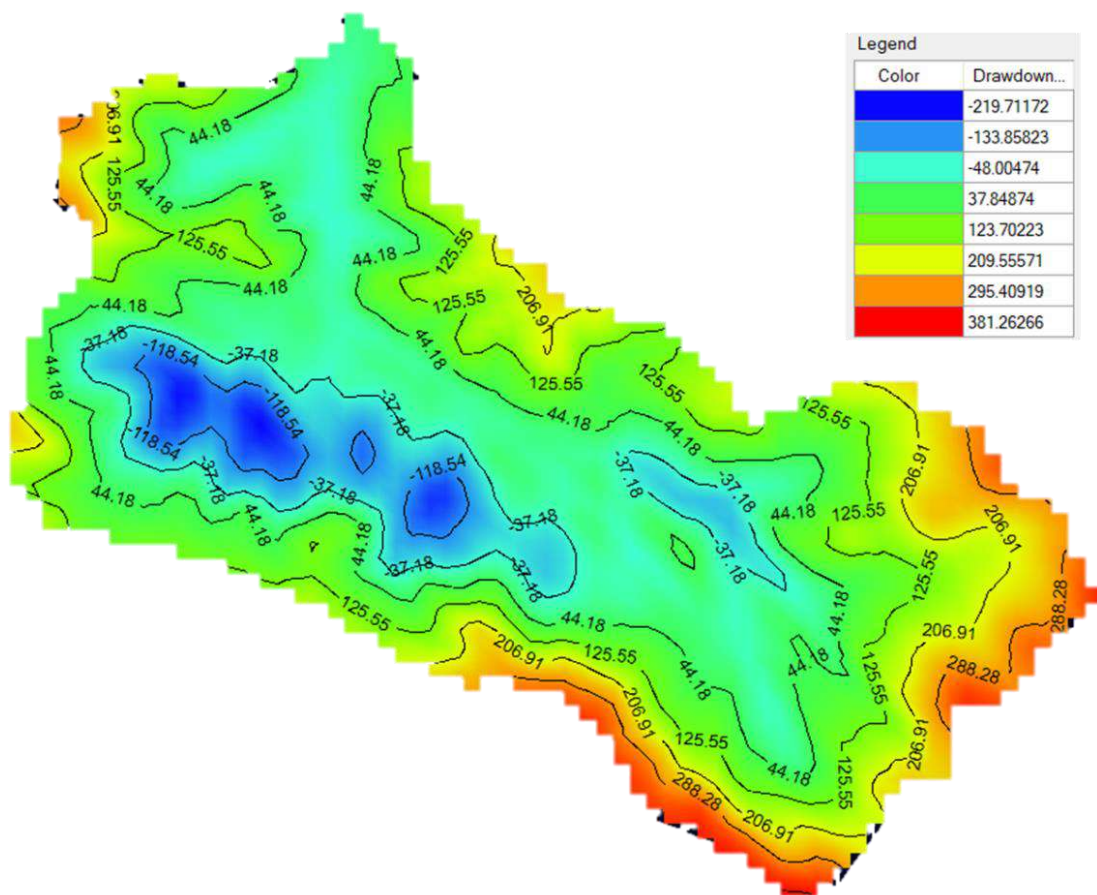
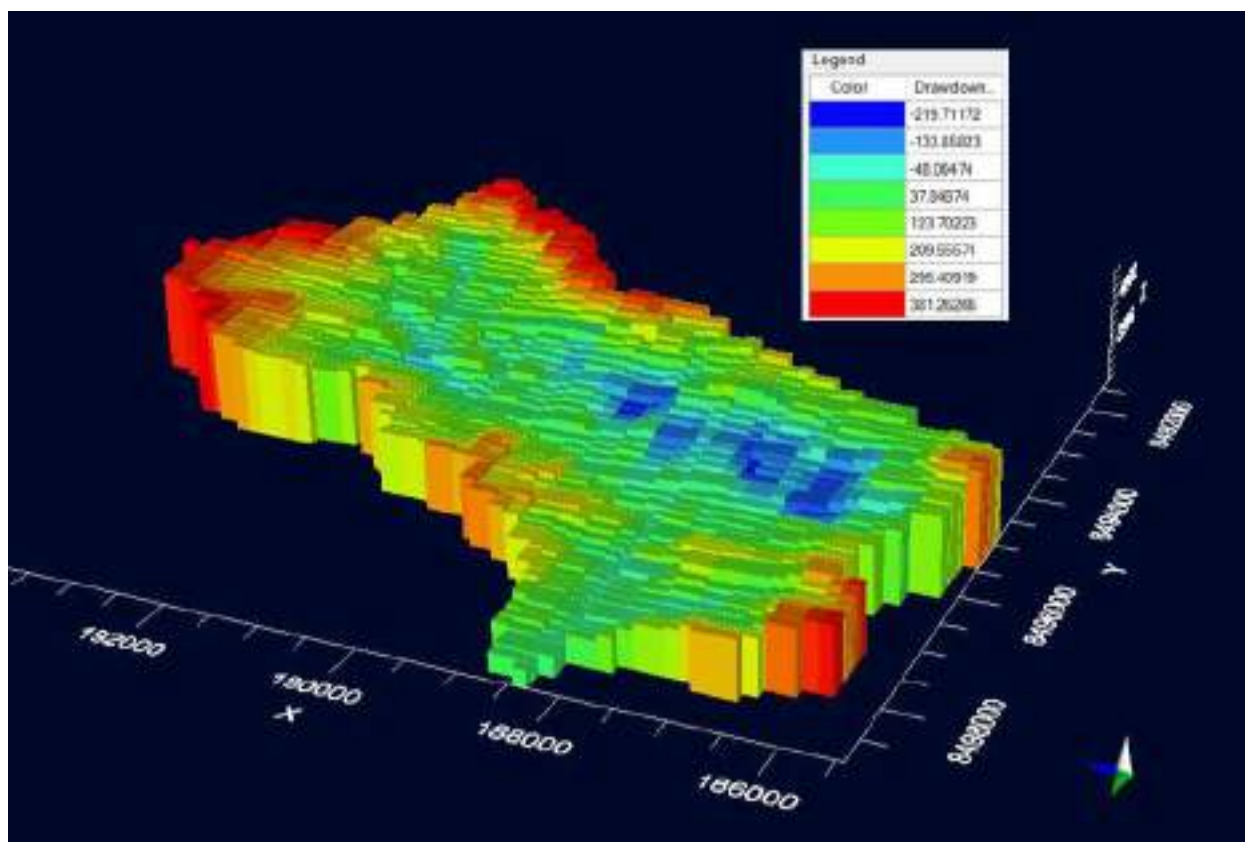


Figura 157

Vista 3D descenso de nivel de agua



7.2.11.1.3 Dirección de flujo por carga hidráulica (for heads).

La figura 157 muestra las curvas equipotenciales con valores entre 3270 y 4010 m, gran parte de la cuenca presenta una carga de 3873 precisamente en los afloramientos de manantes y a partir de aquí la carga va disminuyendo progresivamente.

Respecto a las direcciones de flujo subterráneo, hay una tendencia de movimiento hacia el desfogue de la cuenca, pero es importante mencionar que las direcciones en el lado suroeste (zona Quircas) y en el lado sureste (zonas de recarga donde se encuentran depósitos residuales), se orientan fuera de la cuenca.

El movimiento del flujo en la zona sur (Fm. Soncco II y Punacancha I) parece orientarse tanto fuera como dentro de la cuenca, aunque no está claro podría considerarse el movimiento de orientación variado a causa de la superficie topográfica y la ubicación de manantes.

