UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

TESIS

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA, DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN –CUSCO 2025

PRESENTADO POR:

Br. CARMEN PACCO DELGADO
Br. RAI RONALDO TTITO TORIBIO

PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEOLOGO

ASESOR:

Dr. RONALD LUIS LÓPEZ ZAPANA

CUSCO – PERÚ

2026

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

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

El que suscribe, el **Asesor** RONALD LUIS LÓPEZ ZAPANA ..... quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesistitulada: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA, DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2025

Presentado por: CARMEN PACCO DELGADO ..... DNI N° 76160380 .....;
presentado por: RAI RONALDO TTITO TORIBIO ..... DNI N°: 72797704 .....
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 de Similitud, conforme al Art. 6° del ***Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC*** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 3 **%.**

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

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 03 de SETIEMBRE de 2026

.....
Firma
Post firma RONALD LUIS LÓPEZ ZAPANA
Nro. de DNI 23923900
ORCID del Asesor 0000-0003-0148-6535

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:619784699

Carmen Rai Pacco Ttito

Tesis_Pacco Carmen y Ttito Rai V 3.pdf

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:619784699

Fecha de entrega
2 sep 2026, 7:11 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
2 sep 2026, 7:36 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
Tesis_Pacco Carmen y Ttito Rai V 3.pdf

Tamaño del archivo
95.2 MB

232 páginas

44.968 palabras

235.146 caracteres

3% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

2% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
2% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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

Texto oculto
1259 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

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

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

Dedicatoria

A Dios, por darme la sabiduría y perseverancia a lo largo de este proceso.

A mis padres Crisologo Pacco y Bertha Delgado, por su esfuerzo, sacrificio y motivación para convertirme en una profesional.

A mis hermanas, por su apoyo y motivación en los momentos difíciles.

A Joel Taco, por su apoyo en los trabajos de campo y por su motivación en la conclusión de este proceso.

Carmen Pacco Delgado

A Dios, por darme las fuerzas de seguir día a día en esta oportunidad de vida, dándome la sabiduría para culminar este proceso.

A mis padres Eleuterio Ttito y Felicitas Toribio, por sus consejos, por el esfuerzo y sacrificio que tuvieron que realizar para direccionar mi vida profesional, ellos representan para mí el mayor pilar de mi vida.

A mis hermanos, porque son para mí el mayor soporte para levantarme ante mis caídas, por la motivación y el apoyo.

Rai Ronaldo Ttito Toribio

Agradecimiento

Queremos expresar nuestro mayor agradecimiento a nuestro asesor, al Dr. Ronald Luis López Zapana, por su orientación y por sus valiosos aportes en el desarrollo de la presente investigación.

A nuestros amigos, los ingenieros Wilde B. Arqque Cahuana, Miguel Ángel Huamán Cusiquispe, Daira L. Dueñas Silva y Oswaldo Quispe Pariguana, por todo el apoyo brindado en los trabajos de campo y en gabinete, por sus recomendaciones y motivación.

Al Dr. Juan Carlos Ascue Cuba, al Mgt. Ivan Caceres Angulo y al Mgt. Ruperto Benavente Velásquez, miembros de la comisión dictaminadora, por las sugerencias y recomendaciones para las mejoras de este trabajo de tesis.

Un agradecimiento general a todos los docentes de nuestra escuela profesional, por su contribución en nuestra formación profesional.

Índice general

Dedicatoria ..... **i**

Agradecimiento ..... **ii**

Resumen **1**

Abstract **3**

Introducción **5**

Capítulo I Aspectos Generales **7**

1.1. Planteamiento del Problema **7**

1.2. Formulación del Problema **8**

1.2.1. Problema General ***8***

1.2.2. Problemas Específicos ***8***

1.3. Justificación de la Investigación **9**

1.3.1. Conveniencia ***9***

1.3.2. Relevancia Social ***9***

1.3.3. Implicancias Prácticas ***9***

1.3.4. Valor Teórico ***10***

1.3.5. Utilidad Metodológica ***10***

1.4. Objetivos **10**

1.4.1. Objetivo General ***10***

1.4.2. Objetivos Específicos ***10***

1.5. Delimitación del Estudio **11**

1.5.1. Delimitación Espacial ***11***

1.5.1.1. Ubicación **11**

1.5.1.2. Accesibilidad **12**

1.5.2. Delimitación Temporal ***12***

Capítulo II Marco Teórico **13**

2.1. Antecedentes **13**

2.1.1. Antecedentes Internacionales ***13***

2.1.2. Antecedentes Nacionales ***14***

2.1.3. Antecedentes Locales ***16***

2.2. Bases Teóricas **19**

2.3. Hipótesis **22**

2.3.1. Hipótesis General ***22***

2.3.2. Hipótesis Específicas ***22***

2.4. Variables **23**

2.4.1. Identificación de Variables ***23***

2.4.1.1. Variable independiente **23**

2.4.1.2. Variable dependiente **23**

2.4.2. Operacionalización de Variables ***24***

2.5. Definición de Términos Básicos **26**

Capítulo III Método **32**

3.1. Enfoque de la Investigación **32**

3.2. Tipo de Investigación **32**

3.3. Alcance de Investigación **32**

3.4. Diseño de Investigación **32**

3.5. Población **32**

3.6. Muestra 33

3.7. Unidad de Análisis 33

3.8. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos 33

3.9. Plan de Análisis de Datos 34

3.9.1. Fase Preliminar 34

3.9.2. Fase de Consolidación de Datos 34

3.9.3. Fase de Diseño Conceptual 35

3.9.4. Fase de Diseño Numérico 35

3.9.5. Fase de Calibración 35

3.9.6. Fase de ejecución y resultados 35

3.9.7. Fase de interpretación y redacción 35

3.10. Aspectos Éticos 35

3.11. Equipos, Instrumentos y Materiales 36

3.11.1. Equipos e Instrumentos 36

3.11.2. Materiales 36

3.12. Etapas de la Investigación 37

3.12.1. Etapa de Pre-campo 37

3.12.2. Etapa de Campo 37

3.12.3. Etapa de Post campo 37

Capítulo IV Resultados 38

4.1. Caracterización geomorfológica y geológica 38

4.1.1. Geomorfología 38

4.1.1.1. Geomorfología Regional 38

4.1.1.1. Pendientes....39

4.1.1.2. Geomorfología Local....40

4.1.1.3. Controles Morfométricos....46

4.1.2. Geología....47

4.1.2.1. Estratigrafía Regional....47

4.1.2.2. Estratigrafía Local....48

4.1.2.1. Influencia de la Geología en la Dinámica del Flujo Subterráneo....64

4.1.2.2. Geología Estructural Regional....66

4.1.2.4. Geología Estructural Local....67

4.1.2.5. Influencia de las Estructuras en la Dinámica del Flujo Subterráneo....69

4.2. Parámetros hidrológicos....78

4.2.1. Hidrología....78

4.2.1.1. Ubicación Hidrográfica de la Cuenca....78

4.2.1.2. Morfometría de la Microcuenca....80

4.2.1.3. Información Hidrometereológica....88

4.2.1.4. Parámetros hidrológicos....90

4.3. Parámetros y unidades hidrogeológicas....109

4.3.1. Hidrogeología....109

4.3.1.1. Inventario de Fuentes de Agua Subterránea....109

4.3.1.2. Parámetros Hidrogeológicos de las Formaciones Geológicas....113

4.3.1.3. Clasificación de las Unidades Hidrogeológicas....122

4.4. Modelo Hidrogeológico Conceptual....128

4.4.1. Componentes del Modelo Hidrogeológico Conceptual....128

4.4.1.1. Modelo Geológico 129

4.4.1.2. Modelo Hidrológico 130

4.4.1.3. Modelo Hidráulico 131

4.4.2. Conceptualización del Flujo subterráneo 132

4.5. Modelo Hidrogeológico Numérico 136

4.5.1. Construcción del Modelo 136

4.5.1.1. Referenciación y Definición del Dominio del Modelo 137

4.5.1.2. Discretización Vertical y Generación de Malla 139

4.5.1.3. Asignación de Parámetros Hidrogeológicos al Modelo 142

4.5.1.4. Asignación de Condiciones de Borde al Modelo 147

4.5.1.5. Calibración del Modelo Numérico 149

Capítulo V Discusión de Resultados 156

Conclusiones 161

Conclusión General 161

Conclusiones Específicas 161

Recomendaciones 163

Referencias 164

Anexos 169

Anexo 1. Mapas 170

Anexo 1a. Mapa de ubicación 170

Anexo 1b. Mapa de accesibilidad 171

Anexo 1c. Mapa geomorfológico regional 172

Anexo 1d. Mapa de pendientes 173

Anexo 1e. Mapa geomorfológico local *174*

Anexo 1f. Mapa geológico regional *175*

Anexo 1g. Mapa geológico local *176*

Anexo 1h. Mapa geológico estructural regional *177*

Anexo 1i. Mapa geológico estructural local *178*

Anexo 1j. Mapa de sistemas de discontinuidades y de direcciones de flujo subterráneo *179*

Anexo 2. Ventanas estructurales en las formaciones geológicas **181**

Anexo 2a. Ventana estructural en la Formación Kayra *181*

Anexo 2b. Ventana estructural en la Formación Soncco secuencia I *185*

Anexo 2c. Ventana estructural en la Formación Soncco secuencia II *187*

Anexo 2d. Ventana estructural en la Formación Soncco secuencia III *189*

Anexo 2e. Ventana estructural en la Formación Soncco secuencia IV *191*

Anexo 2f. Ventana estructural en la Formación Soncco secuencia V *193*

Anexo 2g. Ventana estructural en la Formación Soncco secuencia VI *195*

Anexo 3. Datos Crudos de Precipitación Anual y Mensual - Estación Granja Kayra **197**

Anexo 4. Tablas Referenciales de Valores de t y F **198**

Anexo 4a. Valores de t *198*

Anexo 4b. Valores de F con significación al 5 ..... *199*

Anexo 5. Medición de Dip/ Dip direction y Parámetros de las Discontinuidades mediante Ventanas Estructurales **200**

Anexo 6. Tablas de Intensidades de Precipitación **205**

Anexo 7. Inventario y Aforo Volumétrico en Manantiales **206**

Anexo 8. Ensayo de Permeabilidad Lefranc en Depósitos No Consolidados **207**

Anexo 9. Modelos 210

Anexo 9a. Modelo geológico.....210

Anexo 9b. Modelo hidrológico.....211

Anexo 9c. Modelo hidráulico.....212

Anexo 9d. Modelo hidrogeológico conceptual.....213

Anexo 10. Matriz de consistencia.....214

Índice de tablas

Tabla 1 ***Coordenadas del punto de desfogue de la microcuenca La Rinconada en el sistema WGS84*** **.....11**

Tabla 2 ***Accesibilidad de Cusco al área de estudio*** **.....12**

Tabla 3 ***Operacionalización de variables de la investigación*** **.....24**

Tabla 4 ***Clasificación de pendientes*** **.....39**

Tabla 5 ***Parámetros de las discontinuidades Formación Kayra*** **.....72**

Tabla 6 ***Parámetros de las discontinuidades Formación Soncco secuencia I*** **.....73**

Tabla 7 ***Parámetros de las discontinuidades Formación Soncco secuencia II*** **.....74**

Tabla 8 ***Parámetros de las discontinuidades Formación Soncco secuencia III*** **.....74**

Tabla 9 ***Parámetros de las discontinuidades Formación Soncco secuencia IV*** **.....75**

Tabla 10 ***Parámetros de las discontinuidades Formación Soncco secuencia V*** **.....76**

Tabla 11 ***Parámetros de las discontinuidades Formación Soncco secuencia VI*** **.....76**

Tabla 12 ***Resumen de parámetros por familias de discontinuidades*** **.....77**

Tabla 13 ***Codificación según Pfasfstetter de la microcuenca La Rinconada*** **.....78**

Tabla 14 ***Parámetros relativos a la forma de la microcuenca*** **.....80**

Tabla 15 ***Parámetros relativos al relieve de la microcuenca*** **.....81**

Tabla 16 ***Áreas parciales y acumuladas para la microcuenca La Rinconada*** **.....81**

Tabla 17 ***Parámetros relativos al perfil de la microcuenca*** **.....84**

Tabla 18 ***Áreas parciales y acumuladas para la microcuenca La Rinconada*** **.....84**

Tabla 19 ***Parámetros relativos al drenaje de la microcuenca*** **.....85**

Tabla 20 ***Resumen de los parámetros morfométricos de la microcuenca*** **.....87**

Tabla 21 ***Detalle de la estación meteorológica Granja Kayra*** **.....89**

Tabla 22 ***Completación de precipitaciones mensuales faltantes en la estación Granja Kayra*** **91**

Tabla 23 ***Rangos de periodos*** **96**

Tabla 24 ***Valores de la media y de la desviación estándar*** **97**

Tabla 25 ***Valores de*** **tc,** sd **y** sp **97**

Tabla 26 ***Valores de la varianza*** **99**

Tabla 27 ***Temperatura media mensuales en la estación Granja Kayra*** **100**

Tabla 28 ***Evapotranspiración potencial mensual de la microcuenca La Rinconada*** **101**

Tabla 29 ***Balance hidrológico de la microcuenca La Rinconada*** **102**

Tabla 30 ***Clasificación de grupos hidrológicos del suelo (SCS)*** **105**

Tabla 31 ***Valores del Número de Curva (CN) según uso del suelo*** **106**

Tabla 32 ***Valores de CN para cada área, CN compuesto y Qevento*** **107**

Tabla 33 ***Detalle de los manantiales en la microcuenca La Rinconada*** **109**

Tabla 34 ***Clasificación de manantiales en la microcuenca La Rinconada*** **111**

Tabla 35 ***Detalle de la galería filtrante Pillao Matao*** **111**

Tabla 36 ***Valores promedio de abertura por familias y por formación en la ventana estructural Kayra*** **114**

Tabla 37 ***Valores promedio de espaciado por familias y por formación en la ventana estructural Kayra*** **115**

Tabla 38 ***Valores de k en materiales consolidados*** **115**

Tabla 39 ***Valores de k en materiales no consolidados*** **116**

Tabla 40 ***Clasificación de la conductividad hidráulica según la litología*** **118**

Tabla 41 ***Valores de T en materiales consolidados y no consolidados*** **119**

Tabla 42 ***Clasificación de acuíferos según la transmisividad*** **119**

Tabla 43 ***Valores de porosidad total y efectiva según los materiales*** **.....120**

Tabla 44 ***Valores de ne en materiales consolidados y no consolidados*** **.....121**

Tabla 45 ***Valores de coeficiente de almacenamiento según tipo de acuífero*** **.....122**

Tabla 46 ***Coordenadas del dominio*** **.....137**

Tabla 47 ***Unidades geológicas asignadas al dominio discretizado*** **.....139**

Tabla 48 ***Características de la malla del modelo numérico*** **.....141**

Tabla 49 ***Coordenadas de origen y geometría del dominio*** **.....141**

Tabla 50 ***Características de las mallas y valor de ajuste*** **.....142**

Tabla 51 ***Conductividad hidráulica (m/día) asignada con el modelo*** **.....143**

Tabla 52 ***Porosidad () asignada al modelo*** **.....145**

Tabla 53 ***Valores de recarga asignados en el modelo numérico*** **.....146**

Tabla 54 ***Estadística de Cargas Hidráulicas Observadas y Calculadas*** **.....150**

Índice de figuras

Figura 1 ***Unidades geomorfológicas locales del cuadrángulo del Cusco*** **.....19**

Figura 2 ***Estratigrafía de los dominios morfoestructurales regionales*** **.....20**

Figura 3 ***Variación de la forma de la curva hipsométrica según la edad del río.*** **.....28**

Figura 4 ***Vista hacia el norte de laderas de montaña en roca sedimentaria con pendiente fuerte*** **.....40**

Figura 5 ***Vista hacia oeste de laderas de montaña en roca sedimentaria con pendiente suave*** **41**

Figura 6 ***Vista hacia el norte de cima de montaña en roca sedimentaria*** **.....42**

Figura 7 ***Vista hacia el norte de montaña baja en roca sedimentaria con pendiente fuerte*** **....43**

Figura 8 ***Vista hacia la desembocadura de la microcuenca de las terrazas fluvio-aluviales*** **....44**

Figura 9 ***Vista hacia el suroeste de la quebrada principal y cárcavas*** **.....45**

Figura 10 ***Vista hacia el sureste de la quebrada secundaria*** **.....45**

Figura 11 ***Vista de la Formación Kayra en la parte media de la microcuenca*** **.....49**

Figura 12 ***Vista hacia el noreste del contacto de la Formación Kayra con la Formación San Sebastián*** **.....49**

Figura 13 ***Vista hacia el sureste de la base de la secuencia I de la Formación Soncco*** **.....51**

Figura 14 ***Vista hacia el suroeste del contacto entre las secuencias I y II de la Formación Soncco*** **.....51**

Figura 15 ***Vista hacia el suroeste del contacto entre las secuencias I y II de la Formación Soncco*** **.....52**

Figura 16 ***Vista hacia el sureste del techo de la secuencia II de la Formación Soncco*** **.....53**

Figura 17 ***Vista hacia el sureste de la secuencia III de la Formación Soncco*** **.....54**

Figura 18 ***Vista hacia el sureste de la secuencia Soncco IV de la Formación Soncco*** **.....55**

Figura 19 ***Vista de la secuencia Soncco V al sur de la microcuenca*** **.....56**

Figura 20 ***Vista hacia el sur de la secuencia VI en la parte alta de la microcuenca*** **.....57**

Figura 21 ***Vista hacia el suroeste de la secuencia VI, en la cabecera de la microcuenca*** **.....57**

Figura 22 ***Vista hacia el noroeste de la secuencia granodecreciente de la Formación San Sebastián*** **.....58**

Figura 23 ***Vista hacia el noroeste de la parte superior de la Formación San Sebastián*** **.....59**

Figura 24 ***Vista hacia el noroeste del contacto entre la Formación Kayra y la Formación San Sebastián*** **.....59**

Figura 25 ***Vista del cauce principal de la microcuenca, depósitos de gravas con matriz de arena*** **.....60**

Figura 26 ***Vista hacia el noreste de los depósitos eluviales, ubicados al lado este de la microcuenca*** **.....61**

Figura 27 ***Vista del noroeste de la microcuenca, depósitos diluviales en laderas suaves*** **.....62**

Figura 28 ***Vista de depósitos deluvio-coluviales al pie de laderas*** **.....63**

Figura 29 ***Vista de depósitos deluvio-coluviales con presencia de bloques subangulosos*** **.....63**

Figura 30 ***Columna estratigráfica de la microcuenca La Rinconada*** **.....65**

Figura 31 ***Falla inversa en la Formación Kayra, hacia el norte de la microcuenca*** **.....67**

Figura 32 ***Vista hacia el sur de la microcuenca, falla de rumbo sinestral, al sur de la microcuenca*** **.....68**

Figura 33 ***Falla de rumbo sinestral con componente inversa, en la Formación Kayra, al centro de la microcuenca*** **.....68**

Figura 34 ***Sección A-A'*** **.....69**

Figura 35 ***Sección B-B'*** **.....70**

Figura 36 ***Sección C-C'*** **.....71**

Figura 37 ***Planos de discontinuidades por familias en la microcuenca La Rinconada*** **.....77**

Figura 38 ***Detalle de la codificación de la cuenca La Rinconada basado en Pfasfstetter*** **.....79**

Figura 39 ***Mapa de áreas parciales de la microcuenca La Rinconada*** **.....82**

Figura 40 ***Curva Hipsométrica*** **.....83**

Figura 41 ***Polígono de frecuencias*** **.....83**

Figura 42 ***Orden de ríos de la microcuenca La Rinconada*** **.....86**

Figura 43 ***Pendiente del drenaje principal*** **.....86**

Figura 44 ***Ubicación de la estación meteorológica Granja Kayra*** **.....89**

Figura 45 ***Representación de la precipitación media mensual – Estación Granja Kayra*** **.....92**

Figura 46 ***Esquema para el análisis de consistencia de datos*** **.....93**

Figura 47 ***Serie gráfica de precipitaciones anuales desde 1985 a 2021– Estación Granja Kayra*** **.....94**

Figura 48 ***Representación del análisis de doble masa para obtener estación base*** **.....95**

Figura 49 ***Representación del análisis de doble masa para obtener periodos*** **.....95**

Figura 50 ***Representación de la temperatura media, mínima y máxima – Estación Granja Kayra*** **.....100**

Figura 51 ***Relación de Precipitación vs Evapotranspiración Real*** **.....102**

Figura 52 ***Aforo volumétrico de caudal en el manantial captado SoIV-3*** **.....110**

Figura 53 ***Aforo volumétrico de caudal en el manantial no captado SoV-2*** **.....110**

Figura 54 ***Localización de manantiales y galería filtrante en la microcuenca La Rinconada*** **.....112**

Figura 55 ***Medición de parámetro de espaciado en la ventana estructural – Fm. Soncco*** **.....114**

Figura 56 ***Ensayo de permeabilidad método Lefranc a carga variable*** **.....116**

Figura 57 ***Localización de los ensayos Lefranc en la microcuenca La Rinconada*** **.....117**

Figura 58 ***Acuífero fisurado sedimentario Kayra*** **.....123**

Figura 59 ***Acuífero fisurado sedimentario Soncco en secuencia III*** **.....124**

Figura 60 ***Acuífero fisurado sedimentario Soncco en secuencia V*** **.....125**

Figura 61 ***Acuífero fisurado sedimentario Soncco en secuencia VI*** **.....125**

Figura 62 ***Acuífero no consolidado San Sebastián*** **.....126**

Figura 63 ***Acuitardo no consolidado*** **.....127**

Figura 64 ***Acuitardo no consolidado*** **.....127**

Figura 65 ***Representación de los componentes del modelo conceptual*** **.....128**

Figura 66 ***Vista al oeste del modelo geológico de la microcuenca La Rinconada*** **.....129**

Figura 67 ***Vista al sur del modelo geológico de la microcuenca La Rinconada*** **.....130**

Figura 68 ***Vista al este del modelo hidrológico de la microcuenca La Rinconada*** **.....131**

Figura 69 ***Vista al suroeste del modelo hidráulico de la microcuenca La Rinconada*** **.....132**

Figura 70 ***Vista al oeste del modelo hidrogeológico conceptual de la microcuenca La Rinconada*** **.....134**

Figura 71 ***Vista del perfil longitudinal de sur a norte con sus de zonas de recarga, dinámica y descarga*** **.....135**

Figura 72 ***Construcción Básica del Modelo Tridimensional*** **.....136**

Figura 73 ***Dominio del modelo numérico discretizado*** **.....138**

Figura 74 ***Unidades litológicas generadas para el modelo numérico*** **.....140**

Figura 75 ***Unidades litológicas generadas para el modelo numérico*** **.....140**

Figura 76 ***Distribución de la conductividad hidráulica asignada al modelo numérico*** **.....144**

Figura 77 ***Distribución espacial de la recarga asignada al modelo numérico*** **.....146**

Figura 78 ***Condiciones de borde para el modelo numérico*** **.....148**

Figura 79 ***Diagrama cargas Observadas Vs. Calibradas*** **.....151**

Figura 80 ***Diagrama cargas Observadas Vs. Calibradas propios de modelo*** **.....152**

Figura 81 ***Vista en planta de los niveles piezométricos simulados*** **.....154**

Figura 81 ***Sección A-A' con piezometría en régimen estacionario*** **.....155**

Figura 82 ***Sección B-B' con piezometría en régimen estacionario*** **.....155**

Resumen

Esta investigación tiene como objetivo determinar la dinámica del flujo subterráneo de la microcuenca La Rinconada en San Sebastián - Cusco mediante el desarrollo del modelo conceptual y del modelo numérico.

Geomorfológicamente, presenta laderas de montaña con pendiente fuerte y suave, cimas, montañas bajas con pendiente fuerte, terraza fluvio aluvial, quebradas y cárcavas.

Geológicamente está conformada por las formaciones Kayra, Soncco, San Sebastián y por los depósitos cuaternarios fluviales, eluviales, deluviales y deluvio-coluviales, donde Kayra y Soncco controlan la dinámica del flujo subterráneo principalmente asociadas a su fracturamiento.

En hidrología, los parámetros hidrológicos representan los mecanismos de entrada y salida del agua, dados por una precipitación media anual de 680.93 mm/año como único aportante de la infiltración de 102.95 mm/año, que representa la recarga de los acuíferos.

Hidrogeológicamente está conformada por los acuíferos fisurados sedimentarios Kayra, Soncco y el acuífero no consolidado San Sebastián (conductividades de 1.00E-02 a 2.86E+00 m/día y porosidades efectivas de 7.4% a 10%), clasificándolos como acuíferos de pobres a buenos; y los acuitardos no consolidados, siendo los acuíferos Kayra y Soncco favorables para la dinámica del flujo subterráneo.

El modelo conceptual producto de la integración de los modelos geológico, hidrológico e hidráulico, muestra direcciones predominantes del flujo subterráneo hacia el ENE en Kayra y hacia el NNW en Soncco.

El modelo numérico en un régimen estacionario muestra que las líneas de flujo ocurren en Kayra y Soncco, moviéndose de las zonas de cargas hidráulicas mayores a menores orientadas predominantemente hacia el norte, respaldando el modelo conceptual.

Palabras clave: Dirección del flujo subterráneo, Modelo numérico, Modelo conceptual, Unidades hidrogeológicas

Abstract

This research aims to determine the dynamics of groundwater flow of the La Rinconada microbasin in San Sebastian - Cusco throught the development of conceptual and numerical model.

Geomorphologically, it presents mountain slopes with steep and gentle slopes, peaks, low mountains with steep slope, fluvial-alluvial terrace, ravines and gullies.

Geologically, it is made up of the Kayra, Soncco, San Sebastian formations, and for the Quaternary deposits fluvial, eluvial, deluvial and deluvio-colluvial deposits, where Kayra and Soncco control the dynamics of groundwater flow mainly associated to their fracturing.

In hydrology, hydrological parameters represent the input and output mechanisms of water, given by an average annual precipitation of 680.93 mm/year as the sole contributor to the infiltration of 102.95 mm/year, which represents aquifer recharge.

Hydrogeologically it is made up of the Kayra and Soncco fractured sedimentary aquifer, the San Sebastian unconsolidated aquifer (conductivity of 1.00E-02 to 2.86E+00 m/day and an effective porosity of 7.4% to 10%), classifying them as poor to good aquifer, and the unconsolidated aquitards, being Kayra and Soncco aquifers favorable for the groundwater flow dynamics.

The conceptual model resulting from the integration of geological, hydrological, and hydraulic models shows predominant directions of groundwater flow towards the ENE in Kayra and towards the NNW in Soncco.

The numerical model shows that the flow lines occur predominantly in the Kayra and Soncco formations, moving from areas of higher to lower hydraulic heads oriented predominantly to the north.

Keywords: Direction of the underground flow, Numerical model, Conceptual model, Hydrogeological units

Introducción

La dinámica del flujo subterráneo constituye un aspecto importante en el estudio de los sistemas hidrogeológicos, ya que describe el movimiento del agua en medios porosos y fracturados, y está controlado por los parámetros hidrogeológicos y las condiciones de borde del sistema. En este contexto, el uso de herramientas de modelamiento conceptual y numérico son fundamentales para representar la dinámica del agua subterránea.

Geomorfológicamente, las geoformas donde el agua proveniente de la precipitación se infiltra y alimenta a los acuíferos son las que conforman las zonas de recarga.

Geológicamente, las unidades geológicas que presentan discontinuidades asociadas principalmente al fracturamiento en sus areniscas (caracterizadas a través de ventanas estructurales) y los sistemas de fallas favorecen a la dinámica del flujo subterráneo.

En hidrología, los parámetros hidrológicos representan las variables de entrada y salida del agua, siendo la precipitación la única variable de entrada, y la evapotranspiración y la escorrentía (escorrentía superficial e infiltración) las variables de salida, donde la infiltración es la fuente de recarga hídrica subterránea.

Hidrogeológicamente, las unidades hidrogeológicas mediante los parámetros hidrogeológicos como la conductividad hidráulica, transmisividad, porosidad y almacenamiento, así como las direcciones del flujo subterráneo dadas por la estratificación y el fracturamiento; y el inventario de manantiales que proporcionan el nivel freático libre. La dinámica del flujo subterráneo se desarrolla cuando posee condiciones favorables de los parámetros hidrogeológicos en las unidades hidrogeológicas, es decir, la conductividad hidráulica se encuentra en rangos de 10^{-2} m/día a 10^{4} m/día, la transmisividad es mayor a los 10 m²/día, la porosidad efectiva se

encuentra en rangos de 5% a 15 % en areniscas y el coeficiente de almacenamiento es equivalente a la porosidad efectiva en acuíferos libres.

El modelamiento conceptual permite constituye una representación integral del sistema hidrogeológico, ya que integra la información geomorfológica-geológica, hidrológica e hidrogeológica mediante tres componentes dados por el modelo geológico; el modelo hidrológico y el modelo hidráulico, los permiten construir una base sólida que sustenta el desarrollo del modelo numérico.

El modelamiento numérico permite simular la dinámica del flujo subterráneo a través de la resolución de ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo en medios porosos mediante el método de elementos finitos, mediante el uso del software especializado FEFLOW. Este modelo no solo permite determinar de forma precisa las direcciones de flujo, sino también la validación del modelo conceptual mediante la comparación con los datos reales observados, con una calibración aceptable a aquella que posee un RMS Normalizado inferior al 10%, incrementando la confiabilidad de la simulación para un escenario estacionario.

Finalmente, los resultados de esta investigación determinan la dinámica del flujo subterráneo, proporcionando una base técnica para futuros proyectos de manejo y/o extracción de aguas subterráneas.

Capítulo I Aspectos Generales

1.1. Planteamiento del Problema

La dinámica del flujo subterráneo está definida por su movimiento y distribución bajo de la superficie, estos se pueden conocer a través de modelos hidrogeológicos; estos últimos también permiten analizar, interpretar y entender el comportamiento hidrogeológico de las unidades hidrogeológicas y permite generar una información útil para la toma de decisiones. (Ingol & Castañeda, 2017).

A nivel mundial existe una demanda creciente del recurso fundamental del agua, por lo cual se considera la búsqueda de nuevas fuentes de agua, como las aguas subterráneas. En el Perú, las aguas subterráneas constituyen una importante fuente estratégica para el abastecimiento de este recurso en muchas microcuencas andinas. Para la eficiencia de su aprovechamiento no se cuenta con suficientes estudios que desarrollen modelos hidrogeológicos y se deben de ampliar hasta la obtención de información más local. El cuadrángulo del Cusco presenta acuíferos importantes como es el caso de los acuíferos fisurados sedimentarios Kayra y Soncco que pertenecen al Grupo San Jerónimo, los cuales son considerados como los mejores productores de agua subterránea y que se evidencia en la galería filtrante Pillao Matao.

La microcuenca La Rinconada presenta escasa información hidrogeológica integrada respecto al comportamiento del flujo subterráneo, las direcciones preferenciales de circulación, las zonas de recarga y descarga, así como la influencia de las discontinuidades estructurales y unidades litológicas en la dinámica hidrogeológica. Si bien es cierto se tiene el estudio realizado por el INGEMMET del año 2018, el cual constituye un importante antecedente técnico; no obstante, se identifican oportunidades para complementar el conocimiento hidrogeológico de la zona, ya que este cuenta con un modelo conceptual, más no con un modelo numérico, además que está enfocado

hacia el funcionamiento de la galería filtrante Pillao Matao. Este déficit o limitación dificulta el aprovechamiento sostenible de las aguas subterráneas y la planificación de futuros proyectos hidráulicos y ambientales en la extensión de la microcuenca La Rinconada.

Ante esta situación, resulta necesario desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual actualizado y numérico, que permita representar y comprender la dinámica del flujo subterráneo en la microcuenca La Rinconada, y así generar una información que contribuya a la gestión de los recursos hídricos.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Cómo es la dinámica del flujo subterráneo en la microcuenca La Rinconada mediante el desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual y numérico para su gestión sostenible?

1.2.2. Problemas Específicos

1. ¿Cuáles son las características geomorfológicas y geológicas de la microcuenca La Rinconada para definir su influencia en la dinámica del flujo subterráneo?
2. ¿Cuáles son los parámetros hidrológicos que favorecen a la recarga del flujo subterráneo de la microcuenca La Rinconada?
3. ¿Cuáles son los parámetros y las unidades hidrogeológicas para determinar las direcciones preferenciales del flujo subterráneo?
4. ¿Cómo es el modelo hidrogeológico conceptual de la microcuenca La Rinconada para la interpretación de la dinámica del flujo subterráneo?
5. ¿Cómo es el modelo hidrogeológico numérico mediante el software FEFLOW para la interpretación de la dinámica del flujo subterráneo?

1.3.Justificación de la Investigación

1.3.1. Conveniencia

Esta investigación permitirá entender el comportamiento hidrogeológico de la microcuenca la Rinconada mediante el desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual y numérico, de manera que dicha información ayudará a proponer un aprovechamiento sostenible y servirá como base técnica para futuros proyectos hidráulicos en el distrito de San Sebastián. Asimismo, la investigación permitirá identificar las zonas de recarga, entender las direcciones de flujo y prevenir sobreexplotación.

1.3.2. Relevancia Social

Esta investigación de la microcuenca La Rinconada será útil para el desarrollo de futuros proyectos de extracción de aguas subterráneas ya sea con fines de consumo humano, agricultura, etc., que beneficiaría a las comunidades pertenecientes al distrito de San Sebastián, principalmente a la comunidad de Pillao Matao. Asimismo, esta investigación resulta relevante debido al crecimiento urbano acelerado del distrito, el cual incrementará la demanda hídrica y ejercerá mayor presión sobre los acuíferos. De igual manera, la expansión urbana aumenta la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, debido a la limitada información y conciencia de la población respecto al uso sostenible de este recurso.

1.3.3. Implicancias Prácticas

Esta investigación busca mostrar el uso del software FEFLOW para el desarrollo del modelo hidrogeológico numérico, la cual cuenta con técnicas matemáticas que facilitan la resolución de problemas matemáticos complejos, así como también mostrar la importancia de estar en constante innovación mediante el uso de herramientas que brinda el avance de la tecnología.

1.3.4. Valor Teórico

Esta investigación busca aportar información de la dinámica del flujo subterráneo de la microcuenca La Rinconada mediante un modelo hidrogeológico conceptual y numérico ya que existen pocos modelos hidrogeológicos locales, de manera que servirá como base metodológica regional. Asimismo, podrá usarse para posteriores correlaciones con otros modelos hidrogeológicos locales desarrollados con softwares distintos, así como también aportará información de las características geomorfológicas, geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas con información específica de áreas de estudio locales.

1.3.5. Utilidad Metodológica

Esta investigación busca aportar la dinámica del flujo subterráneo mediante un modelo hidrogeológico conceptual y numérico.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar la dinámica del flujo subterráneo de la microcuenca La Rinconada mediante el desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual y numérico para su gestión sostenible.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar geomorfológica y geológicamente la microcuenca La Rinconada para definir su influencia en la dinámica del flujo subterráneo.
2. Determinar los parámetros hidrológicos que favorecen a la recarga del flujo subterráneo de la microcuenca La Rinconada.
3. Determinar los parámetros hidrogeológicos y definir las unidades hidrogeológicas para determinar las direcciones preferenciales del flujo subterráneo.

4. Desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual de la microcuenca La Rinconada para interpretar la dinámica del flujo subterráneo.
5. Desarrollar y calibrar el modelo hidrogeológico numérico mediante el software FEFLOW para interpretar la dinámica del flujo subterráneo.

1.5.Delimitación del Estudio

1.5.1. Delimitación Espacial

1.5.1.1. Ubicación

El área de estudio comprende una extensión de 9.56 Km^2, abarca la microcuenca La Rinconada al Sur Este (SE) de la ciudad del Cusco, en el distrito de San Sebastián en la provincia y departamento del Cusco (Ver Anexo 1a. Mapa de ubicación). Geomorfológicamente, el área de estudio se encuentra formando parte del Altiplano (Serranías del Vilcaconga) (Ver Tabla 1).

Tabla 1

Coordenadas del punto de desfogue de la microcuenca La Rinconada en el sistema WGS84

Zona	Norte	Este
19 L	8500366	184963

1.5.1.2. Accesibilidad

El acceso al área de estudio se realiza por vía terrestre, iniciando en la ciudad del Cusco (Puerta principal de la UNSAAC) hasta llegar al paradero final de la empresa de transporte público "Expreso San Sebastián", en la comunidad de Pillao Matao en un aproximado de 35 minutos (ver Tabla 2 y ver Anexo 1b. Mapa de accesibilidad).

Tabla 2

Accesibilidad de Cusco al área de estudio

Tramo	Descripción	Condición de la vía	Distancia	Duración
1	Cusco (paradero de bajada UNSAAC) – Pillao Matao (paradero final "Expreso San Sebastián")	Asfaltada-trocha carrozable	12 km	35 min

1.5.2. Delimitación Temporal

La ejecución de esta investigación está comprendida entre los meses de diciembre de 2024 a febrero del 2025.

Capítulo II Marco Teórico

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes Internacionales

1. Gomez (2021) en su tesis titulada *"Simulación tridimensional del flujo de aguas"* tiene como objetivo simular el flujo tridimensional de las aguas subterráneas del acuífero Texcoco mediante el Visual MODFLOW para conocer su disminución del grado de explotación e implementar estrategias de manejo sostenible, tomando como método el de Velez para el modelo conceptual y la utilización del método de Diferencias Finitas con el software Visual MODFLOW para el modelo numérico. En sus resultados del modelo conceptual se desarrolló un marco hidrogeológico mostrando 6 unidades hidrogeológicas y valores de propiedades hidráulicas que fueron tomadas de los pozos de bombeo de acuíferos vecinos. En sus conclusiones se tiene que el modelo conceptual hidrogeológico permitió comprender mejor el comportamiento hidrodinámico del acuífero, los parámetros hidráulicos, los mecanismos de recarga existentes en el acuífero y la influencia climatológica y que el modelo numérico reflejó adecuadamente la dinámica de las aguas subterráneas. Este trabajo nos ayudó con los criterios para la caracterización de las unidades hidrogeológicas.
2. Muñoz (2019) en su memoria titulada "*Evaluación de metodologías de modelación numérica 3D para representar un depósito de relaves y su influencia en el flujo de infiltración usando Feflow"* tiene como objetivo evaluar el depósito de forma tridimensional y representar el crecimiento del depósito bajo la influencia en el flujo de infiltración siguiendo el método de modelación explícita del depósito en 3D. En sus conclusiones se tiene que una representación tridimensional es ventajosa para estimar

flujos de infiltración en evaluaciones de impacto ambiental y que representar el crecimiento del depósito en etapas discretas entrega una aproximación importante a los flujos de infiltración del relave. Este trabajo nos ayudó como referencia porque realiza una comparativa de los softwares usados para la modelación numérica 3D, el cual muestra un mayor alcance y permite determinar cuál sería el software más apropiado para este proyecto de investigación.

3. Martínez (2018) en su tesis titulada "*Modelo hidrogeológico conceptual y matemático para el municipio de Castilla La Nueva, ubicado en el departamento del Meta"* tiene como objetivo realizar un modelo hidrogeológico conceptual y numérico del municipio de Castilla La Nueva, tomando como método de construcción de 3 modelos como son el geológico, hidrológico e hidráulico para el modelo conceptual y la utilización del método de Elementos Finitos con el software FEFLOW para el modelo numérico. En sus conclusiones se tiene que el modelo conceptual se obtiene en base a información como la geología, hidrología, hidrogeología e hidráulica, para el modelo numérico se usan esos mismos datos con la ventaja que este permite reducir tiempos en el cálculo de los problemas complejo. Este trabajo aportó la metodología del modelamiento hidrogeológico conceptual y numérico.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

1. Fonseca (2019) en su tesis titulada "*Modelación hidrogeológica con Fleflow para extracción de flujo del acuífero del Río Lurín-Sector Chontay*" busca realizar el modelo conceptual y numérico para su extraccción de flujo del acuífero del Río Lurín con FEFLOW en régimen estacionario y transitorio para evaluar alternativas de extracción del flujo para su aprovechamiento oportuno, tomando como método la caracterización

geológica y geomorfológica, prospección geofísica (Sondaje Eléctrico Vertical), caracterización hidrológica e hidrogeológica para el modelo conceptual y la utilización del método de Elementos Finitos con el software FEFLOW para el modelo numérico. En sus conclusiones se tiene que el método numérico en régimen transitorio para extracción del flujo del acuífero muestra que la galería filtrante presenta descenso máximo producido menor que el de los pozos de extracción, pero la diferencia es mínima. Este trabajo se tomó los parámetros considerados para el modelamiento hidrogeológico conceptual y numérico.

2. Mogrovejo (2019) en su tesis titulada "*Estimación del caudal de filtraciones en macizos fracturados usando Feflow para galerías de drenaje: Caso Derrumbe 5 - Huancavelica – 2019"* busca estimar el caudal de filtraciones en los macizos fracturados que atraviesan la galería de drenaje, tomando como método la caracterización de la geología y geotecnia con sondeos diamantinos y cuantificación de caudales a través de datos piezométricos y obtención de permeabilidades de las masas geológicas ubicadas en el Derrumbe 5 para el modelo conceptual y la utilización del método de Elementos Finitos con el software FEFLOW para el modelo numérico. En sus conclusiones se tiene que el caudal convergente a la galería de drenaje es de 5.32 l/s aproximadamente, el modelo conceptual permitió la identificación de un acuífero libre que debido a su complejidad geométrica no se puede representar oportunamente por la carencia de datos de sondeo y el modelo numérico de las masas geológicas del Derrumbe 5 muestra un error normalizado menor del 5% que es aceptable. El aporte de este trabajo fue la metodología en la consideración de las características geomecánicas y geo-hidráulicas y por el uso del Software FEFLOW.
3. Ingol & Castañeda (2017) en su trabajo de investigación titulado "*Directrices para el modelamiento de aguas subterráneas en Perú"* busca proporcionar aspectos esenciales

para el desarrollo y evaluación de modelos conceptuales y numéricos del flujo de agua subterránea, tomando como método los parámetros las condiciones geológicas e hidrológicas, componentes del balance de agua y propiedades hidráulicas como aspectos para el modelo conceptual y la utilización del método de Diferencias Finitas con el software Visual MODFLOW para el modelo numérico. En sus conclusiones se tiene que el modelo conceptual es importante para conocer el sistema hidrogeológico y el flujo de agua subterránea y el modelo numérico muestra el método numérico para resolver las ecuaciones diferenciales parciales a través de una serie de fases, la calibración y análisis de incertidumbres son muy importantes son fases importantes para un adecuado modelo numérico. Este trabajo se consideró como referencia porque presenta aspectos necesarios y su descripción para el desarrollo del Modelo conceptual y Modelo Numérico, y su evaluación.

2.1.3. Antecedentes Locales

1. Aguirre (2018) en su tesis titulada "*Modelo hidrogeológico numérico conceptual de la microcuenca Huancarqui, distrito Yaurisque*" busca desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual y numérico de la microcuenca de Huancarqui, tomando como método la caracterización del marco hidrogeológico a través de parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas, análisis de recargas y variación del almacenamiento de agua en la microcuenca a nivel subterráneo en base a las características geológicas, hidrológica e hidrogeológica para el modelo conceptual y la utilización del método de Elementos Finitos con el software FEFLOW para el modelo numérico. En sus resultados identificó los acuíferos Kayra, Soncco II y Paruro II; y a los acuitardos Soncco I y Paruro I, donde a estos acuitardos los considera como acuíferos pobres de acuerdo con los resultados de las

pruebas de permeabilidad y porosidad realizados a estas unidades. En sus conclusiones se tiene que el modelo conceptual muestra un sistema de interacción de los componentes tales como la precipitación dada en la parte alta y la evapotranspiración a lo largo de la microcuenca de manera que el agua fluctúa de la parte alta hacia la desembocadura del río. Este trabajo nos ayudó con la descripción de sus características de las unidades geológicas porque se realizó en una zona cercana a la zona de estudio de este proyecto de tesis, y también porque hace uso del Software FEFLOW.

2. Arqque & Quispe (2023) en su tesis titulada "*Modelamiento hidrogeológico para determinar la influencia del flujo subterráneo a los acuíferos de la microcuenca Huanacahuire, San Jerónimo – Cusco"* buscan determinar el movimiento del flujo subterráneo, tomando como método que parte con la caracterización de características geomorfológicas y geológicas, seguida del cálculo de las características hidrológicas e hidrogeológicas para así generar un modelo conceptual y la utilización del método de Diferencias Finitas con el software Visual MODFLOW para el modelo numérico. En sus conclusiones se tiene que el modelo conceptual muestra que el flujo subterráneo fluctúa hacia el suroeste basado en la estratificación y hacia el sureste basado en la fractura principal y el modelo numérico muestra líneas equipotenciales predominantes hacia el norte y algunos hacia fuera de la microcuenca. Esta tesis aporta presenta características geológicas similares que la zona de estudio de esta investigación de tesis porque se desarrolló en una cuenca aledaña a la microcuenca de estudio.
3. Carlotto, Cárdenas, & Carlier (2011) en su trabajo de investigación titulado *"Geología del Cuadrángulo de Cusco, Hoja 28 S"* describen a las unidades geológicas clasificadas en: acuíferos, acuicludos, acuitardos y acuífugos. Dentro de la descripción de los acuíferos se

menciona que los estratos de mayor categoría en producción en la zona vienen a ser los acuíferos fisurados de las formaciones Kayra y Soncco que pertenecen al Grupo San Jerónimo y que afloran en gran parte del cuadrángulo del Cusco. De este estudio se tomó como referencia las descripciones y clasificaciones de las unidades geomorfológicas, geológicas e hidrogeológicas de todo el cuadrángulo del Cusco, y porque el área de estudio del presente proyecto de tesis se encuentra dentro de este cuadrángulo.

4. Peña & Santos (2018) en su trabajo de investigación "*Estudio hidrogeológico para determinar perímetros de protección de la zona de recarga de la galería filtrante de Pillao Matao"* busca elaborar un estudio hidrogeológico de la microcuenca Pillao Matao para una gestionar correctamente el agua subterránea así como también delimitar los perímetros de protección, tomando como método la caracterización hidrogeológica según las características hidrológicas, el contexto geológico y geomorfológico, la evaluación de fuentes de agua subterránea y su respectivo análisis químico e isotópico, la determinación de parámetros hidrogeológicos y zonas de fracturas y la delimitación de los perímetros de protección. En sus conclusiones se tiene que las zonas de protección se encuentran en la parte alta de la microcuenca Pillao Matao con un perímetro de 7.53 km. Este trabajo se consideró como referencia porque abarca un sector de la microcuenca La Rinconada, es decir, el estudio se desarrolló dentro de la microcuenca, pero centrada en la galería Pillao Matao.

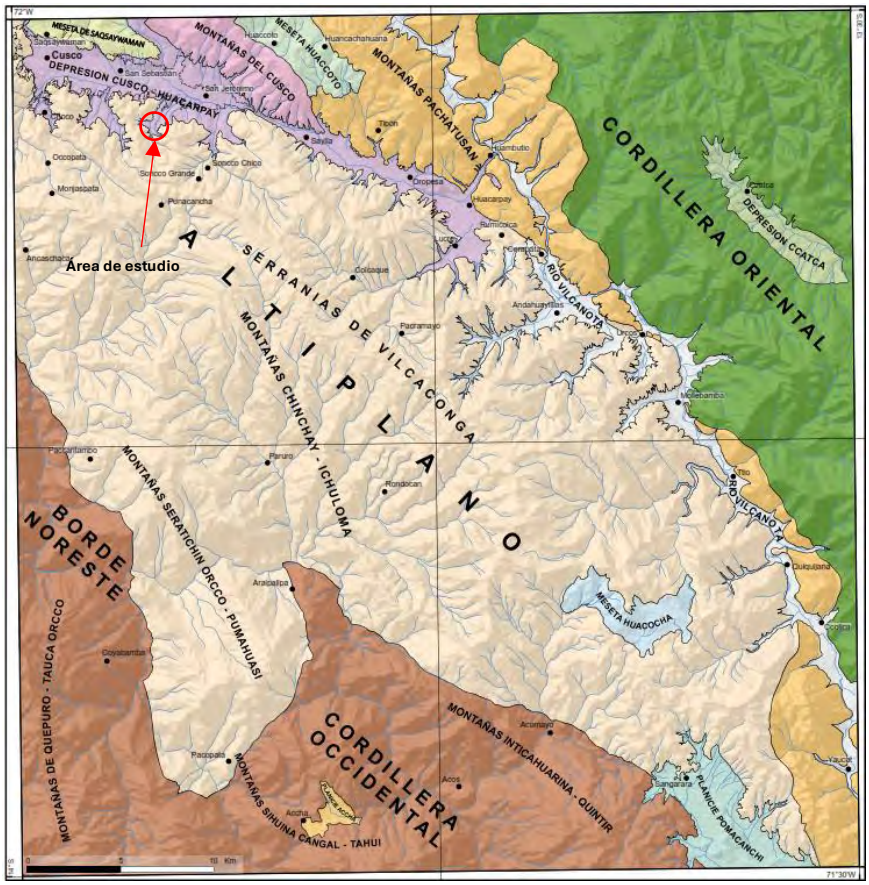
2.2. Bases Teóricas

Geomorfología y geología del Cusco

La geología del cuadrángulo del Cusco presenta cuatro unidades geomorfológicas regionales: Cordillera Oriental, zona intermedia Altiplano-Cordillera Oriental, Altiplano y borde noreste de la Cordillera Occidental, las cuales cuentan unidades locales, destacando las serranías de Vilcaconga (ver Figura 1) por abarcar el área de estudio (Carlotto, Cárdenas, & Carlier, Geología del Cuadrángulo de Cusco Hoja 28-s, 2011).

Figura 1

Unidades geomorfológicas locales del cuadrángulo del Cusco

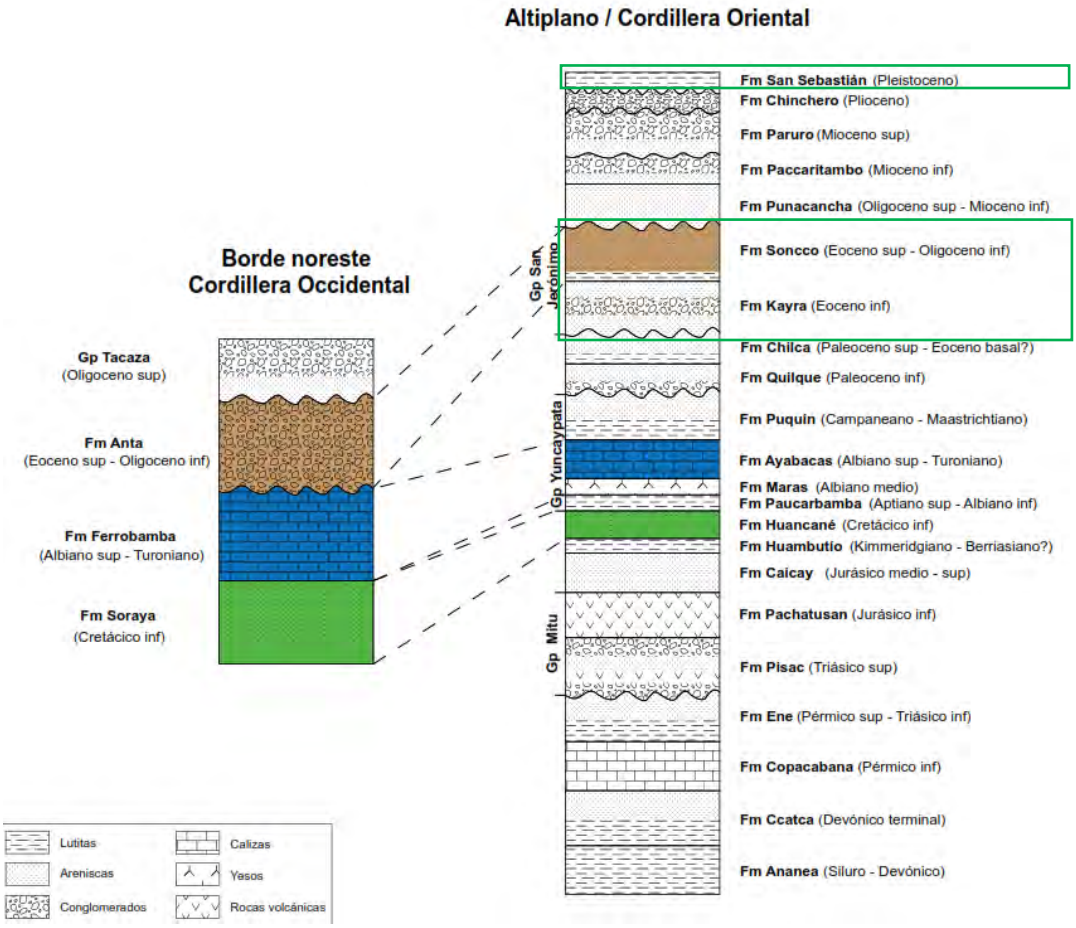


Nota. Modificado de Carlotto, Cárdenas, & Carlier (2011, p. 10).

También presenta la estratigrafía donde describe las unidades litoestratigráficas que van desde el basamento con rocas del Paleozoico que aflora en la Cordillera Oriental, seguido del Mesozoico y Cenozoico que afloran en el Altiplano y el borde NE de la Cordillera Occidental, las cuales cuentan unidades locales, destacando el Grupo San Jerónimo (ver Figura 2) por abarcar el área de estudio (Carlotto, Cárdenas, & Carlier, Geología del Cuadrángulo de Cusco Hoja 28-s, 2011).

Figura 2

Estratigrafía de los dominios morfoestructurales regionales



Nota. Modificado de Carlotto, Cárdenas, & Carlier (2011, p. 15).

Aforo volumétrico de caudal del agua en manantiales

Este método se usa para determinar caudales de manantiales, es decir caudales muy pequeños, el cual se basa en medir el tiempo que demora en llenarse un balde de un volumen conocido (Ministerio de Agricultura y Riego, 2014). El caudal se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V_b}{T}$$

Donde:

Q = caudal

V_b= volumen de balde

T = tiempo que demora en llenarse

Ensayo de permeabilidad Lefranc

Este ensayo geotécnico que se caracteriza por realizarse in situ el cual determina el coeficiente de permeabilidad en suelos ya sean permeables o semipermeables del tipo granular y en rocas muy fracturadas por debajo del nivel freático. Este ensayo presenta dos procedimientos, a carga constante y a carga variable (Maldonado, 2020). A continuación, la conductividad hidráulica (K) para un procedimiento a carga variable dada por la fórmula general de Hvorslev adaptada por Maldonado:

$$K = \frac{d_e^2 \, ln(\frac{2L}{d})}{8Lt} ln(\frac{h_1}{h_2})$$

Donde:

h_1, h_2 = altura de agua al inicio y final del ensayo en cm

t = tiempo entre la observación de los niveles h_1 y h_2 en s

L = longitud de la zona filtrante en cm

d = diámetro de la zona filtrante en m

d_e = diámetro de entubación, puede ser igual a d en cm

2.3. Hipótesis

2.3.1. Hipótesis General

El desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual y numérico permite determinar la dinámica del flujo subterráneo de la microcuenca La Rinconada.

2.3.2. Hipótesis Específicas

1. En el contexto geomorfológico las laderas de montaña baja con pendiente fuerte y en el contexto geológico las formaciones Kayra y Soncco controlan la dinámica del flujo subterráneo porque estas permiten la infiltración del agua.
2. El parámetro hidrológico que aporta a la recarga de los acuíferos fisurados sedimentarios de Kayra y Soncco es la precipitación.
3. Los parámetros hidrogeológicos de conductividad hidráulica y de porosidad efectiva son mayores a 10^{-2} m/día y a 5% respectivamente, y poseen condiciones favorables para el transporte del flujo subterráneo, teniendo a los acuíferos fisurados sedimentarios Kayra y Soncco que influyen en la dirección del flujo subterráneo dado por su porosidad secundaria, obteniéndose una dirección preferencial del flujo subterráneo hacia el norte, que se ajusta a la gradiente hidráulica.
4. El desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual es producto de la integración del contexto geomorfológico-geológico, hidrológico e hidrogeológico en la microcuenca La Rinconada que permite representar las líneas de flujo subterráneo con dirección predominante hacia el norte.

5. El modelo numérico muestra el comportamiento del flujo subterráneo mediante el software FEFLOW en base a la piezometría determinada por los manantiales aflorantes en superficie, con un RMS Normalizado menor al 10%.

2.4.Variables

2.4.1. Identificación de Variables

2.4.1.1. Variable independiente

- Modelo hidrogeológico conceptual y numérico

2.4.1.2. Variable dependiente

- Dinámica del flujo subterráneo

2.4.2. Operacionalización de Variables

Tabla 3

Operacionalización de variables de la investigación

Variable dependiente	Variable independiente	Dimensiones	Subdimensiones	Indicadores	Técnicas	Instrumentos de medida
Dinámica del flujo subterráneo	Modelo hidrogeológico conceptual y numérico	Geomorfología	Fisiografía	Formas de relieve del terreno	Cartografiado	Google Earth, ArcGIS
			Pendientes	Grado de inclinación del terreno		Modelo de Elevación Digital (DEM)
		Geología	Estratigrafía	Unidades litoestratigráficas	Cartografiado	Flexómetro, picota, lupa, etc.
			Geología estructural	Condición de fallas	Cartografiado	Brújula, protactor
				Condición de estructuras primarias (estratificación)	Cartografiado	Brújula
				Condición de estructuras secundarias (fracturas en materiales rocosos)	Caracterización mediante ventanas estructurales	Wincha, brújula, formatos de mapeo mediante ventanas estructurales
		Hidrología	Condiciones hidrológicas	Parámetros hidrológicos (precipitación, temperatura, evapotranspiración real, escorrentía e infiltración)	Recopilación de datos secundarios y balance hidrológico	Base de datos (SENAMHI y SNIRH), Hoja de cálculo (Excel) de evapotranspiración potencial y de balance hidrológico

Variable dependiente	Variable independiente	Dimensiones	Subdimensiones	Indicadores	Técnicas	Instrumentos de medida
Dinámica del flujo subterráneo	Modelo hidrogeológico conceptual y numérico	Hidrogeología	Unidades hidrogeológicas	Unidades litoestratigráficas	Cartografiado	Flexómetro, picota, lupa, etc.
				Conductividad para materiales consolidados	Análisis cuantitativo	Fórmulas y hoja de cálculo.
				Conductividad para materiales no consolidados	Ensayos de permeabilidad Lefranc	Cronómetro, tubo, flexómetro, etc.
				Transmisividad	Análisis cuantitativo	Fórmulas y hoja de cálculo.
				Porosidad eficaz	Revisión documental	Tablas referenciales
				Coeficiente de almacenamiento	Revisión documental	Tablas referenciales
				Inventario y aforo volumétrico de fuentes de agua subterránea	Observación y aforo volumétrico	GPS, Balde, cronómetro, informes, etc.
		Piezometría	Niveles piezométricos	Dirección del flujo subterráneo	Análisis hidrogeológico	Mapa piezométrico

2.5. Definición de Términos Básicos

1. Discontinuidad

Según González de Vallejo, Ferrer & Oteo (2002) define como cualquier plano de separación en el macizo rocoso y condicionan de una forma definitiva las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico de los macizos rocosos.

Las características y parámetros geométricos de las discontinuidades, dadas por González de Vallejo, Ferrer & Oteo (2002), que condicionan sus propiedades y su comportamiento mecánico, las cuales son: orientación **(**buzamiento y dirección de buzamiento de la discontinuidad), espaciado (distancia media perpendicular entre los planos de discontinuidad de una misma familia), persistencia (extensión del plano de discontinuidad), rugosidad (determina su resistencia al corte), abertura (distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad), relleno (es importante conocer el tipo de relleno debido a que estos pueden variar en sus propiedades resistentes) y filtraciones (si existe relleno como si no, las discontinuidades son el camino preferente para las filtraciones del agua en el macizo rocoso).

2. Fallas (concepto y tipos)

Según Rivera Mantilla (2005) define como una estructura en la que se produjo una fractura o ruptura con longitudes desde muy pequeñas a cientos de kilómetros acompañadas de desplazamiento relativo entre dos bloques separados por la fractura, estos desplazamientos van desde escasos centímetros hasta cientos de metros. Entre los tipos de fallas según la dirección del movimiento y relación con la superficie se clasifican en fallas normales, inversas, de rumbo rotacional, entre otras. Las fallas normales presentan el bloque techo desplazado hacia abajo en relación con el bloque piso. Las fallas inversas presentan el bloque techo levantado con respecto al bloque piso. Las fallas de rumbo se desarrollan paralelamente al rumbo del plano de falla y se

dividen en fallas de rumbo dextral donde el bloque de la derecha se desplaza en dirección del observador o el movimiento es en sentido horario y en fallas de rumbo sinestral donde el bloque de la izquierda se desplaza en dirección del observador o el movimiento es en sentido antihorario.

3. **Ventana estructural**

Es un método de mapeo estructural que comprende realizar un mapeo donde se caracterizan a las principales familias de discontinuidades dentro de un segmento que tiene que ser representativo o una ventana de un tamaño fijo. Una ventana normalmente puede tener una dimensión aproximada de 10 m (Wyllie & Mah, 2004).

4. **Cuenca**

Comprende un área territorial definido topográficamente y delimitado a través de la línea divisoria de las aguas o parte aguas (partes altas de las montañas), en este espacio es donde se concentran todos los cursos de agua que confluyen formando un sistema conectado de cursos de agua y desembocan en un punto común (punto de salida o punto de aforo) (Aparicio, 1992).

5. **Precipitación**

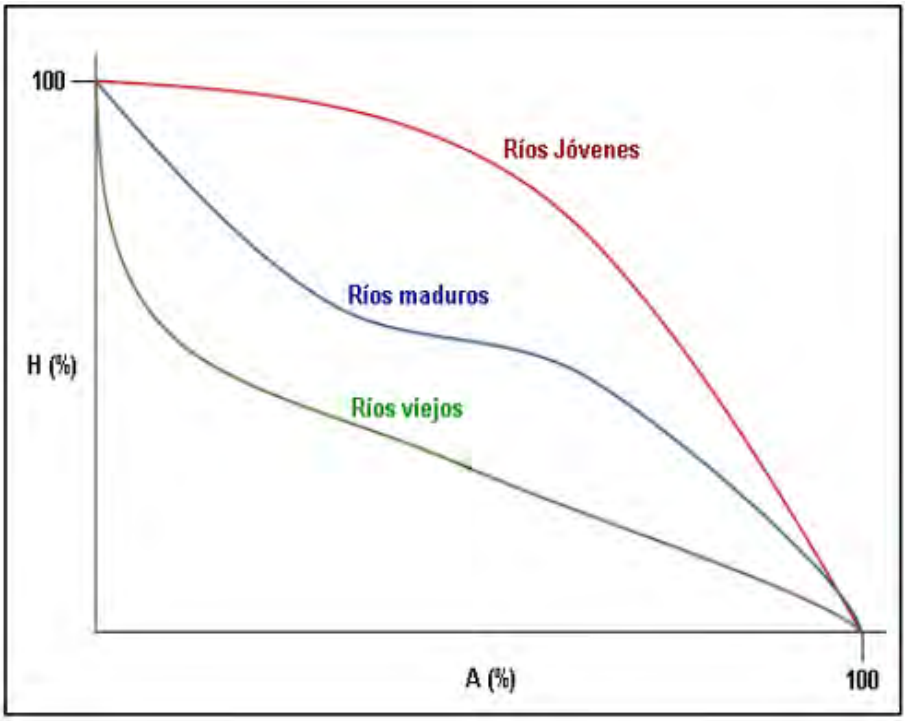
Proceso por el cual las nubes van hacia el continente donde una parte de estas sufre un proceso termodinámico adiabático y la otra parte uno no adiabático, de manera que las partículas pequeñas de agua incrementan su tamaño hasta poder vencer la resistencia del aire y es allí cuando caen a la superficie terrestre por efecto de la gravedad (Martínez, Martínez, & Castaño, 2005).

6. **Curva hipsométrica**

Es una gráfica que representa, a través de curvas, como va variando el área drenada según la altura de la superficie de cuenca como se muestra en la Figura 3. También, se asocia con las edades de los ríos de las respectivas cuencas (Ibáñez Asencio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2009).

Figura 3

Variación de la forma de la curva hipsométrica según la edad del río.



Fuente: Ibáñez Asencio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer (2009, p. 9).

7. **Escorrentía Superficial y Subterránea**

Aquellas aguas que no se infiltraron en el suelo y se quedaron en superficie, constituyen a la escorrentía superficial, mientras que las aguas que se infiltraron en el suelo y discurren por su interior constituyen la escorrentía subterránea o subsuperficial (Ibáñez Asencio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2009).

8. **Evapotranspiración potencial (ETP)**

Se define como el volumen de agua que volvería a la atmósfera en forma de vapor producto de la evaporación directa y de transpiración de las plantas suponiendo que siempre hubiese la cantidad de agua necesaria para dichos procesos (Martínez, Martínez, & Castaño, 2005).

9. Balance hidrológico

Se define como la expresión que refleja el principio de conservación de la masa en una microcuenca cerrada y en un intervalo de tiempo determinado que permite obtener la evapotranspiración real, el excedente y déficit de agua de manera mensualizada. El balance suele empezarse al final del periodo de estiaje para poder suponer que la reserva de agua en el suelo para ese mes es cero, tanto la precipitación como la evapotranspiración potencial se expresan en mm/mes o mm/el, considerando a la precipitación como único aportante de agua en la naturaleza (Martínez, Martínez, & Castaño, 2005).

$$\text{ENTRADAS} - \text{SALIDAS} = \Delta\ \text{ALMACENAMIENTO} = 0$$

10. Acuíferos

Son formaciones capaces de almacenar y transmitir el agua (gravas, arenas, materiales calizos, etc.), teniendo una capacidad de drenaje alta (González de Vallejo, Ferrer, & Oteo, 2002).

11. Acuitardos

Son formaciones capaces de almacenar el agua en cantidades muy importantes, pero la trasmiten con dificultad (limos, arenas limosas, arenas arcillosas, etc.) y su capacidad de drenaje es media a baja (González de Vallejo, Ferrer, & Oteo, 2002).

12. Manantiales

Se define como una corriente de agua subterránea con tres condiciones, el agua debe provenir de una gran corriente, el agua debe estar en movimiento y el movimiento de agua debe tener cierta duración, de manera que hay manantiales permanentes, variables o temporarios (Soldevilla, 1863).

13. Permeabilidad y permeabilidad efectiva (Conductividad hidráulica)

Se define como un parámetro que permite evaluar la capacidad de poder transmitir agua de una formación en función de la textura de esta, sin tener que relacionarla con su forma geométrica o con su estructura. Dentro de los conceptos de permeabilidad se puede definir a: la permeabilidad efectiva, que es la permeabilidad ligada a las características texturales del medio físico y a las del fluido que se transmite, y la permeabilidad intrínseca que solo depende de las características internas del medio permeable (González de Vallejo, Ferrer, & Oteo, 2002).

14. Porosidad eficaz *(n_e)*

Se define como la relación del volumen de poros interconectados entre sí con respecto al volumen total de roca, expresado en porcentaje, a diferencia de la porosidad total que se refiere al volumen de poros totales interconectados entre sí o no (Martínez, Martínez, & Castaño, 2005).

15. Transmisividad

Se define como un parámetro para evaluar la capacidad de transmitir agua de los acuíferos, donde se toma en cuenta la textura del acuífero, las características del fluido y también a las características geométricas o estructurales. (González de Vallejo, Ferrer, & Oteo, 2002).

16. Coeficiente de almacenamiento (S)

Se define como el volumen de agua que se puede extraer en una columna de acuífero considerándola de base unitaria y altura (espesor saturado del acuífero) cuando varía el potencial hidráulico resultando un valor adimensional (Martínez, Martínez, & Castaño, 2005).

17. Método de Elementos Finitos

Se define como un método numérico especialmente usado para regiones irregulares mediante la aplicación de Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP) del tipo elípticas como la ecuación bidimensional de Laplace. En este método los puntos de la malla pueden estar espaciados

de manera no uniformizada resolviendo el problema de hacer coincidir los puntos con una frontera, sino que también facilita la colocación más estrecha de los puntos entre sí en partes en regiones donde la solución del problema varía rápidamente, con lo que se mejora la exactitud. También denominado de manera abreviada como MEF (Esquerro, 2012).

18. Modelamiento hidrogeológico

El modelo conceptual representa de manera descriptiva el sistema de agua subterránea, esta incorpora la descripción y la interpretación de las condiciones geológicas e hidrológicas. En cambio, el modelo numérico es una representación matemática de los procesos físicos que están relacionados a la hidrología subterránea, se basa en la Ley de Darcy y conservación de la masa. incluye la selección del software de modelamiento, el dominio computacional, la discretización numérica espacial y temporal, condiciones iniciales y condiciones de frontera. Asimismo, se incorpora el proceso de calibración y análisis de sensibilidad, predicciones y análisis de incertidumbre. Este último es un aspecto esencial que todo modelamiento debe incluir para evaluar el impacto del cambio de los valores de los parámetros sobre las predicciones (Ingol & Castañeda, 2017).

19. Dinámica del flujo subterráneo

Se refiere al movimiento y distribución del agua subterránea a través de procesos de percolación y de la recarga de acuíferos. El movimiento del agua subterránea está determinado por factores como el gradiente hidráulico, porosidad, permeabilidad y gravedad, además esta influenciado por la presión en el subsuelo y por las características de las formaciones rocosas (StudySmarter, s. f.)

Capítulo III Método

3.1. Enfoque de la Investigación

Esta investigación presenta un enfoque mixto porque los datos recolectados, analizados e interpretados serán del tipo cuantitativo y cualitativo (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

3.2. Tipo de Investigación

Esta investigación presenta un tipo de investigación aplicada porque se busca resolver un problema, que para este caso es la falta de información específica de la dinámica del flujo subterráneo en áreas locales (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

3.3. Alcance de Investigación

Esta investigación presenta un alcance explicativo porque se describen, analizan y clasifican las características geomorfológicas, geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas; que posteriormente se relacionan en el modelo hidrogeológico para determinar la dinámica del flujo subterráneo (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

3.4. Diseño de Investigación

Esta investigación presenta un diseño no experimental porque no se realiza la manipulación de variables, se observan y analizan las condiciones naturales (geomorfología, geología, hidrología e hidrogeología). En este caso es del tipo transversal porque recolectan datos en el año 2025 (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

3.5. Población

Esta investigación presenta como población la microcuenca La Rinconada la cual presenta unidades geomorfológicas, geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas.

La cantidad de población beneficiada con esta información y con futuros proyectos que abarque a la microcuenca la Rinconada, está conformada por la población de las comunidades de

Pillao Matao y Kirkas siendo un total aproximado de 443 a 473 familias. La cantidad de población de Kirkas conformada por 200 a 250 familias según dato de la Municipalidad Distrital de San Sebastián en el año 2023 y la comunidad de Pillao Matao cuenta con una población conformada por 223 familias con 1338 habitantes, según la memoria descriptiva del proyecto "Canal de derivación de aguas pluviales – Pillao Matao" del 2025.

3.6. Muestra

Para esta investigación se toma muestras no probabilísticas porque la selección de los elementos a estudiar no depende de la probabilidad sino del propósito que tiene el investigador (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

Los criterios considerados para el muestreo dados Otzen & Manterola (2017) son los siguientes:

- **Intencional o por juicio**: se considera a los más representativos o relevantes como por ejemplo en la elección de los puntos para la elaboración de las ventanas estructurales para la caracterización de discontinuidades.
- **Conveniencia:** se considera a los elementos más accesibles o próximos, como por ejemplo los puntos para los ensayos de conductividad hidráulica.

3.7. Unidad de Análisis

Como unidad de análisis se tiene las características geomorfológicas, geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de la microcuenca La Rinconada.

3.8. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Según Hernández et al. (2014) se tienen las siguientes técnicas e instrumentos de recolección de datos.

- Observación (cartografiado geomorfológico, geológico y estructural e inventario de fuentes de agua de subterráneas) para ello se hará uso de un mapa base y mapas regionales.
- Datos secundarios (datos de precipitación y temperatura de estaciones meteorológicas – SENAMHI y SNIRH) y
- Procedimientos específicos propios de cada disciplina (caracterización de discontinuidades mediante ventanas estructurales, ensayos de permeabilidad Lefranc, aforo volumétrico de caudal del agua en manantiales, etc.) (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

3.9. Plan de Análisis de Datos

Este plan muestra el procesamiento, análisis e interpretación de los datos obtenidos en las etapas previas y redacción de tesis. Esta etapa se divide en fases para mostrar un orden cronológico apropiado en vista que se hizo uso del software FEFLOW, el cual contempla varios pasos para la obtención del modelo hidrogeológico. Estas fases son las siguientes:

3.9.1. Fase Preliminar

Fase que comprende los trabajos de clasificación de la información y datos obtenidos en la etapa de campo.

3.9.2. Fase de Consolidación de Datos

Fase que comprende los trabajos de digitalización y procesamiento de los datos, así como la generación de capas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que pueden ser archivos de puntos, líneas, polígonos, rasters y otros formatos relevantes para la generación del modelo. Esta fase también comprende la creación de mapas específicos (geomorfológicos, geológicos, estructural, etc.).

3.9.3. Fase de Diseño Conceptual

Fase que comprende los trabajos de diseño de los modelos geológico, hidrológico e hidráulico como componentes para la obtención del modelo hidrogeológico conceptual. Esta fase contempla un paso previo relevante para la fase de diseño numérico. Esta fase es indispensable para la fase de diseño numérico.

3.9.4. Fase de Diseño Numérico

Fase que comprende los trabajos de diseño del modelo numérico con el uso e integración de datos al paquete informativo FEFLOW.

3.9.5. Fase de Calibración

Fase que comprende la verificación de la correlación que existe entre los datos de campo y aquellos datos que va brindando el software a través del modelo, cabe mencionar que debe existir un mínimo de tolerancia de error, por lo que se entiende que la calibración puede realizarse varias veces.

3.9.6. Fase de ejecución y resultados

Fase que comprende la simulación de escenarios hipotéticos, los que proporcionan resultados en forma de mapas, así como valores que pueden ser interpretados.

3.9.7. Fase de interpretación y redacción

Fase que comprende el análisis e interpretación de resultados y posterior redacción de tesis.

3.10. Aspectos Éticos

Toda la información recolectada es citada y referenciada de manera que se respalda su validez y da el crédito a las fuentes originales, además dicha información es parafraseada con nuestras propias palabras, con esto también se evita problemas de plagio, lo cual es importante en todos los trabajos de investigación.

3.11. Equipos, Instrumentos y Materiales

3.11.1. Equipos e Instrumentos

- Brújula
- GPS
- Rayador
- Lupa
- Flexómetro
- Protactor
- Picota
- Celular o cámara fotográfica
- Cronómetro

3.11.2. Materiales

- Libreta de campo
- Tablero
- Mapas de ubicación, base, geomorfológico y geológico a escala regional y el topográfico a escala local.
- Colores, lápices, lapiceros y plumones
- Ácido clorhídrico
- Imagen satelital
- Bolsa hermética para muestreo
- EPPs (chaleco, zapatos, lentes, casco o sombrero, cortaviento, poncho de agua y guantes)
- Tubo PVC, etc.

3.12. Etapas de la Investigación

3.12.1. Etapa de Pre-campo

- Recolección de información bibliográfica diversa relacionada al tema y área de estudio (artículos científicos, papers, libros, tesis, etc.).
- Identificación de la accesibilidad al área de estudio y elaboración de su respectivo mapa.
- Elaboración y ploteo de los mapas preliminares de ubicación, base, geomorfológico, geológico y estructural a escala regional para la referencia de dichos aspectos en campo, y de los mapas topográficos a escala local para el cartografiado y mapeo en general.
- Elaboración del plan de actividades para la etapa de campo.
- Equipamiento de materiales, herramientas y equipos.

3.12.2. Etapa de Campo

- Identificación y reconocimiento general del área de estudio.
- Cartografiado de las características geomorfológicas, geológicas (muestreo y levantamiento de columnas estratigráficas) y estructurales a escala local.
- Caracterización de las discontinuidades en los afloramientos rocosos a través de ventanas estructurales.
- Inventariado y aforo volumétrico de caudal del agua en manantiales.
- Ejecución del ensayo de permeabilidad Lefranc.

3.12.3. Etapa de Post campo

Esta etapa muestra el procesamiento, análisis e interpretación de los datos obtenidos en las etapas previas y redacción de tesis. Esta etapa comprende las siguientes fases: fase preliminar, fase de consolidación de datos, fase de diseño conceptual, fase de diseño numérico, fase de calibración, fase de ejecución y resultados y fase de interpretación y redacción.

Capítulo IV Resultados

4.1. Caracterización geomorfológica y geológica

4.1.1. Geomorfología

4.1.1.1. Geomorfología Regional

Según Carlotto, Cárdenas & Carlier (2011) el área de estudio a nivel regional forma parte de las Serranías de Vilcanconga y parte de la depresión Cusco – Huacarpay, ubicada al sureste de la ciudad del Cusco y esta a su vez forma parte de las unidades geomorfológicas que engloba el Altiplano. Esta unidad se caracteriza por ser una altiplanicie con altitudes que van desde los 3800 msnm hasta los 4000 msnm, aunque localmente pueden superar los 4400 msnm, principalmente afloran las capas rojas del Grupo San Jerónimo que a diferencia de otras rocas mesozoicas del Altiplano cuentan con una gran potencia, de más de 6000 m, con montañas disectadas por la acción de los ríos Huatanay y Vilcanota y de quebradas menores que le dan una configuración accidentada a pesar de ser parte del Altiplano (ver Anexo 1c. Mapa geomorfológico regional).

4.1.1.1. Pendientes

Las pendientes presentes en la microcuenca La Rinconada son originadas principalmente por la acción de procesos erosivos dadas por la escorrentía superficial y por las características erosivas de los materiales (litología), la cual se refleja en la formación de terrazas y quebradas secundarias con pendientes abruptas.

Para la clasificación de las pendientes en la microcuenca La Rinconada se tomó como referencia las clasificaciones dadas por Zavala, J. (1993), por el Instituto Nacional de Recursos Naturales (Perú) – INRENA (2001) y por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación – FAO (1995). En la Tabla 4 se obtiene una clasificación adaptada para la sierra del Cusco (ver Anexo 1d. Mapa de pendientes).

Tabla 4

Clasificación de pendientes

Ítem	Pendientes (%)	Pendientes (°)	Descripción	Área (Km2)	Porcentaje (%)
1	0-3%	0°-1.7°	Pendientes planas o casi planas	0.28	2.96%
2	3-12%	1.7°-6.8°	Pendientes ligeramente inclinadas	0.20	2.08%
3	12-25%	6.8°-14°	Pendientes moderadas	0.66	6.92%
4	25-50%	14°-26.5°	Pendientes fuertes	4.23	44.28%
5	50-75%	26.5°-37°	Pendientes muy fuertes	3.40	35.54%
6	>75%	>37°	Pendientes extremadamente fuertes	0.79	8.23%

4.1.1.2. Geomorfología Local

El área de estudio a nivel local está conformada por las siguientes unidades geomorfológicas (ver Anexo 1e. Mapa geomorfológico local):

4.1.1.2.1. Ladera de Montaña en Roca Sedimentaria con Pendiente Fuerte (Lmrspf)

Está unidad está comprendida por pendientes mayores a 25%, con altitudes que van desde los 3265 msnm hasta 4069 msnm. Se extiende en la cabecera y en las áreas de elevaciones altas de la parte media de la microcuenca; se caracteriza por ser la unidad con mayor extensión del área de estudio. Sobre esta unidad afloran areniscas de las formaciones Kayra y Soncco. Estas laderas se encuentran fuertemente disectadas y colindan principalmente con las cimas de montaña y laderas de montaña con pendiente suave (ver Figura 4).