Figura 158

Líneas de flujo subterráneo cuenca Huanacahuire

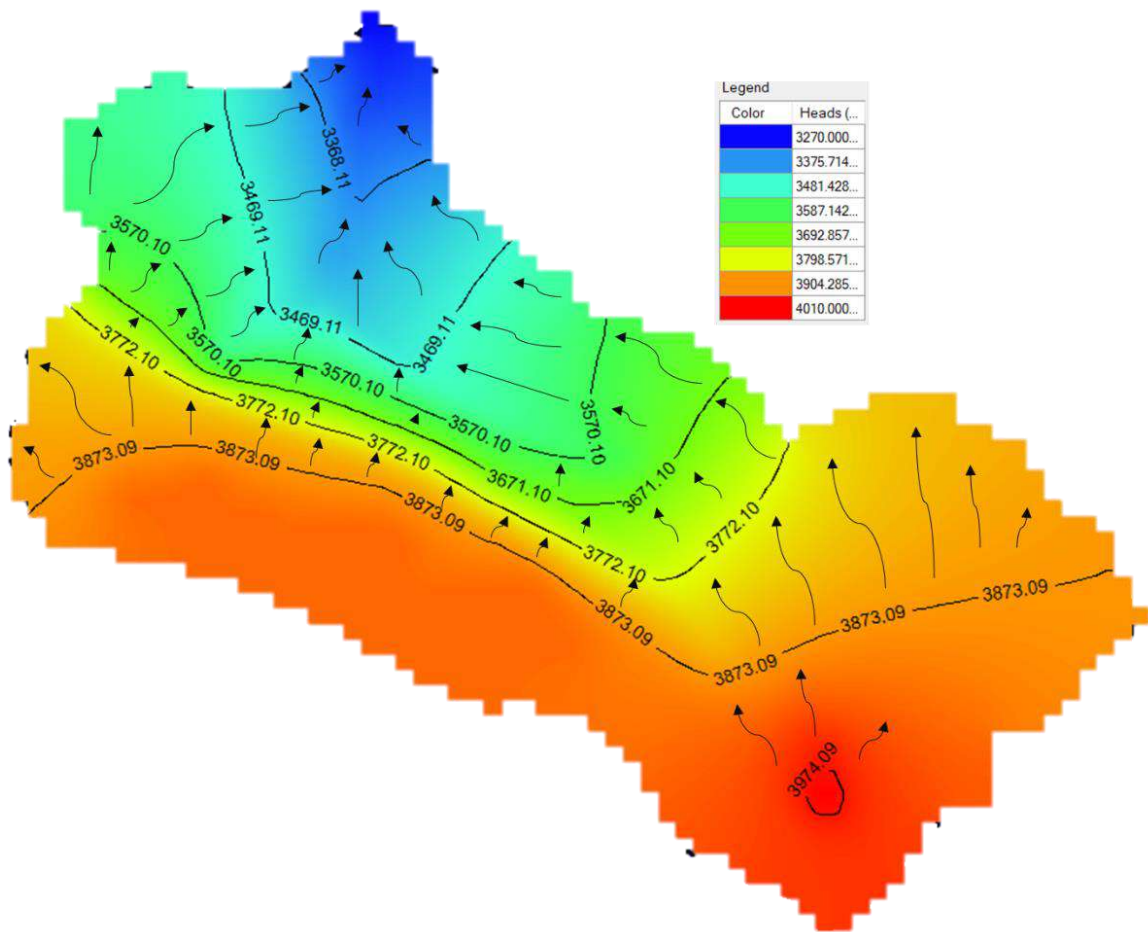
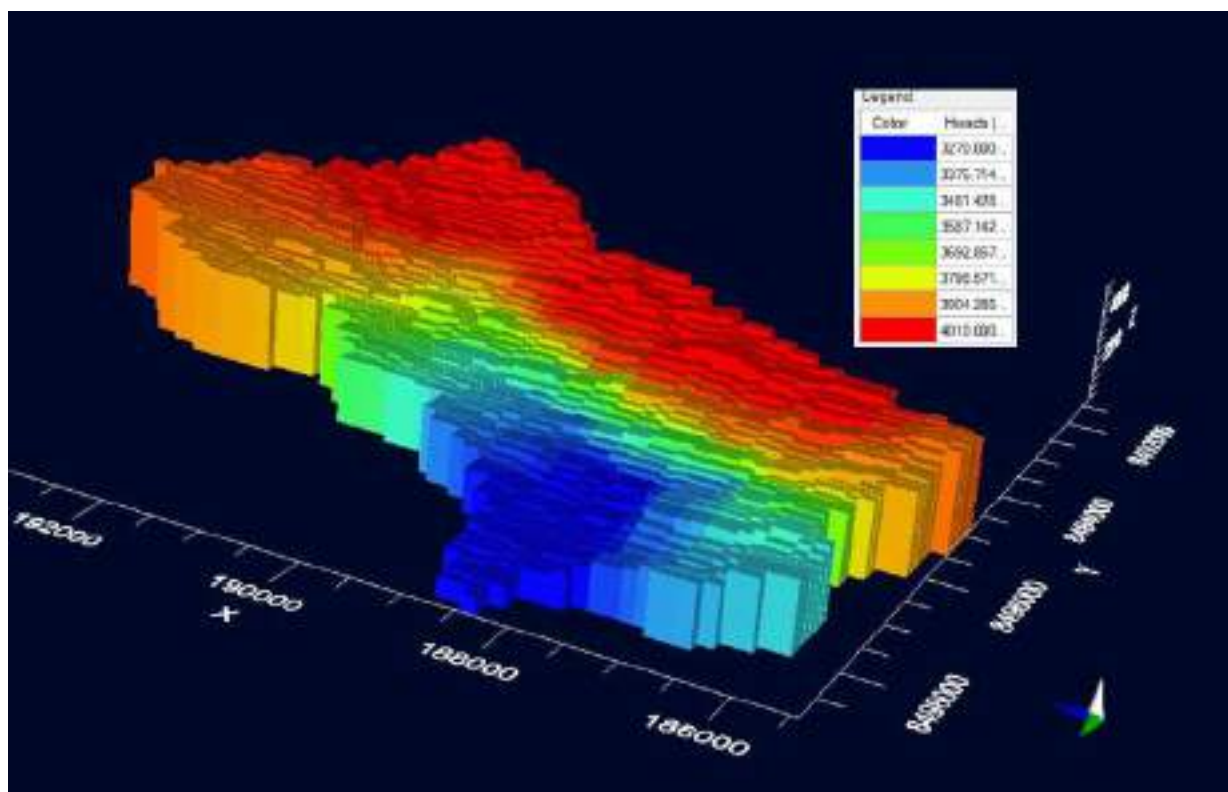


Figura 159

Vista 3D carga hidráulica cuenca Huanacahuire



7.2.11.1.4 Movimiento de partículas simuladas.

Se definieron partículas en todos los puntos de manantes, sin embargo, para la simulación solo se consideraron seis puntos de trayectoria (puntos amarillos) y tres puntos de destino (puntos rojos), un factor que impide la simulación de más puntos es la capacidad que tiene la máquina y es la razón por la cual se redujo el número de partículas.

Los resultados de simulación de partículas muestra que para las partículas de trayectoria (forward particles) ubicadas en la base y parte media de la cuenca son trayectorias largas que coinciden con la orientación tomada de las curvas equipotenciales, lo mismo sucede para las partículas de destino (backward particles) ubicadas en la Formación Kayra (zona 1), estas trayectorias largas pueden estar asociadas movimientos de flujo profundos, mientras que las otras

partículas ubicadas en la cabecera de cuenca muestran movimientos de distancias cortas asumiéndose como movimientos superficiales o casi superficiales.

Figura 160

Distribución de partículas definidas

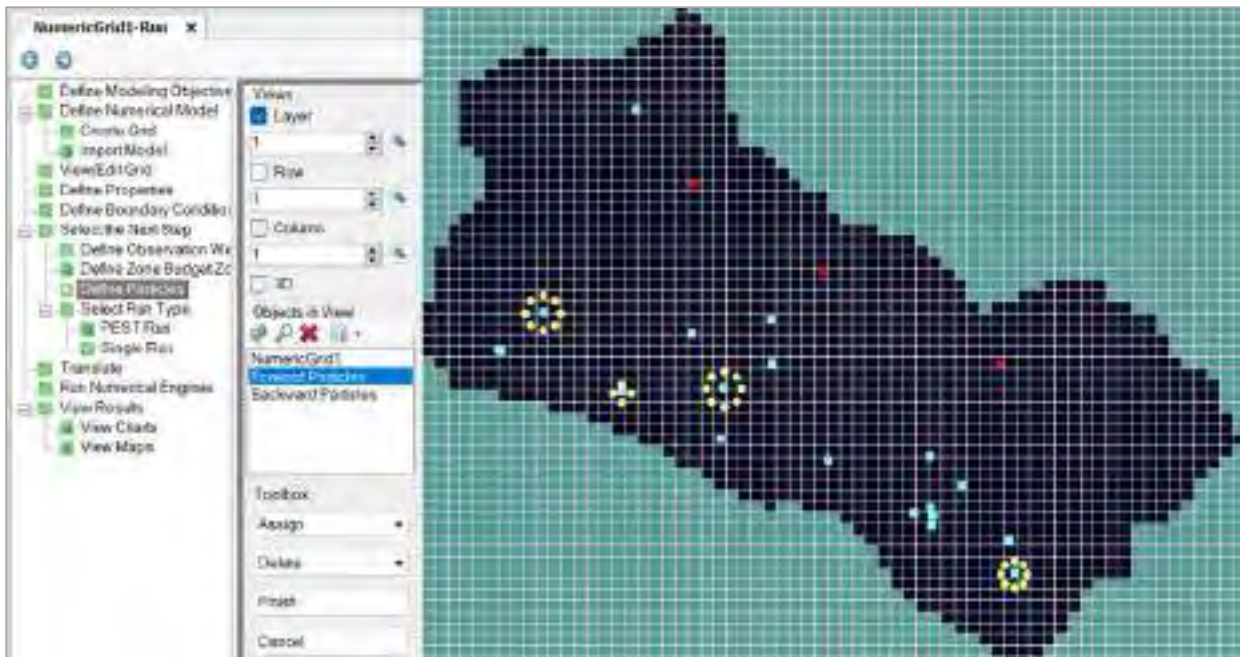
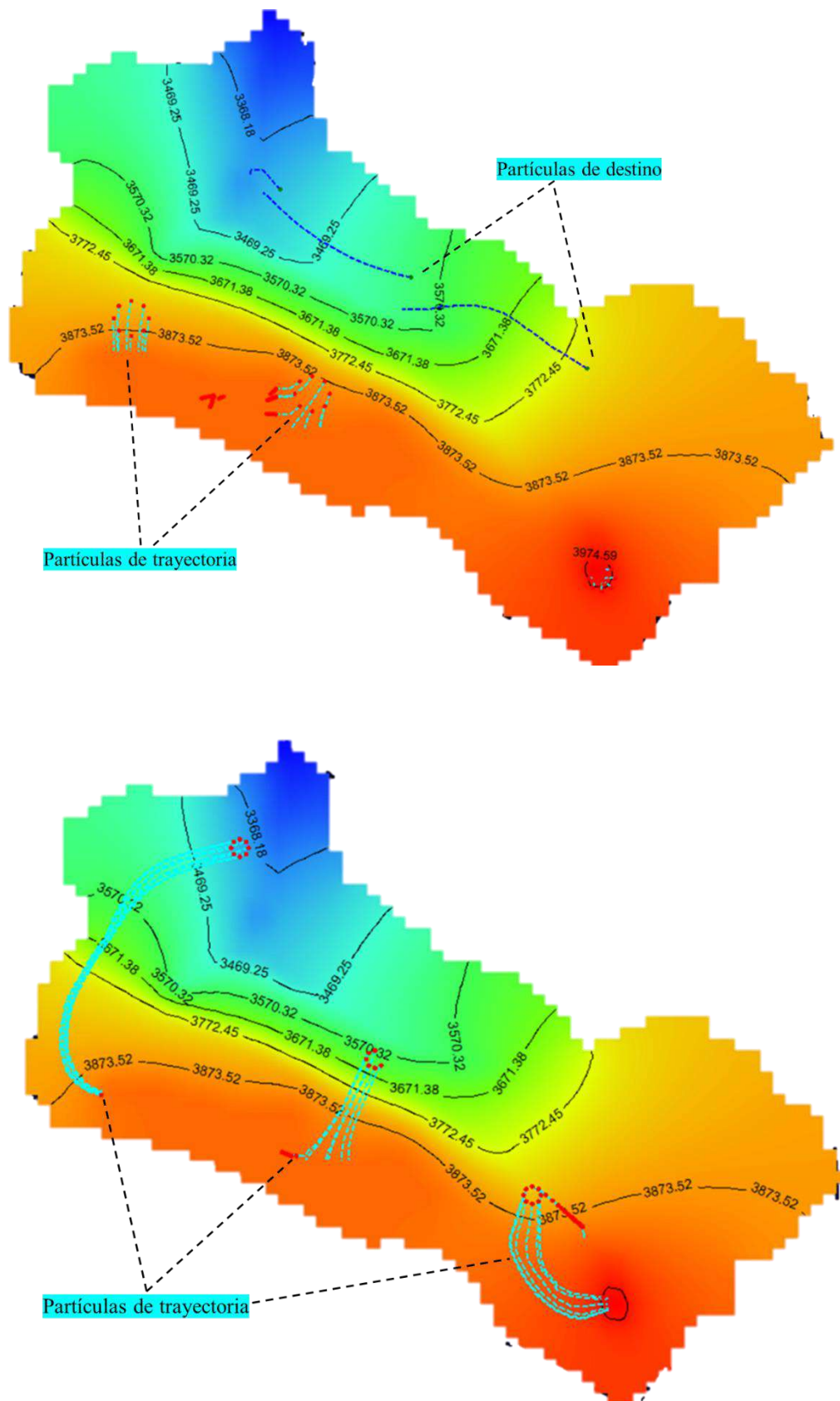


Figura 161

Movimiento de partículas destino y trayectoria



7.2.12 Análisis de incertidumbre cualitativo

La insuficiencia y carencia de la precisión de datos recolectados puede representar la incertidumbre que existe en el modelo numérico, lo que significa la existencia de vacíos y carencia en algunos resultados mostrados por el modelo numérico.