Figura 4

Vista hacia el norte de laderas de montaña en roca sedimentaria con pendiente fuerte



4.1.1.2.2. Ladera de Montaña en Roca Sedimentaria con Pendiente Suave (Lmrsps)

Está unidad está comprendida por pendientes menores a 25%, con altitudes que van desde los 3299 msnm hasta 4014 msnm. Se extiende en las áreas con elevaciones bajas y en las proximidades de la desembocadura de la microcuenca. Sobre esta unidad afloran las formaciones Kayra, Soncco y San Sebastián; y otros depósitos cuaternarios. Estas laderas cuentan con pendientes constantes y son moderadamente disectadas; colindan principalmente con las laderas de montaña con pendiente fuerte y terrazas fluvio-aluviales (ver Figura 5).

Figura 5

Vista hacia oeste de laderas de montaña en roca sedimentaria con pendiente suave



4.1.1.2.3. Cima de Montaña en Roca Sedimentaria (Cmrs)

Está unidad comprende las áreas de mayor elevación de las montañas y laderas de montaña, se caracteriza por sus pendientes suaves y constantes, con altitudes que van desde los 3285 msnm hasta los 4085 msnm. Sobre esta unidad afloran areniscas feldespáticas de las formaciones Soncco

y Kayra. Las cimas de montaña colindan principalmente con las laderas de montaña con pendiente fuerte y montañas bajas (ver Figura 6).

Figura 6

Vista hacia el norte de cima de montaña en roca sedimentaria



4.1.1.2.4. Montaña Baja en Roca Sedimentaria con Pendiente Fuerte (Mbrspf)

Está unidad comprende elevaciones con cimas suaves y flancos con pendientes fuertes, con altitudes que van desde los 3427 msnm hasta los 3853 msnm. Se extiende en el sureste de la microcuenca. Sobre esta unidad afloran areniscas feldespáticas de las formaciones Soncco y Kayra (ver Figura 7).

Figura 7

Vista hacia el norte de montaña baja en roca sedimentaria con pendiente fuerte

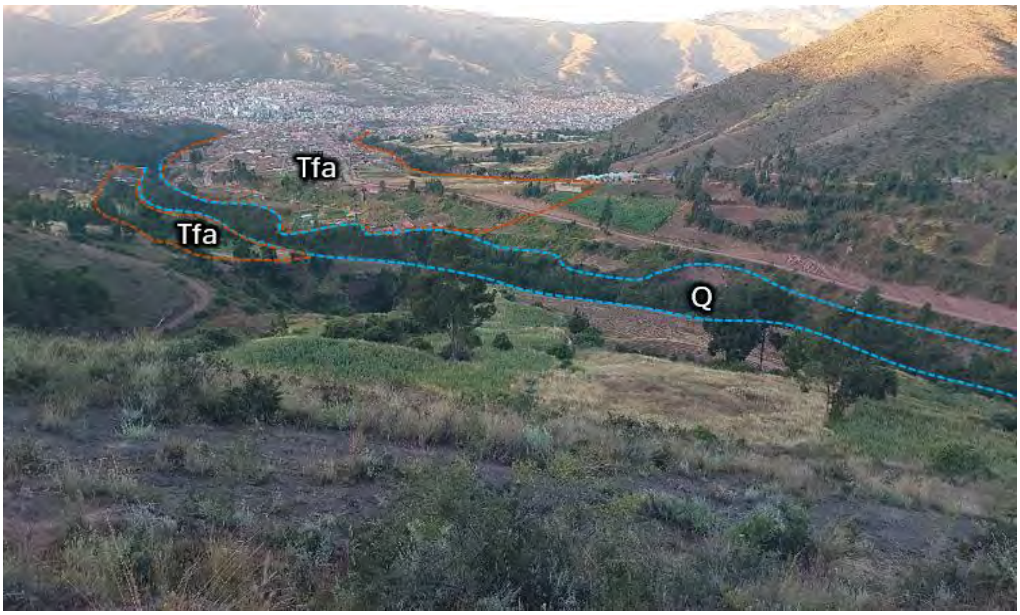


4.1.1.2.5. Terraza Fluvio-aluvial (Tfa)

Está unidad comprende áreas planas o casi planas, producto de la erosión originada por la escorrentía de la quebrada principal. Se caracteriza por estar conformada por los materiales cuaternarios pertenecientes a la Formación San Sebastián y otros cuaternarios más recientes, con altitudes que van desde los 3231 msnm hasta 3380 msnm. Se extiende en la desembocadura de la microcuenca (ver Figura 8).

Figura 8

Vista hacia la desembocadura de la microcuenca de las terrazas fluvio-aluviales



4.1.1.2.6. Quebradas (Q) y Cárcavas (Ca)

Estas unidades se caracterizan por ser depresiones de origen erosivo. La quebrada principal contribuye a la erosión en el área de estudio por acción de su escorrentía superficial, mientras que las quebradas secundarias y las cárcavas por las características de sus materiales que son altamente erosionables. Las cárcavas presentan materiales no consolidados (fragmentos de roca, gravas, arenas y limos), en su mayoría estas cárcavas conectan con la quebrada principal, algunas conectan con las quebradas secundarias (ver figuras 9 y 10).

Figura 9

Vista hacia el suroeste de la quebrada principal y cárcavas

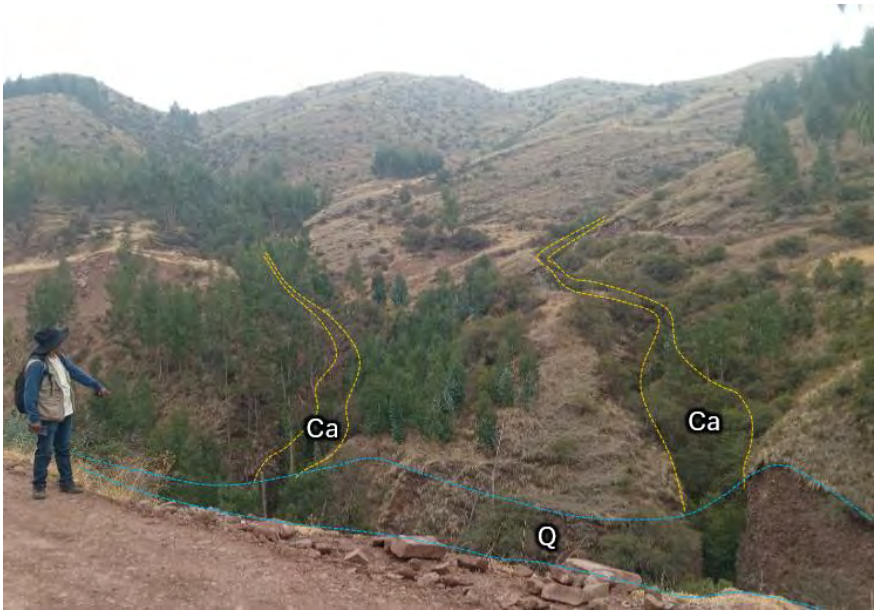


Figura 10

Vista hacia el sureste de la quebrada secundaria



4.1.1.3.Controles Morfométricos

4.1.1.3.1. Control litológico

Está vinculado a las propiedades de las areniscas que afloran en geoformas como laderas de montaña con pendiente fuerte, cimas de montaña y montañas bajas, porque presentan resistencia a la erosión por su contenido de sílice, de manera que forman relieves positivos y por su meteorización diferencial, puesto que están intercaladas con lutitas, que son menos resistentes. Además, por sus propiedades de porosidad y permeabilidad de las areniscas, la escorrentía superficial es baja y su influencia no es significativa en las geoformas que adapten estas areniscas.

4.1.1.3.2. Control estructural

Está vinculado al tectonismo andino que formó las serranías de Vilcaconga, mediante pliegues, sistemas de fallas y diaclasas producto de estas fallas. En la microcuenca La Rinconada se manifiesta con la orientación de algunas quebradas que coinciden con sistemas de fallas, presencia de diaclasas que actúan como zonas de debilidad y contribuyen a la formación de cárcavas y quebradas, y la estratificación con buzamiento inclinados en las areniscas que influyen el desarrollo de laderas de montaña con pendientes similares.

4.1.1.3.3. Control sedimentológico

Está vinculado a los procesos sedimentarios e hidrodinámicos, y se manifiesta con la presencia de depósitos no consolidados que forman laderas de montaña con pendiente suave y terrazas. Las pendientes suaves favorecen a la sedimentación y las pendientes altas al transporte.

La microcuenca La Rinconada presenta geoformas principalmente producto del control estructural porque tiene relación directa con el tectonismo andino, el cual tiene un dominio regional, que se manifiesta con la presencia de los sistemas de fallas y diaclasas.

4.1.2. *Geología*

4.1.2.1. Estratigrafía Regional

Según Carlotto, Cárdenas & Carlier (2011) el área de estudio a nivel regional está comprendida por el Grupo San Jerónimo que está dividido en las formaciones Kayra y Soncco; y la Formación San Sebastián. El Grupo San Jerónimo con edades que van del Eoceno inferior al Oligoceno inferior aflora ampliamente al sur de la ciudad del Cusco, comprendida por areniscas feldespáticas con intercalación de limolitas y en ocasiones con bancos de conglomerados, originadas en un medio fluvial. La Formación San Sebastián de edad Pleistocena aflora a lo largo de la Depresión del Cusco, comprendida por dos secuencias: la granodecreciente constituida por areniscas y lutitas con niveles diatomíticos y calcáreos en la parte superior y la granocreciente constituida por conglomerados y areniscas en el cierre de la cuenca (ver Anexo 1f. Mapa geológico regional).

4.1.2.2. Estratigrafía Local

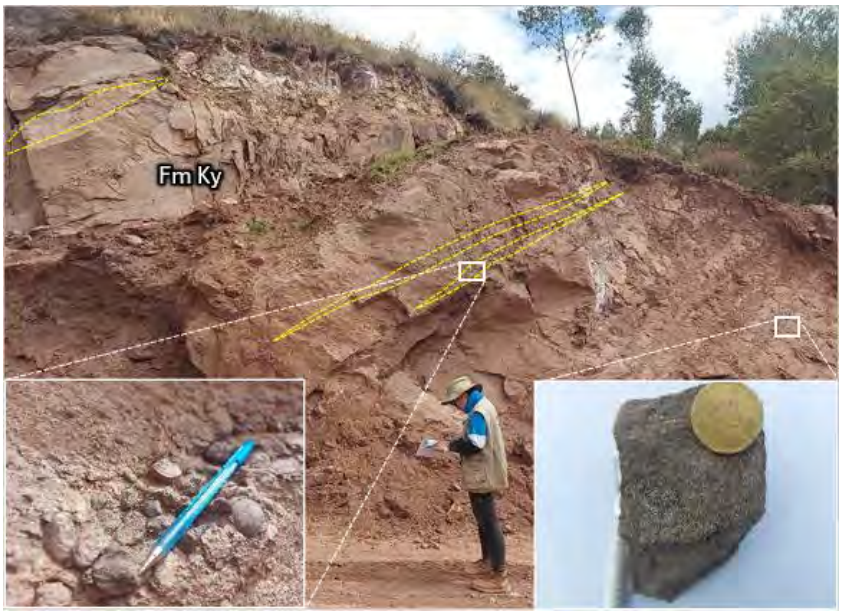
El área de estudio a nivel local está conformada por las siguientes unidades geológicas (ver Anexo 1g. Mapa geológico local):

4.1.2.2.1. Formación Kayra (Peo-Ky)

Se caracteriza por presentar areniscas feldespáticas de grano fino a grueso con intercalación de niveles pequeños de lutitas y con presencia de lentes de conglomerados, se extiende en gran parte al norte de la microcuenca, abarcando la parte media y las proximidades de la desembocadura (ver Figura 11). Hacia el techo subyace en discordancia progresiva con la formación Soncco secuencia I, que se extiende de sureste a suroeste con azimuts de N100° a N108° y con buzamientos de 37°SW a 57°SW. En esta zona, las areniscas se caracterizan por presentar una coloración marrón rojizo y se encuentran moderadamente fracturadas, sin embargo, hacia el techo en el lado sureste presenta un tramo pequeño con areniscas muy fracturadas (en forma tabular), con areniscas frágiles o deleznables. Hacia las proximidades a la desembocadura de la microcuenca, subyace con la formación San Sebastián en contacto discordante (ver Figura 12) con azimuts de N288° a N338° y con buzamientos de 48°NE a 49°NE. En esta zona, las areniscas presentan una coloración gris blanquecina con tamaño de grano medio a grueso, con lentes de areniscas con fragmentos de rocas, se encuentran poco fracturadas. Se observan fallas locales sobre esta formación.

Figura 11

Vista de la Formación Kayra en la parte media de la microcuenca



Nota. Se observan areniscas feldespáticas intercaladas con lutitas y con presencia de lentes de conglomerado.

Figura 12

Vista hacia el noreste del contacto de la Formación Kayra con la Formación San Sebastián



4.1.2.2.2. Formación Soncco (Peo-so)

Se caracteriza por presentar areniscas feldespáticas; sin embargo, hacia el techo, se presentan areniscas cuarzosas, con intercalación de pequeños niveles de lutitas y con presencia de lentes de conglomerado en las areniscas. Esta formación sobreyace a la formación Kayra y se extiende en la parte sur de la microcuenca, abarcando la parte alta de la misma, orientada de sureste a suroeste con azimuts de N100° a N108° y con buzamientos de 37°SW a 57°SW; con presencia de 06 secuencias granocrecientes y granodecrecientes. A continuación, se detallan las secuencias.

4.1.2.2.2.1. Formación Soncco secuencia I (Peo-so-I). Esta secuencia, hacia la base, se caracteriza por presentar areniscas feldespáticas de grano fino, de coloración marrón rojiza, muy fracturadas con laminaciones paralelas y venillas de calcitas; intercaladas con lutitas rojas con espesores de 7 a 12 cm (ver Figura 13). Mientras que, hacia el techo, se mantiene la litología, pero los estratos de areniscas presentan una coloración más gris blanquecina, de grano medio a grueso y se muestran menos fracturadas respecto a la base. En las areniscas se evidencia de filtración de agua en épocas de lluvia. Esta secuencia sobreyace a la formación Kayra y subyace a la secuencia II de la Formación Soncco (ver Figura 14).

Figura 13

Vista hacia el sureste de la base de la secuencia I de la Formación Soncco



Nota. Se observan las areniscas muy fracturadas y con laminación paralela.

Figura 14

Vista hacia el suroeste del contacto entre las secuencias I y II de la Formación Soncco



4.1.2.2.2.2. Formación Soncco secuencia II (Peo-so-II). Esta secuencia, hacia la base, se caracteriza por presentar areniscas feldespáticas de grano fino a medio, con coloración marrón rojiza, de moderada a muy fracturadas (ver Figura 15); intercaladas con lutitas con espesores pequeños que van desde 2 a 15 cm, sin embargo, hacia la parte central se tiene bancos de areniscas de grano fino a medio, poco fracturados. Finalmente, hacia el techo, se mantiene la litología, pero las lutitas presentan mayores espesores de hasta 80 cm (ver Figura 16), sin embargo, hacia el suroeste, se observan areniscas cuarzo-feldespáticas de grano medio, de coloración gris verdoso con clastos blandos, poco fracturadas; intercaladas con niveles de lutitas con espesores de 2 a 3 cm. Esta secuencia sobreyace a la secuencia I y subyace a la secuencia III de la Formación Soncco.

Figura 15

Vista hacia el suroeste del contacto entre las secuencias I y II de la Formación Soncco

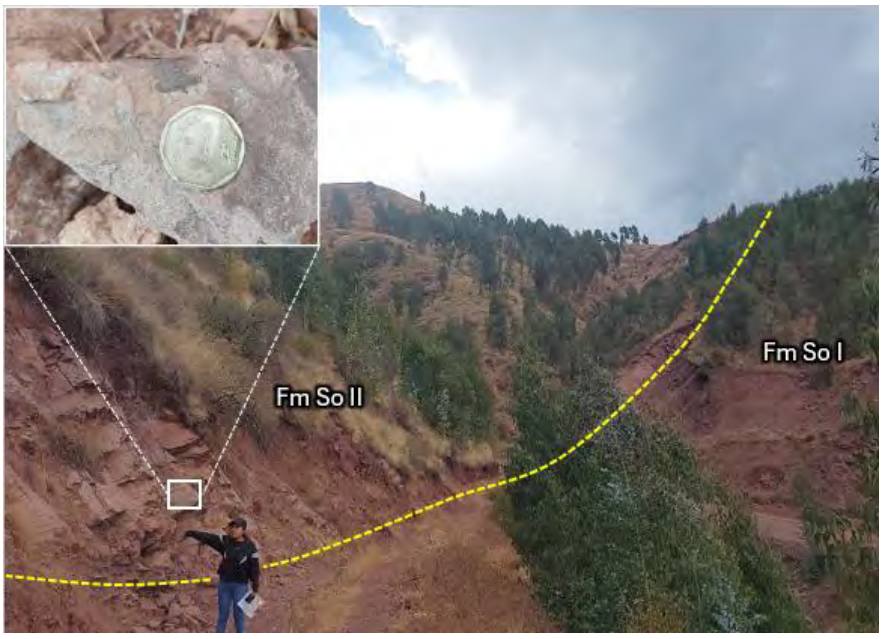


Figura 16

Vista hacia el sureste del techo de la secuencia II de la Formación Soncco



4.1.2.2.2.3. Formación Soncco secuencia III (Peo-so-III). Esta secuencia se caracteriza por presentar areniscas feldespáticas de grano fino a medio, de coloración rojiza, moderadamente fracturadas con venillas de calcita y pequeños fragmentos de arenisca de grano grueso; intercaladas con lutitas rojas con espesores 6.5 a 21 cm (ver Figura 17), sin embargo, en la parte central hacia el suroeste, las areniscas presentan alteración argílica avanzada, teniendo un comportamiento de suelo. Esta secuencia sobreyace a la secuencia II y subyace a la secuencia IV de la Formación Soncco

Figura 17

Vista hacia el sureste de la secuencia III de la Formación Soncco



4.1.2.2.2.4. Formación Soncco secuencia IV (Peo-so-IV). Esta secuencia se caracteriza por presentar areniscas cuarzo-feldespáticas de grano a fino a medio, de coloración marrón rojiza, moderadamente fracturadas en forma de bloques; intercaladas con niveles de lutitas rojizas con espesores de 10 a 12 cm (ver Figura 18). Esta secuencia sobreyace a la secuencia III y subyace a la secuencia V de la Formación Soncco.

Figura 18

Vista hacia el sureste de la secuencia Soncco IV de la Formación Soncco



Nota. Se observa el afloramiento de areniscas fracturadas en forma de bloques.

4.1.2.2.2.5. Formación Soncco secuencia V (Peo-so-V). Esta secuencia se caracteriza por presentar areniscas feldespáticas de grano medio a grueso con presencia de pequeños clastos blandos; intercaladas lutitas de espesores de 10 a 15 cm, poco fracturadas hacia el techo (ver Figura 19), mientras que, hacia la base y parte media de la secuencia, al suroeste de la microcuenca, se observa areniscas plegadas y muy fracturadas. Esta secuencia sobreyace a la secuencia IV y subyace a la secuencia VI de la Formación Soncco. Se observa presencia de malaquita en el contacto con la secuencia IV.

Figura 19

Vista de la secuencia Soncco V al sur de la microcuenca



Nota. Se observa el afloramiento de areniscas con pequeños clastos blandos.

4.1.2.2.2.6. Formación Soncco secuencia VI (Peo-so-VI). Esta secuencia se caracteriza por presentar areniscas feldespáticas en forma de bancos de grano fino a grueso, de coloración marrón rojizo de grano medio, poco fracturadas con presencia de biotitas y clastos blandos. Estos bancos de areniscas feldespáticas presentan lentes de conglomerados con clastos blandos, con un espesor de 30 cm y con un diámetro promedio de 2.5 cm de los clastos y diámetro mayor igual a 5 cm (ver Figura 20); sin embargo, hacia el techo, se presentan areniscas cuarzosas de coloración gris verdoso, de grano fino a medio, moderadamente fracturadas, con presencia de biotita y minerales secundarios (ver Figura 21). Esta secuencia sobreyace a la secuencia V de la Formación Soncco.

Figura 20

Vista hacia el sur de la secuencia VI en la parte alta de la microcuenca



Nota. Se observa el afloramiento de areniscas feldespáticas con presencia de lentes de conglomerado.

Figura 21

Vista hacia el suroeste de la secuencia VI, en la cabecera de la microcuenca



Nota. Se observa el contacto entre las areniscas feldespáticas y cuarzosas con cambio de coloración demarcado por la línea amarilla entrecortada.

4.1.2.2.3. Formación San Sebastián (Q-sa)

Esta formación se caracteriza por presentar una secuencia granodecreciente conformada por gravas con matriz arenosa, con espesores de 15 cm a 30 cm intercaladas con arenas de grano medio a fino, con espesores de 110 cm a 120 cm (ver Figura 22); con niveles diatomíticos y calcáreos en la parte superior (ver Figura 23). Esta formación sobreyace a la Formación Kayra en contacto discordante (ver Figura 24).

Figura 22

Vista hacia el noroeste de la secuencia granodecreciente de la Formación San Sebastián

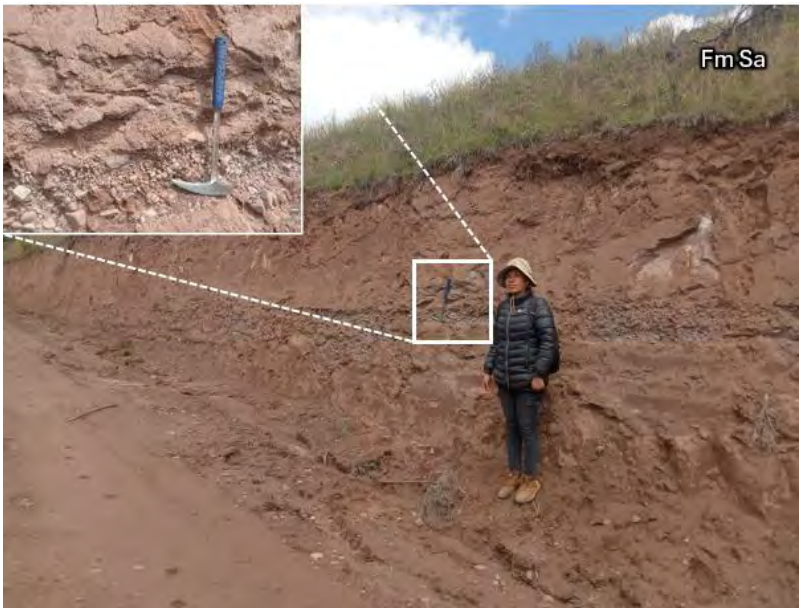


Figura 23

Vista hacia el noroeste de la parte superior de la Formación San Sebastián



Nota. Se aprecia niveles diatomíticos y calcáreos

Figura 24

Vista hacia el noroeste del contacto entre la Formación Kayra y la Formación San Sebastián



Nota. Se aprecia contacto discordante entre ambas formaciones.

4.1.2.2.4. Depósitos Fluviales (Q-fl)

Estos depósitos se caracterizan por presentar fragmentos rocosos heterométricos, presencia de arenas, gravas, limos y bloques con formas sub redondeadas. Estos depósitos han sido transportados por corrientes de agua de las quebradas y del riachuelo, y que fueron depositados en el curso del cauce principal de la microcuenca (ver Figura 25). La disposición en superficie de este depósito tiene un área de 0.02 Km2, que representa el 0.26% del área total de la microcuenca en estudio.

Figura 25

Vista del cauce principal de la microcuenca, depósitos de gravas con matriz de arena



4.1.2.2.5. Depósitos Eluviales (Q-el)

Estos depósitos se caracterizan por presentar materiales que deriva de los procesos de meteorización intensa de la roca in situ, que no han sido transportados y en parte estos conservan la estructura de la roca original. Están conformados por limos arenosos y en gran parte aprovechadas para actividades de agricultura. Estos depósitos se disponen en zonas de planicies

altas de la microcuenca (ver Figura 26). La disposición en superficie de este depósito tiene un área de 0.05 Km2, que representa el 0.49% del área total de la microcuenca en estudio.

Figura 26

Vista hacia el noreste de los depósitos eluviales, ubicados al lado este de la microcuenca



Nota. Se observa depósitos eluviales aprovechados para la agricultura.

4.1.2.2.6. Depósitos Deluviales (Q-dl)

Estos depósitos se caracterizan por la presencia de arenas limosas y arcillas con inclusiones de clastos de roca dispersos, ubicados principalmente en laderas con pendientes casi planas a moderadas. Estos depósitos son aprovechadas principalmente para la agricultura (ver Figura 27). La disposición en superficie de este depósito tiene un área de 0.26 Km2, que representa el 2.68% del área total de la microcuenca en estudio.

Figura 27

Vista del noroeste de la microcuenca, depósitos diluviales en laderas suaves



4.1.2.2.7. Depósitos Deluvio-coluviales (Q-dl/cl)

Estos depósitos se caracterizan por la presencia de bloques y gravas de clastos subangulosos a angulosos con una matriz limo arenosa, con una distribución caótica, que se disponen hacia el pie de laderas que convergen con quebradas y en taludes de cortes de carretera (ver figuras 28 y 29). Son depósitos poco consolidados de baja cohesión. La disposición en superficie de este depósito tiene un área de 0.09 Km2, que representa el 0.99% del área total de la microcuenca en estudio.

Figura 28

Vista de depósitos deluvio-coluviales al pie de laderas



Figura 29

Vista de depósitos deluvio-coluviales con presencia de bloques subangulosos



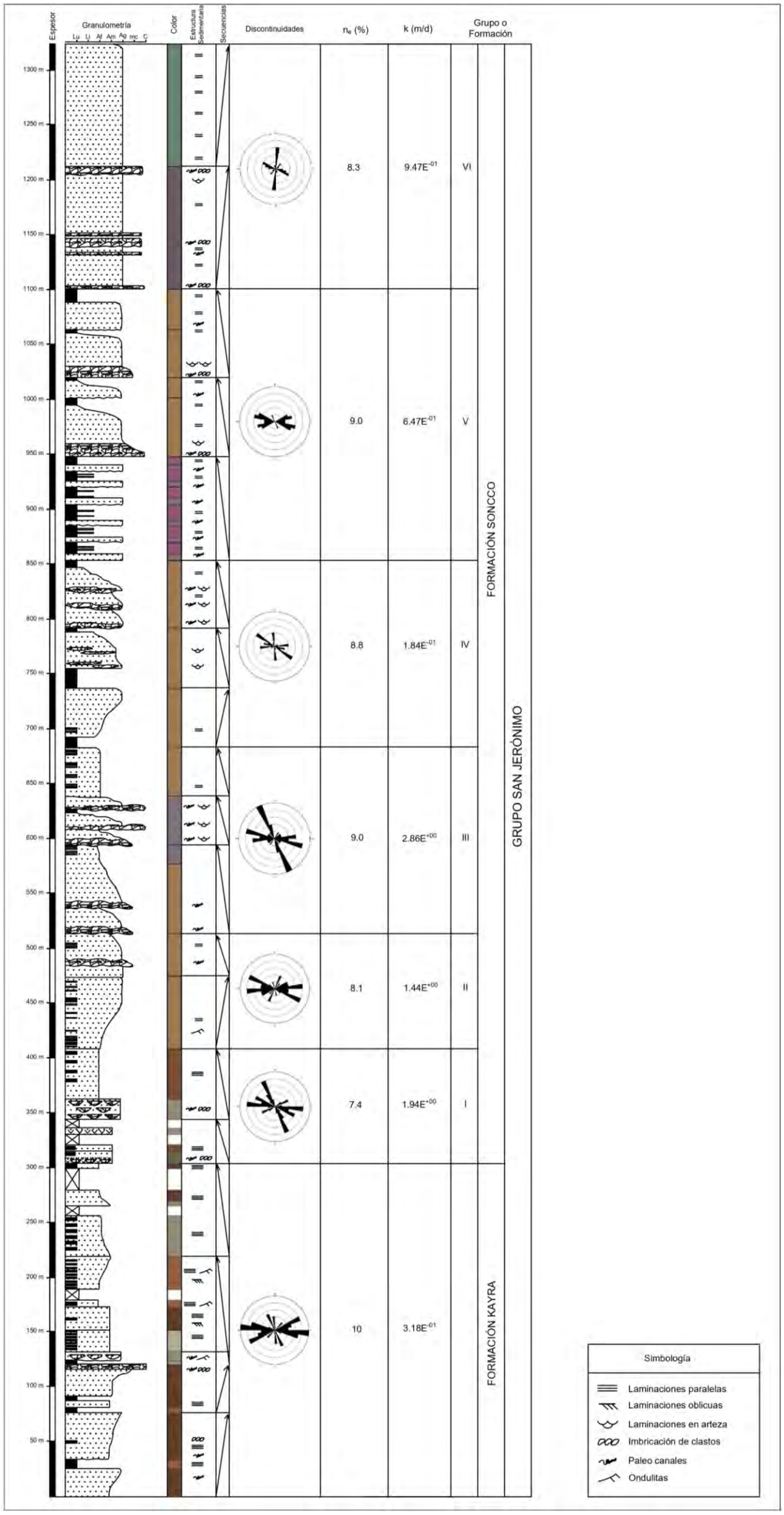
4.1.2.1.Influencia de la Geología en la Dinámica del Flujo Subterráneo

La geología dada principalmente por las rocas sedimentarias de las formaciones Kayra y Soncco, conformadas principalmente por areniscas feldespáticas contribuyen a la dinámica del flujo subterráneo por su propiedad de poseer poros interconectados que facilitan la transmisividad del agua y por su tamaño de grano variable, de fino a grueso, que deja espacios vacíos que favorecen el almacenamiento del agua. Estas propiedades de alta conductividad hidráulica y porosidad efectiva clasifican a las areniscas como acuíferos. Por otra parte, la disposición de sus estratos, con un buzamiento promedio de 41°SSW, favorecen a que el agua se infiltre.

A continuación, para un mejor entendimiento de la geología local, se presenta la columna estratigráfica en la proyección de la sección B-B´, que se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Columna estratigráfica de la microcuenca La Rinconada



Nota. Modificado de Peña & Santos (2018, p. 63).

4.1.2.2.Geología Estructural Regional

A nivel regional el área de estudio tiene la influencia de fallas regionales, que afectan directamente al grado de fracturamiento de las formaciones geológicas que se desarrollan en la microcuenca (ver Anexo 1h. Mapa geológico estructural regional).

4.1.2.2.1. Falla Cusco

Las fotografías aéreas y las imágenes satélite muestran un alineamiento NO-SE que coincide con el piso de valle del río Huatanay, desde Cusco y hasta Saylla-Oropesa. Desde el punto de vista geológico se interpreta como una falla antigua sellada con los sedimentos cuaternarios de la Formación San Sebastián. Esta falla separa en parte el Altiplano de la zona intermedia con la Cordillera Oriental. Actualmente esta estructura no muestra signos de reactivaciones recientes, sin embargo, durante el sismo del 21 de mayo de 1950 se observaron desplazamientos en terrenos recientes que afectaron la Formación San Sebastián. De acuerdo con lo que muestra la foto de Ericksen et al. (1954), las estructuras serían una consecuencia de la reactivación de la falla Cusco. (Carlotto, Cárdenas, & Carlier, Geología del Cuadrángulo de Cusco Hoja 28-s, 2011, pp. 110-111).

4.1.2.2.2. Falla Tancarpata

En la zona de estudio la falla más importante es la Falla Tancarpata, esta se localiza en el extremo suroeste de la microcuenca. Si bien la falla no pasa por la quebrada, la influencia estructural es importante porque las rocas en la quebrada se encuentran fracturados y diaclasados. Desde el punto de vista hidrogeológico esta falla controla la Formación Soncco y permite las surgencias de aguas subterráneas a través de manantiales de bajo caudal (Peña & Santos, 2018, p. 20).

4.1.2.4.Geología Estructural Local

En el área de estudio, se reconoce a las fallas locales como elementos clave del control estructural (ver Anexo 1i. Mapa geológico estructural local); las cuales se detallan a continuación:

4.1.2.4.1. Fallas Locales

Localmente se identificaron indicios de fallas, planos de fallas e indicadores cinemáticos que indicaron la presencia de fallas de tipo normales, inversas y generalmente de rumbo. Las fallas presentan escasos o muy pequeños desplazamientos, y la alineación que presentan son generalmente con dirección NNE-SSW, NNW-SSE y E-W (ver figuras 31, 32 y 33).

La presencia de estas fallas influencia directamente en el fracturamiento de las formaciones Kayra y Soncco, y contribuyen al transporte del flujo subterráneo.

Figura 31

Falla inversa en la Formación Kayra, hacia el norte de la microcuenca

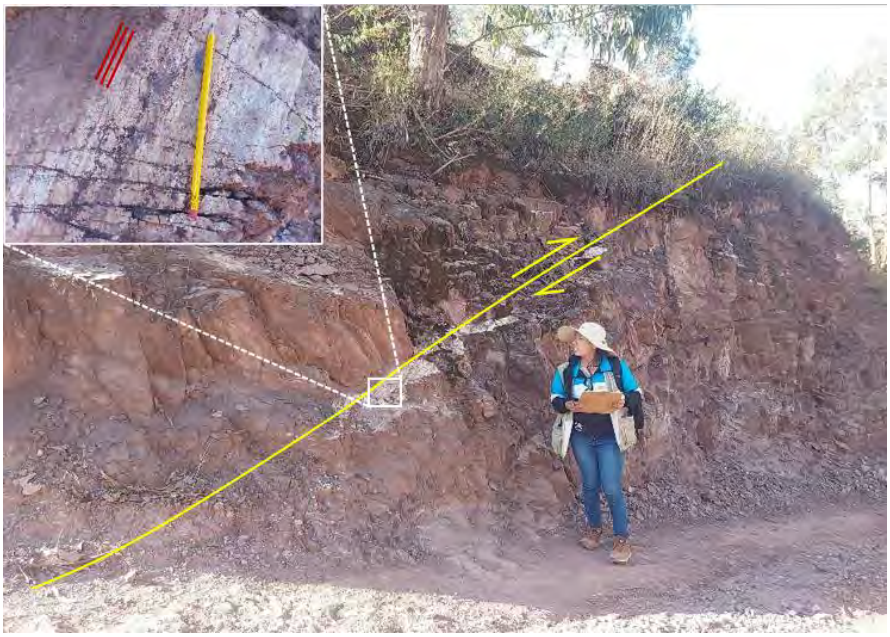


Figura 32

Vista hacia el sur de la microcuenca, falla de rumbo sinestral, al sur de la microcuenca

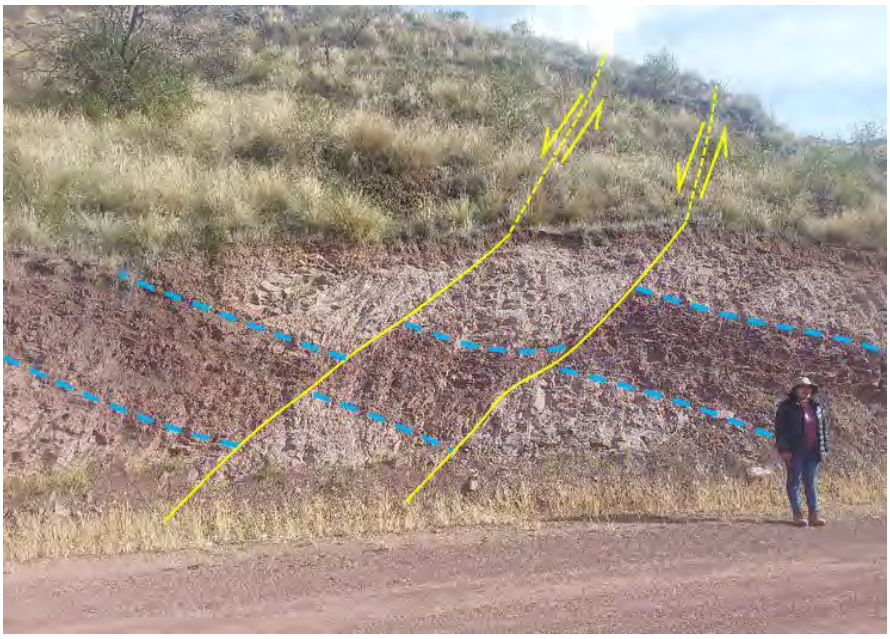
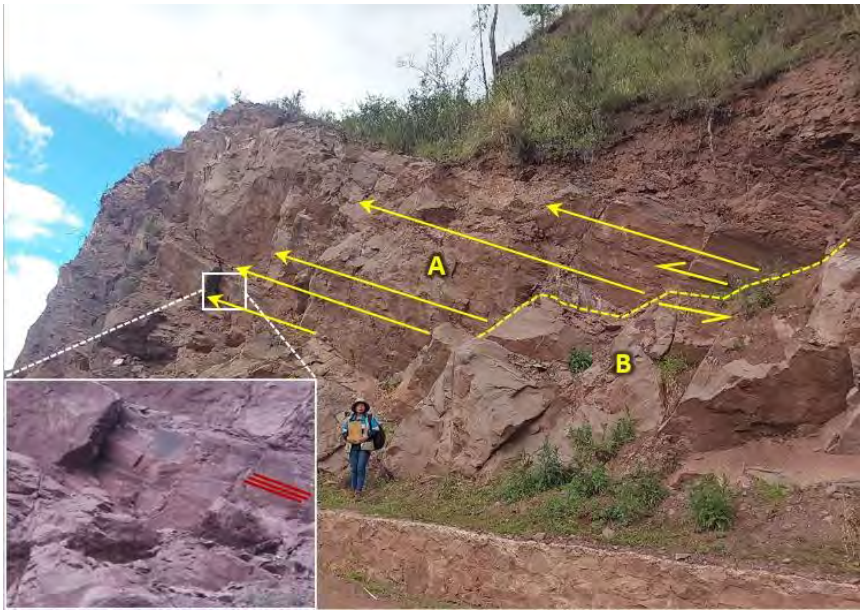


Figura 33

Falla de rumbo sinestral con componente inversa, en la Formación Kayra, al centro de la microcuenca



4.1.2.5. Influencia de las Estructuras en la Dinámica del Flujo Subterráneo

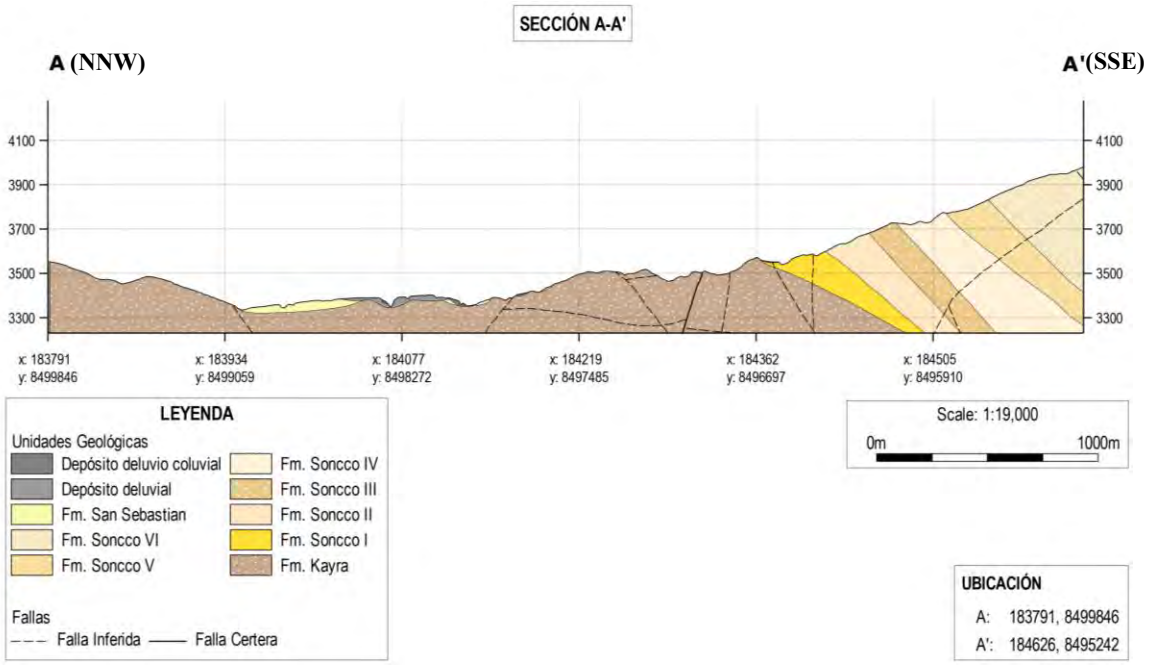
4.1.2.5.1. Estructuras Primarias

La estratificación que es característica de estas rocas sedimentarias mediante sus planos de estratificación configura un tipo de discontinuidad natural y esta tiene características que permiten controlar la dinámica del flujo subterráneo. A continuación, se visualizan algunas secciones geológicas donde se muestran los buzamientos de las formaciones geológicas.

4.1.2.5.1.1. Sección A-A'. Presenta una orientación NNW-SSE en una longitud de 4680 metros. La sección atraviesa a las formaciones rocosas de Kayra y Soncco, que buzan hacia el SSW, y a la Formación San Sebastián, que presenta buzamientos horizontales. La disposición de los planos de estratificación de las formaciones rocosas favorece a que la dinámica del flujo subterráneo, a través de estos, sean en general hacia la dirección sur-suroeste (SSW) (ver Figura 34).

Figura 34

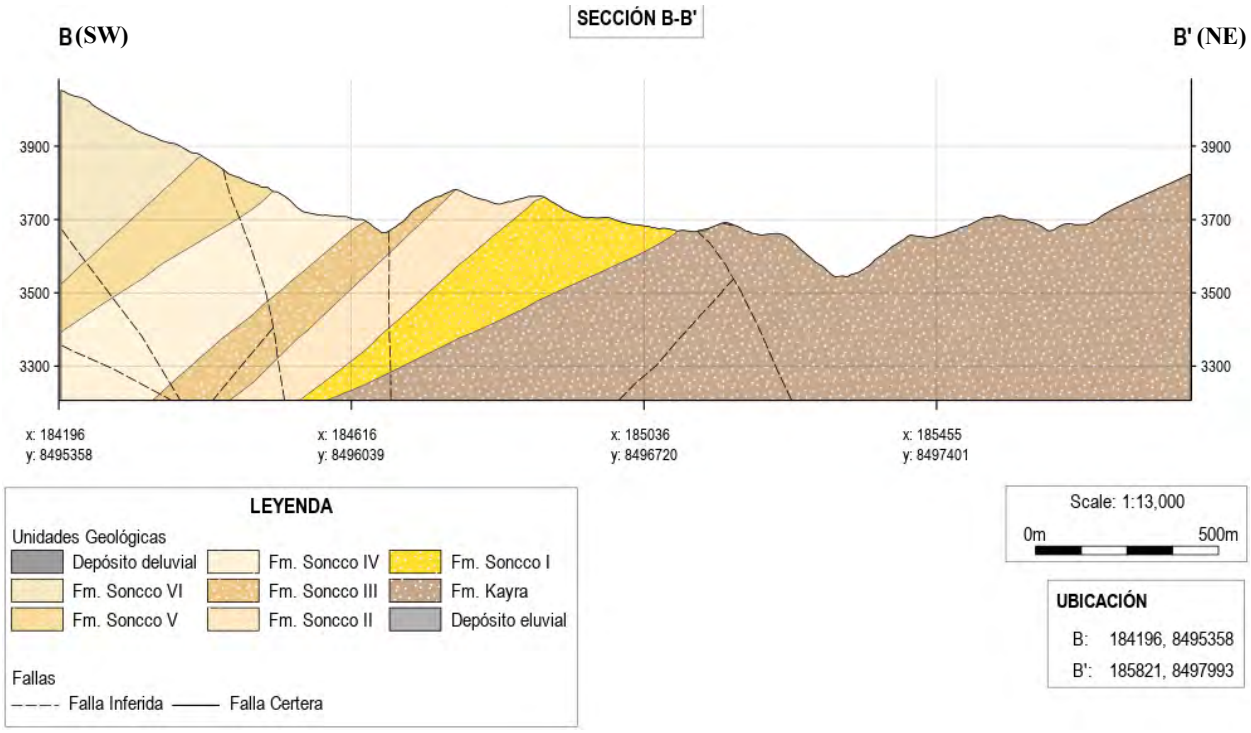
Sección A-A'



4.1.2.5.1.2. Sección B-B'. Presenta una orientación de SW-NE con una longitud de 3096 metros. Esta sección atraviesa la parte sureste de la microcuenca, cortando a las formaciones Kayra y Soncco. También, se representa a los pequeños depósitos cuaternarios no consolidados que sobreyacen a las formaciones rocosas de Kayra y Soncco (ver Figura 35). Las formaciones Kayra y Soncco prevalecen su discordancia progresiva.

Figura 35

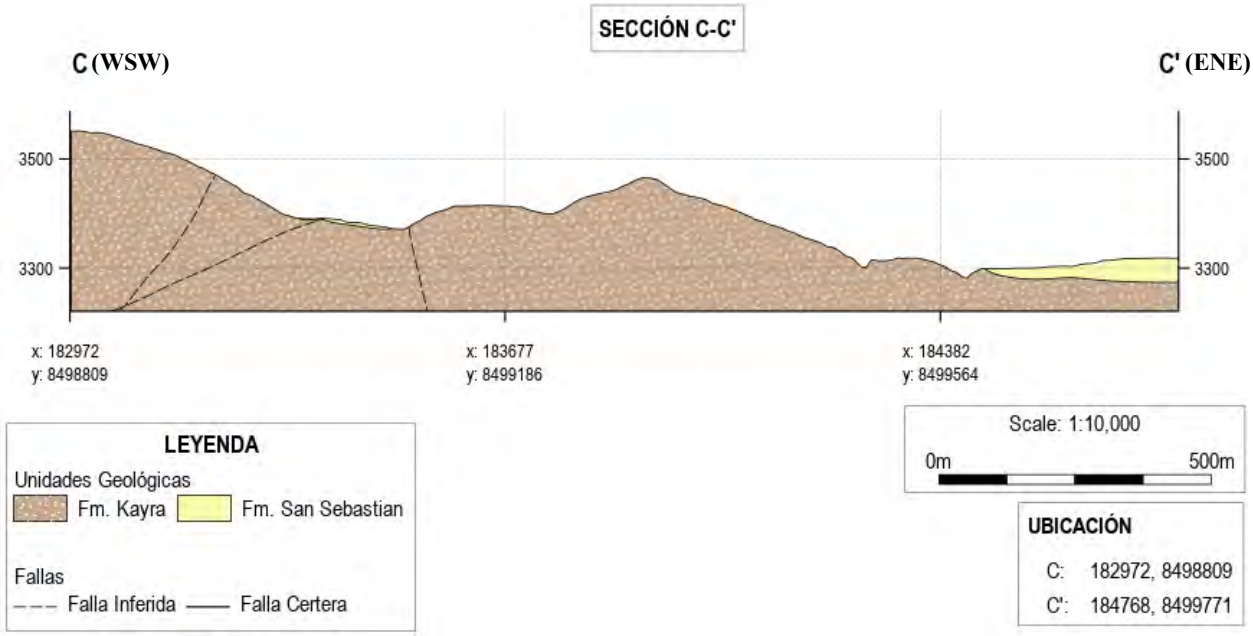
Sección B-B'



4.1.2.5.1.3. Sección C-C'. Presenta una orientación WSW-ENE con una longitud de 2037 metros. Esta sección atraviesa la parte norte de la microcuenca, cortando a las formaciones Kayra y San Sebastián. En esta sección se aprecia como la Formación San Sebastián sobreyace a la Formación Kayra, con un contacto discordante (ver Figura 36).

Figura 36

Sección C-C'



4.1.2.5.2. Estructuras Secundarias

Las fracturas presentes en las areniscas constituidas en el área de estudio configuran un tipo de discontinuidad secundaria y se manifiestan en las formaciones Kayra y Soncco en forma de diaclasas, estas también influyen en el control de la dinámica del flujo subterráneo, ya que permiten la fluencia de las aguas subterráneas por estos espacios que sirven como canales de transporte del agua subterránea dada por su porosidad secundaria.

4.1.2.5.3. Análisis de la Influencia de las Discontinuidades

Para la determinación de la dirección del flujo subterráneo dado por las discontinuidades primarias y secundarias se realizó la caracterización de sus parámetros a través de ventanas estructurales en los afloramientos rocosos y con ello se pasó a representar mediante el Dips las familias que poseen características más favorables para el transporte de las aguas subterráneas.

A continuación, se detallan las familias de discontinuidades más dominantes para cada formación geológica.

4.1.2.5.3.1. Formación Kayra. Está ubicada al norte del área de estudio presenta areniscas de poco fracturadas a muy fracturadas y se puede visualizar que se tiene tres familias de discontinuidades principales (ver Anexo 2a). La familia F1 correspondiente a la estratificación con azimut de N96° y buzamiento de 33°SSW, en la familia F2 con azimut N253° y buzamiento 56°NNW, y la familia F3 con azimut N358° y buzamiento 71°ENE, teniendo como familias dominantes a las familias F3 al oeste de la microcuenca en Kayra, y F2 al este de la microcuenca en Kayra, siendo los que tienen espaciados menores y aberturas considerables y que influyen favorablemente en el transporte del flujo subterráneo (ver Tabla 5).

Tabla 5

Parámetros de las discontinuidades Formación Kayra

N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	44.13 cm	10.67 m	0.55 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	30.24 cm	2.23 m	0.22 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	41.59 cm	2.51 m	0.51 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado

4.1.2.5.3.2. Formación Soncco secuencia I. Está ubicada al norte del área de estudio presenta areniscas de muy fracturadas a moderadamente fracturadas y se puede visualizar que se tiene tres familias de discontinuidades principales (ver Anexo 2b). La familia F1 correspondiente a la estratificación con azimut de 103° y buzamiento de 46°SSW, en la familia F2 el azimut es de N252° y el buzamiento 39°NNW, y la familia F3 con azimut N330° y buzamiento 43°ENE, teniendo como familia dominante a la familia F3, siendo el que tiene la mayor abertura y no cuenta con relleno, los cuales influyen favorablemente en el transporte del flujo subterráneo (ver Tabla 6).

Tabla 6

Parámetros de las discontinuidades Formación Soncco secuencia I

N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	35.00 cm	7.95 m	0.37 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	19.50 cm	2.75 m	1.00 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	23.83 cm	1.15 m	1.39 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado

4.1.2.5.3.3. Formación Soncco secuencia II. Presenta areniscas de moderadamente fracturadas a muy fracturadas y se puede visualizar que se tiene tres familias de discontinuidades principales (ver Anexo 2c). La familia F1 correspondiente a la estratificación con azimut de N94° y buzamiento de 41°SSW, en la familia F2 el azimut es de N269° y el buzamiento 34°NNW, y la familia F4 con azimut N191° y buzamiento 88°WNW, teniendo como familia dominante a la familia F2 por su mayor abertura y ausencia de relleno, los cuales influyen favorablemente en el transporte del flujo subterráneo (ver Tabla 7).

Tabla 7

Parámetros de las discontinuidades Formación Soncco secuencia II

N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	43.00 cm	4.60 m	0.92 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	44.50 cm	2.61 m	1.31 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F4	Diaclasa	56.00 cm	2.33 m	0.10 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado

4.1.2.5.3.4. Formación Soncco secuencia III. Presenta areniscas moderadamente fracturadas y se puede visualizar que se tiene tres familias de discontinuidades principales (ver Anexo 2d). La familia 1 correspondiente a la estratificación con azimut de N94° y buzamiento de 35°SSW, en la familia 2 el azimut es de N261° y el buzamiento 51°NNW, y la familia 3 con azimut N341° y buzamiento 66°ENE, teniendo como familia dominante a la familia F3 por su mayor abertura y ausencia de relleno, los cuales influyen favorablemente en el transporte del flujo subterráneo (ver Tabla 8).

Tabla 8

Parámetros de las discontinuidades Formación Soncco secuencia III

N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	35.42 cm	3.75 m	0.44 mm	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
F2	Diaclasa	38.80 cm	1.49 m	0.94 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	35.67 cm	2.04 m	2.20 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado

4.1.2.5.3.5. Formación Soncco secuencia IV. Presenta areniscas moderadamente fracturadas y se puede visualizar que se tiene tres familias de discontinuidades principales (ver Anexo 2e). La familia F1 correspondiente a la estratificación con azimut de N115° y buzamiento de 43°SSW, en la familia F2 el azimut es de N266° y el buzamiento 36°NNW, y la familia F3 con azimut N349° y buzamiento 56°ENE, teniendo como familia dominante a la familia F2 por su mayor abertura que influye favorablemente en el transporte del flujo subterráneo (ver Tabla 9).

Tabla 9

Parámetros de las discontinuidades Formación Soncco secuencia IV

N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	54.63 cm	5.00 m	0.45 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	74.17 cm	4.12 m	0.56 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	26.25 cm	2.22 m	0.00 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado

4.1.2.5.3.6. Formación Soncco secuencia V. Presenta areniscas de muy fracturadas a poco fracturadas y se puede visualizar que se tiene tres familias de discontinuidades principales (ver Anexo 2f). La familia F1 correspondiente a la estratificación con azimut de N104° y buzamiento de 47°SSW, en la familia F2 el azimut es de N252° y el buzamiento 44°NNW, y la familia F3 con azimut N335° y buzamiento 51°ENE, teniendo como familia dominante a la familia F2 por su mayor abertura y ausencia de relleno, las cuales influyen favorablemente en el transporte del flujo subterráneo (ver Tabla 10).

Tabla 10

Parámetros de las discontinuidades Formación Soncco secuencia V

N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	39.69 cm	11.44 m	0.50 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	40.67 cm	9.86 m	0.84 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	48.00 cm	13.00 m	0.10 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado

4.1.2.5.3.7. Formación Soncco secuencia VI. Presenta areniscas de poco fracturadas a moderadamente fracturadas y se puede visualizar que se tiene tres familias de discontinuidades principales (ver Anexo 2g). La familia F1 correspondiente a la estratificación con azimut de N108° y buzamiento de 49°SSW, en la familia F2 el azimut es de N233° y el buzamiento 46°NW, y la familia F3 con azimut N363° y buzamiento 65°ENE, teniendo como familia dominante a la familia F2 por su mayor abertura y ausencia de relleno, las cuales hacen que el transporte del flujo subterráneo sea favorable (ver Tabla 11).

Tabla 11

Parámetros de las discontinuidades Formación Soncco secuencia VI

N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	33.86 cm	2.64 m	0.80 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	32.00 cm	1.55 m	0.88 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	23.86 cm	1.49 m	0.33 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado

Después de realizar un análisis general se muestra que se tienen 4 familias dominantes en el área de estudio (ver Figura 37), donde las familias más representativas y que favorece al transporte del flujo subterráneo dominantemente son las familias F2 y F3 quienes poseen espaciados pequeños y aberturas considerables, las cuales son estructuras secundarias dada por el fracturamiento, con direcciones de flujo hacia el NNW y ENE respectivamente (ver Tabla 12 y ver Anexo 1j. Mapa de sistemas de discontinuidades y de direcciones de flujo subterráneo y Anexo 5).

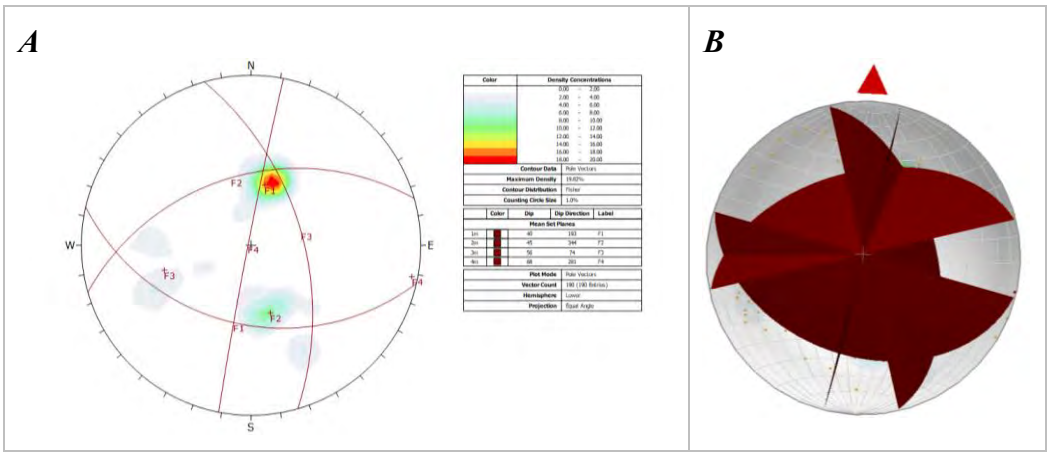
Tabla 12

Resumen de parámetros por familias de discontinuidades

N° de familia	Tipo	Azimut	Buzamiento	Espaciado	Persistencia	Abertura
F1	Estrato	N101°	41°SSW	41.46 cm	7.17 m	0.57 mm
F2	Diaclasa	N256°	**46°NNW**	**40.02 cm**	3.83 m	**0.68 mm**
F3	Diaclasa	N343°	**60°ENE**	**31.23 cm**	2.40 m	**0.85 mm**
F4	Diaclasa	N191°	88°WNW	56.00 cm	2.33 m	0.10 mm

Figura 37

Planos de discontinuidades por familias en la microcuenca La Rinconada



4.2. Parámetros hidrológicos

4.2.1. Hidrología

4.2.1.1. Ubicación Hidrográfica de la Cuenca

Para la ubicación hidrográfica de la microcuenca La Rinconada se utiliza la metodología de codificación Pfasfstetter, que es un sistema jerárquico y es basado en su ubicación dentro del sistema de drenaje que ocupa, asimismo se considera la existencia de tres unidades de drenaje: cuenca, intercuenca y cuenca interna (Ministerio de Agricultura, 2012). En la Tabla 13 y la Figura 38 se detallan los niveles y la denominación de los drenajes basados en la codificación Pfasfstetter.

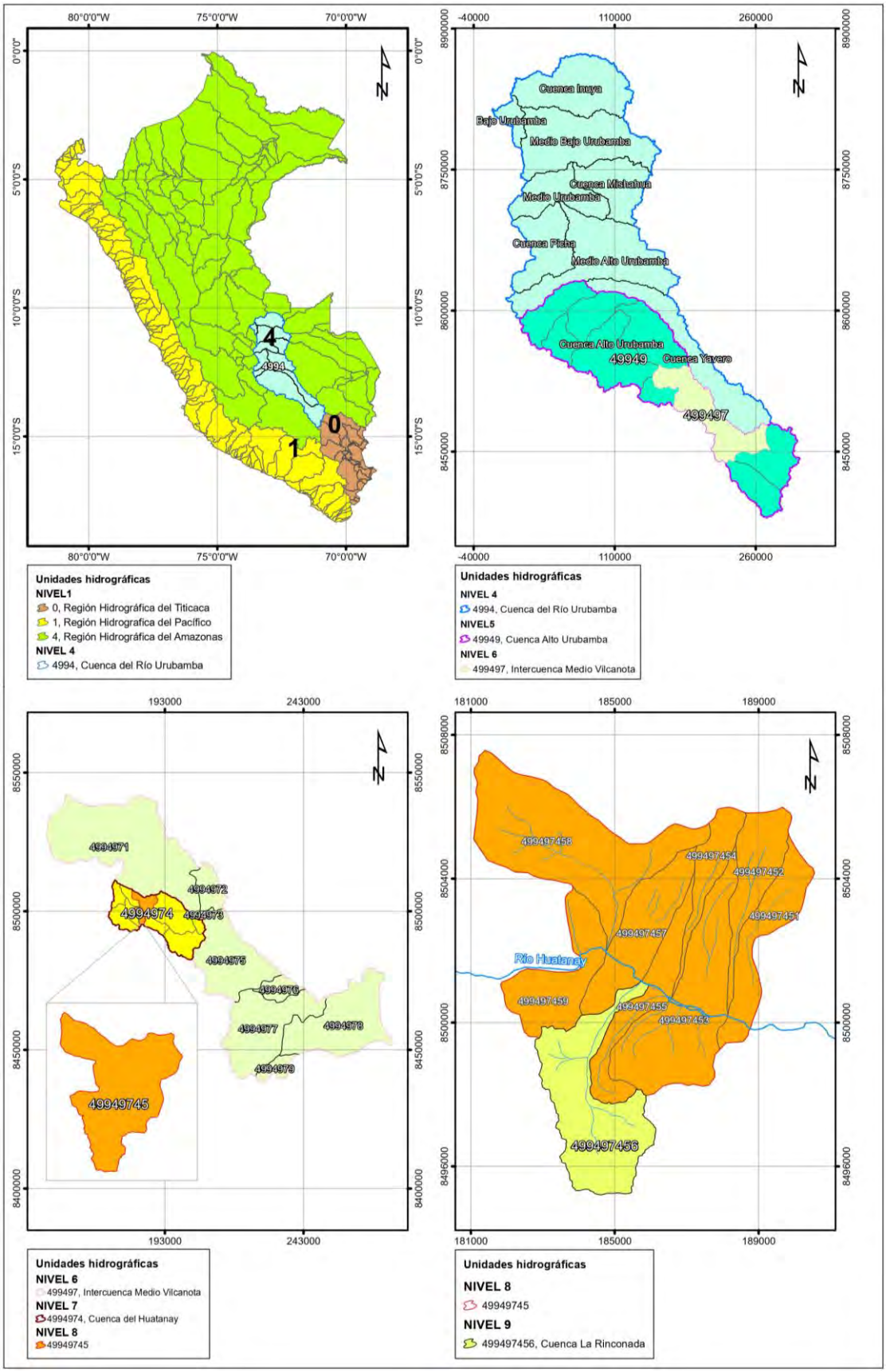
Tabla 13

Codificación según Pfasfstetter de la microcuenca La Rinconada

Nivel	Denominación	Código
1	Cuenca Hidrográfica del Río Amazonas	4
2	Cuenca cabecera del Río Amazonas	49
3	Cuenca hidrográfica del Río Ucayali	499
4	Cuenca hidrográfica del Río Urubamba	4994
5	Cuenca hidrográfica Alto Urubamba	49949
6	Intercuenca Medio Vilcanota	499497
7	Cuenca del Huatanay	4994974
8	Intercuenca hidrográfica	49949745
9	Cuenca La Rinconada	499497456

Figura 38

Detalle de la codificación de la cuenca La Rinconada basado en Pfasfstetter



4.2.1.2. Morfometría de la Microcuenca

Se determina mediante parámetros, los cuales son de gran importancia, puesto que determinan las características de la microcuenca y del comportamiento del recurso hídrico.

4.1.2.5.1. Parámetros Relativos a la Forma de la Microcuenca

Los parámetros de forma de la microcuenca se presentan en la siguiente Tabla 14. La microcuenca, de acuerdo con su factor de forma es muy alargada, por su coeficiente de compacidad es casi rectangular (alargada).

Tabla 14

Parámetros relativos a la forma de la microcuenca

Parámetro		Valor	Unidad	Símbolo
Área		9.56	km2	A
Perímetro		19.94	Km	P
Longitud de la cuenca		6.08	Km	L
Ancho de la cuenca		1.57	Km	B
Centroide X		184421	M	-
Centroide Y		8497920	M	-
Centroide Z		3688.65	M	-
Factor Forma		0.1185	-	Ff
Índice de Gravelius *(Coeficiente de compacidad)*		1.82	-	K
Relación de elongación		0.57	-	Re
Rectángulo equivalente	Lado Mayor	8.98	Km	L
	Lado Menor	1.06	Km	L

4.1.2.5.2. Parámetros Relativos al Relieve de la Microcuenca

Los parámetros de relieve se presentan en las siguientes tablas 15 y 16. Se presentan datos de altitudes, áreas parciales, curva hipsométrica y el polígono de frecuencias. Estos datos son de

mayor importancia, puesto que mientras se tenga mayor relieve de pendiente, la generación del flujo se produce en menos tiempo. A continuación, se detallan:

Tabla 15

Parámetros relativos al relieve de la microcuenca

Parámetro	Valor	Unidad	Símbolo
Altitud mínima	3230	msnm	Hm
Altitud máxima	4085	msnm	HM
Altitud mediana	3600	msnm	-
Altitud Media Ponderada	3599.58	msnm	H
Altitud Media Simple	3657.5	msnm	Hms
Desnivel altitudinal	855	m	Da

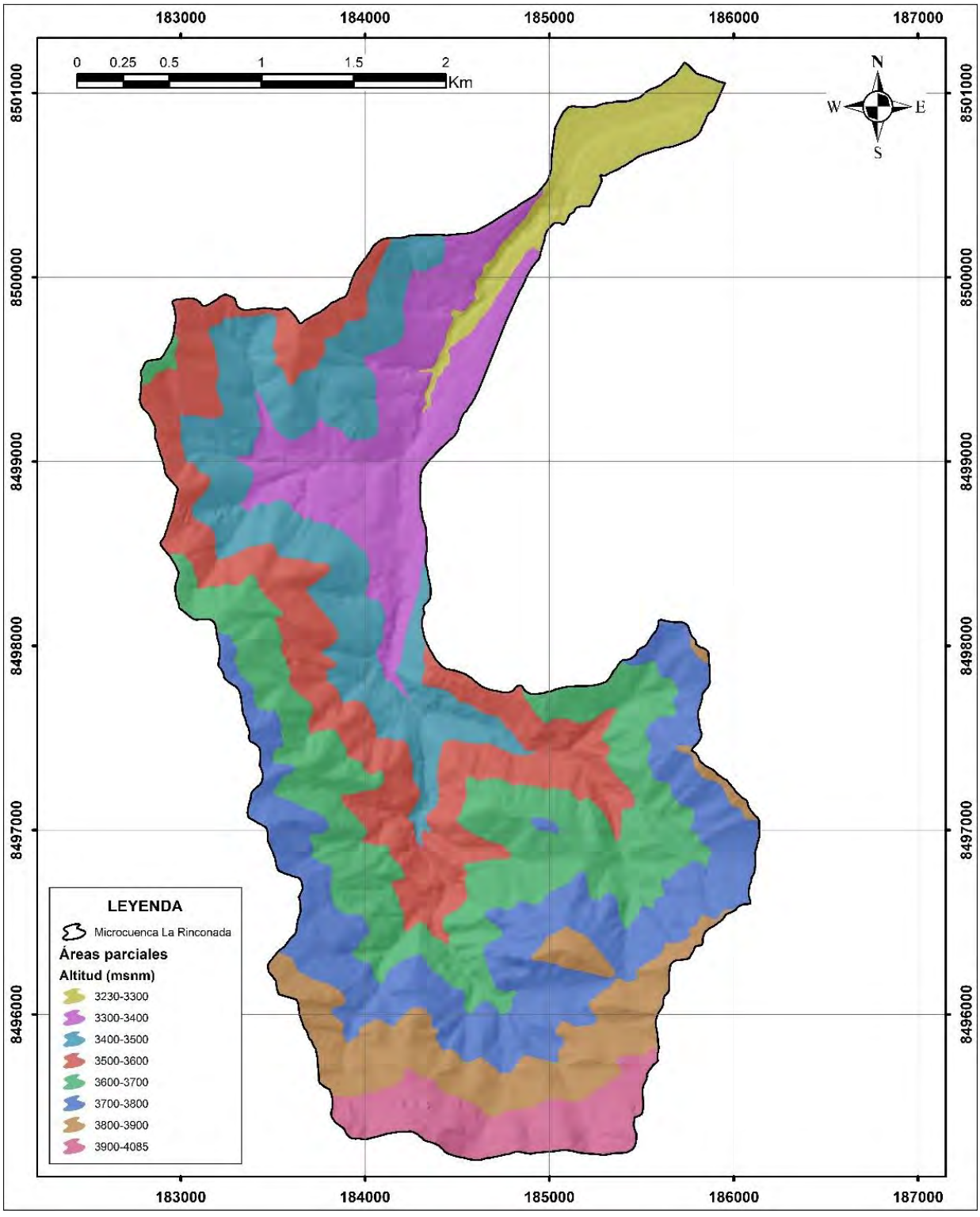
Tabla 16

Áreas parciales y acumuladas para la microcuenca La Rinconada

Altitud	Áreas parciales		Áreas acumuladas			
			Por debajo		Por encima	
m.s.n.m.	Km2	(%)	(Km2)	(%)	Km2	(%)
Punto más bajo						
3230	0.00	0.00	0.00	0.00	9.56	100.00
3300	0.50	5.24	0.50	5.24	9.05	94.76
3400	1.18	12.33	1.68	17.57	7.88	82.43
3500	1.41	14.79	3.09	32.36	6.46	67.64
3600	1.64	17.13	4.73	49.49	4.83	50.51
3700	1.80	18.86	6.53	68.35	3.02	31.65
3800	1.66	17.35	8.19	85.70	1.37	14.30
3900	0.86	9.03	9.05	94.73	0.50	5.27
4085	0.50	5.27	9.56	100.00	0.00	0.00
Punto más alto						
Total	9.56	100.00				

Figura 39

Mapa de áreas parciales de la microcuenca La Rinconada



La microcuenca La Rinconada presenta una curva hipsométrica del tipo B, que indica que se encuentra en una fase de equilibrio (microcuenca en etapa madura), ver Figura 40. En lo que respecta al polígono de frecuencias, ver Figura 41, se presenta un dominio con mayor área (18.86%) con la altitud de 3700 msnm.

Figura 40

Curva Hipsométrica

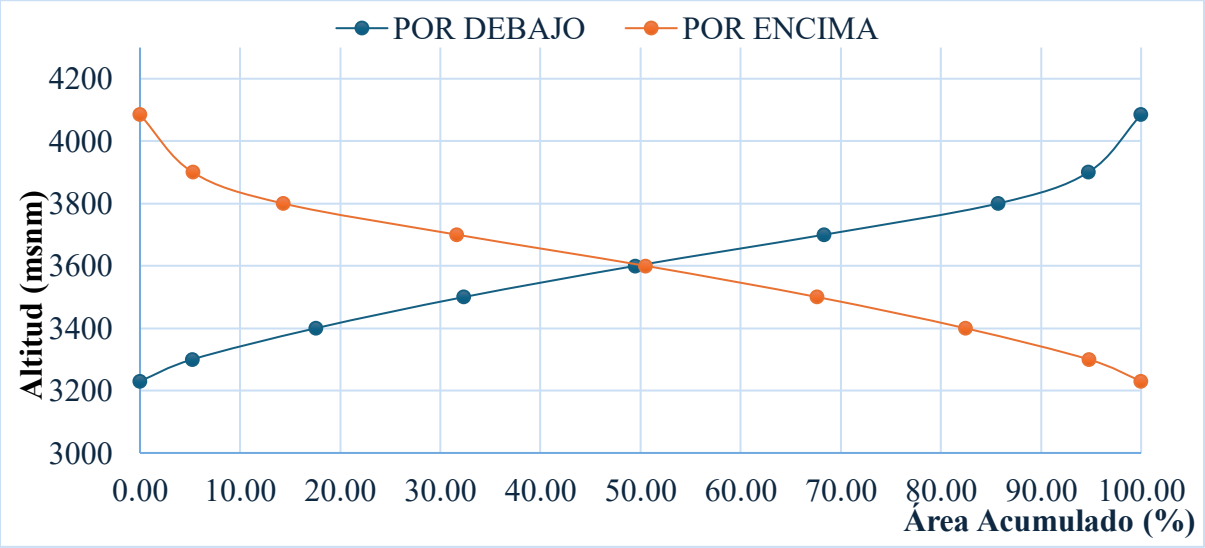
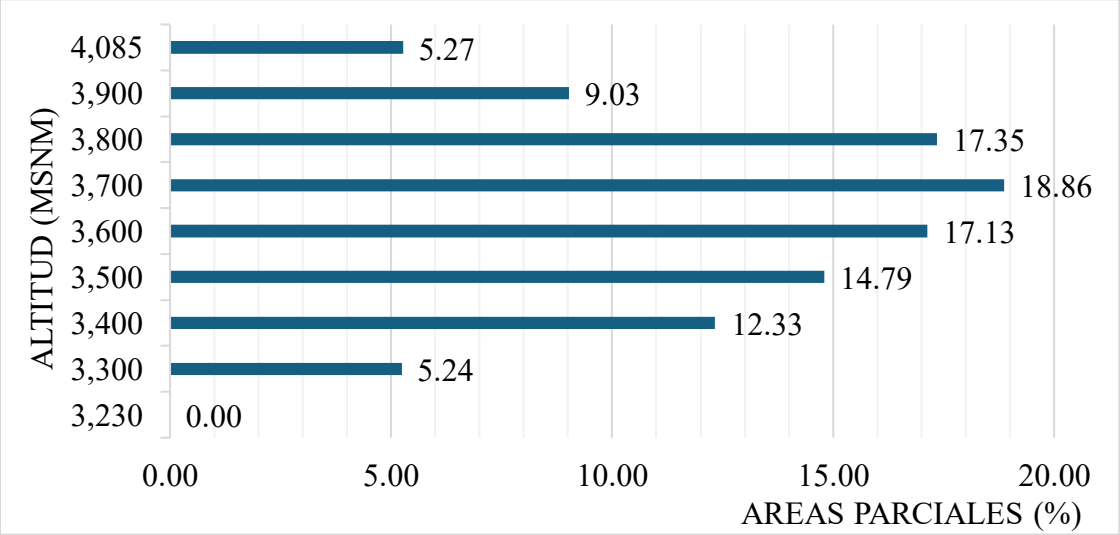


Figura 41

Polígono de frecuencias



4.1.2.5.3. Parámetros Relativos al Perfil de la Microcuenca

Los parámetros de perfil de la microcuenca se presentan en la siguiente Tabla 17.

Tabla 17

Parámetros relativos al perfil de la microcuenca

Parámetro	Valor	Unidad	Símbolo
Índice de Pendiente	9.36	%	Ip
Pendiente de la microcuenca *(Criterio del rectángulo equivalente)*	9.52	%	S
Pendiente media de la microcuenca	47.59	%	Pmc
Altitud mayor del cauce principal	3415	msnm	AMcp
Altitud menor del cauce principal	3235	msnm	Amcp
Pendiente promedio del cauce principal	4.15	%	Scp

La pendiente media de la microcuenca se determinó mediante la Tabla 18, obteniéndose una pendiente media de la microcuenca La Rinconada de 47.59%.

Tabla 18

Áreas parciales y acumuladas para la microcuenca La Rinconada

Nº	Rango pendiente (%)		Promedio	Número de ocurrencia	Promedio X ocurrencia
	Inferior	Superior			
1	0	3	1.5	14764	22146
2	3	12	7.5	18416	138120
3	12	25	18.5	47160	872460
4	25	50	37.5	258579	9696712.5
5	50	75	62.5	209084	13067750
6	75	100	87.5	41312	3614800
7	100	150	125.0	7539	942375
8	150	200	175.0	336	58800
9	200	250	225.0	23	5175
10	250	266	258.0	2	516
Total				597215	28418854.5
Pendiente media de la microcuenca			47.586%		

4.1.2.5.4. Parámetros Relativos al Drenaje de la Microcuenca

Los parámetros de drenaje de la microcuenca se presentan en la siguiente Tabla 19. El orden de drenaje de la microcuenca corresponde a orden 5 (ver Figura 42). Se presenta el perfil longitudinal del drenaje principal con cauce de orden 5 (ver Figura 43).

Tabla 19

Parámetros relativos al drenaje de la microcuenca

Parámetro		Valor	Unidad	Símbolo
Orden de cauce		5	-	-
Densidad de drenaje		3.91	-	-
Frecuencia de los ríos		11.512	-	-
Longitud del cauce principal		4333.12	m	
Extensión media del Escurrimiento Superficial		0.064	-	-
Tiempo de Concentración	Tc (horas)	0.899	horas	Tc-h
Kirpich	Tc (min)	41.90	min	Tc-m

Figura 42

Orden de ríos de la microcuenca La Rinconada

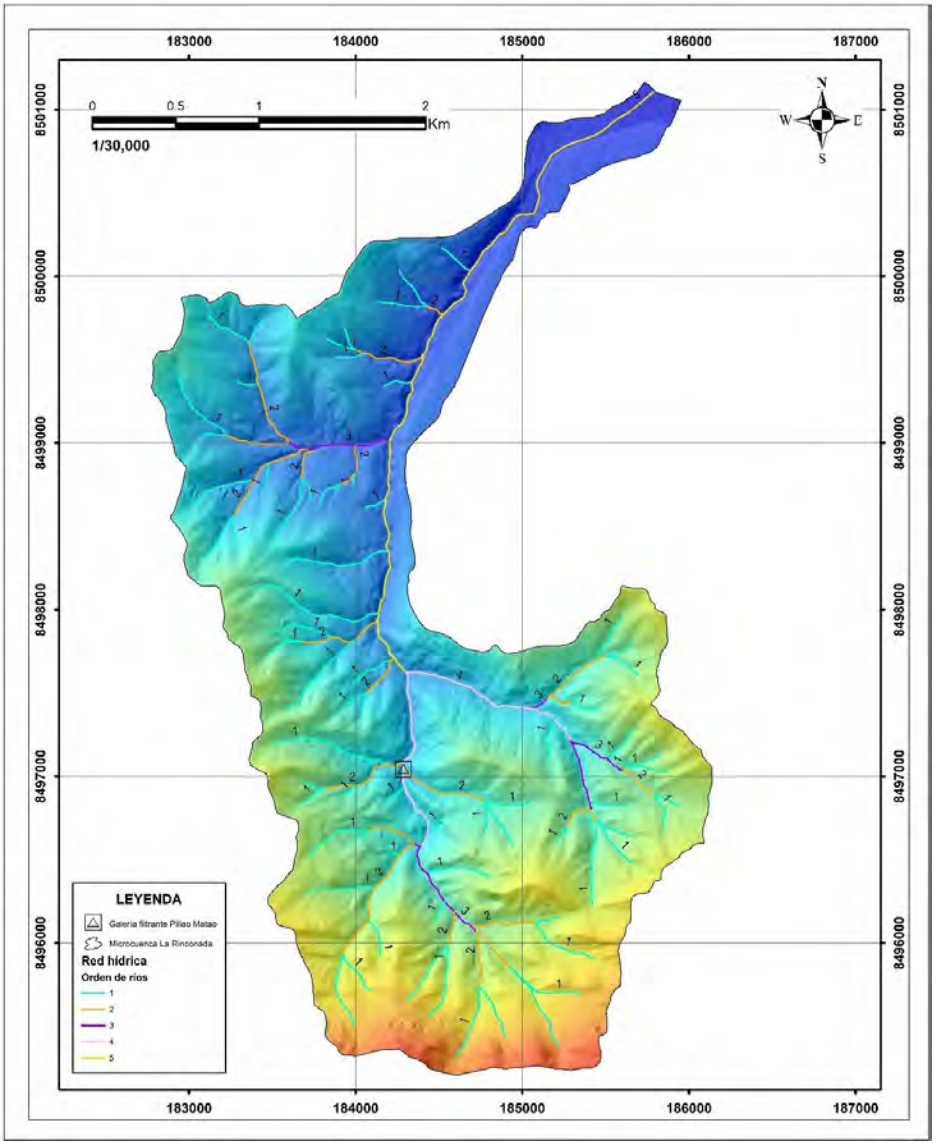
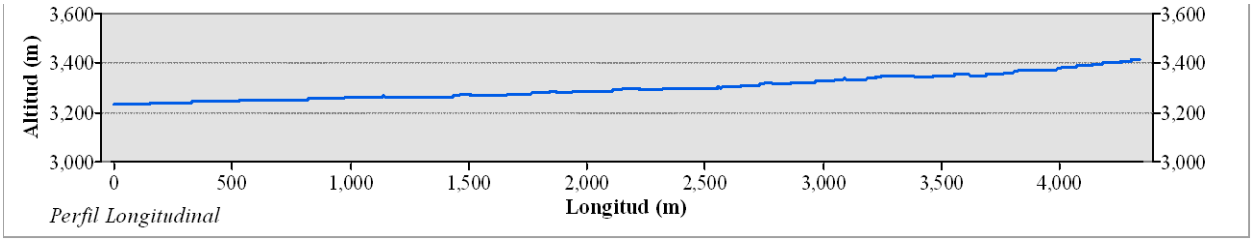


Figura 43

Pendiente del drenaje principal



A continuación, en la Tabla 20 se tiene un resumen de los parámetros morfométricos de la microcuenca.