En el modelo no se consideró una condición de frontera de carga hidráulica en el borde noreste de la cuenca, lo que significa que el modelo realizó el cálculo de las cargas hidráulicas en esta zona en base a las cargas que se ingresaron por los manantes, aunque el resultado mediante la calibración es confiable en la zona noreste (sector Ccescce) solo se observa una curva equipotencial, resultado que está relacionado a la falta de datos en esta zona. Cabe la posibilidad de que si se ingresaran datos de cargas hidráulica en la zona mencionada tendríamos una variación en los resultados respecto a esta zona; el modelo podría mostrar tal vez las cargas hidráulicas en esta zona más detallada, lo que implica tener más curvas equipotenciales y una mejor visión en las líneas de flujo subterráneo. Sin embargo, lo mencionado anteriormente puede considerarse como algo indispensable que se debió realizar, pero ya que en esta zona de la cuenca no existe aprovechamiento del suelo como en agricultura, ganadería, etc. podría no ser tan necesaria para el modelo, pero si considerarla para casos en que el modelo tuviera que ser corregido.

Conclusiones

Conclusión general

La relación flujo subterráneo y sistema acuífero en la cuenca Huanacahuire está dada por la orientación de fracturas, la estratificación y las principales geoformas, que en conjunto indican la presencia de los manantes al sureste y suroeste de la cuenca; mientras que en el modelo hidrogeológico numérico esta relación está dada por el nivel de agua que muestran los manantes y las condiciones hidrogeológicas presentes, donde la simulación de partículas muestra movimientos de flujo con tendencia de trayectorias hacia el norte. Lo que conlleva a una idea de que el flujo subterráneo en el lado sureste y noroeste, en la formación kayra, puede aflorar en la unidad hidrográfica vecina.

Conclusiones específicas

a.1 La geomorfología local de la cuenca Huanacahuire cuyo origen principal es del tipo estructural presenta laderas, cimas, planicies, montañas, lomas, colinas, quebradas y cárcavas; de las cuales las geoformas ubicadas en los lineamientos en la parte sur de la cuenca y las geoformas con pendientes ligeramente inclinadas favorecen a las zonas de recarga.

a.2 La geología local de la cuenca está conformada por las formaciones: Kayra, Soncco I, Soncco II, Punacancha I, San Sebastian y los depósitos cuaternarios recientes como materiales aluviales, coluvio aluviales, residuales, deluviales y fluviales, donde la Formación Soncco I presenta el mayor grado de fracturamiento, seguida de la Formación Kayra en la cual se infiere una falla con dirección al norte que transporta el flujo de agua a la unidad hidrográfica vecina. Por otra parte, la Formación Soncco II presenta las condiciones más favorables para el movimiento de flujo de agua subterráneo considerando los parámetros de las fracturas como la apertura y espaciado; y esto se demuestra con la mayor presencia de manantes en esta zona.

b.1 La precipitación media anual calculada en la cuenca es 691.34 mm/año, una temperatura media mensual de 12.65 °C con temperaturas máximas y mínimas medias mensuales de 14.93 °C y 11.05 °C respectivamente; además la evapotranspiración real es de 536.23 mm/año, una escorrentía superficial e infiltración que representan el 10.9% y 11.53% del total de precipitación respectivamente, lo que en el balance general muestra un excedente hídrico de 155.11 mm en épocas de lluvia y un déficit de 118.97 mm en épocas de estiaje.

b.2 En la cuenca se obtuvo un total de 20 manantes captados inventariados con caudales que varían entre 0.22 y 3.9 lt/s, clasificándolos como manantes de baja a media productividad según Meizer.

Se determinaron las unidades hidrogeológicas y sus características: Acuífero Kayra, con una conductividad hidráulica de 1.45E-04 m/s y porosidad eficaz del 14% considerado de calidad media a buena; acuífero Soncco I, con una conductividad hidráulica de 7.92E-05 m/s y porosidad eficaz del 8% considerado de calidad baja o pobre; acuífero Soncco II, con una conductividad hidráulica de 3.09E-04 m/s y porosidad eficaz del 15% considerado de calidad media a buena; Acuífero Punacancha I, con una conductividad hidráulica de 1.52E-04 m/s y porosidad eficaz del 11% considerado de calidad media a buena; y los acuíferos cuaternarios con conductividades hidráulicas que varían entre 5.69E-05 - 2.76E-04 m/s y porosidades eficaces 15-25 %, con una calidad que varía de pobre a buena. Siendo el acuífero Soncco II considerado la unidad hidrogeológica de mejor calidad para almacenar y transportar agua.

c.1 El modelo hidrogeológico conceptual, construido a partir de 3 componentes: Geológico, hidrológico, e hidráulico; definió las unidades hidrogeológicas en base a sus propiedades hidráulicas y el resultado de la conceptualización muestra un sistema hidrogeológico físico que parte de la precipitación en las consideradas posibles zonas de recarga, los cuales generan los flujos superficiales y subterráneos; y sus respectivos movimientos direccionados por

las fracturas y los planos de estratificación donde, respecto a la estratificación, se observan movimientos dirigidos al suroeste y respecto a la fractura principal, movimientos hacia al sureste.

c.2 En el modelo hidrogeológico numérico de la cuenca, el proceso de calibración dio como resultado un RMS normalizado de 3.71% y un coeficiente de correlación normalizado de 0.99% que indica que la simulación se encuentra dentro de los límites aceptables.

La ejecución del modelo numérico quedó definida por la formulación de escenarios el cual fue generado en la clase de régimen permanente, esta ejecución mostró que orientación de flujo subterráneo definido por las líneas equipotenciales tienen una predominancia hacia el norte, con algunos cambios de direcciones que muestran de flujos fuera de la cuenca (sector Quircas, Callacancha y Ccesce).

Recomendaciones

1. Una mayor resolución de la topografía mostrará un mejor detalle en los resultados, por lo que se recomienda trabajar con superficies topográficas obtenidas de levantamientos topográficos donde la resolución podría ser $< 5 \times 5$ metros, considerando la extensión de la zona de estudio.

2. Para ampliar el ingreso de datos en las condiciones de borde iniciales se recomienda realizar sondeos eléctricos verticales o tomografías que muestren los niveles de agua, esto con el fin reducir la incertidumbre en el modelo y los resultados finales.

3. Se recomienda realizar el monitoreo de los manantes tanto en temporadas lluviosas y secas, con la finalidad de complementar la información de campo, que puede permitir que el modelo realice simulaciones en un régimen cambiado o distinto (régimen transitorio).

4. La interacción entre un modelo numérico y conceptual es indispensable, con lo que se recomienda el uso de softwares de modelos conceptuales que interactúen con modelos numéricos de manera directa, ya que disminuye el proceso de modelamiento y facilita la obtención de datos de ingreso.

5. Para comprobar las trayectorias y destinos de las partículas definidas en el modelo numérico, es recomendable el uso de métodos geoquímicos que muestre el movimiento de partículas mediante el estudio de composición de aguas.

Referencias bibliográficas

- Aguirre Pozo, B. M. A. (2018). Modelo hidrogeológico conceptual y numérico de la microcuenca Huancarqui, distrito Yaurisque, provincia de Paruro, departamento del Cusco. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Araujo, E. (2017). Métodos numéricos para simulación en la ingeniería. ESSS. <https://www.esss.co/es/blog/metodos-numericos-para-simulacion-en-la-ingenieria/>
- Arellano Gil, J., Llata Romero, R., & Carreon Méndez, M. A. (2002). Ejercicios de geología estructural (1ra ed.).
- Aybar Camacho, C., Lavado Casimiro, W., & Huerta Julca, A. (2017). Uso del producto grillado Pisco de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico (p. 22) [Nota técnica]. SENAMHI.
- Benavente Escóbar, C., Delgado Madera, F., Taipe Maquerhua, E., Audin, L., & Pari Pinto, W. (2013). Neotectónica y peligro sísmico en la región Cusco (Boletín No. 55; C-Geodinámica e Ingeniería Geológica, p. 245). INGEMMET.
- Carlotto Caillaux, Cárdenas Roque, J. D., & Carlier, G. (2011a). Geología del cuadrángulo de Cusco Hoja 28-s. INGEMMET.
- Carlotto Caillaux, V. S., Cárdenas Roque, J. D., & Carlier, G. (2011b). Geología del cuadrángulo de Cusco, hoja 28-s, escala 1:50,000—[Boletín A 138]. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/99>
- Donado, L. D. (2002). Aplicación de Visual Modflow en la simulación numérica de flujo de la zona de recarga del Acuífero Morroa (Departamentos de Sucre y Córdoba). 13. <https://doi.org/10.13140/2.1.5026.3362>
- Elorrieta Agramonte, J. I., Lastarria Rivera, M. E., & Ricalde Ríos, E. (2017). Plan de desarrollo concertado, municipalidad distrital de San Jerónimo, Cusco (p. 532).
- Flujo subterráneo. (2020). Hmn.Wiki. https://hmn.wiki/es/Subsurface_flow

- Fluquer Peña, L., & Boris Santos, R. (2018). Estudio hidrogeológico para determinar perímetros de protección de la zona de recarga de la galería filtrante de Pillao Matao.pdf (p. 89) [Técnico]. INGEMMET.
- Fossen, H. (2016). Geología estructural (Segunda).
- Giai, S. B. (2008). Introducción a la hidrología (Primera). Univ. Nacional de La Pampa, EdUNLPam.
- González de Vallejo, L. I. (2002). Ingeniería Geológica. Pearson education.
- Groundwater Flow & Contaminant Transport Modeling Software. (2022). Waterloo Hydrogeologic. <https://www.waterloohydrogeologic.com/products/visual-modflow-flex/>
- Gutiérrez L., J. A. (2004). Guía teórica de geomorfología.
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2011). Morfología de una cuenca (p. 12). Escuela técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural.
- Ingol Blanco, E., & Castañeda Zavaleta, M. (2017). Directrices para el modelamiento de aguas subterráneas en Perú. Mayo, 2017, 30.
- Kresic, N. (2007). Hidrogeología y modelado de aguas subterráneas (Segunda).
- López Geta, J. A., Fornés Azcoiti, J. M., Ramos González, G., & Villarroya Gil, F. (2009). Las aguas subterráneas, un recurso natural del subsuelo. Instituto Geológico y Minero de España [u.a.].
- Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P., & Castaño Castaño, S. (2006). Fundamentos de hidrogeología. Ediciones Mundi-Prensa.
- Medina Allcca, L., Nuñez Peredo, M., & Vilchez Mata, M. (2021). Peligros geológicos por movimientos en masa e inundación fluvial en la ciudad de Cusco (Boletín No. 80; C-Geodinámica e Ingeniería Geológica, p. 210). INGEMMET.