Tabla 20

Resumen de los parámetros morfométricos de la microcuenca

Morfometría de la Microcuenca			
Parámetros Relativos a la Forma de la Microcuenca			
Parámetro	**Valor**	**Unidad**	**Símbolo**
Área	9.56	km2	A
Perímetro	19.94	Km	P
Longitud de la cuenca	6.08	Km	L
Ancho de la cuenca	1.57	Km	B
Centroide X	184421	M	-
Centroide Y	8497920	M	-
Centroide Z	3688.65	M	-
Factor Forma	0.1185	-	Ff
Índice de Gravelius *(Coeficiente de compacidad)*	1.82	-	K
Relación de elongación	0.57	-	Re
Rectángulo equivalente	8.98	Km	L
	1.06	Km	L
Parámetros Relativos al Relieve de la Microcuenca			
Parámetro	**Valor**	**Unidad**	**Símbolo**
Altitud mínima	3230	Msnm	Hm
Altitud máxima	4085	Msnm	HM
Altitud mediana	3600	Msnm	-
Altitud Media Ponderada	3599.58	Msnm	H
Altitud Media Simple	3657.5	Msnm	Hms
Desnivel altitudinal	855	M	Da

Morfometría de la Cuenca			
Parámetros Relativos al Perfil de la Microcuenca			
Parámetro	**Valor**	**Unidad**	**Símbolo**
Índice de Pendiente	9.36	%	Ip
Pendiente de la microcuenca *(Criterio del rectángulo equivalente)*	9.52	%	S
Pendiente media de la microcuenca	47.59	%	Pmc
Altitud mayor del cauce principal	3415	Msnm	AMcp
Altitud menor del cauce principal	3235	Msnm	Amcp
Pendiente promedio del cauce principal	4.15	%	Scp
Parámetros Relativos al Drenaje de la Microcuenca			
Parámetro	**Valor**	**Unidad**	**Símbolo**
Orden de cauce	5	-	-
Densidad de drenaje	3.91	-	-
Frecuencia de los ríos	11.512	-	-
Longitud del cauce principal	4333.12	M	
Extensión media del Escurrimiento Superficial	0.064	-	-
Tiempo de Concentración	0.899	Horas	Tc-h
Kirpich	41.9	Min	Tc-m

4.2.1.3. Información Hidrometereológica

La base de los datos hidrometeorológicos como la precipitación y la temperatura fueron obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH) que fueron registrados por la estación meteorológica Granja Kayra (ver Tabla 21), ubicado en la ciudad del Cusco (ver Figura 44).

Tabla 21

Detalle de la estación meteorológica Granja Kayra

Estación Meteorológica Granja Kayra					
		Longitud:	71°52'30.61"W	Departamento:	Cusco
Código:	100044	Latitud:	13°33'24.29"S	Provincia:	Cusco
		Altitud:	3214 msnm	Distrito:	San Jerónimo

Nota. Adaptado del SENAMHI (2025).

Figura 44

Ubicación de la estación meteorológica Granja Kayra



Nota. Modificado de Google Earth (2025).

4.2.1.4. Parámetros hidrológicos

4.2.1.4.1. Precipitación (PP)

4.2.1.4.1.1. Análisis y Completación de Datos de Precipitación. Para obtener la precipitación en la microcuenca La Rinconada se toman como referencia los obtenidos en la estación Granja Kayra por su cercanía, sin embargo, para la completación de datos faltantes se requiere usar otras estaciones, para este caso se eligió Pisac, Urubamba y Paruro. Los datos con los que se trabajaron van desde el año 1985 hasta el año 2021 (ver Tabla 22 y Figura 45). Esta completación se realiza para crear series periódicas completas, uniformes y fiables como sea posible. El método utilizado para completar los datos faltantes es el de relaciones normales por la variación mayor al 10% de la media anual entre las 4 estaciones y viene dada por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{P_x}=\frac{N_x}{3}\sum_{i=1}^{3}\frac{P_i}{N_i}$$

Donde:

N_x = Precipitación media anual de la estación con dato faltante

P_i= Precipitación mensual en cada estación vecina en el mes con dato faltante

N_i= Precipitación media anual de las estaciones vecinas

Tabla 22

Completación de precipitaciones mensuales faltantes en la estación Granja Kayra

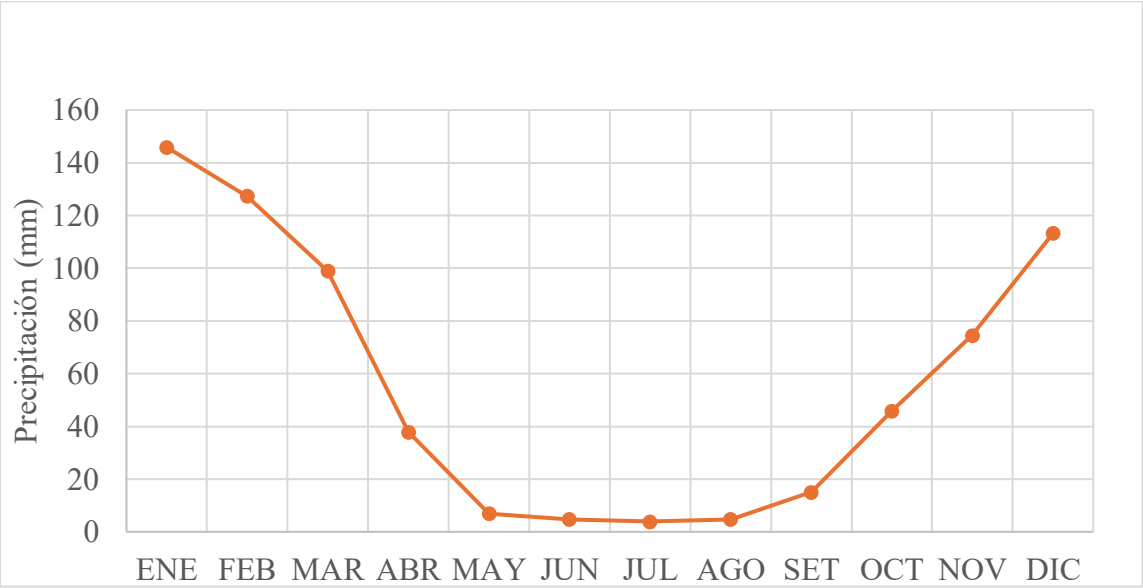
Precipitación media mensual (mm/mes) - Estación Granja Kayra															
N°	**AÑO**	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SET**	**OCT**	**NOV**	**DIC**	**PP anual**	**PP media mensual**
1	1985	129.10	119.40	74.20	33.20	15.60	11.60	0.90	0.00	43.30	62.10	116.50	122.40	728.30	60.69
2	1986	76.40	92.20	125.70	65.50	6.20	0.00	1.80	4.20	7.50	17.30	69.60	102.70	569.10	47.43
3	1987	224.30	87.90	48.60	13.10	2.10	1.30	9.20	0.00	8.20	26.50	101.80	107.60	630.60	52.55
4	1988	163.80	84.30	166.50	108.90	4.60	0.00	0.00	0.00	9.90	36.20	47.60	103.70	725.50	60.46
5	1989	151.40	126.80	119.30	38.60	6.40	9.10	0.00	6.10	30.70	15.70	60.70	88.50	653.30	54.44
6	1990	157.60	90.40	60.20	47.40	7.50	31.80	0.00	5.80	13.30	73.70	86.90	66.50	641.10	53.43
7	1991	97.60	163.60	105.20	45.10	11.00	5.10	1.50	0.00	21.40	49.30	83.60	99.00	682.40	56.87
8	1992	114.10	102.40	104.00	14.90	0.00	19.40	0.00	21.40	8.00	50.70	117.40	57.00	609.30	50.78
9	1993	206.70	110.50	75.80	18.80	0.90	0.00	2.70	6.90	18.00	46.20	111.90	201.50	799.90	66.66
10	1994	177.02	163.90	173.90	45.50	11.80	0.00	0.00	0.00	25.70	40.20	40.50	119.90	798.42	66.54
11	1995	122.00	94.80	95.30	17.80	0.00	0.00	0.60	1.20	28.80	26.70	70.20	102.60	560.00	46.67
12	1996	131.90	98.00	70.50	32.30	11.00	0.00	0.00	6.30	19.60	**58.86**	**63.80**	**123.73**	615.99	51.33
13	1997	123.30	127.73	104.80	31.00	4.80	0.00	0.00	7.10	12.30	44.40	201.50	148.40	805.33	67.11
14	1998	116.30	156.20	22.60	31.00	1.60	1.90	**0.00**	1.60	4.30	49.80	34.60	58.90	478.80	39.90
15	1999	89.30	92.20	92.00	42.80	1.30	3.40	1.00	0.00	43.10	18.80	39.70	119.50	543.10	45.26
16	2000	197.40	137.30	119.50	10.90	2.60	5.80	2.70	4.50	10.70	49.30	29.30	82.00	652.00	54.33
17	2001	233.00	173.10	137.40	36.40	11.50	0.00	17.40	10.20	20.60	38.30	96.80	89.40	864.10	72.01
18	2002	134.50	184.60	112.70	21.60	16.20	2.50	27.10	3.70	10.30	78.70	97.80	132.40	822.10	68.51
19	2003	163.90	135.50	142.90	56.50	2.00	6.40	0.00	21.30	3.70	34.60	23.10	123.80	713.70	59.48
20	2004	173.70	125.80	66.50	21.00	2.40	20.50	17.00	9.00	21.70	25.60	60.90	87.90	632.00	52.67
21	2005	140.80	**104.67**	120.20	33.10	3.20	0.40	1.20	4.00	4.50	39.10	59.30	102.50	612.97	51.08
22	2006	203.40	155.50	145.90	40.90	0.20	4.90	0.00	10.50	7.50	72.50	67.80	147.20	856.30	71.36
23	2007	140.80	58.70	107.30	93.60	5.80	0.00	4.00	0.00	1.00	49.40	74.00	88.40	623.00	51.92
24	2008	108.80	109.20	64.40	7.60	8.70	2.10	0.00	3.90	13.90	51.70	90.20	120.50	581.00	48.42
25	2009	112.50	108.30	79.10	21.30	5.30	0.00	3.30	0.70	15.10	8.30	88.70	82.90	525.50	43.79
26	2010	268.50	168.50	129.20	16.60	1.30	0.00	1.40	4.70	8.20	70.00	40.00	174.10	882.50	73.54
27	2011	103.40	187.00	131.90	67.60	3.90	3.20	3.70	0.00	38.90	38.20	60.20	110.20	748.20	62.35
28	2012	70.50	157.90	41.70	48.10	4.50	1.20	0.00	0.10	18.40	19.50	138.20	179.50	679.60	56.63
29	2013	187.30	137.20	75.50	13.00	25.30	6.10	2.00	12.40	6.30	105.00	86.00	159.40	815.50	67.96
30	2014	161.90	116.50	40.00	35.00	10.10	0.00	3.20	5.80	5.60	**54.77**	29.60	156.00	618.47	51.54
31	2015	169.80	146.50	66.70	69.80	18.60	3.90	10.30	4.60	16.10	19.10	48.60	113.00	687.00	57.25
32	2016	104.00	153.10	54.30	24.40	3.00	0.00	4.50	0.50	7.00	79.50	28.00	89.80	548.10	45.68
33	2017	111.20	86.90	122.80	47.50	11.20	5.90	0.00	8.40	19.00	33.70	61.40	101.70	609.70	50.81
34	2018	134.70	162.20	145.70	19.60	0.20	16.20	15.80	7.10	7.00	80.70	80.80	95.20	765.20	63.77
35	2019	121.00	115.20	164.40	38.90	28.20	1.50	3.70	0.00	9.80	82.40	111.70	140.40	817.20	68.10
36	2020	124.50	153.30	80.20	**8.51**	**5.36**	0.00	8.20	1.00	14.60	17.50	40.90	139.70	593.77	49.48
37	2021	150.50	116.50	74.10	90.50	6.70	11.50	3.00	4.30	1.50	38.20	102.30	106.10	705.20	58.77
PP máx. (mm)		268.50	187.00	173.90	108.90	28.20	31.80	27.10	21.40	43.30	105.00	201.50	201.50	268.50	73.54
PP mín. (mm)		70.50	58.70	22.60	7.60	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	8.30	23.10	57.00	0.00	39.90
SD (mm)		44.62	32.10	38.38	24.36	6.79	7.15	6.19	5.33	10.89	22.85	36.40	32.82	105.85	8.82
PP media (mm)		145.86	127.13	98.95	38.06	7.06	4.75	3.95	4.79	15.01	46.01	74.65	114.70	**680.93**	56.74
N° de datos		37.00	37.00	37.00	37.00	37.00	37.00	37.00	37.00	37.00	37.00	37.00	37.00	37.00	37.00
CV		0.31	0.25	0.39	0.64	0.96	1.51	1.57	1.11	0.73	0.50	0.49	0.29	0.16	0.16

Nota. Modificado del SENAMHI (2025) y de SNIRH (2025).

La precipitación media mensual de la microcuenca La Rinconada es de 56.74 mm y su precipitación media anual es de 680.93 mm.

Figura 45

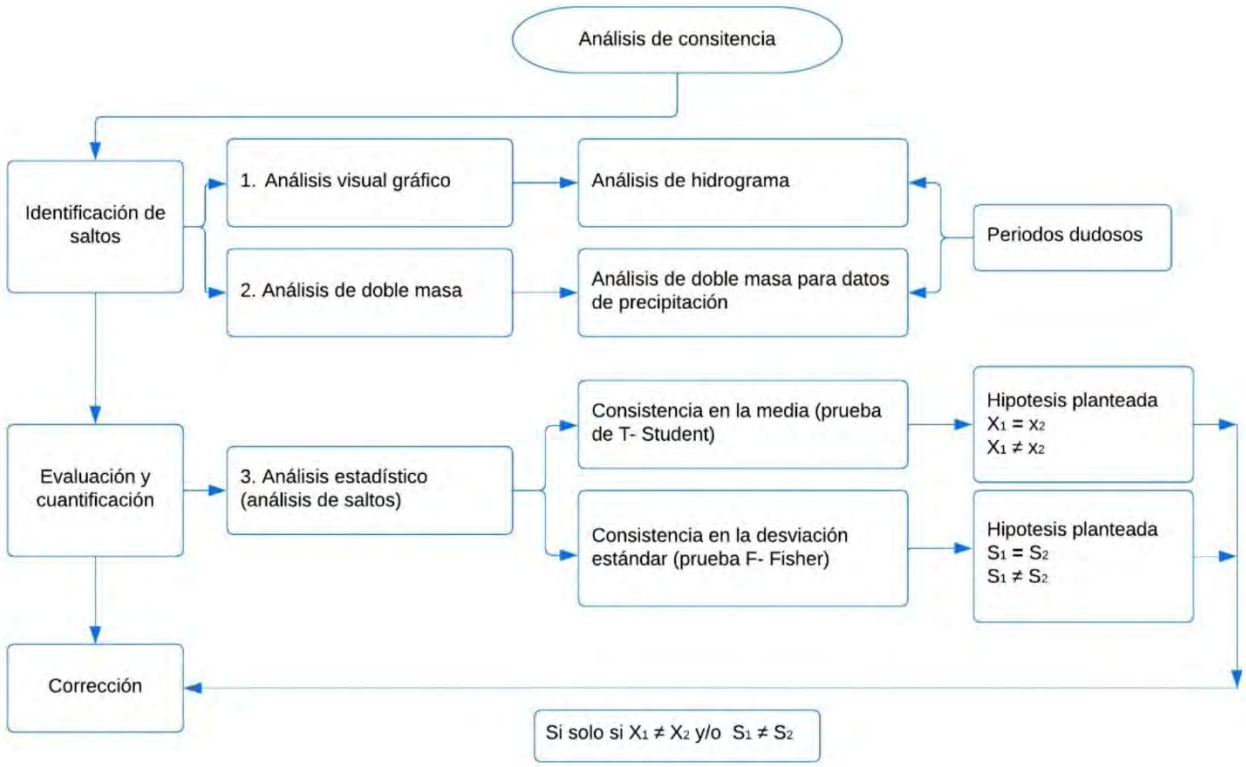
Representación de la precipitación media mensual – Estación Granja Kayra



4.2.1.4.1.2. Análisis de Consistencia. Este análisis es indispensable para evaluar la confiabilidad de los datos disponibles y que permiten detectar y eliminar posibles errores sistemáticos dados por la no homogeneidad e inconsistencia de los datos (Villón Béjar, 2006). A continuación, se visualiza Figura 46 con el esquema del análisis de consistencia de datos.

Figura 46

Esquema para el análisis de consistencia de datos

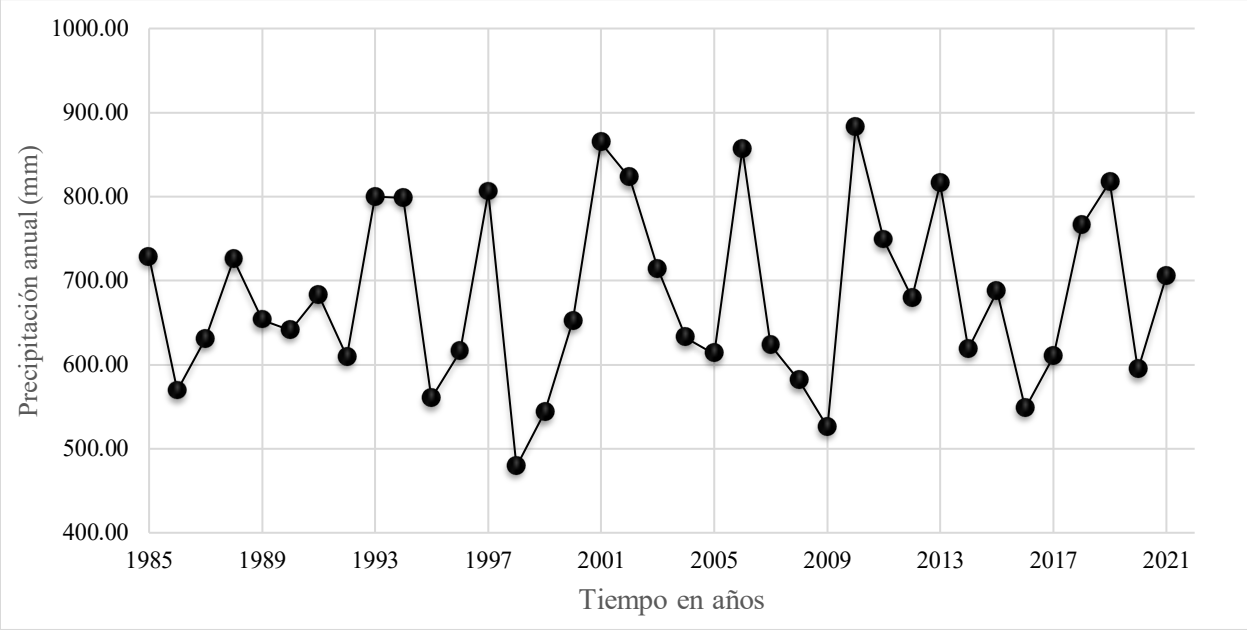


Fuente: Arqque & Quispe (2023, p. 111).

4.2.1.4.1.2.1. Análisis Visual Gráfico. Este análisis permite analizar la consistencia de los datos de precipitaciones a través de un gráfico en donde los picos o saltos indican periodos con información dudosa que pueden ser dadas por fenómenos naturales o errores sistemáticos. En este caso al trabajar con una sola estación, la Figura 47 te muestra la división en periodos.

Figura 47

Serie gráfica de precipitaciones anuales desde 1985 a 2021– Estación Granja Kayra

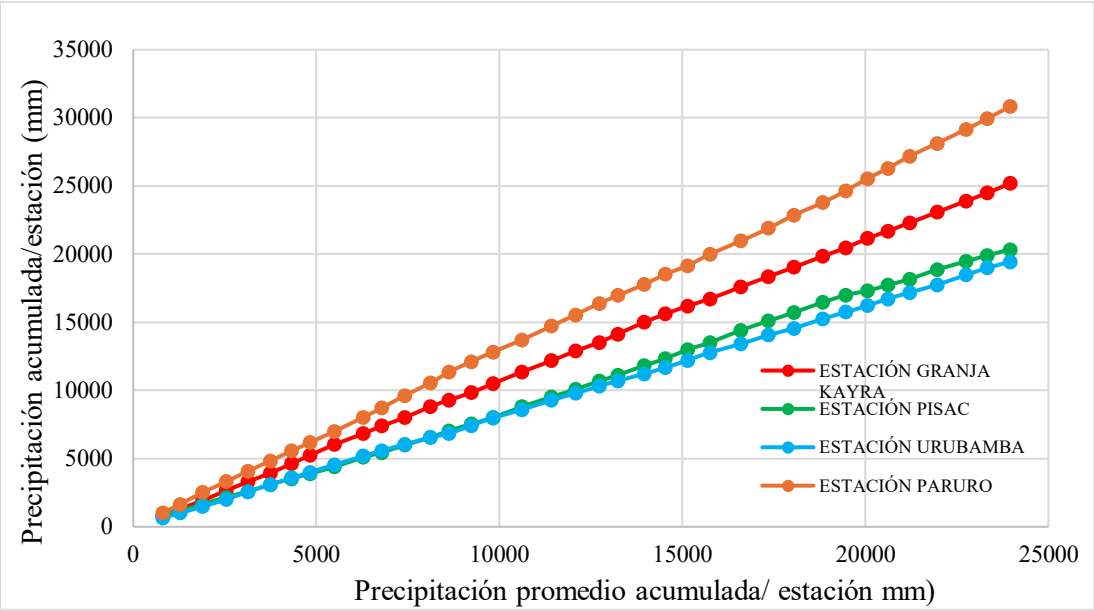


De la figura 47 se observa dos saltos en el año 1998 con una precipitación menor a 478.80 mm y en el año 2010 con una precipitación mayor a 882.50 mm con lo que se tiene tres periodos.

4.2.1.4.1.2.2. **Análisis de Doble Masa.** Este análisis permite analizar la consistencia de los datos de precipitación relacionado a errores y evaluar su grado de confiabilidad a través de quiebres que pueden ser producto de fenómenos naturales o por errores sistemáticos. La estación más confiable es la que muestra el menor número de quiebres y para este caso es la Estación Granja Kayra (ver Figura 48), la cual es usada como la estación base para el segundo diagrama de doble masa donde se determina el rango de periodos dudosos y confiables (ver Figura 49), los cuales son estudiados con el análisis estadístico para determinar si amerita corrección o no.

Figura 48

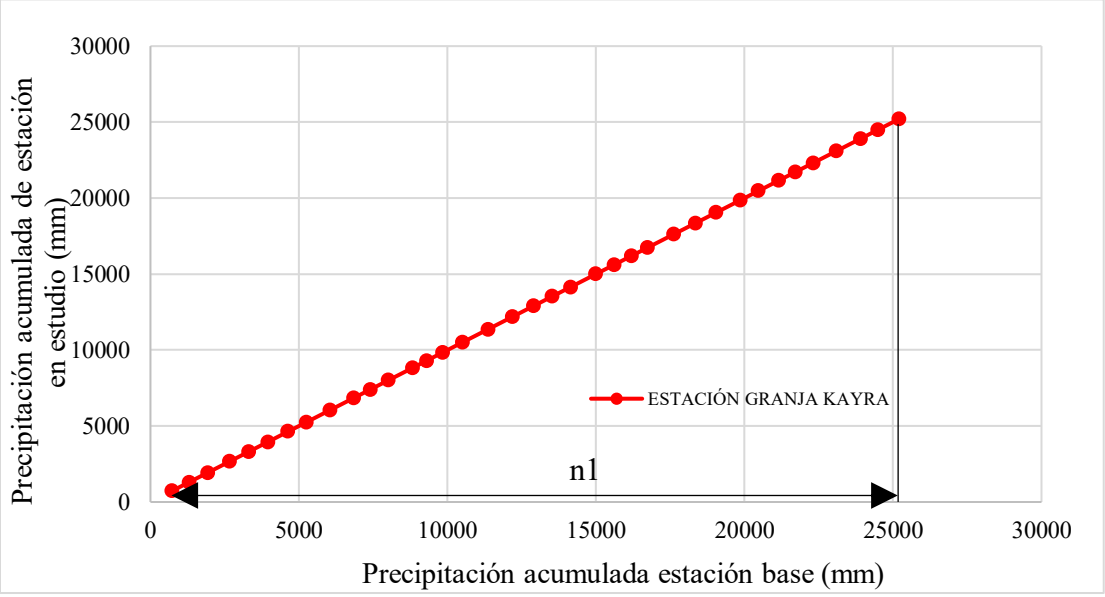
Representación del análisis de doble masa para obtener estación base



De la figura 48 se observa que la estación Granja Kayra es la estación base.

Figura 49

Representación del análisis de doble masa para obtener periodos



De la figura 49 se observa que la estación Granja Kayra solo tiene un periodo.

4.2.1.4.1.2.3. Análisis Estadístico. Una vez obtenidos los gráficos del análisis visual y de los de doble masa se pueden observar los periodos de posible corrección y los periodos que mantendrán sus datos iniciales, con todo esto se procede a realizar el análisis estadístico de saltos en la media y en la desviación estándar.

Consistencia de la Media

Este análisis busca probar que los valores medios de los periodos son iguales o diferentes con una probabilidad del 95% o con un nivel de significancia del 5%, es decir con $\alpha/2 = 0.025$ mediante la prueba de hipótesis (prueba t) donde por comparación del t calculado (t_c) y t tabular (t_t) se evalúa la consistencia de los datos y se rige en dos condiciones, si $t_c \leq t_t$ las medias son estadísticamente iguales y no amerita corrección de la información y si $t_c > t_t$ las medias son estadísticamente diferentes y si amerita corrección de la información. Para este caso se tiene 3 periodos (ver Tabla 23), de manera que para aplicar este método se compara los 2 primeros periodos (ver tablas 24 y 25) y luego este conjunto con el tercero.

Tabla 23

Rangos de periodos

Periodo	Año	Tamaño de muestra (n)
1	1985-1997	13
2	1998-2009	12
3	2010-2021	12

Consistencia de la media en los periodos 1 y 2

a) Cálculo de la media ($\overline{\boldsymbol{x}}$) y de la desviación estándar ($\boldsymbol{S}$)

$$\overline{\boldsymbol{X_1}}=\frac{1}{n_1}\sum_{i=1}^{n_1} x_i \qquad \text{y} \qquad \boldsymbol{S_1} = \left[\frac{1}{n_1-1}\sum_{i=1}^{n_1}(x_i-\overline{x_1})^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\overline{\boldsymbol{X_2}}=\frac{1}{n_2}\sum_{j=1}^{n_2} x_j \qquad \text{y} \qquad \boldsymbol{S_2} = \left[\frac{1}{n_2-1}\sum_{j=1}^{n_2}\left(x_j-\overline{x_2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

Tabla 24

Valores de la media y de la desviación estándar

Periodo	Media	Desviación estándar
1	678.403	658.714
2	86.093	129.541

b) Cálculo del t calculado $(\mathbf{t_c})$

$t_c = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (u_1 - u_2)}{s_{\bar{d}}}$, por hipótesis $u_1 - u_2 = 0$ indicando que las medias son iguales

Por ende:

$$t_c = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_{\bar{d}}}$$

Donde:

$s_{\bar{d}}$ = Desviación de las diferencias de los promedios y es igual a $s_P \left[\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right]^{\frac{1}{2}}$

s_p= Desviación estándar ponderada y es igual a $\left[\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1+n_2-2}\right]^{\frac{1}{2}}$

Tabla 25

Valores de $\mathbf{t_c}$, $\boldsymbol{s_{\bar{d}}}$ y $\boldsymbol{s_p}$

Parámetro	Valor
$\boldsymbol{s_p}$	109.054
$\boldsymbol{s_{\bar{d}}}$	43.657
$\mathbf{t_c}$	0.451

c) Cálculo del t tabular **(t_t)**

Este valor se obtiene de la tabla t de Student (ver Anexo 4a) de Villón (2006), donde se considera $\alpha/2 = 0.025$, con un grado de libertad (v) de 23, de manera que se tiene que t_t es igual a 2.069.

Por lo tanto, se tiene que para los periodos 1 y 2 las medias son estadísticamente iguales y no amerita corrección de los datos de precipitación, debido a que $t_c < t_t$. De la misma manera se realizó el análisis para el periodo conjunto del 1 y 2 con el periodo 3, donde se repite la condición que $t_c < t_t$, con valores de t_c igual a 0.993 y t_t igual a 2.030 con un grado de libertad de 35.

Consistencia de la Desviación Estándar

Este análisis busca probar que los valores de las desviaciones estándar de los periodos son iguales o diferentes con una probabilidad del 95% o con un nivel de significancia del 5%, es decir con $\alpha = 0.05$ mediante la prueba F donde por comparación del F calculado (F_c) y F tabular (F_t) se evalúa la consistencia de los datos y se rige en estas dos condiciones, si $F_c \leq F_t$ las desviaciones estándar son estadísticamente iguales y no amerita corrección de la información y si $F_c > F_t$ las desviaciones estándar son estadísticamente diferentes y si amerita corrección de la información. De igual manera que en la consistencia de la media, se repitió la agrupación de periodos.

Consistencia de la desviación estándar en los periodos 1 y 2

1. Cálculo de la varianza ($\boldsymbol{S^2}$)

$$\boldsymbol{S_1^2} = \left(\frac{1}{n_1 - 1}\right) \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \overline{x_1})^2 \qquad \text{y} \qquad \boldsymbol{S_2^2} = \left(\frac{1}{n_2 - 1}\right) \sum_{j=1}^{n_2} \left(x_j - \overline{x_2}\right)^2$$

Tabla 26

Valores de la varianza

Periodo	Varianza
1	7412.017
2	16780.928

2. Cálculo del F calculado **(F_c)**

$$F_c = \frac{S_1^2(X)}{S_2^2(X)}, \text{ si } S_1^2 > S_2^2 \qquad \text{o} \qquad F_c = \frac{S_2^2(X)}{S_1^2(X)}, \text{ si } S_2^2 > S_1^2$$

Para este caso que $S_2^2 > S_1^2$, se obtiene que F_c es igual a 2.264.

3. Cálculo del t tabular **(F_t)**

Este valor se obtiene de la tabla F (ver Anexo 4b) de Villón (2006), donde se considera $\alpha = 0.05$, con un grado de libertad del numerador (v_1) de 12 y un grado de libertad denominador (v_2) de 11, de manera que se tiene que F_t es igual a 2.79.

Por lo tanto, se tiene que para los periodos 1 y 2 las desviaciones estándar son estadísticamente iguales y no amerita corrección de los datos de precipitación, debido a que $F_c < F_t$. De la misma manera se realizó el análisis para el periodo conjunto del 1 y 2 con el periodo 3, donde se repite la condición que $F_c < F_t$, con valores de F_c igual a 1.087 y F_t igual a 2.61 con un grado de libertad del numerador de 11 y un grado de libertad denominador de 24.

4.2.1.4.2. Temperatura (T)

La temperatura media mensual de la microcuenca La Rinconada es de 12.84 °C, con una temperatura media mínima de 11.30 °C y una temperatura media máxima de 14.93 °C (ver Tabla 27). Los datos con los que se trabajaron tienen un periodo que va desde el año 1985 hasta el año 2021.

Tabla 27

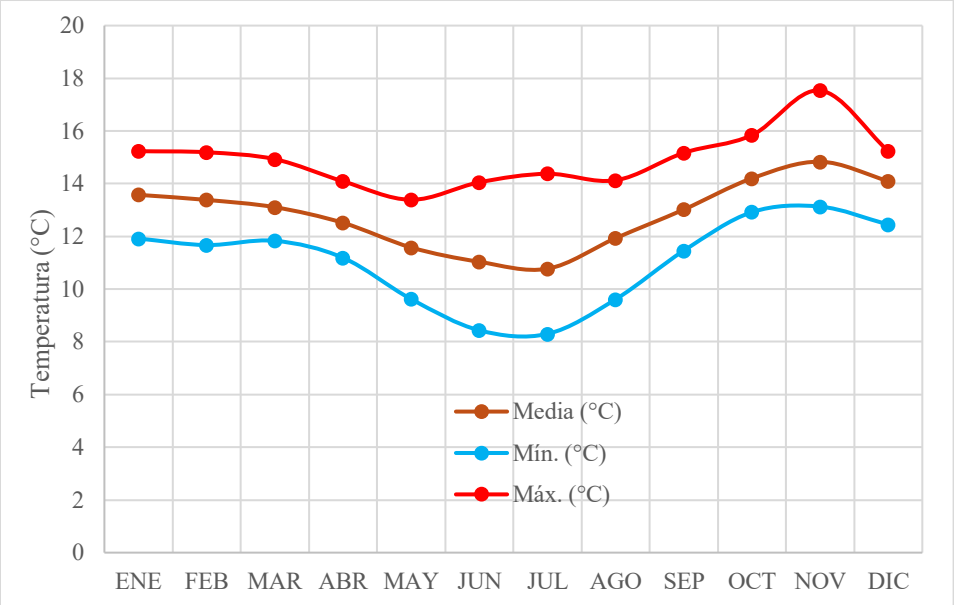
Temperatura media mensuales en la estación Granja Kayra

Temperatura media mensual (°C) - Estación Granja Kayra													
Mes/T°	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media (°C)
Media (°C)	13.58	13.38	13.11	12.52	11.58	11.04	10.77	11.93	13.02	14.20	14.83	14.10	**12.84**
Mín. (°C)	12.30	12.07	11.83	11.40	10.45	8.44	8.30	10.12	11.66	13.03	13.13	12.87	**11.30**
Máx. (°C)	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**

Nota. Modificado de SENAMHI (2025).

Figura 50

Representación de la temperatura media, mínima y máxima – Estación Granja Kayra



4.2.1.4.3. Evapotranspiración Potencial (ETP)

La evapotranspiración potencial se determina mediante la fórmula de Thornthwaite por la disponibilidad de datos y está dada por la siguiente ecuación:

$$ETP = 16c \cdot \left(\frac{10T}{I}\right)^{a}$$

Donde:

c = constante equivale a $\frac{n}{12} * \frac{d}{30}$

T = temperatura media mensual ºC

I = índice de calor anual equivale a ∑i

i = índice de calor mensual equivale a $(\frac{t}{5})^{1.514}$

a = $675 \cdot 10^{-9} \cdot (I^3 - 771 \cdot 10^{-7})(I^2 - 1972 \cdot 10^{-5})(I + 0.49239)$

Tabla 28

Evapotranspiración potencial mensual de la microcuenca La Rinconada

Mes	n	d	c	T (°C)	I	ETP (mm/mes)
ENE	12.70	31	1.09	13.58	4.54	62.73
FEB	12.43	28	0.97	13.38	4.44	54.44
MAR	12.06	31	1.04	13.11	4.30	56.95
ABR	11.68	30	0.97	12.52	4.01	50.28
MAY	11.36	31	0.98	11.58	3.57	45.75
JUN	11.21	30	0.93	11.04	3.32	41.07
JUL	11.29	31	0.97	10.77	3.20	41.44
AGO	11.57	31	1.00	11.93	3.73	48.42
SET	11.95	30	1.00	13.02	4.26	54.10
OCT	12.33	31	1.06	14.20	4.86	64.52
NOV	12.65	30	1.05	14.83	5.19	67.70
DIC	12.79	31	1.10	14.10	4.81	66.29
	I=	50.21			ETP (mm/año) =	**653.68**
	a=	1.2832712				

4.2.1.4.4. Balance Hidrológico

El balance hidrológico para la microcuenca La Rinconada considera a la precipitación como una variable de entrada, y a la evapotranspiración y la escorrentía como variables de salida; y está dada en la Tabla 29, donde se tiene un déficit de 125.93 mm/año en época de estiaje y un exceso de 153.18 mm/año en época de lluvias. Para esta investigación se está considerando la época de lluvias, por ende, se toma el valor de exceso para posteriores cálculos. Asimismo, se visualiza la Figura 51 que muestra la relación de la precipitación y la evapotranspiración real.

Precipitación – Evapotranspiración – Escorrentía (E. superficial+Infiltración) = Δ Almacenamiento = 0

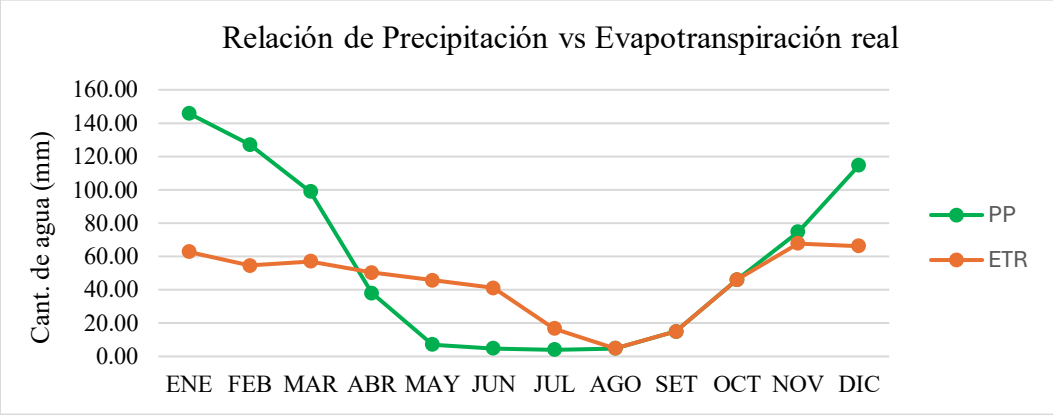
Tabla 29

Balance hidrológico de la microcuenca La Rinconada

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
T	13.58	13.38	13.11	12.52	11.58	11.04	10.77	11.93	13.02	14.20	14.83	14.10	12.84
PP	145.86	127.13	98.95	38.06	7.06	4.75	3.95	4.79	15.01	46.01	74.65	114.70	680.93
ETP	62.73	54.44	56.95	50.28	45.75	41.07	41.44	48.42	54.10	64.52	67.70	66.29	653.68
Δ ALM.	44.65	0.00	0.00	-12.21	-38.69	-36.32	-12.77	0.00	0.00	0.00	6.94	48.41	
ALM.	100.00	100.00	100.00	87.79	49.09	12.77	0.00	0.00	0.00	0.00	6.94	55.35	
ETR	62.73	54.44	56.95	50.28	45.75	41.07	16.72	4.79	15.01	46.01	67.70	66.29	**527.75**
DÉFICIT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.71	43.63	39.09	18.50	0.00	0.00	125.93
EXCESO	38.49	72.69	42.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	153.18

Figura 51

Relación de Precipitación vs Evapotranspiración Real



4.2.1.4.5. Evapotranspiración Real (ETR)

La evapotranspiración real dada mediante el balance hidrológico es de 527.75 mm/año.

4.2.1.4.6. Escorrentía Superficial (ES)

La escorrentía anual se estima a partir de la precipitación anual mediante el uso de un coeficiente de escorrentía, el cual representa la porción de la lluvia que se transforma en escurrimiento superficial (Chow et al., 1988; Subramanya, 2013). Esta relación se expresa como $\mathrm{ES_{anual}} = \mathrm{C} \cdot \mathrm{P_{anual}}$, donde C es el coeficiente de escorrentía obtenido a partir de un evento de precipitación de diseño, definido mediante curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), donde el tiempo de concentración se definió como la duración de la tormenta de diseño con un periodo de retorno de 10 año, el cual es ampliamente usado en estudios hidrológicos, ya que representa eventos frecuentes con escorrentías a condiciones medias. Bajo este enfoque, el coeficiente puede estimarse como $\mathrm{C} \approx \frac{\mathrm{Q_{evento}}}{\mathrm{P_{evento}}}$, donde $\mathrm{P_{evento}}$ corresponde a la precipitación asociada a la tormenta de diseño, mientras que $\mathrm{Q_{evento}}$ corresponde a la escorrentía superficial generada por dicho evento, determinada mediante el método del Natural Resources Conservation Service (SCS), el cual permite estimar dicha escorrentía directa a partir de las condiciones hidrológicas de la microcuenca. Este mecanismo cumple el principio del balance hidrológico donde la precipitación es igual a la escorrentía, infiltración y evapotranspiración.

a) Cálculo de $\mathbf{P_{evento}}$

Se realiza mediante la relación P = I·t proveniente del concepto de intensidad de precipitación, donde I representa la intensidad media de la precipitación y t la duración del evento y esta equivale al tiempo de concentración (t_c), ya que esto garantiza que toda la microcuenca contribuya al escurrimiento. En base a lo mencionado anteriormente y teniendo un t_c de 41.9 min,

para la obtención de I es necesario realizar una interpolación logarítmica de las curvas IDF obtenidas del SENAMHI con un periodo de retorno de 10 años ya que estas presentan t_c en horas (ver Anexo 6).

$$P_{evento}(mm) = I_{41} \cdot t_c$$

$$P_{evento}(mm) = 18.51 \text{ mm/h} \cdot 41.90 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}}$$

$$P_{evento}(mm) = 12.92$$

Donde:

$I_{41} = I_{60} \cdot \left(\frac{60}{41}\right)^n$ = 18.51 mm/h

$n = \frac{\log(I_1/I_2)}{\log(t_2/t_1)}$ = 0.585, por su relación potencial

b) Cálculo de $\mathbf{Q_{evento}}$

Para el cálculo de Q_{evento} se realiza mediante el método del Natural Resources Conservation Service (SCS) y se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{evento}(mm) = \frac{(P_{evento} - 0.2S)^2}{P_{evento} + 0.8S}$$

Donde:

P_{evento} = precipitación del evento en mm

S = almacenamiento potencial del suelo em mm equivale a $\frac{25400}{CN} - 254$

CN = número de curva

Considerando que la microcuenca La Rinconada presenta litología y uso del suelo variables, se realiza la estimación de un número de curva compuesto (CN_{comp}) haciendo uso de la Tabla 30 para determinar el grupo hidrológico y posteriormente se le asigna el Número de Curva

dado por el uso del suelo según la Tabla 31 para cada área correspondiente. Dicha ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$\mathrm{CN}_{\mathrm{comp}} = \frac{\sum(CN_i \cdot A_i)}{\Sigma A_i}$$

Donde:

CN_i = número de curva de cada tipo de cobertura

A_i = área correspondiente en km2

ΣA_i = área total de la microcuenca en km2

Tabla 30

Clasificación de grupos hidrológicos del suelo (SCS)

Grupo	Características del suelo	Infiltración
A	Arenas, gravas, suelos bien drenados	Alta
B	Franco arenoso, moderadamente drenado	Moderada
C	Franco arcilloso, baja permeabilidad	Baja
D	Arcillas, suelos saturados o con napa somera	Muy baja

Fuente: Natural Resources Conservation Service (1986).

Tabla 31

Valores del Número de Curva (CN) según uso del suelo

Uso del suelo	A	B	C	D
Bosque (buena condición)	30	55	70	77
Bosque (condición regular)	36	60	73	79
Bosque (condición pobre/degradado)	45	66	77	83
Pastizal (buena condición)	39	61	74	80
Pastizal (condición pobre)	49	69	79	84
Agricultura (buena condición)	62	71	78	81
Agricultura (condición pobre)	68	79	86	89
Área urbana (baja densidad)	57	72	81	86
Área urbana (alta densidad)	77	85	90	92
Suelo desnudo	77	86	91	94

Fuente: Natural Resources Conservation Service (1986).

Tabla 32

Valores de CN para cada área, CN compuesto y Qevento

Ítem	Descripción	Ai (km2)	Porcentaje (%)	Grupo	CNi	CNi *Ai
1	Formación Kayra	5.33	55.82	B	60	320.02
2	Formación Soncco sec. I	0.72	7.56	B	60	43.36
3	Formación Soncco sec. II	0.40	4.21	B	60	24.12
4	Formación Soncco sec. III	0.29	3.00	B	60	17.19
5	Formación Soncco sec. IV	0.38	3.95	B	69	26.07
6	Formación Soncco sec. V	0.36	3.75	B	69	24.70
7	Formación Soncco sec. VI	0.65	6.79	B	69	44.78
8	Formación San Sebastián	0.38	3.98	B	79	30.08
9	Formación San Sebastián	0.62	6.51	B	72	44.80
10	Depósito Fluvial	0.02	0.26	B	86	2.12
11	Depósito Eluvial	0.05	0.49	C	86	4.06
12	Depósito Deluvial	0.26	2.68	C	86	22.04
13	Depósito Deluvio-coluvial	0.09	0.99	C	86	8.15
	ΣAi (Km2) =		9.56			
	CN compuesto=		63.99			
	S (mm)=		142.92			
	Qevento (mm)=		**0.95**			

c) Cálculo de **C**

$$C \approx \frac{0.95\ mm}{12.92\ mm}$$

$$C \approx 0.07$$

De manera que: $ES_{anual} = C \cdot P_{anual}$

$$ES(mm/año) = 0.07 \cdot 680.93 mm/año$$

$$ES(mm/año) = 50.23$$

4.2.1.4.7. Infiltración (I)

La infiltración se determina mediante la ecuación del principio de conservación de masas en una microcuenca cerrada y está dada por la siguiente expresión:

$$PP=ETR+ES+I, \text{ para este caso se despeja I}$$

$$I(mm/año) = PP-ETR-ES$$

$$I(mm/año) = 680.93-527.75-50.23$$

$$I(mm/año) = 102.95$$

La infiltración constituye la fuente de recarga hídrica subterránea de los acuíferos en la microcuenca La Rinconada.

4.3. Parámetros y unidades hidrogeológicas

4.3.1. Hidrogeología

4.3.1.1. Inventario de Fuentes de Agua Subterránea

4.3.1.1.1. Inventario y Aforo Volumétrico de Caudal en Manantiales

Se realizó el inventariado y aforo volumétrico de caudal de 21 manantiales en los meses de enero y febrero del año 2025 en la microcuenca La Rinconada (ver Tabla 33, figuras 52 y 53 y Anexo 7), posteriormente se realizó la clasificación de manantiales según Carpio, Peña y Charca (2012) adaptada de Meinzer (1923) para acuíferos fisurado-sedimentarios (ver Tabla 34).

Tabla 33

Detalle de los manantiales en la microcuenca La Rinconada

N°	Código	Este	Norte	Tipo de manantial	Régimen	Uso	Caudal (l/s)	Fecha
1	SoIV-3	185380	8496116	Captado	Permanente	Riego	0.76	30/01/2025
2	SoIV-1	185185	8495926	No captado	Estacionario	Sin uso	0.71	30/01/2025
3	SoII-1	184856	8496371	No captado	Estacionario	Sin uso	0.01	30/01/2025
4	SoI-2	184954	8496546	No captado	Estacionario	Sin uso	0.02	30/01/2025
5	Ky-01	184687	8496895	No captado	Estacionario	Sin uso	0.03	5/02/2025
6	SoV-3	184726	8495836	No captado	Estacionario	Sin uso	0.94	5/02/2025
7	SoIV-2	184135	8495975	No captado	Estacionario	Sin uso	0.67	5/02/2025
8	SoI-1	184657	8496439	No captado	Estacionario	Sin uso	0.02	5/02/2025
9	SoVI-1	184730	8495590	Captado	Permanente	Riego	1.21	3/02/2025
10	SoV-1	185064	8495686	No captado	Estacionario	Sin uso	1.31	3/02/2025
11	SoV-2	184974	8495782	No captado	Estacionario	Sin uso	1.12	3/02/2025
12	Ky-02	185006	8496833	No captado	Estacionario	Sin uso	0.02	19/02/2025
13	SoI-03	185217	8496616	No captado	Estacionario	Sin uso	0.01	19/02/2025
14	SoI-04	185386	8496484	No captado	Estacionario	Sin uso	0.03	19/02/2025
15	SoI-05	185633	8496479	No captado	Estacionario	Sin uso	0.13	19/02/2025
16	SoI-06	185668	8496629	No captado	Estacionario	Sin uso	0.05	19/02/2025
17	Qel-01	185912	8496857	No captado	Estacionario	Sin uso	0.20	19/02/2025
18	Ky-03	185692	8497055	No captado	Estacionario	Sin uso	0.10	19/02/2025
19	Ky-04	185240	8497438	No captado	Estacionario	Sin uso	0.11	19/02/2025
20	Ky-05	185421	8497685	No captado	Permanente	Riego	1.43	19/02/2025
21	Ky-06	183811	8497659	No captado	Estacionario	Sin uso	0.07	20/02/2025

Figura 52

Aforo volumétrico de caudal en el manantial captado SoIV-3



Figura 53

Aforo volumétrico de caudal en el manantial no captado SoV-2



Tabla 34

Clasificación de manantiales en la microcuenca La Rinconada

Categoría	Rango de caudal (l/s)	N° manantiales
Primera	> a 2830	0
Segunda	283 – 2830	0
Tercera	28.3 – 283	0
Cuarta	10 – 28.3	0
Quinta	3 – 10	0
Sexta	1 – 3	4
Séptima	< 1	17

Fuente: Carpio, Peña, & Charca (2012, p. 2).

4.3.1.1.2. Inventario de la Galería Pillao Matao

Es importante mencionar que la microcuenca cuenta con la galería filtrante Pillao Matao con un caudal que varía de 2 l/s a 2.8 l/s, la cual también es una fuente de agua subterránea dada por los acuíferos fisurados sedimentarios Kayra y Soncco aprovechados en la agricultura (Vilchez Mata & Sosa Senticala, 2021) (ver Tabla 35).

Tabla 35

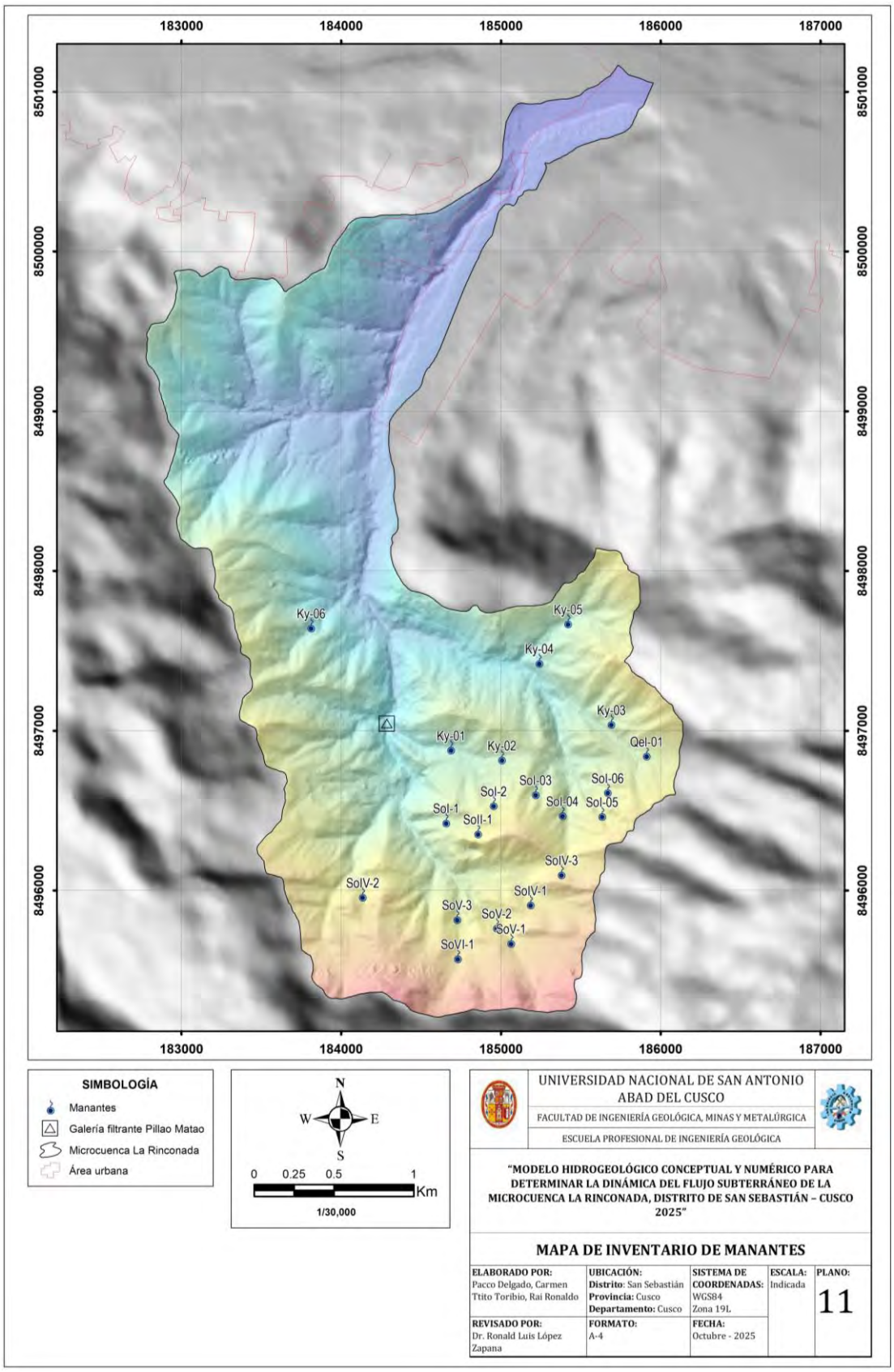
Detalle de la galería filtrante Pillao Matao

Código	Coordenadas UTM		Cota msnm	Acuíferos	Sección (mxm)	Longitud (m)	Dirección	Uso	Caudal (l/s)
	Este	Norte							
49949-51	184288	8497042	3843	Kayra/ Soncco	2x2	80	N225° (primeros 37 m) N210° (43 m)	Riego	2-2.8

Nota. Adaptado de Vilchez Mata & Sosa Senticala (2021, p. 71 y p.75) y de Carlotto, et al. (2008).

Figura 54

Localización de manantiales y galería filtrante en la microcuenca La Rinconada



4.3.1.2. Parámetros Hidrogeológicos de las Formaciones Geológicas

Para la clasificación de las unidades hidrogeológicas en el área de estudio es necesario conocer los parámetros hidrogeológicos como son la conductividad hidráulica, transmisividad, porosidad eficaz y coeficiente de almacenamiento que ya que dan una idea del comportamiento del agua en términos de cuanto pueden transmitir y almacenar.

4.3.1.2.1. Conductividad hidráulica (k)

4.3.1.2.1.1. Conductividad hidráulica para materiales consolidados. Para la estimación de manera indirecta de la conductividad en macizos rocosos fracturados se toma el método dado por Evert Hoek y John W. Bray en 1981 basado en las características del sistema de discontinuidades (fracturas) dado por los valores de abertura y espaciado, con la idea que el flujo subterráneo circula por las discontinuidades (ver Figura 55). A continuación, se detalla la ecuación:

$$k\ (cm/s) = \frac{a^2 \gamma}{12ub}$$

Donde:

a= promedio de abertura de la discontinuidad en cm

γ = peso específico del agua a 20°C equivale a 0.998 g/cm³

u = viscosidad dinámica del agua a 20°C equivale a 0.01 g/cm.s

b = promedio de espaciado de la discontinuidad en cm

Figura 55

Medición de parámetro de espaciado en la ventana estructural – Fm. Soncco

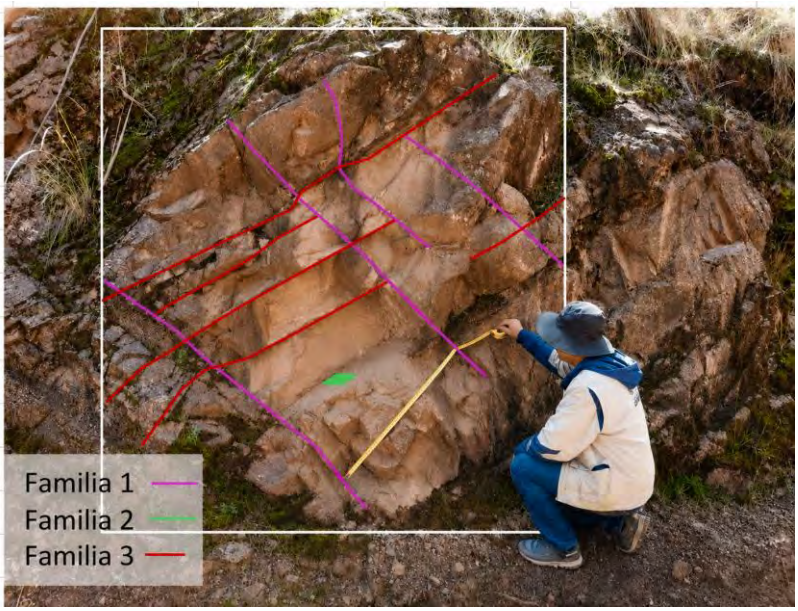


Tabla 36

Valores promedio de abertura por familias y por formación en la ventana estructural Kayra

N° de familia	Prom. abertura/familia	
	mm	cm
F1	0.55	0.06
F2	0.22	0.02
F3	0.51	0.05
Prom. abertura	**0.41**	**0.04**

Tabla 37

Valores promedio de espaciado por familias y por formación en la ventana estructural Kayra

N° de familia	Prom. espaciado/familia (cm)
F1	44.13
F2	30.24
F3	41.59
Prom. espaciado	**37.62**

Tabla 38

Valores de k en materiales consolidados

Unidad geológica	Prom. abertura (cm)	Prom. espaciado (cm)	k (cm/s)	k (m/s)	k (m/día)
Fm. Kayra	0.04	37.62	3.68E-04	3.68E-06	3.18E-01
Fm. Soncco sec. I	0.09	28.47	2.24E-03	2.24E-05	1.94E+00
Fm. Soncco sec. II	0.10	45.19	1.67E-03	1.67E-05	1.44E+00
Fm. Soncco sec. III	0.12	36.50	3.30E-03	3.30E-05	2.86E+00
Fm. Soncco sec. IV	0.04	54.83	2.13E-04	2.13E-06	1.84E-01
Fm. Soncco sec. V	0.06	40.43	7.49E-04	7.49E-06	6.47E-01
Fm. Soncco sec. VI	0.06	29.41	1.10E-03	1.10E-05	9.47E-01

4.3.1.2.1.2. Conductividad hidráulica para materiales no consolidados. Para la determinación de la conductividad en materiales no consolidados se realizó a través del ensayo de permeabilidad in situ mediante el método Lefranc a carga variable (ver Figura 56 y ver Anexo 8). A continuación, se detalla la ecuación:

$$k(\mathrm{cm/s}) = \frac{d_e^2 \ln(\frac{2L}{d})}{8Lt} \ln(\frac{h_1}{h_2})$$

Donde:

h_1, h_2 = altura de agua al inicio y final del ensayo en cm

t = tiempo entre la observación de los niveles h_1 y h_2 en s

L = longitud de la zona filtrante en cm

d = diámetro de la zona filtrante en m

d_e = diámetro de entubación, puede ser igual a d en cm

Figura 56

Ensayo de permeabilidad método Lefranc a carga variable



Tabla 39

Valores de k en materiales no consolidados

Unidad	k mín. (m/día)	k máx. (m/día)	Promedio k(m/día)	k (m/s)	k (cm/s)
Fm. San Sebastián	-	-	1.00E-02	1.16E-07	1.16E-05
Depósito deluvial	1.22E-03	1.37E-02	7.45E-03	8.62E-08	8.62E-06
Depósito eluvial	-	-	4.88E-03	5.65E-08	5.65E-06
Depósito deluvio-coluvial	3.12E-03	8.18E-03	5.65E-03	6.54E-08	6.54E-06

Figura 57

Localización de los ensayos Lefranc en la microcuenca La Rinconada

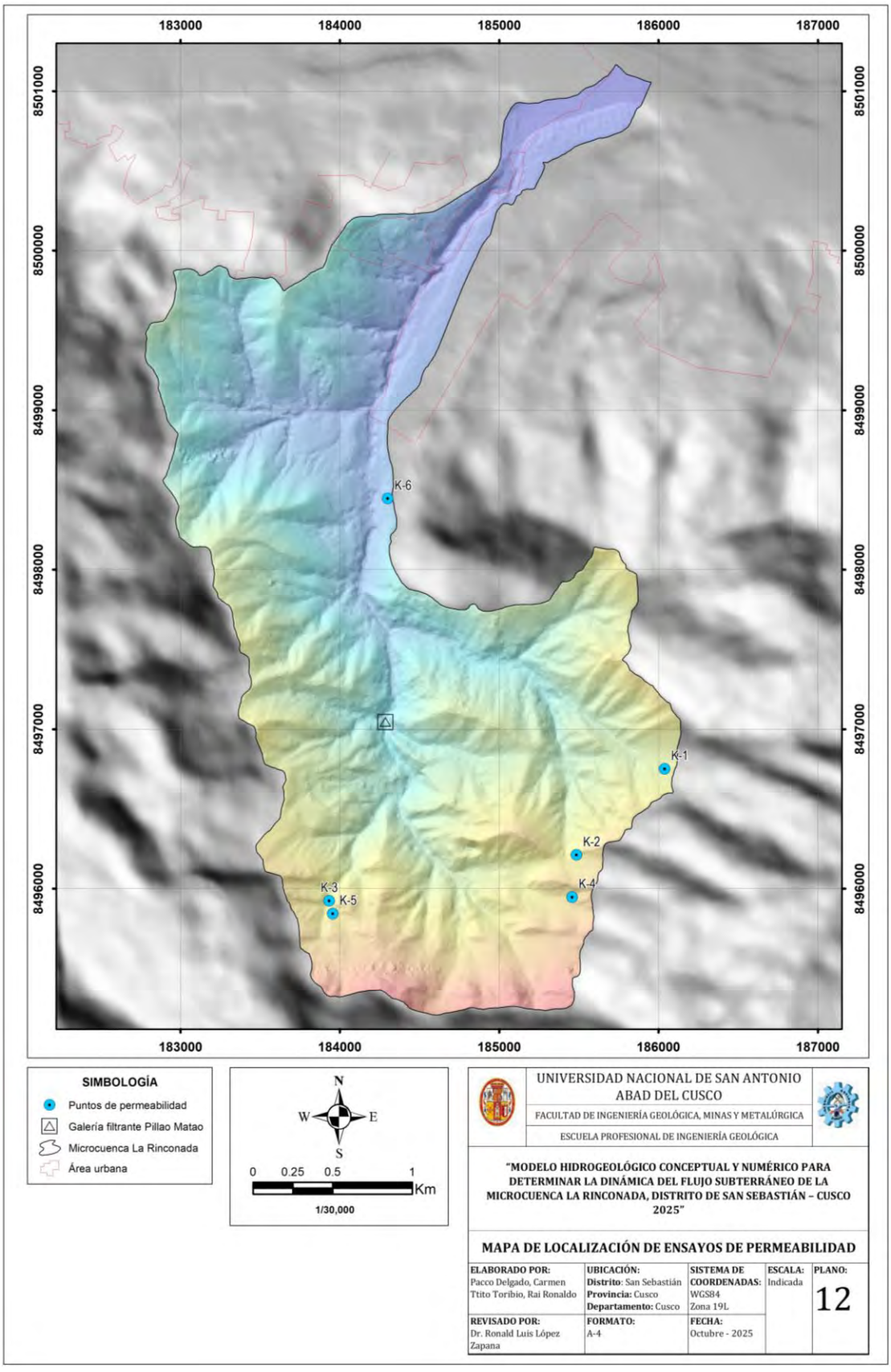


Tabla 40

Clasificación de la conductividad hidráulica según la litología

Conductividad hidráulica											
m/día	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^{2}	10^{3}	10^{4}
Clasificación	Impermeable			Poco permeable		Algo permeable		Permeable		Muy permeable	
	Acuicludo			Acuitardo		Acuífero pobre		Acuífero medio a bueno		Acuífero	
Tipo de materiales	Arcilla compacta Granito			Limo arenoso Limo Arcilla limosa		Arena fina Arena limosa Caliza fracturada		Arena limpia Grava Arena fina		Grava limpia	

Fuente: Vilchez Mata & Sosa Senticala (2021, p. 55).

4.3.1.2.2. Transmisividad (T)

Para la estimación de la transmisividad se hace uso de la expresión definida por González de Vallejo, Ferrer & Oteo (2002) que indican que la transmisividad está dada por el producto de la conductividad hidráulica k y el espesor del acuífero b. Se opta tomar un espesor saturado representativo de 40 m en las formaciones Kayra y Soncco y de 20 m en formaciones no consolidadas (ver Tabla 41). Estos valores se avalan en estudios hidrogeológicos que evidencian niveles saturados a profundidades con volúmenes de agua mayores a 40 m en acuíferos fisurados sedimentarios y mayores a 20 m en acuíferos sedimentarios no consolidadas obtenidos mediante métodos geofísicos en la ciudad del Cusco (Lopez De La Torre, 2023).

$$T\ (\mathrm{m}^2/\mathrm{día}) = k * b$$

Tabla 41

Valores de T en materiales consolidados y no consolidados

Unidad geológica	k (m/día)	b (m)	T (m2/día)
Fm. Kayra	0.32	40	12.80
Fm. Soncco secuencia I	1.94	40	77.60
Fm. Soncco secuencia II	1.44	40	57.60
Fm. Soncco secuencia III	2.86	40	114.40
Fm. Soncco secuencia IV	0.18	40	7.20
Fm. Soncco secuencia V	0.65	40	26.00
Fm. Soncco secuencia VI	0.95	40	38.00
Fm. San Sebastián	0.01	20	0.20

Tabla 42

Clasificación de acuíferos según la transmisividad

Transmisividad				
m²/día	**Clasificación**	**Posibilidades del acuífero**	**Tipo de acuífero**	**Características hidrogeológicas**
T < 10	Muy baja	Menos de 1 L/s con 10 m de depresión	Acuitardo / Acuífugo	Flujo prácticamente nulo, materiales poco permeables
10 < T < 100	Baja	Entre 1 y 10 L/s con 10 m de depresión	Acuífero pobre	Baja conectividad de fracturas, caudales pequeños
100 < T < 500	Media a alta	Entre 10 y 50 L/s con 10 m de depresión	Acuífero moderado	Productividad intermedia, fracturación moderada
500 < T < 1000	Alta	Entre 50 y 100 L/s con 10 m de depresión	Buen acuífero	Buena transmisividad, apto para captaciones
T > 1000	Muy alta	Más de 100 L/s con 10 m de depresión	Acuífero muy productivo	Alta permeabilidad (gravas, arenas gruesas o karst)

Fuente: Iglesias (2002).

4.3.1.2.3. Porosidad (n)

Para la estimación de la porosidad total (n) y la prorosidad efectiva (n_e) se toma como referencia la tabla de porosidad propuesta por Custodio y Llamas (ver tablas 43 y 44), que es ampliamente usada en estudios hidrogeológicos. La porosidad total viene a ser el volumen total de vacíos respecto al volumen total del material, mientras que la porosidad efectiva es la fracción de poros interconectados que contribuyen al flujo del agua subterránea (Fetter, 2001).

Tabla 43

Valores de porosidad total y efectiva según los materiales

Material	Porosidad total (%)	Porosidad efectiva (%)
Materiales no consolidados		
Grava	25 – 40	15 – 30
Arena	25 – 50	10 – 30
Limo	35 – 50	1 – 20
Arcilla	40 – 70	0 – 10
Materiales consolidados		
Arenisca	5 – 30	5 – 15
Caliza	0 – 20	0 – 10
Lutita	0 – 10	0 – 5
Rocas ígneas/metamórficas	0 – 5	≈ 0

Fuente: E. Custodio y M. R. Llamas (1983).

Tabla 44

Valores de n_e en materiales consolidados y no consolidados

Unidad geológica	n_e (%)	n_e ( )
Fm. Kayra	10	0.10
Fm. Soncco secuencia I	7.4	0.07
Fm. Soncco secuencia II	8.1	0.08
Fm. Soncco secuencia III	9.0	0.09
Fm. Soncco secuencia IV	8.8	0.09
Fm. Soncco secuencia V	9.0	0.09
Fm. Soncco secuencia VI	8.3	0.09
Fm. San Sebastián	10	0.10

4.3.1.2.4. Coeficiente de Almacenamiento (S)

Para la estimación del coeficiente de almacenamiento se consideró que es equivalente a la porosidad eficaz tomando los criterios que el acuífero es libre, el almacenamiento ocurre por gravedad a través de los poros interconectados y la compresibilidad del acuífero es muy pequeña (ver Tabla 45). Esta equivalencia es válida en estudios hidrogeológicos cuando no se cuenta con ensayos de bombeo (Fetter, 2001; Custodio & Llamas, 1983)

$$S \approx n_e$$

Tabla 45

Valores de coeficiente de almacenamiento según tipo de acuífero

Tipo de acuífero	Coeficiente de almacenamiento (S)	Clasificación
Acuífero confinado	$10^{-5} – 10^{-3}$	Muy bajo
Acuífero semiconfinado	$10^{-4} – 10^{-2}$	Bajo
Acuífero libre	0.01 – 0.30	Alto
Acuíferos de baja permeabilidad (arcillas)	$10^{-5} – 10^{-2}$	Muy bajo
Rocas fracturadas	$10^{-5} – 10^{-2}$	Muy bajo a bajo

Nota. Adaptado de R. C. Heath (1983) y de R. A. Freeze y J. A. Cherry (1979).

4.3.1.3. Clasificación de las Unidades Hidrogeológicas

Para dicha clasificación se hizo uso de los valores obtenidos de los parámetros hidrogeológicos principalmente de conductividad hidráulica y de porosidad efectiva, asimismo se consideró que principalmente el transporte del flujo subterráneo se da a través de las areniscas fracturas, de manera que se tiene las siguientes unidades hidrogeológicas (ver Anexo 1k. Mapa hidrogeológico local):

4.3.1.3.1. Acuífero Fisurado Sedimentario Kayra (Afs-Ky)

Está compuesto predominantemente por areniscas feldespáticas, que en gran parte se encuentran moderadamente fracturadas, intercalados con niveles pequeños de lutitas de manera que poseen una porosidad primaria dada por su litología y una porosidad secundaria dada por las fracturas (ver Figura 58). La conductividad hidráulica es de 3.18E-01 m/día y la porosidad efectiva es de 10%. Sus parámetros hidrogeológicos indican alta capacidad de almacenamiento y baja de transmisividad que sugieren que los acuíferos son de productividad baja y se evidencian con los

caudales pequeños en los manantiales en el área. Aflora al norte de la microcuenca La Rinconada, siendo la unidad hidrogeológica con la mayor extensión de la microcuenca.

El movimiento del flujo subterráneo en este acuífero está siendo dominado por las familias F2 y F3 dadas por el fracturamiento, teniendo una dirección de flujo predominantemente hacia el nor-noroeste (NNW) y este-noreste (ENE) respectivamente.

Figura 58

Acuífero fisurado sedimentario Kayra



Nota. Se aprecia areniscas feldespáticas intercaladas con pequeños niveles de lutitas.

4.3.1.3.2. Acuífero Fisurado Sedimentario Soncco (Afs-so)

Dentro de la microcuenca La Rinconada se tiene seis secuencias de la Formación Soncco, donde todas estas secuencias se clasifican como acuíferos ya que están compuestas por areniscas con intercalación de niveles pequeños de lutitas (ver figuras 59, 60 y 61). Los valores de conductividad se encuentran en rangos de 1.84E-01 a 2.86E+00 m/día y los de porosidad efectiva se encuentran en rangos de 7.4% a 9%. Sobre estas secuencias se encontraron afloramientos de manantiales que evidencian sus condiciones favorables como acuífero.

Sus parámetros hidrogeológicos reflejan valores de transmisividad en rangos de baja a media que indican que los acuíferos son de productividad baja a moderada. Aflora al sur de la microcuenca La Rinconada.

El flujo subterráneo en este acuífero está dado predominantemente por el fracturamiento, teniendo una dirección de flujo predominante hacia el este-noreste (ENE) en las secuencias I y III representadas por la familia F3 y hacia el nor-noroeste (NNW) en las secuencias II, IV, V y VI representada por la familia F2.

Figura 59

Acuífero fisurado sedimentario Soncco en secuencia III



Figura 60

Acuífero fisurado sedimentario Soncco en secuencia V



Figura 61

Acuífero fisurado sedimentario Soncco en secuencia VI



4.3.1.3.3. Acuífero no consolidado San Sebastián (Anc-sa)

Está compuesto por arenas fluviales con intercalación de niveles de gravas con matriz arenosa (ver Figura 62). La conductividad hidráulica en campo es de 1.00E-02 m/día y la porosidad efectiva estimada de 10%. Sus parámetros hidrogeológicos indican alta capacidad de almacenamiento y muy baja de transmisividad que sugieren que los acuíferos son de productividad baja. Aflora en la desembocadura de la microcuenca La Rinconada.

Figura 62

Acuífero no consolidado San Sebastián



4.3.1.3.4. Acuitardos No Consolidados (Atnc)

Está compuesto por los depósitos deluviales, eluviales y deluvio-coluviales ya que están compuestos predominantemente por suelos limo-arenosos y arcillas, con pequeñas áreas de gravas con una matriz limo arenosa y bloques (ver figuras 63 y 64), con valores de conductividades hidráulicas en campo que se encuentran en rangos de 4.88E-03 a 7.45E-03 m/día, de manera que se clasifica como un acuitardo.

Figura 63

Acuitardo no consolidado



Figura 64

Acuitardo no consolidado



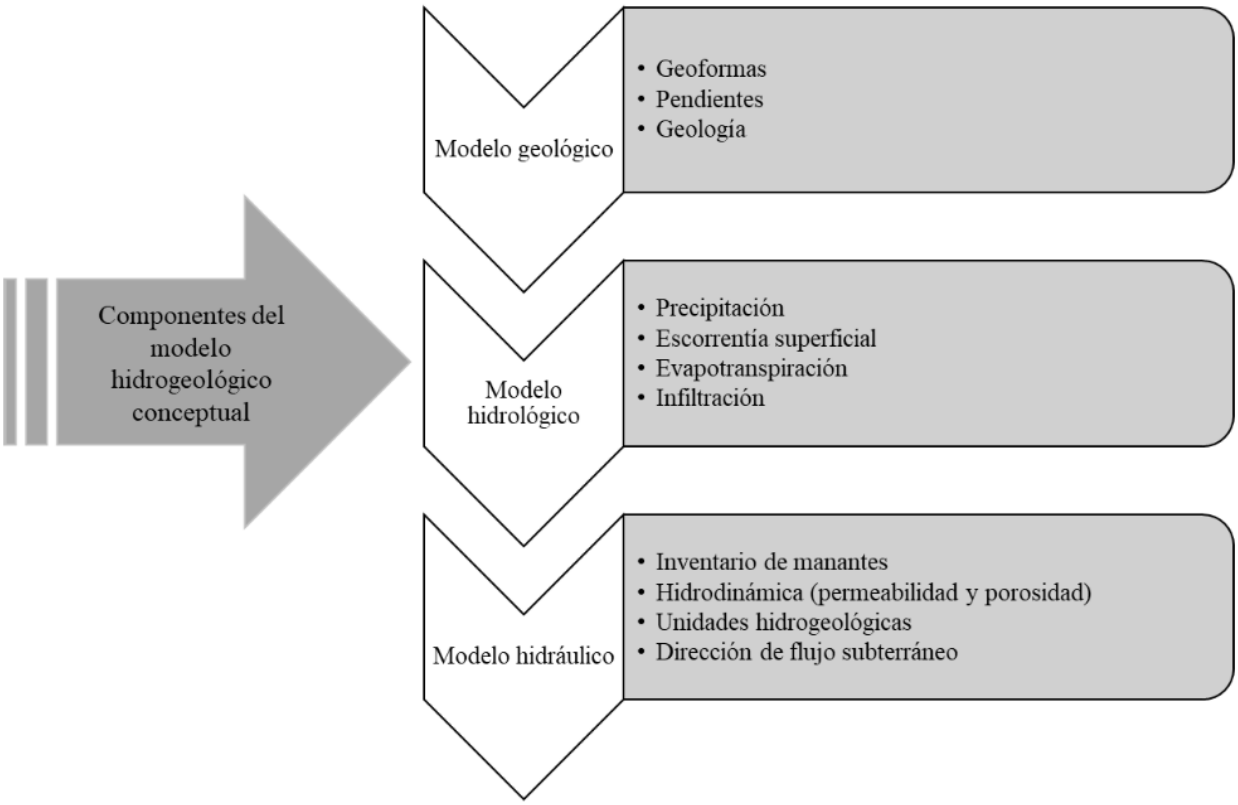
4.4. Modelo Hidrogeológico Conceptual

4.4.1. Componentes del Modelo Hidrogeológico Conceptual

Para el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual se está integrando tres componentes, que se detallan en la Figura 65.

Figura 65

Representación de los componentes del modelo conceptual



Fuente: Arqque & Quispe (2023, p. 147).

4.4.1.1. Modelo Geológico

Dentro de este componente se está integrando la geomorfología y la geología, es decir, este modelo representa de forma tridimensional las unidades geológicas y permite entender de mejor manera tanto su morfología como su disposición dada por los buzamientos en los contactos de las unidades. Asimismo, representa los sistemas de fallas presentes en el área de estudio.

Para el desarrollo del modelo geológico se utiliza información del tipo DEM (Digital Elevation Model) para representar la superficie tridimensional del relieve de la microcuenca y del tipo vector (shapefile) para representar las unidades geológicas, los contactos entre las unidades geológicas, las fallas y los buzamientos a través de polígonos, polilíneas y puntos (ver figuras 66 y 67).