- Momiy Hada, F., Rojas Morote, A., Rodríguez González, A., & Mendez Vega, M. (2017). Nuevo régimen especial de monitoreo de gestión de uso de aguas subterráneas a cargo de las EPS (Primera).
- Ordoñez Gálvez, J. J. (2011a). Aguas subterráneas, acuíferos (Primera). Sociedad Geográfica de Lima.
- Ordoñez Gálvez, J. J. (2011b). Balance hídrico superficial (1ra ed.). Sociedad Geográfica de Lima.
- Pacheco, P. E., & Obando, W. (2016). Cálculo de la descarga media multianual por método indirecto zonas de escurrimiento. Aplicado a la cuenca del río San Juan-Chincha-Ica. 9.
- Saavedra, J. T., Rosales, L. A., & Saavedra, O. C. (2020). Modelación de aguas subterráneas del valle de Cochabamba utilizando Modflow. INVESTIGACION & DESARROLLO, 20(1), 81–88. <https://doi.org/10.23881/idupbo.020.1-6i>
- Santos, B., & Arriola, D. (2018). Análisis de estratigrafía secuencial de la Formación San Sebastian aplicado a la reconstrucción de la paleogeografía en la cuenca Plio-cuaternaria Cusco. Servicio Geológico Mexicano. (2017). Introducción Estratigrafía. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Estratigrafia/Introduccion-estratigrafia.html>
- Tarbuk, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física (Octava). Pearson-Prentice-Hall.
- Villón Béjar, M. (2006). Hidrología estadística.

Anexos

1. Dirección de fracturas principal y secundaria formaciones (Kayra, Soncco, Punacancha)

N°	Litología	dip_dir	Obs.	X	Y	N°	Litología	dip_dir	Obs.	X	Y
1	Fm. Kayra sur	-195	fractura primaria	190634	8496075	1	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	190868	8495422
2	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	190661	8495678	2	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	191169	8495674
3	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	191008	8495708	3	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	191520	8495498
4	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	191296	8495572	4	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	191129	8495280
5	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	191216	8495056	5	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	191348	8494926
6	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	191686	8495278	6	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	190772	8494817
7	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	191620	8494844	7	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	190944	8494361
8	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	190495	8494761	8	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	191470	8494397
9	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	191431	8494342	9	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	191771	8495029
10	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	192129	8494621	10	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192155	8495340
11	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	192384	8495252	11	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192171	8495055
12	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193039	8495434	12	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	191212	8494238
13	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	192817	8495213	13	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	191685	8494351
14	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193022	8494806	14	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	191427	8493891
15	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193403	8495074	15	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	191983	8493841
16	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193684	8494769	16	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	191893	8494582
17	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	191240	8494029	17	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192346	8494506
18	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	191835	8493877	18	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192723	8494506
19	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	192215	8494247	19	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192674	8494870
20	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	192794	8494379	20	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	193127	8495151
21	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	191901	8493402	21	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	193679	8494916
22	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	192346	8493533	22	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	193431	8494543
23	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	192655	8493640	23	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	193061	8494354
24	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193068	8493862	24	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192465	8494037
25	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193893	8494422	25	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192207	8493683
26	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193941	8493965	26	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	191711	8493517
27	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193286	8493652	27	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192022	8493236
28	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	194108	8494644	28	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192333	8493362
29	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	194401	8494283	29	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192799	8493521
30	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	194247	8493842	30	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	193130	8493722
31	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193747	8493560	31	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	193692	8494040
32	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193973	8493156	32	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	194093	8494539
33	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193508	8493267	33	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	194377	8493947
34	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	192814	8491949	34	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	193891	8493716
35	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	192810	8492354	35	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	194430	8493686
36	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	192592	8492731	36	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	193530	8493640
37	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193115	8493005	37	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	193560	8493087
38	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193354	8492711	38	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	193243	8492800
39	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	192790	8493417	39	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	193286	8492399
40	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	192282	8493235	40	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192912	8492476
41	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	193303	8494273	41	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192515	8492601
42	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	190941	8495250	42	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192621	8492221

“MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO A LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA HUANACAHUIRE, SAN JERÓNIMO, CUSCO 2023”

N°	Litología	dip_dir	Obs.	X	Y	N°	Litología	dip_dir	Obs.	X	Y
43	Fm. kayra sur	-195	fractura primaria	191004	8494507	43	Fm. Kayra sur	-110	fractura secundaria	192885	8492065
1	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	190575	8494758	1	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	190463	8494820
2	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	190321	8494875	2	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	190632	8495362
3	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	190459	8495288	3	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	190725	8495593
4	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	190279	8495547	4	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	190778	8495894
5	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	190374	8495822	5	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	191085	8495899
6	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	190515	8496187	6	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	190119	8495460
7	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	190250	8496272	7	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	190402	8495746
8	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	190163	8495975	8	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	190434	8496000
9	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	190012	8495830	9	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	189799	8495923
10	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	189996	8495526	10	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	189875	8496190
11	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	189573	8495748	11	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	189719	8496452
12	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	189644	8496195	12	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	189648	8496730
13	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	189948	8496446	13	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	189320	8496177
14	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	189343	8495872	14	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188775	8496151
15	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	189022	8496269	15	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188865	8496476
16	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	189501	8496658	16	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	189187	8496802
17	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	189096	8496653	17	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188738	8496714
18	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	188686	8496830	18	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188333	8496550
19	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	188491	8496486	19	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188468	8496900
20	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	188620	8496214	20	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	189015	8497135
21	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	189123	8497010	21	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188690	8497132
22	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	188723	8497327	22	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188796	8497490
23	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	188356	8497444	23	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188465	8497503
24	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	188739	8497716	24	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188584	8497789
25	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	188454	8497947	25	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188552	8498085
26	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	188644	8498103	26	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188862	8495573
27	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	187395	8498112	27	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188060	8495861
28	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	187209	8497731	28	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188663	8495857
29	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	187133	8497937	29	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188388	8495776
30	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	186879	8498005	30	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	188657	8495755
31	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	186855	8498211	31	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	187739	8498141
32	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	186478	8498064	32	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	187359	8497995
33	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	186197	8497731	33	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	186936	8498171
34	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	186506	8497691	34	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	186939	8497893
35	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	186109	8497576	35	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	186575	8497999
36	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	186407	8497159	36	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	186099	8497879
37	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	186804	8497104	37	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	186744	8497579
38	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	187232	8497227	38	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	186476	8497552
39	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	187657	8497437	39	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	186139	8497463
40	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	186666	8496954	40	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	186209	8497141
41	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	186299	8496637	41	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	186685	8497255
42	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	186722	8496637	42	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	187693	8497578
43	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	186785	8496409	43	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	187354	8497104
44	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	187000	8496382	44	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	187926	8496951
45	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	187053	8496667	45	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	187471	8496781
46	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	187443	8496528	46	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	187714	8496533

“MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO A LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA HUANACAHUIRE, SAN JERÓNIMO, CUSCO 2023”

N°	Litología	dip_dir	Obs.	X	Y	N°	Litología	dip_dir	Obs.	X	Y
47	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	187354	8496782	47	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	187042	8496800
48	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	187682	8496925	48	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	186442	8496834
49	Fm. kayra sur	30	fractura primaria	188009	8497044	49	Fm. Kayra norte	-205	fractura secundaria	186701	8496469
1	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	192609	8491740	1	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	192546	8491615
2	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	192354	8491836	2	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	192480	8491778
3	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	192374	8492075	3	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	192467	8492072
4	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	192083	8492154	4	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	192110	8492283
5	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	192096	8492415	5	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	191864	8492338
6	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	191861	8492402	6	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	191746	8492743
7	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	191888	8492633	7	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	191618	8493103
8	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	191620	8492723	8	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	191395	8493603
9	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	191752	8492961	9	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	191020	8493439
10	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	191587	8492967	10	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	191189	8493249
11	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	191600	8493186	11	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	191091	8493698
12	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	191292	8493047	12	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	190824	8493992
13	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	191087	8493305	13	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	190557	8493849
14	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	191283	8493629	14	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	190258	8494095
15	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	191339	8493358	15	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	190353	8494437
16	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	190869	8493692	16	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	189646	8494918
17	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	190942	8493917	17	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	189501	8495042
18	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	190519	8493907	18	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	189011	8495148
19	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	190535	8494274	19	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	188675	8495230
20	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	190271	8494525	20	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	188316	8495495
21	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	190191	8494158	21	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	187951	8495683
22	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	189444	8494767	22	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	187622	8495823
23	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	189430	8495061	23	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	187308	8495752
24	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	189725	8494843	24	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	187310	8495929
25	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	189123	8494975	25	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	186628	8496072
26	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	189080	8495236	26	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	186461	8496302
27	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	188891	8495164	27	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	186120	8496392
28	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	188779	8495375	28	Fm. Soncco I	10	fractura secundaria	185993	8496302
29	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	188623	8495269						
30	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	188541	8495491						
31	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	188342	8495564						
32	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	188289	8495388						
33	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	187969	8495587						
34	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	187731	8495812						
35	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	187764	8495650						
36	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	187165	8495799						
37	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	186828	8495980						
38	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	186725	8496189						
39	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	186533	8496086						
40	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	186368	8496351						
41	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	186143	8496258						
42	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	185971	8496473						
43	Fm. kayra sur	200	fractura primaria	185875	8496348						
1	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	192242	8491587	1	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	192076	8491578

“MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO A LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA HUANACAHUIRE, SAN JERÓNIMO, CUSCO 2023”