Figura 66

Vista al oeste del modelo geológico de la microcuenca La Rinconada

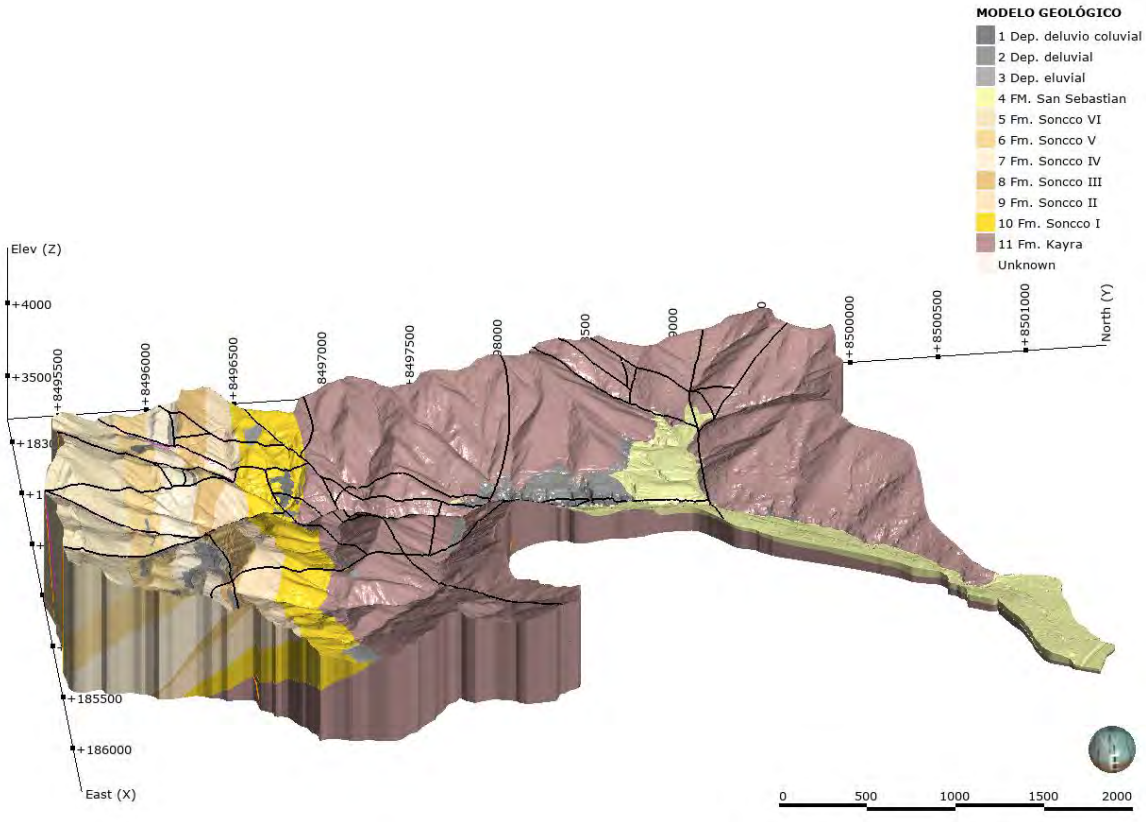
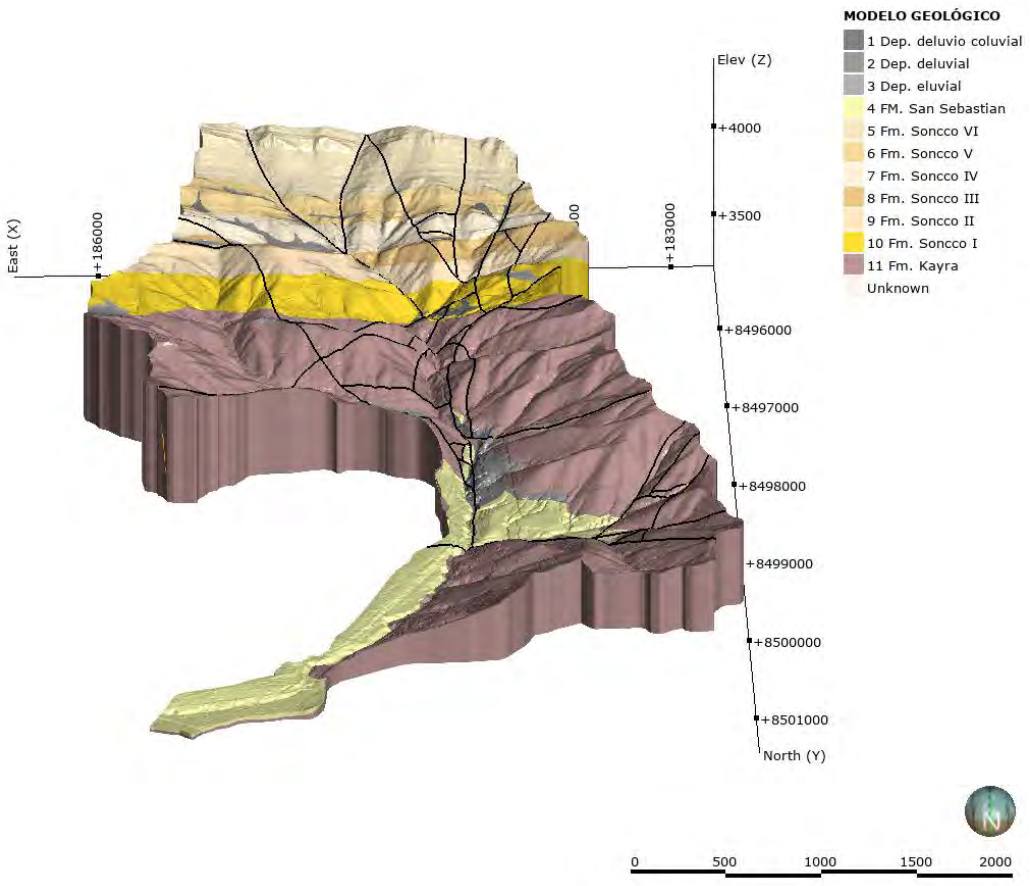


Figura 67

Vista al sur del modelo geológico de la microcuenca La Rinconada



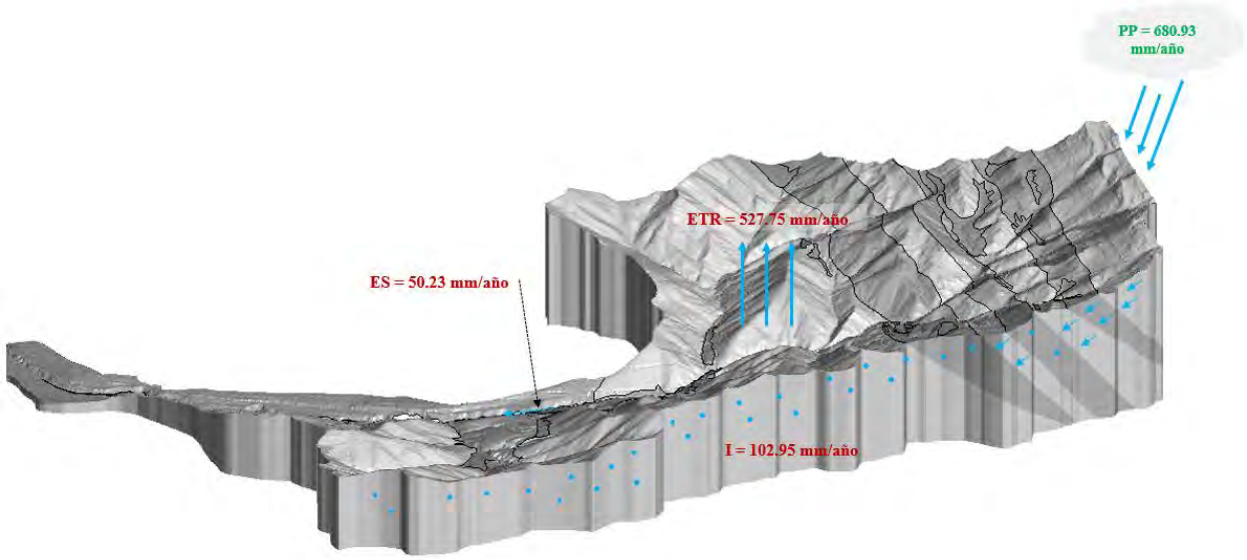
4.4.1.2. Modelo Hidrológico

Dentro de este componente se está considerando los parámetros hidrológicos que intervienen en el balance hidrológico conformados por la precipitación (PP) como una variable de entrada y por la evapotranspiración (ET), la escorrentía superficial (ES) y la infiltración (I) como variables de salida. Estos parámetros han sido abordados en el capítulo de hidrología.

Para el desarrollo del modelo hidrológico se utiliza información del tipo DEM para representar el relieve tridimensional de la microcuenca previamente delimitado, también se hace uso de los datos calculados de los parámetros hidrológicos para representar los mecanismos de entrada y salida de agua en la microcuenca (ver Figura 68).

Figura 68

Vista al este del modelo hidrológico de la microcuenca La Rinconada



4.4.1.3. Modelo Hidráulico

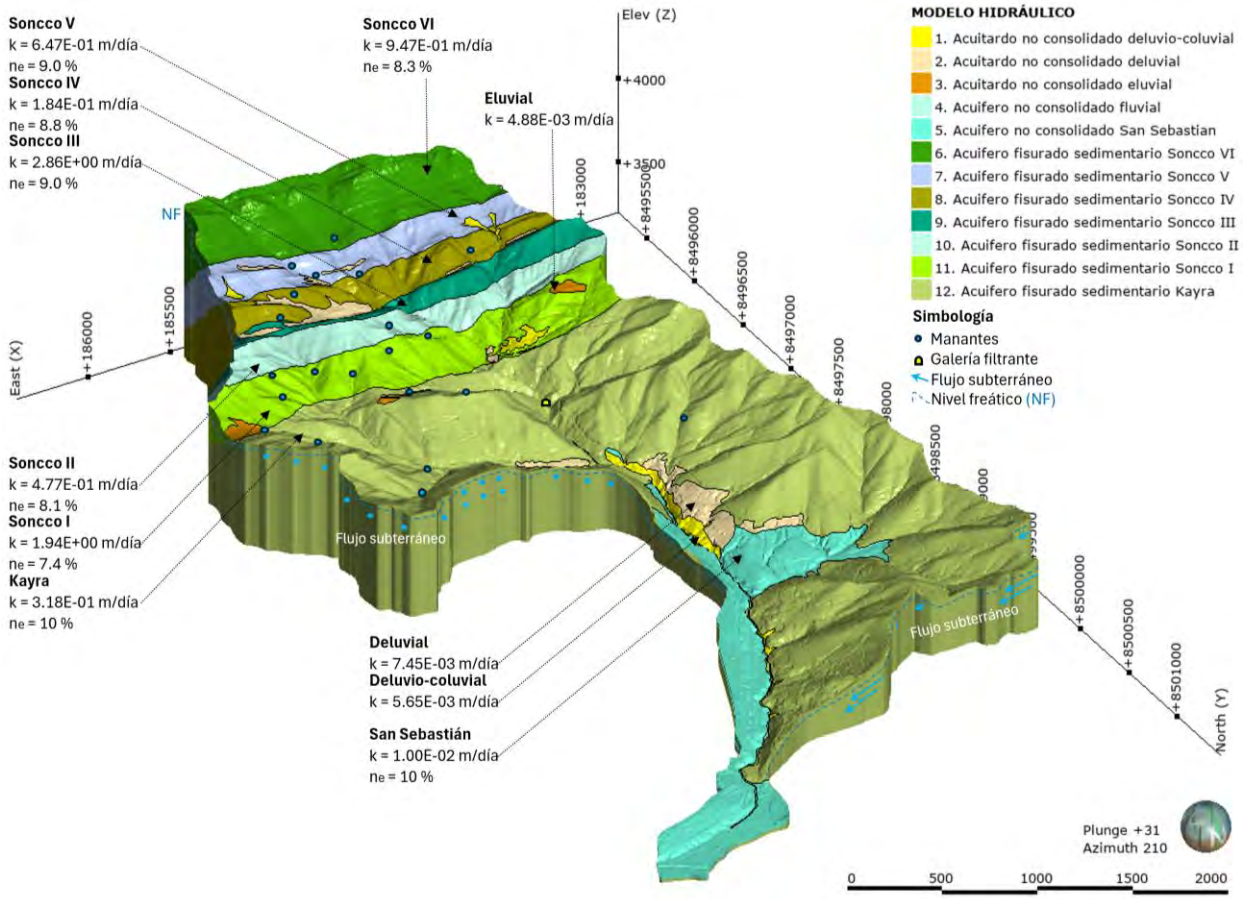
Dentro de este componente se está considerando la hidrogeología, donde los parámetros hidrogeológicos definidas para las unidades geológicas (conductividad hidráulica, transmisividad, porosidad y coeficiente de almacenamiento) permiten la clasificación de las unidades hidrogeológicas según su capacidad de transmitir y almacenar el agua. Tanto los rangos de valores de los parámetros y la posterior clasificación de las unidades hidrogeológicas han sido desarrollados según tablas referenciales.

Para el desarrollo del modelo hidráulico se utiliza información del tipo DEM para representar el relieve de la microcuenca, del tipo vector (shapefile) para representar las unidades hidrogeológicas, también se hace uso de datos obtenidos como el de los parámetros hidrogeológicos que permiten la clasificación de las unidades hidrogeológicas, de las direcciones del flujo subterráneo determinadas por la estratificación y el fracturamiento de las rocas; y los

datos del inventario de manantiales que proporcionan el nivel freático libre, complementado del aforo volumétrico de los mismos para determinar sus caudales (ver Figura 69).

Figura 69

Vista al suroeste del modelo hidráulico de la microcuenca La Rinconada



4.4.2. Conceptualización del Flujo subterráneo

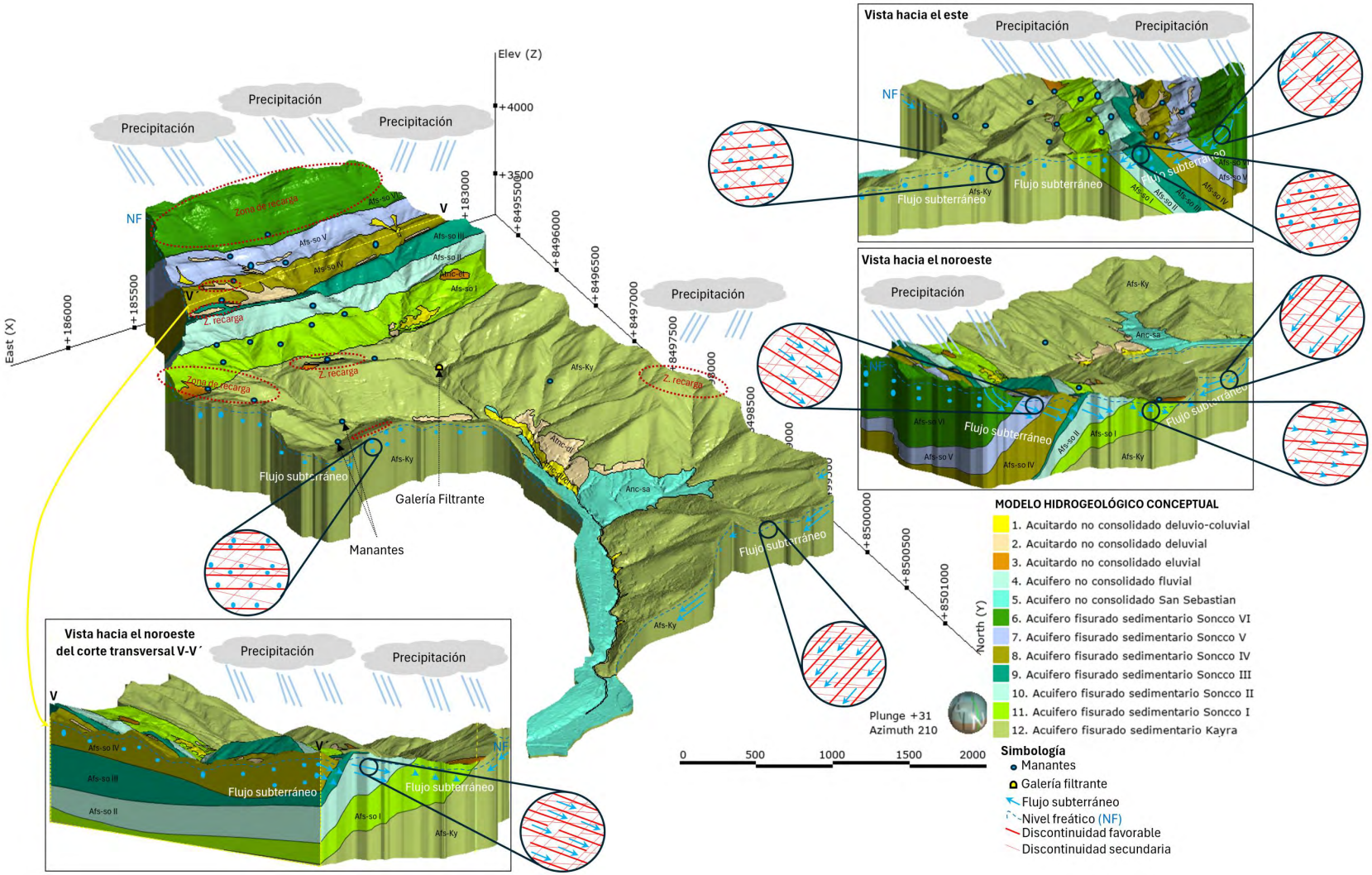
El modelo hidrogeológico conceptual integra los 3 componentes anteriormente mencionados y permite conocer el comportamiento de las aguas subterráneas basada en las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas (ver Figura 70), de manera que representa lo siguiente:

- La geometría de la microcuenca.

- Las variables de entrada y salida del agua en el sistema determinados mediante el balance hidrológico, donde la infiltración es la fuente de recarga al sistema hidrogeológico.
- Las unidades hidrogeológicas definidas por su capacidad de transmitir y almacenar el agua.
- El inventario y aforo de las fuentes de agua subterránea (manantiales y Galería filtrante Pillao Matao)
- La dirección del flujo subterráneo determinadas por los parámetros geomecánicos de las discontinuidades asociadas a la estratificación y al fracturamiento, principalmente abertura y espaciado.

Figura 70

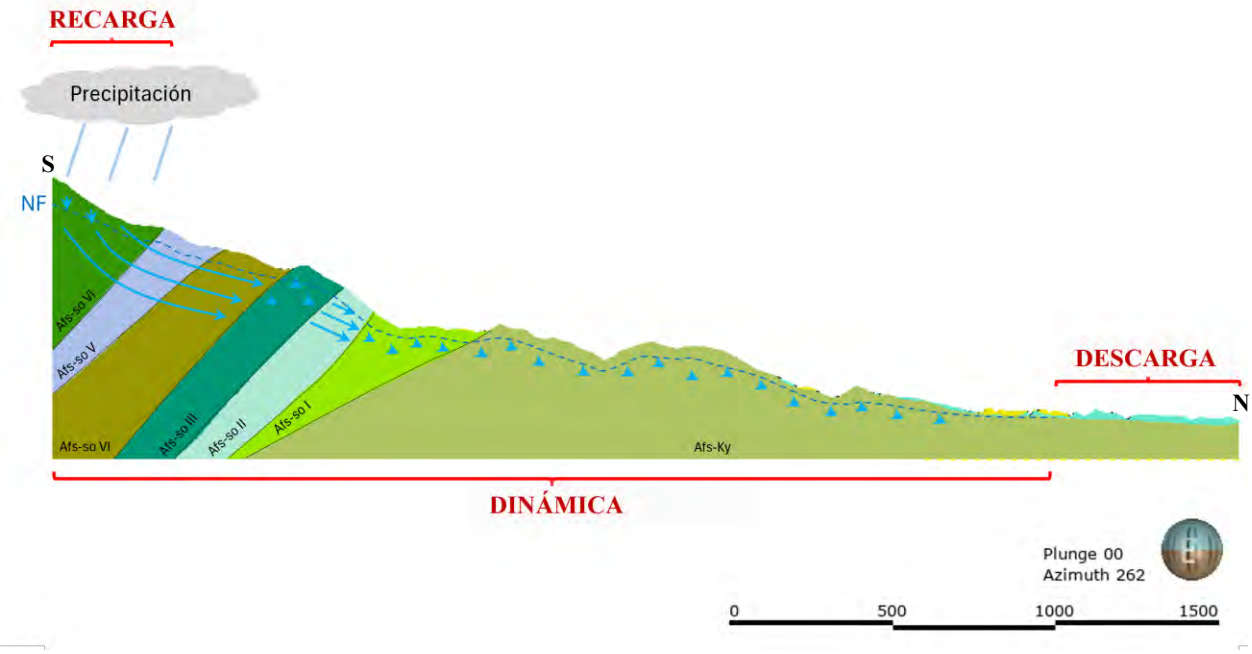
Vista al oeste del modelo hidrogeológico conceptual de la microcuenca La Rinconada



A través del perfil de la Figura 71 podemos visualizar las zonas de recarga, dinámica y descarga.

Figura 71

Vista del perfil longitudinal de sur a norte con sus de zonas de recarga, dinámica y descarga



4.5. Modelo Hidrogeológico Numérico

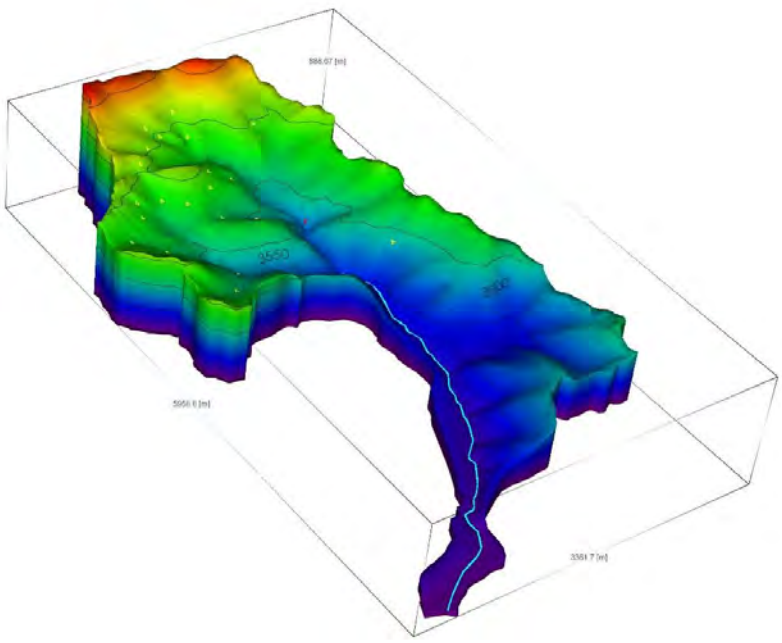
4.5.1. Construcción del Modelo

Se construyó y calibró el modelo numérico para determinar la dinámica del flujo, considerando las condiciones hidrogeológicas, donde la infiltración es la fuente de recarga para el sistema hidrogeológico de la microcuenca La Rinconada. Para su construcción, se empleó el software FEFLOW 7.5, desarrollado por el Instituto WASY en Alemania (Diersch, 2005). Este software utiliza ecuaciones de elementos finitos y permite simular el flujo subterráneo.

La construcción del modelo numérico en 3D se muestra en la Figura 72, donde el Modelo de Elevación Digital de Terreno representa la superficie tridimensional del relieve de la microcuenca. La capa superior del modelo asigna las elevaciones de la superficie del terreno (topografía), mientras que la capa base del modelo está establecida a una altitud de 3190 msnm.

Figura 72

Construcción Básica del Modelo Tridimensional



-

A continuación, se detallan las etapas que comprende la construcción del modelo numérico:

4.5.1.1. Referenciación y Definición del Dominio del Modelo

El modelo inicialmente es referenciado en coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator Zona 19 Sur), luego se procede a definir el dominio del modelo aprovechando al máximo las condiciones hidrogeológicas de manera que permita representar y simular las direcciones del flujo subterráneo limitando su dominio al máximo potencial de influencia hidráulica y las direcciones de flujo de agua subterránea y está dado por las siguientes coordenadas, mostrada en la Tabla 46 y la Figura 73:

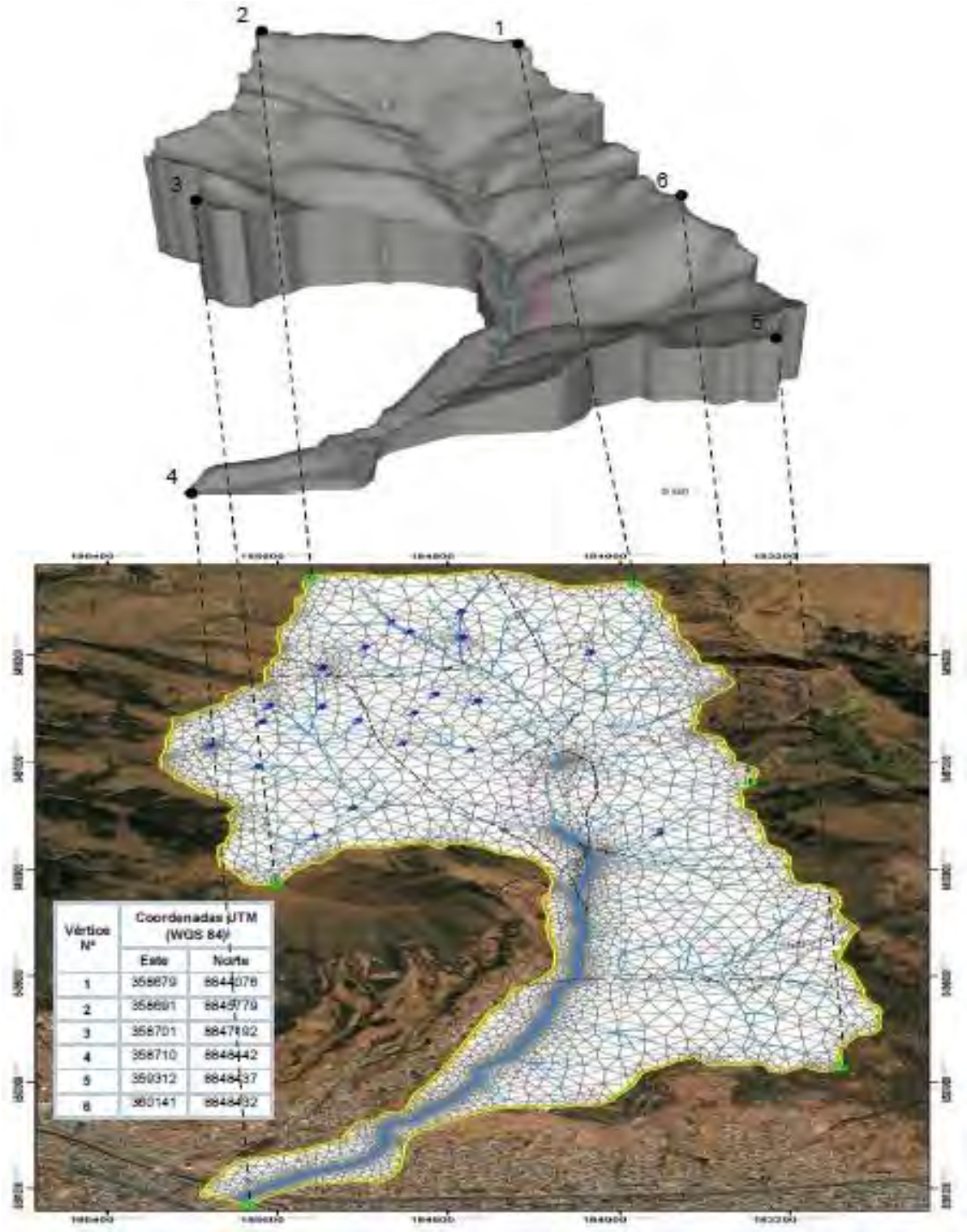
Tabla 46

Coordenadas del dominio

Vértice	Coordenadas UTM (WGS 84)	
	Este	Norte
1	185732	8501165
2	182954	8499861
3	183382	8497198
4	183932	8495326
5	185452	8495269
6	185607	8498143

Figura 73

Dominio del modelo numérico discretizado



4.5.1.2. Discretización Vertical y Generación de Malla

La discretización vertical consiste en la división del dominio del modelo en unidades espaciales, para este caso, el dominio fue dividido en 9 unidades geológicas (ver Tabla 47 y figuras 74 y 75), las cuales se agrupan en 10 layers y 11 slices, los elementos por layers son 22,899 y 11,773 nodos por slices. Asimismo, la malla generada mediante elementos finitos está compuesta por 228,990 elementos triangulares (prismas) y de 129,503 nodos (Ver tablas 42 y 43).

El sólido del modelo se generó a partir de la topografía del terreno; posteriormente, las unidades geológicas fueron incorporados de manera secuencial desde la base hacia la superficie, siguiendo el orden cronológico de su formación geológica.

Tabla 47

Unidades geológicas asignadas al dominio discretizado

N°	Unidades geológicas	Descripción
Unidad 1	Deposito deluvio-coluvial	Limos arenosos y arcillas, con pequeñas áreas de gravas con una matriz limo arenosa y bloques
Unidad 1	Depósitos deluviales	Limos arenosos y arcillas, con pequeñas áreas de gravas con una matriz limo arenosa y bloques
Unidad 1	Depósitos eluviales	Limos arenosos y arcillas, con pequeñas áreas de gravas con una matriz limo arenosa y bloques
Unidad 2	Fm. San Sebastián	Arenas fluviales con intercalación de niveles de gravas con matriz arenosa, con niveles de diatomitas.
Unidad 3	Fm. Soncco secuencia VI	Areniscas feldespáticas con intercalación de niveles de lutitas, fracturados.
Unidad 4	Fm. Soncco secuencia V	Areniscas feldespáticas con intercalación de niveles de lutitas, fracturados
Unidad 5	Fm. Soncco secuencia IV	Areniscas feldespáticas con intercalación de niveles de lutitas, fracturados
Unidad 6	Fm. Soncco secuencia III	Areniscas feldespáticas con intercalación de niveles de lutitas, fracturados
Unidad 7	Fm. Soncco secuencia II	Areniscas feldespáticas con intercalación de niveles de lutitas, fracturados
Unidad 8	Fm. Soncco secuencia I	Areniscas feldespáticas con intercalación de niveles de lutitas, fracturados
Unidad 9	Fm. Kayra	Areniscas feldespáticas con intercalación de niveles de lutitas, fracturados

Figura 74

Unidades litológicas generadas para el modelo numérico

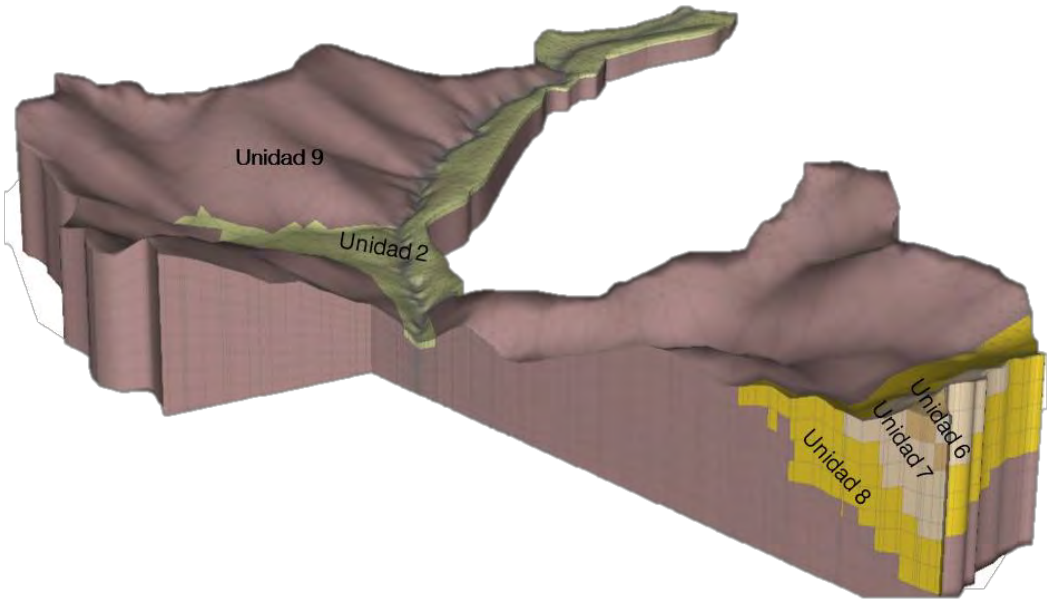


Figura 75

Unidades litológicas generadas para el modelo numérico

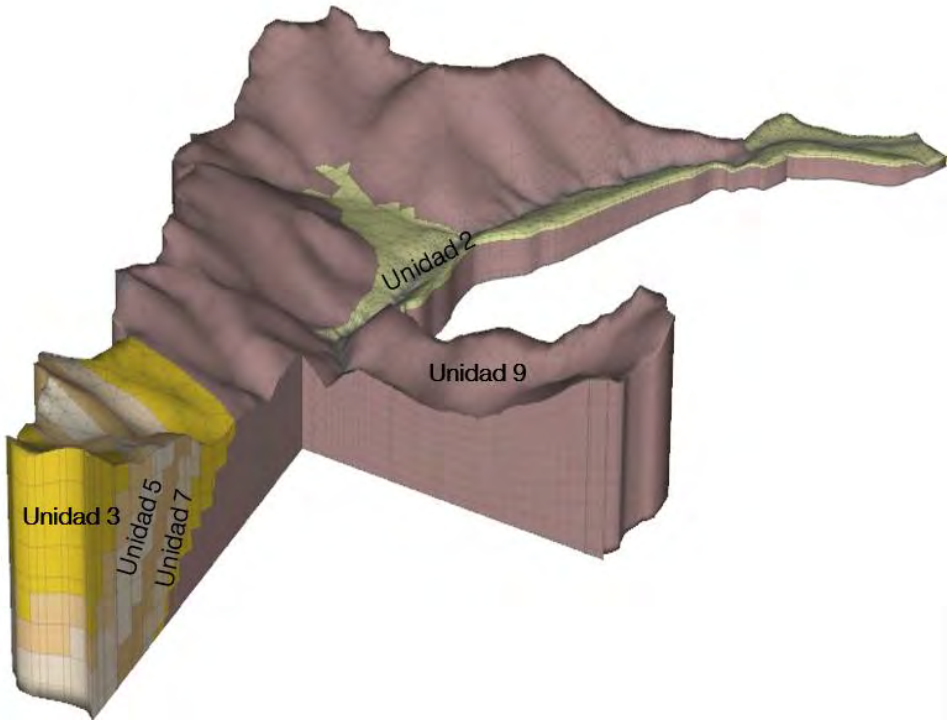


Tabla 48

Características de la malla del modelo numérico

Ítem	Valor
Área (km^2)	9.56
Perímetro (km)	19.93
Tipo de elemento	Prismas triangulares
Elementos por malla	228,990
/Nodos por malla	129,503
Elementos por layer	22,899
Nodos por slice	11,773
Numero de layer	10
Numero de slice	11

Tabla 49

Coordenadas de origen y geometría del dominio

Coordenadas de origen	Valor
Este	182777.98
Norte	8495208.84
Ancho	3361.73
Largo	5956.62
Profundidad	888.665
Coordenadas de origen	Valor

9.1.1.1. Calidad de Malla. La malla generada posee dos indicadores de la calidad, la que informa sobre la estabilidad y la distribución de ángulos en los triángulos de la malla, lo que no debe tener ángulos muy obtusos, pues generaría problemas numéricos durante la simulación y la no convergencia, los ángulos deben ser cercanos a 60° para una buena consistencia, como se muestra en la siguiente Tabla 50.

Tabla 50

Características de las mallas y valor de ajuste

Calidad de malla	Valor
Triángulos con ángulos obtusos	0.1 > 120°, 8.40 > 90°
Delaunay violating triangles	0.0

4.5.1.3. Asignación de Parámetros Hidrogeológicos al Modelo

4.5.1.3.1. Conductividad Hidráulica

Estos valores adaptados para el modelo numérico fueron determinadas mediante el método dado por Evert Hoek y John W. Bray para los materiales consolidados y mediante ensayos en campo para los materiales no consolidados (ver Tabla 51 y Figura 76).

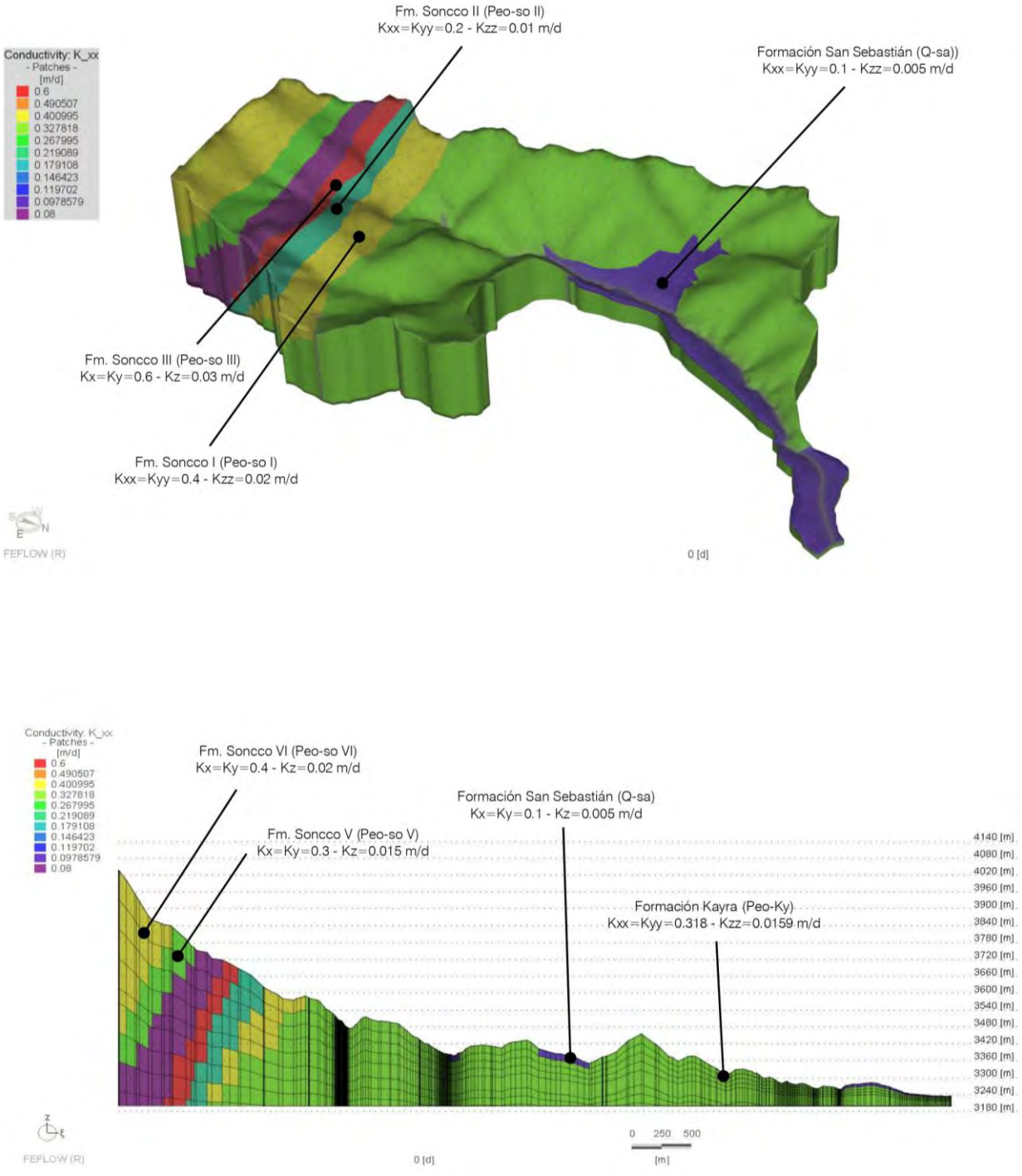
Tabla 51

Conductividad hidráulica (m/día) asignada con el modelo

N°	Unidades geológicas	k [cm/s]	k [m/s]	k [m/d]	k [m/d]	Kh/Kv	Dirección (°)
01	Depósito deluvio-coluvial	6.54E-06	6.54E-08	5.65E-03	0.006	20:1	0
02	Depósito deluvial	8.62E-06	8.62E-08	7.45E-03	0.007	20:1	0
03	Depósito eluvial	5.65E-06	5.65E-08	4.88E-03	0.005	20:1	0
04	Fm. San Sebastián	1.16E-04	1.16E-06	1.00E-01	0.100	20:1	0
05	Fm. Soncco sec. VI	4.63E-04	4.63E-06	4.00E-01	0.400	20:1	0
06	Fm. Soncco sec. V	3.47E-04	3.47E-06	3.00E-01	0.300	20:1	0
07	Fm. Soncco sec. IV	9.26E-05	9.26E-07	8.00E-02	0.080	20:1	0
08	Fm. Soncco sec. III	6.94E-04	6.94E-06	6.00E-01	0.600	20:1	0
09	Fm. Soncco sec. II	2.31E-04	2.31E-06	2.00E-01	0.200	20:1	0
10	Fm. Soncco sec. I	4.63E-04	4.63E-06	4.00E-01	0.400	20:1	0
11	Fm. Kayra	3.68E-04	3.68E-06	3.18E-01	0.318	20:1	0

Figura 76

Distribución de la conductividad hidráulica asignada al modelo numérico



4.5.1.3.2. Porosidad

Estos valores adaptados para el modelo numérico fueron determinadas por tablas referenciales (ver Tabla 52).