N°	Litología	dip_dir	Obs.	X	Y	N°	Litología	dip_dir	Obs.	X	Y
2	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	191885	8491571	2	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	192388	8491509
3	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	191885	8491915	3	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	192055	8491930
4	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	191420	8491952	4	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	191885	8491729
5	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	191266	8492140	5	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	191515	8492022
6	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	190927	8492386	6	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	191512	8492483
7	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	191327	8492669	7	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	191383	8492364
8	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	191081	8492897	8	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	191092	8492306
9	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	190795	8492807	9	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	191084	8492634
10	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	190483	8493042	10	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	190959	8493007
11	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	190634	8493399	11	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	190896	8493319
12	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	190425	8493381	12	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	190650	8492962
13	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	190404	8493794	13	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	190348	8493179
14	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	190126	8493669	14	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	190303	8493538
15	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	190189	8493312	15	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	190554	8493663
16	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	189607	8493323	16	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	189964	8493422
17	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	189790	8493664	17	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	190176	8493867
18	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	189933	8493955	18	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	189795	8494105
19	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	189692	8494191	19	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	189811	8493856
20	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	189414	8494103	20	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	189496	8493441
21	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	189557	8493841	21	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	189388	8493766
22	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	189173	8493651	22	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	189070	8493800
23	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	188977	8493942	23	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	189364	8494181
24	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	188933	8494188	24	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	189284	8494562
25	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	189679	8494548	25	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	189525	8494377
26	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	188559	8493997	26	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	188962	8494279
27	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	188337	8494339	27	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	188845	8494647
28	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	187893	8494312	28	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	188493	8494372
29	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	188612	8494897	29	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	188353	8494041
30	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	188946	8494754	30	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	188049	8494375
31	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	188467	8494709	31	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	188038	8494711
32	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	188133	8494638	32	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	188477	8494808
33	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	187975	8494923	33	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	188096	8494986
34	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	187845	8494669	34	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	188051	8495261
35	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	187644	8495146	35	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	187485	8494533
36	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	187319	8494579	36	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	187623	8495015
37	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	187636	8494873	37	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	187348	8495359
38	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	187247	8494918	38	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	187001	8495237
39	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	186903	8494968	39	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	187049	8494798
40	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	188218	8495191	40	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	186586	8494769
41	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	187930	8495257	41	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	186533	8495007
42	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	187726	8495476	42	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	186520	8495578
43	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	187244	8495394	43	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	185990	8494920
44	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	186781	8495738	44	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	185750	8495192
45	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	186705	8495543	45	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	185845	8495499
46	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	186406	8494868	46	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	186123	8495629
47	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	186075	8495019	47	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	186168	8496010
48	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	186350	8495413	48	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	185750	8496182

“MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO A LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA HUANACAHUIRE, SAN JERÓNIMO, CUSCO 2023”

N°	Litología	dip_dir	Obs.	X	Y	N°	Litología	dip_dir	Obs.	X	Y
49	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	186451	8495770	49	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	185765	8495824
50	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	185956	8496133	50	Fm. Soncco II	30	fractura secundaria	185514	8495002
51	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	185885	8495828						
52	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	185612	8495286						
53	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	185959	8495543						
54	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	185824	8495090						
55	Fm. kayra sur	70	fractura primaria	191498	8492359						
1	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	189412	8493225						
2	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	189108	8493323						
3	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	188809	8493574						
4	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	188434	8493688						
5	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	188135	8493844						
6	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	188008	8494029						
7	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	188862	8493460						
8	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	187722	8494082						
9	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	187354	8494347						
10	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	187092	8494405						
11	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	187150	8494249						
12	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	186600	8494410						
13	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	186830	8494540						
14	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	186436	8494397						
15	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	186050	8494715						
16	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	186071	8494590						
17	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	185687	8494791						
18	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	186470	8494606						
19	Fm. kayra sur	60	fractura primaria	185835	8494545						

2. Tabla de datos de precipitación mensual estación Kayra (1971-2021)

1971				1972				1973				1974				1975			
MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M
1	4.15806452	31	128.9	1	6.19677419	31	192.1	1	7.13870968	31	221.3	1	3.30645161	31	102.5	1	4.02258065	31	124.7
2	5.77137931	28	161.598621	2	2.30344828	28	64.4965517	2	4.31793103	28	120.902069	2	5.63206897	28	157.697931	2	4.67896552	28	131.011034
3	2.69677419	31	83.6	3	1.84516129	31	57.2	3	3.21290323	31	99.6	3	3.91935484	31	121.5	3	1.78387097	31	55.3
4	1.33333333	30	40	4	0.99	30	29.7	4	2.50666667	30	75.2	4	1.15	30	34.5	4	2.22666667	30	66.8
5	0.0483871	31	1.5	5	0.10967742	31	3.4	5	0.4516129	31	14	5	0.11612903	31	3.6	5	0.72580645	31	22.5
6	0.00333333	30	0.1	6	0	30	0	6	0	30	0	6	0.27333333	30	8.2	6	0.02333333	30	0.7
7	0	31	0	7	0.20967742	31	6.5	7	0.29354839	31	9.1	7	0.03225806	31	1	7	0.00967742	31	0.3
8	0.18387097	31	5.7	8	0.88064516	31	27.3	8	0.38064516	31	11.8	8	1.11612903	31	34.6	8	0.01935484	31	0.6
9	0.11666667	30	3.5	9	0.40666667	30	12.2	9	0.48333333	30	14.5	9	0.19666667	30	5.9	9	1.70333333	30	51.1
10	1.79677419	31	55.7	10	0.25483871	31	7.9	10	2.1	31	65.1	10	1.39677419	31	43.3	10	1.53225806	31	47.5
11	1.7	30	51	11	1.67333333	30	50.2	11	2.96	30	88.8	11	2.03	30	60.9	11	1.7	30	51
12	4.11290323	31	127.5	12	3.23225806	31	100.2	12	3.11290323	31	96.5	12	3.48387097	31	108	12	5.48709677	31	170.1
1976				1977				1978				1979				1980			
MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M
1	3.85806452	31	119.6	1	3.76451613	31	116.7	1	5.65806452	31	175.4	1	3.26129032	31	101.1	1	3.42580645	31	106.2
2	2.86551724	28	80.2344828	2	4.38586207	28	122.804138	2	3.78931034	28	106.10069	2	4.7	28	131.6	2	4.35862069	28	122.041379
3	3.97096774	31	123.1	3	2.23548387	31	69.3	3	2.85483871	31	88.5	3	3.50967742	31	108.8	3	4.35483871	31	135
4	1.43	30	42.9	4	1.58666667	30	47.6	4	1.62333333	30	48.7	4	1.56	30	46.8	4	0.77333333	30	23.2
5	0.41935484	31	13	5	0.25483871	31	7.9	5	0.36774194	31	11.4	5	0.2	31	6.2	5	0.11935484	31	3.7
6	0.29	30	8.7	6	0	30	0	6	0	30	0	6	0	30	0	6	0	30	0
7	0.02258065	31	0.7	7	0.14193548	31	4.4	7	0.10967742	31	3.4	7	0.02903226	31	0.9	7	0.17096774	31	5.3
8	0.08064516	31	2.5	8	0	31	0	8	0	31	0	8	0.26129032	31	8.1	8	0.03225806	31	1
9	0.89333333	30	26.8	9	0.99666667	30	29.9	9	0.45666667	30	13.7	9	0.38333333	30	11.5	9	0.42	30	12.6
10	0.81612903	31	25.3	10	2.09677419	31	65	10	0.39677419	31	12.3	10	0.59354839	31	18.4	10	2.02903226	31	62.9
11	1.59333333	30	47.8	11	2.38333333	30	71.5	11	2.89	30	86.7	11	2.85333333	30	85.6	11	2.00666667	30	60.2
12	2.15483871	31	66.8	12	2.51612903	31	78	12	3.80322581	31	117.9	12	2.63870968	31	81.8	12	2.68064516	31	83.1
1981				1982				1983				1984				1985			
MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M
1	7.27096774	31	225.4	1	5.77096774	31	178.9	1	4.14193548	31	128.4	1	6.40645161	31	198.6	1	4.16451613	31	129.1
2	2.88586207	28	80.8041379	2	4.12517241	28	115.504828	2	3	28	84	2	4.91034483	28	137.489655	2	4.26310345	28	119.366897
3	4.01290323	31	124.4	3	4.61612903	31	143.1	3	1.75806452	31	54.5	3	2.29032258	31	71	3	2.39354839	31	74.2
4	1.89666667	30	56.9	4	1.96	30	58.8	4	0.99333333	30	29.8	4	2.76	30	82.8	4	1.10666667	30	33.2
5	0.05806452	31	1.8	5	0	31	0	5	0.10967742	31	3.4	5	0	31	0	5	0.50322581	31	15.6
6	0.13	30	3.9	6	0.30666667	30	9.2	6	0.20666667	30	6.2	6	0.06666667	30	2	6	0.38666667	30	11.6
7	0	31	0	7	0.10967742	31	3.4	7	0.01612903	31	0.5	7	0.04193548	31	1.3	7	0.02903226	31	0.9
8	0.31612903	31	9.8	8	0.15806452	31	4.9	8	0.02903226	31	0.9	8	0.36774194	31	11.4	8	0	31	0
9	1.53	30	45.9	9	0.46666667	30	14	9	0.18333333	30	5.5	9	0.14	30	4.2	9	1.44333333	30	43.3
10	3.51290323	31	108.9	10	1.22258065	31	37.9	10	0.83870968	31	26	10	3.69677419	31	114.6	10	2.00322581	31	62.1
11	4.02666667	30	120.8	11	4.08333333	30	122.5	11	1.47666667	30	44.3	11	2.28333333	30	68.5	11	3.88333333	30	116.5
12	4.65483871	31	144.3	12	3.18064516	31	98.6	12	3.23225806	31	100.2	12	3.31612903	31	102.8	12	4.08	31	126.4

“MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO A LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA HUANACAHUIRE, SAN JERÓNIMO, CUSCO 2023”

1986				1987				1988				1989				1990			
MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M
1	2.46451613	31	76.4	1	7.23548387	31	224.3	1	5.28387097	31	163.8	1	4.88387097	31	151.4	1	5.08387097	31	157.6
2	3.29275862	28	92.1972414	2	3.13931034	28	87.9006897	2	2.90689655	28	81.3931034	2	4.52862069	28	126.801379	2	3.23275862	28	90.5172414
3	4.05483871	31	125.7	3	1.56774194	31	48.6	3	5.37096774	31	166.5	3	3.8483871	31	119.3	3	1.94193548	31	60.2
4	2.18333333	30	65.5	4	0.43666667	30	13.1	4	3.63	30	108.9	4	1.28666667	30	38.6	4	1.58	30	47.4
5	0.2	31	6.2	5	0.06774194	31	2.1	5	0.1483871	31	4.6	5	0.20645161	31	6.4	5	0.24193548	31	7.5
6	0	30	0	6	0.04333333	30	1.3	6	0.30333333	30	0	6	0.30333333	30	9.1	6	1.06	30	31.8
7	0.05806452	31	1.8	7	0.29677419	31	9.2	7	0	31	0	7	0	31	0	7	0	31	0
8	0.13548387	31	4.2	8	0	31	0	8	0	31	0	8	0.19677419	31	6.1	8	0.18709677	31	5.8
9	0.25	30	7.5	9	0.27333333	30	8.2	9	0.33	30	9.9	9	1.02333333	30	30.7	9	0.44333333	30	13.3
10	0.55806452	31	17.3	10	0.85483871	31	26.5	10	1.16774194	31	36.2	10	1.27290323	31	39.46	10	2.37741935	31	73.7
11	2.32	30	69.6	11	3.39333333	30	101.8	11	1.58666667	30	47.6	11	2.02333333	30	60.7	11	2.89666667	30	86.9
12	3.31290323	31	102.7	12	3.47096774	31	107.6	12	3.34516129	31	103.7	12	2.85483871	31	88.5	12	2.14516129	31	66.5
1991				1992				1993				1994				1995			
MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M
1	3.1483871	31	97.6	1	3.68064516	31	114.1	1	6.66774194	31	206.7	1	5.70967742	31	177	1	3.93548387	31	122
2	5.85034483	28	163.809655	2	3.53103448	28	98.8689655	2	3.94655172	28	110.503448	2	5.86103448	28	164.108966	2	3.3848207	28	94.8041379
3	3.39354839	31	105.2	3	3.35483871	31	104	3	2.44516129	31	75.8	3	5.60967742	31	173.9	3	3.07419355	31	95.3
4	1.50333333	30	45.1	4	0.49666667	30	14.9	4	0.62666667	30	18.8	4	1.51666667	30	45.5	4	0.59333333	30	17.8
5	0.35483871	31	11	5	0	31	0	5	0.02903226	31	0.9	5	0.38064516	31	11.8	5	0	31	0
6	0.17	30	5.1	6	0.64666667	30	19.4	6	0	30	0	6	0	30	0	6	0	30	0
7	0.0483871	31	1.5	7	0	31	0	7	0.08709677	31	2.7	7	0	31	0	7	0.01935484	31	0.6
8	0	31	0	8	0.69032258	31	21.4	8	0.22258065	31	6.9	8	0	31	0	8	0.03870968	31	1.2
9	0.71333333	30	21.4	9	0.26666667	30	8	9	0.6	30	18	9	0.85666667	30	25.7	9	0.96	30	28.8
10	1.59032258	31	49.3	10	1.63548387	31	50.7	10	1.49032258	31	46.2	10	1.29677419	31	40.2	10	0.86129032	31	26.7
11	2.78666667	30	83.6	11	3.91333333	30	117.4	11	3.73	30	111.9	11	1.35	30	40.5	11	2.34	30	70.2
12	3.19354839	31	99	12	1.83870968	31	57	12	6.5	31	201.5	12	3.86774194	31	119.9	12	3.30967742	31	102.6
1996				1997				1998				1999				2000			
MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M
1	4.25483871	31	131.9	1	3.97741935	31	123.3	1	3.7516129	31	116.3	1	2.88064516	31	89.3	1	6.36774194	31	197.4
2	3.37931034	28	94.6206897	2	4.56068966	28	127.69931	2	5.58482759	28	156.375172	2	3.29689655	28	92.3131034	2	4.73448276	28	132.565517
3	2.27419355	31	70.5	3	3.38064516	31	104.8	3	0.72903226	31	22.6	3	2.96774194	31	92	3	3.85483871	31	119.5
4	1.07666667	30	32.3	4	1.03333333	30	31	4	1.03333333	30	31	4	1.42666667	30	42.8	4	0.36333333	30	10.9
5	0.35483871	31	11	5	0.15483871	31	4.8	5	0.0516129	31	1.6	5	0.04193548	31	1.3	5	0.08387097	31	2.6
6	0	30	0	6	0	30	0	6	0.06333333	30	1.9	6	0.11333333	30	3.4	6	0.19333333	30	5.8
7	0	31	0	7	0	31	0	7	0	31	0	7	0.03225806	31	1	7	0.08709677	31	2.7
8	0.20322581	31	6.3	8	0.22903226	31	7.1	8	0.0516129	31	1.6	8	0	31	0	8	0.14516129	31	4.5
9	0.67666667	30	20.3	9	0.41	30	12.3	9	0.14333333	30	4.3	9	1.43666667	30	43.1	9	0.35666667	30	10.7
10	0	31	0	10	1.43225806	31	44.4	10	1.60645161	31	49.8	10	0.60645161	31	18.8	10	1.59032258	31	49.3
11	0	30	0	11	6.71666667	30	201.5	11	1.65666667	30	49.7	11	1.32333333	30	39.7	11	0.97666667	30	29.3
12	0	31	0	12	4.78709677	31	148.4	12	1.9	31	58.9	12	3.85483871	31	119.5	12	2.64516129	31	82


“MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO A LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA HUANACAHUIRE, SAN JERÓNIMO, CUSCO 2023”


2001				2002				2003				2004				2005			
MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M
1	7.51612903	31	233	1	4.33870968	31	134.5	1	5.28709677	31	163.9	1	5.6032581	31	173.7	1	4.69354839	31	145.5
2	6.18206897	28	173.097931	2	6.60137931	28	184.838621	2	4.85206897	28	135.857931	2	4.33793103	28	121.462069	2	0	28	0
3	4.43225806	31	137.4	3	3.63548387	31	112.7	3	4.60967742	31	142.9	3	2.14516129	31	66.5	3	3.87741935	31	120.2
4	1.21333333	30	36.4	4	0.72	30	21.6	4	1.88333333	30	56.5	4	0.7	30	21	4	1.10333333	30	33.1
5	0.37096774	31	11.5	5	0.52258065	31	16.2	5	0.06451613	31	2	5	0.07741935	31	2.4	5	0.10322581	31	3.2
6	0	30	0	6	0.08333333	30	2.5	6	0.21333333	30	6.4	6	0.68333333	30	20.5	6	0.01333333	30	0.4
7	0.56129032	31	17.4	7	0.87419355	31	27.1	7	0	31	0	7	0.5483871	31	17	7	0.03870968	31	1.2
8	0.32903226	31	10.2	8	0.11935484	31	3.7	8	0.68709677	31	21.3	8	0.29032258	31	9	8	0.12903226	31	4
9	0.68666667	30	20.6	9	0.34333333	30	10.3	9	0.12333333	30	3.7	9	0.72333333	30	21.7	9	0.15	30	4.5
10	1.23548387	31	38.3	10	2.53870968	31	78.7	10	1.11612903	31	34.6	10	0.82580645	31	25.6	10	1.26129032	31	39.1
11	1.22666667	30	96.8	11	3.26	30	97.8	11	0.77	30	23.1	11	2.03	30	60.9	11	1.97666667	30	59.3
12	2.88387097	31	89.4	12	4.27096774	31	132.4	12	3.99354839	31	123.8	12	2.83548387	31	87.9	12	3.30645161	31	102.5
2006				2007				2008				2009				2010			
MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M
1	6.56129032	31	203.4	1	4.54193548	31	140.8	1	3.50967742	31	108.8	1	3.62903226	31	112.5	1	8.66129032	31	268.5
2	5.56551724	28	155.834483	2	2.18275862	28	61.1172414	2	3.76551724	28	105.434483	2	3.87241379	28	108.427586	2	6.01724138	28	168.482759
3	4.70645161	31	145.9	3	3.46129032	31	107.3	3	2.07741935	31	64.4	3	2.5516129	31	79.1	3	4.16774194	31	129.2
4	1.36333333	30	40.9	4	3.12	30	93.6	4	0.25333333	30	7.6	4	0.4	30	21.3	4	0.55333333	30	16.6
5	0.00645161	31	0.2	5	0.18709677	31	5.8	5	0.28064516	31	8.7	5	0.17096774	31	5.3	5	0.04193548	31	1.3
6	0.16333333	30	4.9	6	0	30	0	6	0.07	30	2.1	6	0	30	0	6	0	30	0
7	0	31	0	7	0.12903226	31	4	7	0	31	0	7	0.10645161	31	3.3	7	0.04516129	31	1.4
8	0.33870968	31	10.5	8	0	31	0	8	0.12580645	31	3.9	8	0.02258065	31	0.7	8	0.1516129	31	4.7
9	0.25862069	30	7.75862069	9	0.03333333	30	1	9	0.46333333	30	13.9	9	0.50333333	30	15.1	9	0.27333333	30	8.2
10	2.33870968	31	72.5	10	1.59354839	31	49.4	10	1.66774194	31	51.7	10	0.26774194	31	8.3	10	2.25806452	31	70
11	2.26	30	67.8	11	2.46666667	30	74	11	3.00666667	30	90.2	11	2.95666667	30	88.7	11	1.33333333	30	40
12	4.7483871	31	147.2	12	2.8516129	31	88.4	12	4.15548387	31	128.82	12	2.67419355	31	82.9	12	5.61612903	31	174.1
2011				2012				2013				2014				2015			
MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M
1	3.33548387	31	103.4	1	2.27419355	31	70.5	1	6.11612903	31	189.6	1	5.22258065	31	161.9	1	5.47741935	31	169.8
2	6.67931034	28	187.02069	2	5.44482759	28	152.455172	2	4.90344828	28	137.296552	2	4.17241379	28	116.827586	2	5.23103448	28	146.468956
3	4.25483871	31	131.9	3	1.34516129	31	41.7	3	2.43548387	31	75.5	3	1.29032258	31	40	3	2.1516129	31	66.7
4	2.25333333	30	67.9	4	1.60333333	30	48.1	4	0.50333333	30	15.1	4	1.16666667	30	35	4	2.32666667	30	69.8
5	0.12580645	31	3.9	5	0.14516129	31	4.5	5	0.81612903	31	25.3	5	0.32580645	31	10.1	5	0.6	31	18.6
6	0.10666667	30	3.2	6	0.04	30	1.2	6	0.20333333	30	6.1	6	0	30	0	6	0.13	30	3.9
7	0.11935484	31	3.7	7	0	31	0	7	0.06451613	31	2	7	0.10322581	31	3.2	7	0.33225806	31	10.3
8	0	31	0	8	0	31	0	8	0.4	31	12.4	8	0.18709677	31	5.8	8	0.1483871	31	4.6
9	1.29666667	30	38.9	9	0.61333333	30	18.4	9	0.21	30	6.3	9	0.19333333	30	5.8	9	0.53666667	30	16.1
10	1.23225806	31	38.2	10	0.62903226	31	19.5	10	3.38709677	31	105	10	0	31	0	10	0.61612903	31	19.1
11	2.00666667	30	60.2	11	4.60666667	30	138.2	11	2.86666667	30	86	11	1.02	30	30.6	11	1.62	30	48.6
12	3.55483871	31	110.2	12	5.79032258	31	179.5	12	5.14193548	31	159.4	12	5.03225806	31	156	12	3.64516129	31	113
2016				2017				2018				2019				2020			
MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M	MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M
1	3.35483871	31	104	1	3.58709677	31	111.2	1	4.99225806	31	154.76	1	4.12258065	31	127.8	1	4.08709677	31	126.7
2	5.27931034	28	147.82069	2	4.36206897	28	122.137931	2	5.80344828	28	162.496552	2	4.1862069	28	117.213793	2	5.39310345	28	151.006897
3	1.7516129	31	54.3	3	3.96129032	31	122.8	3	4.7183871	31	146.27	3	5.52903226	31	171.4	3	4.45741935	31	138.18
4	0.81333333	30	24.4	4	1.58333333	30	47.5	4	0.67666667	30	20.3	4	1	30	30	4	0	30	0
5	0.09677419	31	3	5	0.36129032	31	11.2	5	0.00645161	31	0.2	5	0.90967742	31	28.2	5	0	31	0
6	0	30	0	6	0.19666667	30	5.9	6	0.53333333	30	16.2	6	0.05	30	1.5	6	0	30	0
7	0.14516129	31	4.5	7	0	31	0	7	0.37419355	31	11.6	7	0.11935484	31	3.7	7	0.26451613	31	8.2
8	0.01612903	31	0.5	8	0.27096774	31	8.4	8	0.22903226	31	7.1	8	0	31	0	8	0.03225806	31	1
9	0.23333333	30	7	9	0.63333333	30	19	9	0.30333333	30	9.1	9	0.32666667	30	9.8	9	0.18666667	30	5.6
10	2.5651613	31	79.5	10	1.08709677	31	33.7	10	2.73612903	31	84.82	10	2.65806452	31	82.4	10	0.24193548	31	7.5
11	0.93333333	30	28	11	2.04666667	30	61.4	11	2.69166667	30	80.75	11	3.72333333	30	111.7	11	1.55333333	30	46.6
12	2.89677419	31	89.8	12	3.28064516	31	101.7	12	3.06451613	31	95	12	4.98064516	31	154.4	12	4.45806452	31	138.2
2021																			
MES	pp mm/D	DIA POR MES	PP mm/M																
1	4.98064516	31	154.4																
2	4.53448276	28	126.965517																
3	2.44193548	31	75.7																
4	4.90333333	30	147.1																
5	0.28064516	31	8.7																
6	0.35666667	30	10.7																
7	0	31	0																
8	0.13870968	31	4.3																
9	0.05	30	1.5																
10	1.48709677	31	46.1																
11	3.38666667	30	101.6																
12	3.42258065	31	106.1																

3. Precipitación anual calculada con datos faltantes.

N°	AÑO/MES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	pp anual TOT	promedio
1	1971	128.9	161.6	83.6	40.0	1.5	0.1	0.0	5.7	3.5	55.7	51.0	127.5	659.098621	54.9248851
2	1972	192.1	64.5	57.2	29.7	3.4	0.0	6.5	27.3	12.2	7.9	50.2	100.2	551.196552	45.933046
3	1973	221.3	120.9	99.6	75.2	14.0	0.0	9.1	11.8	14.5	65.1	88.8	96.5	816.802069	68.0668391
4	1974	102.5	157.7	121.5	34.5	3.6	8.2	1.0	34.6	5.9	43.3	60.9	108.0	681.697931	56.8081609
5	1975	124.7	131.0	55.3	66.8	22.5	0.7	0.3	0.6	51.1	47.5	51.0	170.1	721.611034	60.1342529
6	1976	119.6	80.2	123.1	42.9	13.0	8.7	0.7	2.5	26.8	25.3	47.8	66.8	557.434483	46.4528736
7	1977	116.7	122.8	69.3	47.6	7.9	0.0	4.4	0.0	29.9	65.0	71.5	78.0	613.104138	51.0920115
8	1978	175.4	106.1	88.5	48.7	11.4	0.0	3.4	0.0	13.7	12.3	86.7	117.9	664.10069	55.3417241
9	1979	101.1	131.6	108.8	46.8	6.2	0.0	0.9	8.1	11.5	18.4	85.6	81.8	600.8	50.0666667
10	1980	106.2	122.0	135.0	23.2	3.7	0.0	5.3	1.0	12.6	62.9	60.2	83.1	615.241379	51.2701149
11	1981	225.4	80.8	124.4	56.9	1.8	3.9	0.0	9.8	45.9	108.9	120.8	144.3	922.904138	76.9086782
12	1982	178.9	115.5	143.1	58.8	0.0	9.2	3.4	4.9	14.0	37.9	122.5	98.6	786.804828	65.567069
13	1983	128.4	84.0	54.5	29.8	3.4	6.2	0.5	0.9	5.5	26.0	44.3	100.2	483.7	40.3083333
14	1984	198.6	137.5	71.0	82.8	0.0	2.0	1.3	11.4	4.2	114.6	68.5	102.8	794.689655	66.2241379
15	1985	129.1	119.4	74.2	33.2	15.6	11.6	0.9	0.0	43.3	62.1	116.5	126.5	732.346897	61.028908
16	1986		92.2	125.7	65.5	6.2	0.0	1.8	4.2	7.5	17.3	69.6	102.7	492.697241	44.7906583
17	1987	224.3	87.9	48.6	13.1	2.1	1.3	9.2	0.0	8.2	26.5	101.8	107.6	630.60069	52.5500575
18	1988	163.8	81.4	166.5	108.9	4.6	0.0	0.0	0.0	9.9	36.2	47.6	103.7	722.593103	60.216092
19	1989	151.4	126.8	119.3	38.6	6.4	9.1	0.0	6.1	30.7	39.5	60.7	88.5	677.061379	56.4217816
20	1990	157.6	90.5	60.2	47.4	7.5	31.8	0.0	5.8	13.3	73.7	86.9	66.5	641.217241	53.4347701
21	1991	97.6	163.8	105.2	45.1	11.0	5.1	1.5	0.0	21.4	49.3	83.6	99.0	682.609655	56.8841379
22	1992	114.1	98.9	104.0	14.9	0.0	19.4	0.0	21.4	8.0	50.7	117.4	57.0	605.768966	50.4807471
23	1993	206.7	110.5	75.8	18.8	0.9	0.0	2.7	6.9	18.0	46.2	111.9	201.5	799.903448	66.6586207
24	1994	177	164.1	173.9	45.5	11.8	0.0	0.0	0.0	25.7	40.2	40.5	119.9	798.608966	66.5507471
25	1995	122	94.8	95.3	17.8	0.0	0.0	0.6	1.2	28.8	26.7	70.2	102.6	560.004138	46.6670115
26	1996	131.9	94.6	70.5	32.3	11.0	0.0	0.0	6.3	20.3				366.92069	40.7689655
27	1997	123.3	127.7	104.8	31.0	4.8	0.0	0.0	7.1	12.3	44.4	201.5	148.4	805.29931	67.1082759
28	1998	116.3	156.4	22.6	31.0	1.6	1.9	0.0	1.6	4.3	49.8	49.7	58.9	494.075172	41.172931
29	1999	89.3	92.3	92.0	42.8	1.3	3.4	1.0	0.0	43.1	18.8	39.7	119.5	543.213103	45.2677586
30	2000	197.4	132.6	119.5	10.9	2.6	5.8	2.7	4.5	10.7	49.3	29.3	82.0	647.265517	53.9387931
31	2001	233	173.1	137.4	36.4	11.5	0.0	17.4	10.2	20.6	38.3	96.8	89.4	864.097931	72.0081609
32	2002	134.5	184.8	112.7	21.6	16.2	2.5	27.1	3.7	10.3	78.7	97.8	132.4	822.338621	68.5282184
33	2003	163.9	135.9	142.9	56.5	2.0	6.4	0.0	21.3	3.7	34.6	23.1	123.8	714.057931	59.5048276
34	2004	173.7	121.5	66.5	21.0	2.4	20.5	17.0	9.0	21.7	25.6	60.9	87.9	627.662069	52.3051724
35	2005	145.5		120.2	33.1	3.2	0.4	1.2	4.0	4.5	39.1	59.3	102.5	513	46.6363636
36	2006	203.4	155.8	145.9	40.9	0.2	4.9	0.0	10.5	7.8	72.5	67.8	147.2	856.893103	71.4077586
37	2007	140.8		107.3	93.6	5.8	0.0	4.0	0.0	1.0	49.4	74.0	88.4	564.3	51.3
38	2008	108.8	105.4	64.4	7.6	8.7	2.1	0.0	3.9	13.9	51.7	90.2	128.8	585.554483	48.7962069
39	2009	112.5	108.4	79.1	21.3	5.3	0.0	3.3	0.7	15.1	8.3	88.7	82.9	525.627586	43.8022989
40	2010	268.5	168.5	129.2	16.6	1.3	0.0	1.4	4.7	8.2	70.0	40.0	174.1	882.482759	73.5402299
41	2011	103.4	187.0	131.9	67.6	3.9	3.2	3.7	0.0	38.9	38.2	60.2	110.2	748.22069	62.3517241
42	2012		152.5	41.7	48.1	4.5	1.2	0.0	0.0	18.4	19.5	138.2	179.5	603.555172	54.868652
43	2013	189.6	137.3	75.5	15.1	25.3	6.1	2.0	12.4	6.3	105.0	86.0	159.4	819.996552	68.333046
44	2014	161.9	116.8	40.0	35.0	10.1	0.0	3.2	5.8	5.8	0.0	30.6	156.0	565.227586	47.1022989
45	2015	169.8	146.5	66.7	69.8	18.6	3.9	10.3	4.6	16.1	19.1	48.6	113.0	686.968966	57.2474138
46	2016	104	147.8	54.3	24.4	3.0	0.0	4.5	0.5	7.0	79.5	28.0	89.8	542.82069	45.2350575
47	2017	111.2	122.1	122.8	47.5	11.2	5.9	0.0	8.4	19.0	33.7	61.4	101.7	644.937931	53.7448276
48	2018	154.76	162.5	146.3	20.3	0.2	16.0	11.6	7.1	9.1	84.8	80.8	95.0	788.396552	65.6997126
49	2019	127.8	117.2	171.4	30.0	28.2	1.5	3.7	0.0	9.8	82.4	111.7	154.4	838.113793	69.8428161
50	2020	126.7	151.0	138.2		0.0	0.0	8.2	1.0	5.6	7.5	46.6	138.2	622.986897	56.6351724
51	2021	154.4	127.0	75.7	147.1	8.7	10.7	0.0	4.3	1.5	46.1	101.6	106.1	783.165517	65.2637931
	maxima	268.5	187.0207	173.9	147.1	28.2	31.8	27.1	34.6	51.1	114.6	201.5	201.5	268.5	76.9086782
	minima	89.3	64.49655	22.6	7.6	0	0	0	0	1	0	23.1	57	0	40.3083333
	desviacion estandar	42.45046	30.03971	36.8417	26.411	6.7193	6.3866	5.3424	7.20655	12.14421	26.62417	33.447394	32.123111	123.684043	9.57788278
	media	151.2196	125.9444	99.2755	42.68	6.8647	4.1902	3.4471	5.8	15.70703	46.1096	74.579	112.416	671.956389	56.6116235
	numero de datos	49	49	51	50	51	51	51	51	51	50	50	50	51	51
	coef de variacion	0.280721	0.238516	0.37111	0.6188	0.9788	1.5242	1.5498	1.24251	0.77317	0.57741	0.4484827	0.2857521	0.18406558	0.1691858

4. Ensayos de permeabilidad depósitos no consolidados

N°	Formación geológica	Descripción litológica	Coordenadas UTM		Código	K(m/día)	Calificación	Clasificación del acuífero	Sector	Comunidad
			X	Y						
1	Dep. Residual	Gravas con matriz limo arenosa	193343	8493968	Q-re	10.39	Permeable	Acuífero medio a bueno	Ccesce	Conchacalla
Tiempo		Descenso	Volumen	Caudal (Q)		Permeabilidad (K)				
N°	min	cm	cm ³	cm ³ /s	lt/s	cm/s	m/s			
1	2	1.9	38.5086	0.320905	0.00032091	0.01583333	0.000158333			
2	2	1.6	32.4283	0.270236	0.00027024	0.01333333	0.000133333			
3	2	1.3	26.348	0.219567	0.00021957	0.01083333	0.000108333			
4	2	1.4	28.3748	0.236457	0.00023646	0.01166667	0.000116667			
5	2	1.3	26.348	0.219567	0.00021957	0.01083333	0.000108333			
6	2	1.3	26.348	0.219567	0.00021957	0.01083333	0.000108333			
7	2	1.3	26.348	0.219567	0.00021957	0.01083333	0.000108333			
				Promedio	0.00024369	0.01202381	0.000120238			

N°	Formación geológica	Descripción litológica	Coordenadas UTM		Código	K(m/día)	Calificación	Clasificación del acuífero	Sector	Comunidad
			X	Y						
2	Deluvial	Arenas y gravas con matriz limo arcillosa	190098	8494249	Q-dl	7.08	Algo permeable	Acuífero pobre		Conchacalla
Tiempo		descenso	volumen	Q	Q	K	K			
N°	min	cm	cm ³	cm ³ /s	lt/s	cm/s	m/día			
1	2	1.2	24.3212	0.202677	0.00020268	0.01	8.64			
2	2	1.1	22.2945	0.185787	0.00018579	0.00916667	7.92			
3	2	0.9	18.2409	0.152008	0.00015201	0.0075	6.48			
4	2	0.9	18.2409	0.152008	0.00015201	0.0075	6.48			
5	2	0.9	18.2409	0.152008	0.00015201	0.0075	6.48			
6	2	0.9	18.2409	0.152008	0.00015201	0.0075	6.48			
				Promedio	0.00016608	0.00819444	7.08			

N°	Formación geológica	Descripción litológica	Coordenadas UTM		Código	K(m/día)	Calificación	Clasificación del acuífero	Sector	Comunidad
3	Dep. Aluvial	Gravas con bloques y matriz limo arenosa	188476	8495529	Q-al	15	permeable	Acuífero medio a bueno		Suncco
Tiempo N°		descenso	volumen	Q	Q	K	K			
	min	cm	cm3	cm3/s	lt/s	cm/s	m/día			
1	2	0.9	18.2409	0.152008	0.00015201	0.0075	6.48			
2	2	1.1	22.2945	0.185787	0.00018579	0.00916667	7.92			
3	2	0.6	12.1606	0.101339	0.00010134	0.005	4.32			
4	2	0.5	10.1339	0.084449	8.4449E-05	0.00416667	3.6			
5	2	0.5	10.1339	0.084449	8.4449E-05	0.00416667	3.6			
6	2	0.5	10.1339	0.084449	8.4449E-05	0.00416667	3.6			
				Promedio	0.00011541	0.00569444	4.92			



N°	Formación geológica	Descripción litológica	Coordenadas UTM		Código	K(m/día)	Calificación	Clasificación del acuífero	Sector	Comunidad
4	Dep. Coluvioaluvial	Gravas y bloques y matriz limo arcillosa y arenosa	191832	8492008	Q-coal	4.91	Algo permeable	Acuífero pobre	Llulluchayoc	Conchacalla
Tiempo N°		descenso	volumen	Q	Q	K	K			
	min	cm	cm3	cm3/s	lt/s	cm/s	m/día			
1	2	2.6	52.696	0.439134	0.00043913	0.02166667	18.72			
2	2	2.4	48.6425	0.405354	0.00040535	0.02	17.28			
3	2	1.9	38.5086	0.320905	0.00032091	0.01583333	13.68			
4	2	1.8	36.4819	0.304016	0.00030402	0.015	12.96			
5	2	1.9	38.5086	0.320905	0.00032091	0.01583333	13.68			
6	2	1.9	38.5086	0.320905	0.00032091	0.01583333	13.68			
				Promedio	0.00035187	0.01736111	15			



5. Cronograma de actividades

ACTIVIDADES		AÑO 2023																							
		ENERO				FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ETAPA DE GABINETE I	Recopilación de información, mapas, cuadros, datos de campo y laboratorio, estudios, informes, tesis, papers, relacionados al tema de tesis.	█																							
	Preparación de mapas base para los trabajos de campo a escala 1:40 000.			█	█	█																			
ETAPA DE CAMPO	Obtencion de datos en campo: Datos geológicos, estructurales, hidrológicos e hidrogeológicos					█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█								
ETAPA DE GABINETE II	Procesamiento de base datos: Generar capas de información SIG, a partir de toda la data recopilada.													█	█	█	█								
	Fase de diseño conceptual													█	█	█	█								
	Fase de diseño numérico													█	█	█	█								
	Fase de calibración													█	█	█	█								
	Fase de simulación y resultados													█	█	█	█								
ETAPA DE GABINETE III	Elaboración y digitalización de mapas detallados según el requerimiento de los objetivos del presente trabajo.																					█	█	█	█
	Análisis e interpretación de resultados.																					█	█	█	█
	Conclusiones y recomendaciones.																					█	█	█	█
	Redaccion de tesis.																					█	█	█	█

6. Presupuesto general

PRESUPUESTO			
	ACTIVIDADES	DETALLADO	GASTO
ETAPA DE PRE CAMPO	Recopilación de información, mapas, cuadros, datos de campo y laboratorio, estudios, informes, tesis, papers, relacionados al tema de tesis.	Información obtenida de bibliotecas, y sitios web (Internet).	200 S/.
	Preparación de mapas base para los trabajos de campo a escala 1:40 000.	Se utiliza programas informáticos libres con internet.	100 s/.
ETAPA DE CAMPO	Obtención de datos en campo: Datos geológicos, estructurales, hidrológicos e hidrogeológicos	Movilidad y alimentos, pruebas de ensayo en campo con los diferentes materiales.	800 s/.
ETAPA DE POST CAMPO I	Procesamiento de base datos: Generar capas de información SIG, a partir de toda la data recopilada.	Se utiliza programas informáticos libres con internet.	100 s/.
	Fase de diseño conceptual	Se utiliza programas informáticos libres con internet.	300 s /.
	Fase de diseño numérico		
	Fase de calibración		
Fase de simulación y resultados			
ETAPA DE POST CAMPO II	Elaboración y digitalización de mapas detallados según el requerimiento de los objetivos del presente trabajo.	Se utiliza programas informáticos libres con internet.	200 s/.
	Análisis e interpretación de resultados.	Internet	200 S/.
	Conclusiones y recomendaciones.	Internet	
	Redaccion de tesis.	Internet	

7. Matriz de consistencia

MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO A LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA HUANACAHUIRE, SAN JERÓNIMO – CUSCO

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variables independientes	Metodología
¿Cómo influye el flujo subterráneo a los acuíferos de la cuenca Huanacahuire?	Realizar el modelo hidrogeológico para determinar la influencia del flujo subterráneo a los acuíferos de la cuenca Huanacahuire	El modelo hidrogeológico numérico, apoyado del método de diferencias finitas, determina la dinámica de flujo subterráneo que influye a los acuíferos de la cuenca Huanacahuire.	1. Modelo hidrogeológico <ul style="list-style-type: none"> Geomorfología Geología Hidrología Hidrogeología 	<ul style="list-style-type: none"> Tipo de investigación: Mixta Clase de investigación: Aplicada Método: Inductivo hipotético deductivo Nivel de investigación: Descriptivo, explicativo-correlacional. La metodología de investigación consta de tres etapas: Etapa de pre campo, etapa de campo, etapa de post campo. <ul style="list-style-type: none"> ETAPA DE PRE CAMPO: Recopilación de información bibliográfica y planificación. ETAPA DE CAMPO: Recolección y obtención de datos en campo. ETAPA DE POST CAMPO: procesamiento de los datos obtenidos, interpretación de resultados y redacción de tesis.
	Objetivo específico		Variables dependientes	
	<ul style="list-style-type: none"> Caracterizar la geomorfología local y geología local de la cuenca Huanacahuire Determinar las características hidrológicas e hidrogeológicas de la cuenca Huanacahuire. Diseñar el modelo conceptual y numérico del flujo de agua subterránea en la cuenca Huanacahuire. 		2. Flujo subterráneo <ul style="list-style-type: none"> Dirección de flujo 	

Salidas de campo realizadas en el cartografiado geológico.