Tabla 52

Porosidad () asignada al modelo

N°	Unidades geológicas	Porosidad eficaz ne ()
1	Depósito deluvio-coluvial	0.1
2	Depósito deluvial	0.1
3	Depósito eluvial	0.1
4	Fm. San Sebastián	0.1
5	Fm. Soncco sec. VI	0.08
6	Fm. Soncco sec. V	0.09
7	Fm. Soncco sec. IV	0.09
8	Fm. Soncco sec. III	0.09
9	Fm. Soncco sec. II	0.08
10	Fm. Soncco sec. I	0.07
11	Fm. Kayra	0.10

4.5.1.3.3. Recarga asignada al modelo

Para la asignación de la recarga al sistema de flujo subterráneo se utilizaron condiciones de borde de flujo específico a fin de representar la recarga por efecto de las precipitaciones durante el periodo húmedo. Las tasas de recarga fueron distribuidas a lo largo de la geometría del modelo en función de las unidades hidrogeológicas aflorantes en superficie, la topografía, la litología, y la variación de los niveles del subsuelo, tomando en cuenta las características hidráulicas ya calculadas. Habiendo asignado las tasas de recarga entre 1.10 mm/año a 65.6 mm/año, estas unidades fueron representados en el modelo numérico (ver Tabla 53 y Figura 77).

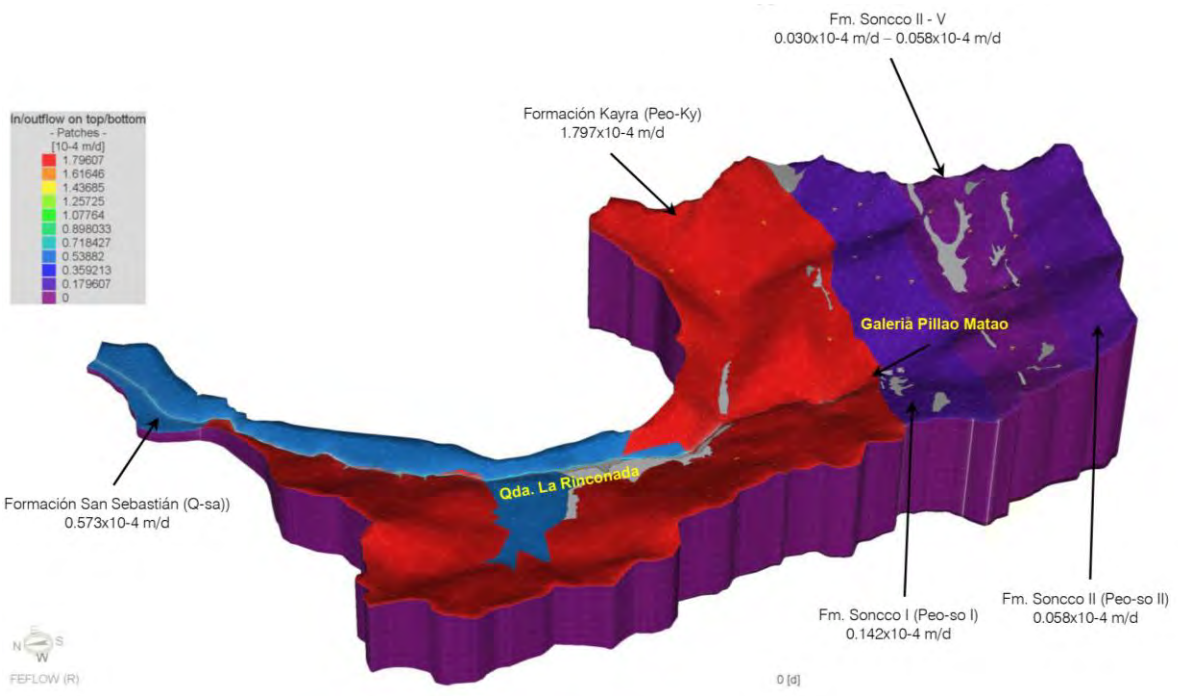
Tabla 53

Valores de recarga asignados en el modelo numérico

Unidades Hidrogeológicas	Recarga (mm/año)	Recarga (10^{-4} m/día)
Acuitardo eluvial deluvio-coluvial	12.8	0.351
Acuitardo deluvial	12.8	0.351
Acuitardo eluvial	12.8	0.351
Acuífero San Sebastián	20.90	0.573
Acuífero Soncco VI	4.2	0.115
Acuífero Soncco V	1.9	0.052
Acuífero Soncco IV	1.1	0.030
Acuífero Soncco III	2.1	0.058
Acuífero Soncco II	2.1	0.058
Acuífero Soncco I	5.2	0.142
Acuífero Kayra	65.6	1.797

Figura 77

Distribución espacial de la recarga asignada al modelo numérico



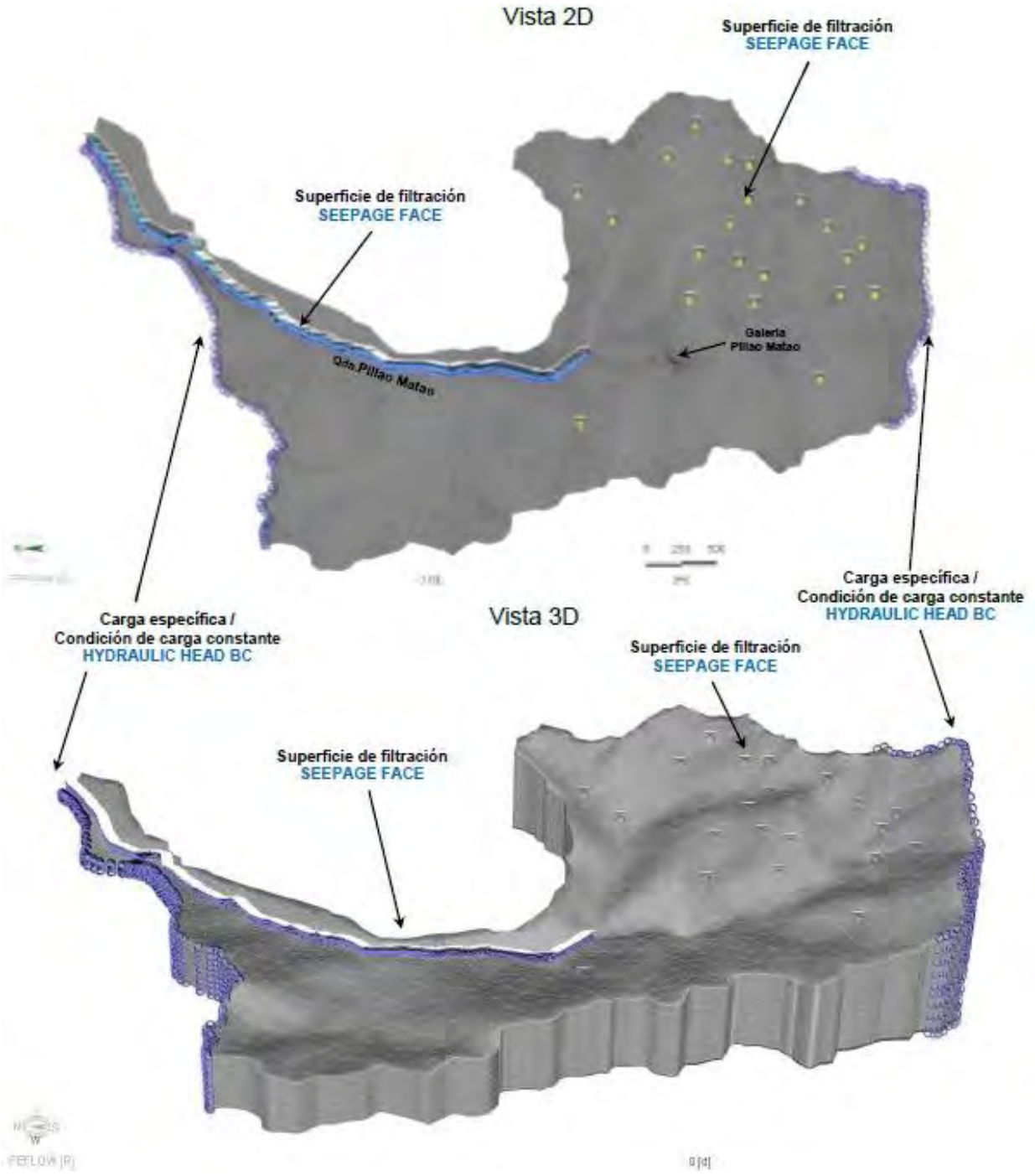
4.5.1.4. Asignación de Condiciones de Borde al Modelo

Entre las condiciones de contorno aplicadas para el modelo numérico, a fin de representar las condiciones naturales del área de proyecto, se incluyeron: carga constante y de flujo específico y superficies de filtración. Estas condiciones de contorno se describen a continuación:

- Condiciones de borde de carga específica fija (Hydraulic Head BC, tipo 1) en los límites laterales del modelo (N y S), de acuerdo con la distribución de carga hidráulica obtenida a partir del modelo de elevación digital del terreno y la conceptualización del sistema hidrogeológico. Estos límites representan las entradas y salidas regionales del flujo subterráneo (ver Figura 78).
- Condición de borde tipo superficie de filtración (seepage face) sobre la superficie superior del modelo para los cursos de agua permanentes, como la quebrada Pillao Matao. Esta condición permite simular la interacción dinámica entre el nivel freático y el cauce, activándose únicamente cuando la carga hidráulica del acuífero supera la elevación del lecho del riachuelo, representando de manera más realista los procesos de descarga hacia el sistema fluvial. Asimismo, para la galería filtrante Pillao Matao se le asignó condición de borde tipo superficie de filtración para representar la descarga de estas aguas subterráneas por control estructural y litológico. Asimismo, para los cauces naturales intermitentes y los manantiales dentro del área de estudio también se asignó la condición de borde superficies de filtración tipo “Seepage Face”, la cual representa de forma más precisa las zonas donde el medio hidrogeológico descarga únicamente cuando su nivel freático supera la elevación del terreno (ver Figura 78).

Figura 78

Condiciones de borde para el modelo numérico



4.5.1.5. Calibración del Modelo Numérico

La calibración del modelo numérico implicó que se ajustaran las tasas de recarga y las conductividades hidráulicas, hasta que estas coincidieran razonablemente con las elevaciones del agua subterránea simulada, inferida con 21 manantiales.

9.1.1.2. Calibración en Régimen Estacionario. La calibración en régimen permanente (estacionario) supone la resolución de la ecuación de flujo sin considerar la variable tiempo, por lo que solo se ajustan los parámetros de entrada; conductividad hidráulica, recarga, y flujo base, la que ofrece el beneficio de verificar el modelo hidrogeológico conceptual.

Para evaluar la precisión de la calibración en régimen estacionario del modelo, estos fueron comparados con los niveles de agua subterránea observados en 21 manantiales de inventariado hidrogeológico, los que se muestran en la Tabla 54.

Tabla 54

Estadística de Cargas Hidráulicas Observadas y Calculadas

Estadística de cargas hidráulicas observadas y calculadas							
N°	**fm measured head(msnm)**	**fc calculated head(msnm)**	**Código**	**Ri (f**m-fc)	**|Ri|**	**|Ri|^2**	**Fuente**
1	3821.71	3811.19	SoIV-3	10.52	10.52	110.708	Manantial
2	3802.80	3805.13	SoIV-1	-2.33	2.33	5.424	Manantial
3	3756.02	3739.94	SoII-1	16.09	16.09	258.792	Manantial
4	3722.79	3722.88	SoI-2	-0.09	0.09	0.008	Manantial
5	3580.64	3581.36	Ky-01	-0.72	0.72	0.520	Manantial
6	3746.41	3748.69	SoV-3	-2.28	2.28	5.199	Manantial
7	3776.52	3780.23	SoIV-2	-3.71	3.71	13.800	Manantial
8	3669.74	3673.23	SoI-1	-3.49	3.49	12.207	Manantial
9	3833.30	3834.07	SoVI-1	-0.77	0.77	0.589	Manantial
10	3818.03	3822.45	SoV-1	-4.42	4.42	19.504	Manantial
11	3775.67	3779.41	SoV-2	-3.74	3.74	13.972	Manantial
12	3645.34	3647.19	Ky-02	-1.85	1.85	3.412	Manantial
13	3703.25	3701.84	SoI-03	1.41	1.41	1.980	Manantial
14	3699.65	3705.40	SoI-04	-5.75	5.75	33.102	Manantial
15	3749.01	3731.37	SoI-05	17.64	17.64	311.344	Manantial
16	3713.43	3706.50	SoI-06	6.93	6.93	47.966	Manantial
17	3708.41	3700.25	Qel-01	8.16	8.16	66.526	Manantial
18	3667.06	3667.83	Ky-03	-0.77	0.77	0.599	Manantial
19	3571.79	3575.86	Ky-04	-4.07	4.07	16.527	Manantial
20	3611.41	3613.98	Ky-05	-2.57	2.57	6.586	Manantial
21	3547.95	3548.63	Ky-06	-0.68	0.68	0.457	Manantial
Differ	**285.3**	**285.4**					
Max	**3833.3**	**3834.1**			21.00	21.00	N
Min	**3548.0**	**3548.6**			97.98	929.22	Total
				Media absoluta	4.67		
				Error medio cuadrático (RMS)	6.65 m		
				RMS Normalizado (NRMS)	2.33 %		

La calibración del modelo numérico presenta un error medio cuadrático (RMS) de 6.65 m y un RMS normalizado (NRMS) de 2.33 % entre las cargas hidráulicas observadas y calculadas, y de acuerdo con la guía Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities (Guía para el Modelamiento de Aguas Subterráneas en la Evaluación de Impactos de Proyectos de Desarrollo de Recursos Naturales) indica que se tiene una calibración muy buena ya que posee RMS Normalizado < 5 %. A continuación, se muestra la recta de calibración mostradas en las figuras 79 y 80 para un número total de 21 puntos evaluados.

Figura 79

Diagrama cargas Observadas Vs. Calibradas

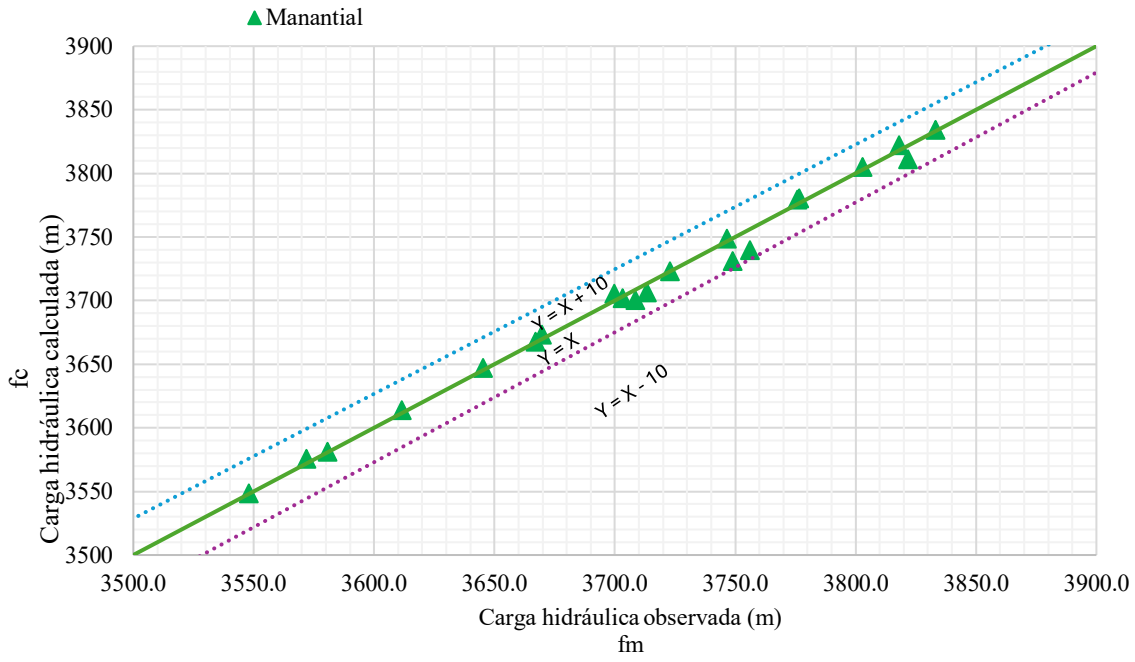
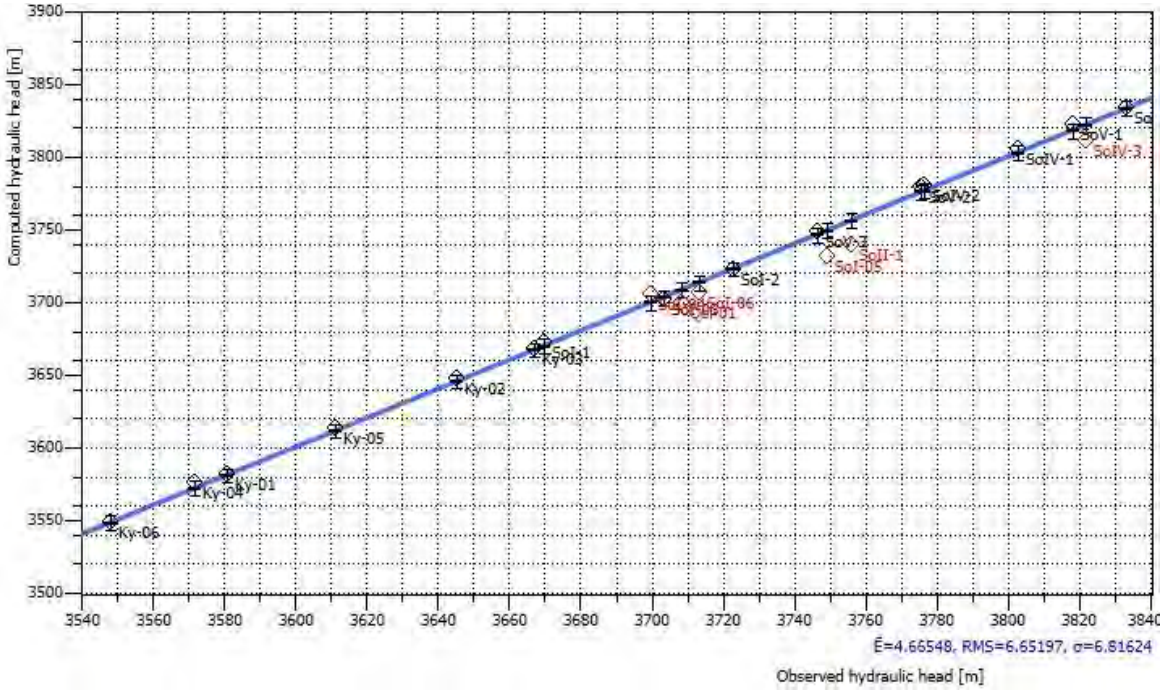


Figura 80

Diagrama cargas Observadas Vs. Calibradas propios de modelo



9.1.1.3. Niveles de agua subterránea simuladas. En la Figura 81 se muestran los contornos de nivel de agua subterránea simulados por el modelo numérico calibrado en régimen estacionario, las que se ajustan a las condiciones del terreno, cuyas cargas hidráulicas se observan entre las cotas de 4063.00 a 3214.47 m.s.n.m.

9.1.1.4. Flujo de agua subterránea simulada. Se observa que el flujo subterráneo se encuentra controlado por los sistemas de fracturas asociadas al control estructural activo, su velocidad es menor en rocas más competentes debido a su baja conductividad hidráulica, cuya dinámica del flujo simulado por el modelo es la que se resume a continuación:

1. La velocidad de flujo en el basamento rocoso disminuye en función a la profundidad, litología y conductividad hidráulica, siendo la velocidad promedio 2.866E-07 m/d y 0.035 m/d, por lo que los flujos verticales descendentes son prácticamente nulos.
2. El modelo simuló que el flujo subterráneo en las formaciones Soncco y Kayra poseen mayor conductividad hidráulica, ya que, debido al sistema de fracturas y fallas en las areniscas y lutitas, las conductividades hidráulicas aumentan.

En la figura 81 se muestran líneas equipotenciales con cargas hidráulicas mayores en la parte alta de la microcuenca de coloración roja y cargas hidráulicas menores de coloración azul, siendo que las líneas de flujo, las cuales son transversales a las líneas equipotenciales, tienen una dirección predominante de movimiento hacia el norte, con lo que se respalda el modelo hidrogeológico conceptual.

Figura 81

Vista en planta de los niveles piezométricos simulados

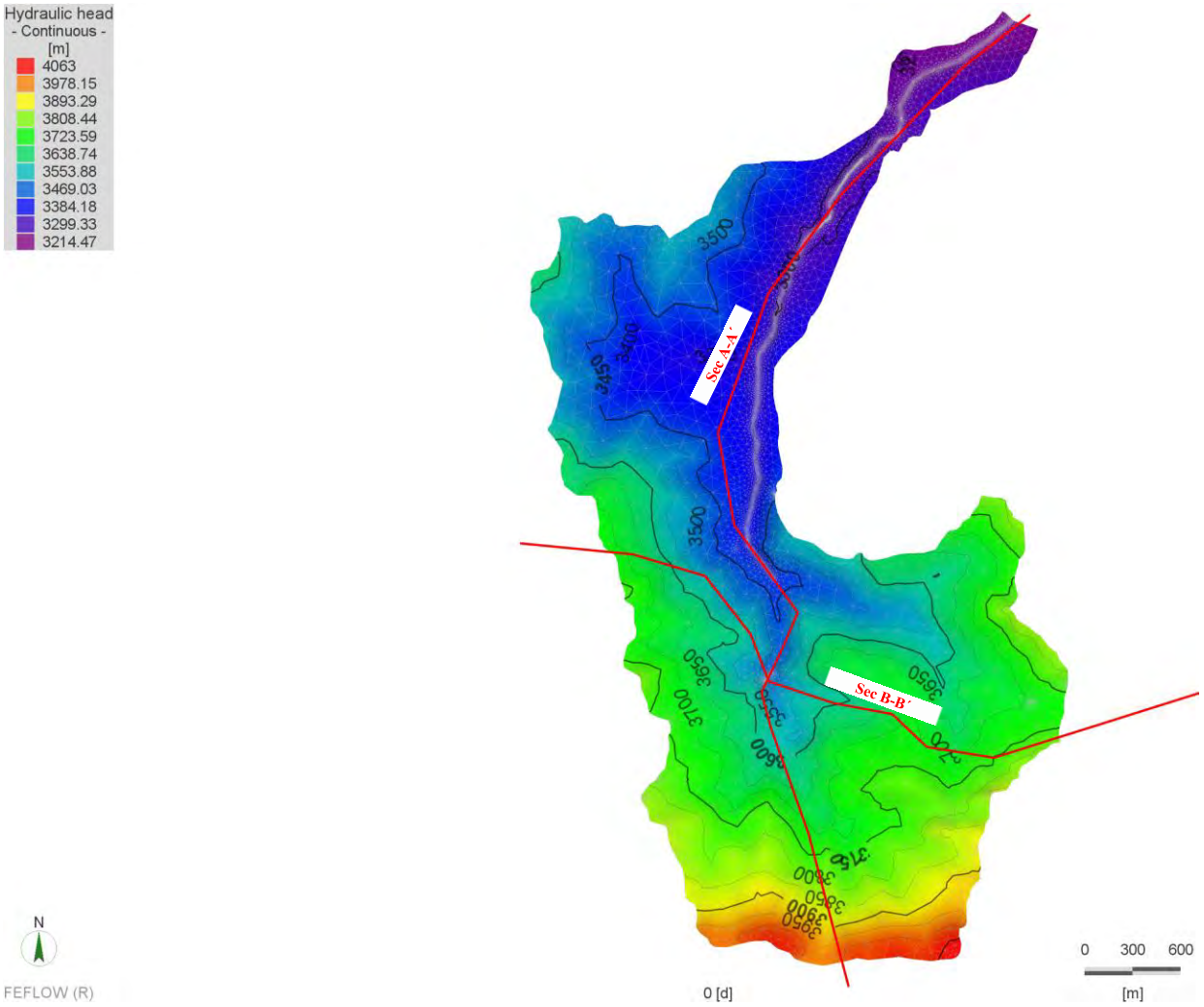


Figura 82

Sección A-A' con piezometría en régimen estacionario

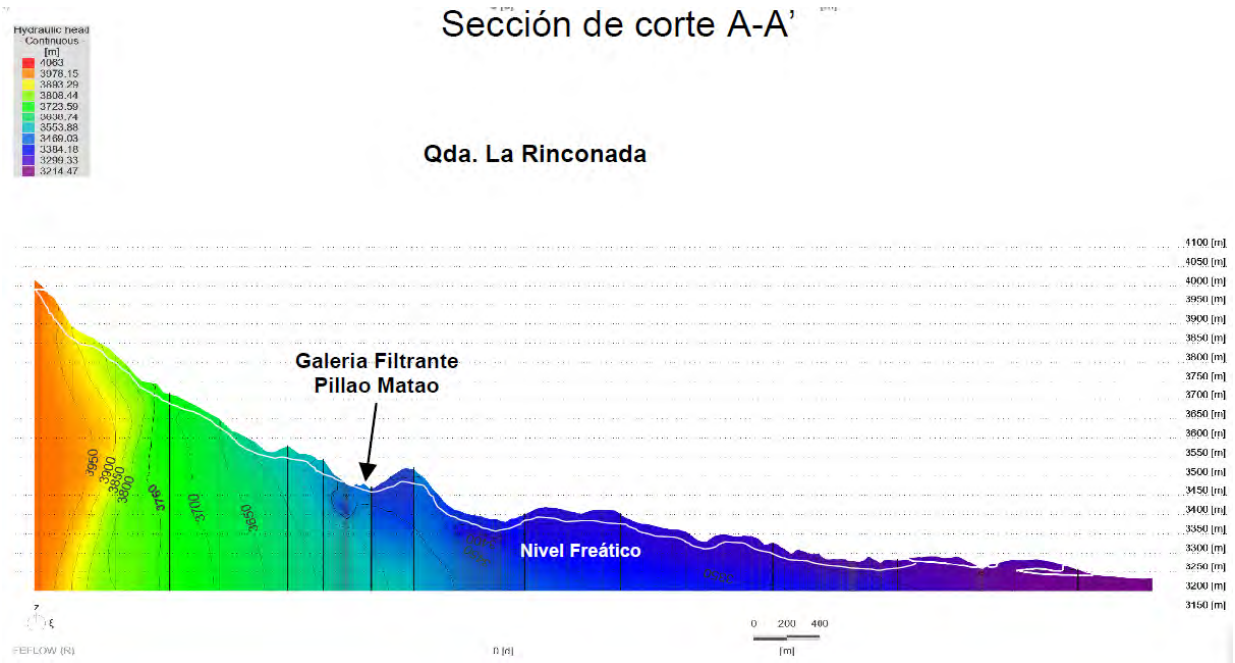
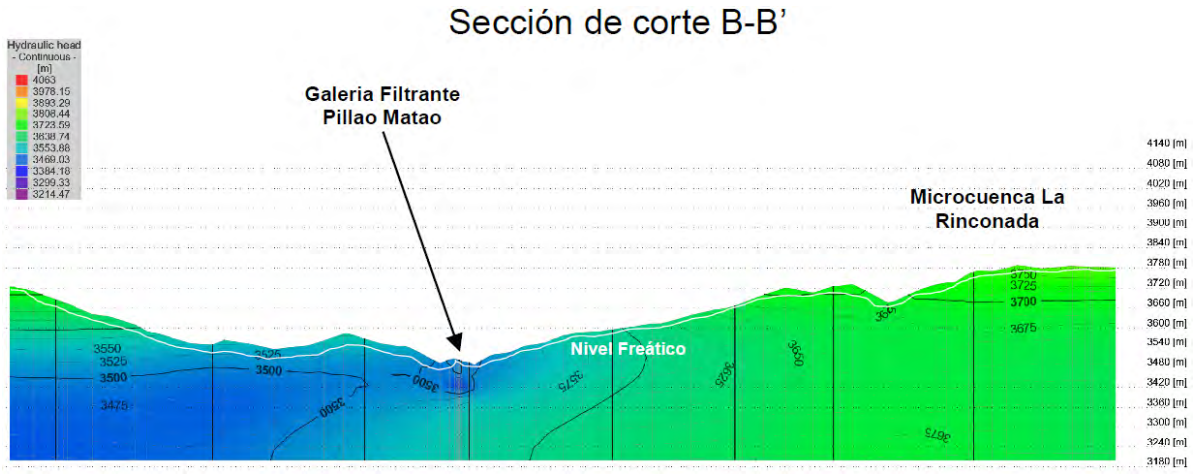


Figura 83

Sección B-B' con piezometría en régimen estacionario



Capítulo V Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos del desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual y numérico para la microcuenca La Rinconada a través de la integración de las características geomorfológicas, geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas determinaron que la dinámica del flujo subterráneo está condicionada por sus características de fracturamiento dados principalmente por el espaciado y abertura de las discontinuidades, de conductividad hidráulica y de porosidad efectiva.

A continuación, se detalla la discusión de resultados por objetivos, siendo las siguientes:

1. Los resultados obtenidos para el objetivo de caracterizar geomorfológica y geológicamente la microcuenca La Rinconada para definir su influencia en la dinámica del flujo subterráneo muestran que geomorfológicamente, las laderas de montaña con pendiente fuerte y las de pendiente suave, y las cimas son las que conforman las zonas de recarga; y geológicamente, las formaciones sedimentarias Kayra y Soncco permiten la dinámica del flujo subterráneo principalmente por el fracturamiento de sus areniscas. Estos resultados validan la hipótesis planteada, donde se indica que en el contexto geomorfológico las laderas de montaña baja con pendiente fuerte y en el contexto geológico las formaciones Kayra y Soncco son las que controlan la dinámica del flujo subterráneo porque estas permiten la infiltración del agua. Asimismo, estos resultados obtenidos se respaldan con el estudio hidrogeológico desarrollado en la microcuenca por el INGEMMET en el año 2018, donde geomorfológicamente las laderas de montaña baja conforman las zonas de recarga, y geológicamente las rocas fracturadas de las formaciones Kayra y Soncco que favorecen la recarga y almacenamiento del agua subterráneo.

2. Para el objetivo de determinar los parámetros hidrológicos que favorecen a la recarga del flujo subterráneo de la microcuenca La Rinconada, los resultados muestran que el parámetro de recarga del flujo subterráneo en las formaciones Kayra y Soncco es una fracción de precipitación que ingresa al subsuelo con un valor de 102.95 mm/año. Estos resultados validan la hipótesis planteada, donde se indicó que el parámetro hidrológico que aporta a la recarga de los acuíferos fisurados sedimentarios de Kayra y Soncco es la precipitación. Asimismo, estos resultados obtenidos se respaldan con el estudio hidrogeológico desarrollado en la microcuenca por el INGEMMET en el año 2018, que precisa que la infiltración representa el principal mecanismo de recarga de los acuíferos.
3. Para el objetivo de determinar los parámetros hidrogeológicos y definir las unidades hidrogeológicas para determinar las direcciones preferenciales del flujo subterráneo, los resultados muestran que se definieron al acuífero Kayra, con una conductividad hidráulica de 3.18E-01 m/día y porosidad efectiva de 10 %, y al acuífero Soncco, con valores de conductividad hidráulica entre 1.84E-01 y 2.86E+00 m/día y de porosidad efectiva que varía entre 7.4 % a 9 %, como acuíferos pobres a buenos y que favorecen a la dinámica del flujo subterráneo, con direcciones preferenciales hacia el ENE al oeste de la microcuenca, y hacia el SSW y entre NNW y NNE al este de la microcuenca en Kayra; y hacia el NNW y ENE en Soncco. Estos resultados validan la hipótesis que indica que los parámetros hidrogeológicos de conductividad hidráulica y de porosidad efectiva son mayores a 10^{-2} m/día y a 5% respectivamente, y poseen condiciones favorables para el transporte del flujo subterráneo, teniendo a los acuíferos fisurados sedimentarios Kayra y Soncco que influyen en la dirección del flujo subterráneo dado por su porosidad secundaria; sin embargo, respecto a las direcciones preferenciales los resultados son más específicos según a cada

acuífero, pero mantienen una predominancia hacia el norte como fue plateada en la hipótesis. Los resultados de la definición de las unidades hidrogeológicas presentan concordancia con la información de la Geología del Cuadrángulo del Cusco elaborado por el INGEMMET en el año 2011, donde se describe a acuíferos importantes como es el caso de los acuíferos fisurados sedimentarios Kayra y Soncco que pertenecen al Grupo San Jerónimo, los cuales son considerados como los mejores productores de agua subterránea, esta característica también fue identificada en el presente estudio de la microcuenca La Rinconada. El estudio hidrogeológico desarrollado en la microcuenca por el INGEMMET en el año 2018, respecto a la permeabilidad presenta valores variables, para la Formación Kayra los valores varían entre 2.13x10-1 m/día y 2.63x10-2 m/día, y para la Formación Soncco, valores entre 0.85x10-2m/día y 1.42x10-1m/día, estos valores son similares a los resultados obtenidos, donde se respalda la clasificación de Kayra y Sonco como acuíferos; respecto a las direcciones preferenciales del flujo subterráneo muestran una relación considerable con este estudio hidrogeológico, donde muestra direcciones del flujo subterráneo de NO-SE a E-O y NE-SO.

4. Para el objetivo de desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual de la microcuenca La Rinconada para interpretar la dinámica del flujo subterráneo, los resultados muestran que el modelo hidrogeológico conceptual desarrollado es producto de la integración de tres componentes dados por la geología, hidrología e hidrogeología, que permitió representar la dinámica del flujo subterráneo, identificándose que las direcciones predominantes se dan hacia el ENE en Kayra; y hacia el NNW en Soncco. Estos resultados, con respecto a las direcciones preferenciales del flujo subterráneo, mantienen una predominancia hacia el norte, validando así parcialmente la hipótesis planteada. Además, estos resultados

obtenidos se respaldan con el estudio hidrogeológico desarrollado en la microcuenca por el INGEMMET en el año 2018, que cuenta con un modelo conceptual enfocado hacia el funcionamiento de la galería filtrante Pillao Matao, con dirección general hacia el norte, la cual coincide con una de las direcciones preferenciales identificadas en este estudio que es hacia el NNW. Asimismo, el flujo subterráneo sigue la dirección del gradiente hidráulico, de acuerdo con la interpretación de la superficie piezométrica, moviéndose de las zonas de mayor carga hidráulica hacia las zonas de menor carga hidráulica ubicados en cotas inferiores de la microcuenca. Esta dinámica del flujo es consistente con los principios fundamentales de la hidrogeología, donde la circulación del flujo subterráneo está regida por las diferencias de potencial hidráulico.

5. Para el objetivo de desarrollar y calibrar el modelo hidrogeológico numérico mediante el software FEFLOW para interpretar la dinámica del flujo subterráneo, los resultados muestran un modelo numérico calibrado con un RMS Normalizado de 2.33 %, con líneas de flujo que ocurren predominantemente en las formaciones Kayra y Soncco, dadas por la piezometría de los manantiales aflorantes, orientadas predominantemente hacia el norte. Los resultados validan la hipótesis planteada, donde se indicó que el numérico muestra el comportamiento del flujo subterráneo mediante el software FEFLOW en base a la piezometría determinada por los manantiales aflorantes en superficie, con un RMS Normalizado menor al 10%, sin embargo, el RMS Normalizado tuvo una mejor calibración siendo menor al 5%, considerándose una calibración muy buena dentro del rango aceptable según la guía internacional desarrollada por el Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de la Provincia de British Columbia (Columbia Británica), Canadá, el cual establece que valores de RMS normalizado inferiores a 10% corresponden a una calibración buena e

inferiores a 5% corresponden a una calibración muy buena. En este sentido, los resultados obtenidos evidencian que el modelo obtenido es confiable y representa satisfactoriamente las condiciones hidrogeológicas de la microcuenca.

La precisión del modelo estuvo condicionada por la disponibilidad de información hidrogeológica en el área de estudio. La ausencia de registros piezométricos (el cual fue subsanada con el inventario de manantiales aflorantes) y la limitada cantidad de ensayos de permeabilidad constituyen una fuente de incertidumbre en la asignación de parámetros al modelo. Esta situación es consistente en estudios hidrogeológicos de zona altoandinas del Perú, donde la escasez de información de campo representa una de las principales limitaciones para la construcción de modelos numéricos de flujo subterráneo.

Por último, los resultados obtenidos permitieron conocer la dinámica del flujo subterráneo en la microcuenca La Rinconada mediante el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual y numérico y constituyen una herramienta técnica útil para la toma de decisiones en relación con la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos y al desarrollo de futuros proyectos hidráulicos y ambientales en la zona.

Conclusiones

Conclusión General

El modelo hidrogeológico conceptual y numérico desarrollado permitió determinar la dinámica del flujo subterráneo de la microcuenca La Rinconada, identificándose que las formaciones sedimentarias fisuradas Kayra y Soncco controlan principalmente las direcciones preferenciales del flujo subterráneo debido a sus características de fracturamiento, conductividad hidráulica y porosidad efectiva. Asimismo, la calibración del modelo numérico mediante FEFLOW presentó una calibración aceptable, permitiendo representar adecuadamente el comportamiento hidrogeológico de la microcuenca.

Conclusiones Específicas

1. Geomorfológicamente, las laderas de montaña con pendiente fuerte y las de pendiente suave, y las cimas son las que conforman las zonas de recarga; y geológicamente, las formaciones Kayra y Soncco permiten la dinámica del flujo subterráneo principalmente por el fracturamiento de sus areniscas, donde las familias más representativas dominantemente son las familias F2 y F3, quienes poseen espaciados menores y aberturas considerables, teniendo direcciones hacia el NNW y ENE.
2. El parámetro hidrológico que favorece a la recarga del flujo subterráneo en las formaciones Kayra y Soncco (secuencias I, II, III, IV, V y VI) es la fracción de precipitación que ingresa al subsuelo, estimándose una recarga de 102.95 mm/año.
3. Los parámetros hidrogeológicos de conductividad hidráulica y de porosidad efectiva permitieron definir al acuífero fisurado sedimentario Kayra y al acuífero fisurado sedimentario Soncco (secuencias I, II, III, IV, V y VI) como unidades hidrogeológicas favorables para la dinámica del flujo subterráneo, para el acuífero Kayra se tiene una

conductividad hidráulica de 3.18E-01 m/día y porosidad efectiva de 10 %, catalogándolo como material algo permeable y clasificándolo como acuífero pobre, y para el acuífero Soncco se tiene valores de conductividad hidráulica entre 1.84E-01 y 2.86E+00 m/día y de porosidad efectiva que varía entre 7.4 % a 9 %, catalogándolo como material que varía de algo permeable a permeable y clasificándolo como acuífero que varía de pobre a bueno, con direcciones preferenciales hacia el ENE al oeste de la microcuenca, y hacia el SSW y entre NNW y NNE al este de la microcuenca en Kayra; y hacia el NNW y ENE en Soncco.

4. El modelo hidrogeológico conceptual desarrollado es producto de la integración de tres componentes dados por la geomorfología y geología, hidrología e hidrogeología, que permitió representar la dinámica del flujo subterráneo, identificándose que las direcciones predominantes se dan hacia el ENE en Kayra; y hacia el NNW en Soncco.
5. El modelo numérico desarrollado y calibrado en el software FEFLOW permitió interpretar que las líneas de flujo ocurren predominantemente en las formaciones Kayra y Soncco, moviéndose de las zonas de cargas hidráulicas mayores a menores, y están orientadas predominantemente hacia el norte; y esto se respalda con la ubicación de los manantiales aflorantes en superficie, con una calibración aceptable ya que obtuvo un RMS Normalizado de 2.33 % en base a 21 puntos de observación.

Recomendaciones

1. Se recomienda incrementar la cantidad de ensayos de permeabilidad (pruebas de Lefranc o Lugeon) en las diferentes unidades hidrogeológicas, a fin de reducir la incertidumbre en la asignación de parámetros hidráulicos dentro del modelo numérico.
2. Se recomienda implementar un monitoreo periódico de niveles piezométricos y caudales en manantiales y riachuelos, tanto como épocas de estiaje y épocas de lluvia, con el objetivo de mejorar la calibración del modelo en estado estacionario y validar el comportamiento hidráulico de la microcuenca.
3. Se recomienda complementar el modelo numérico con investigaciones geofísicas, como tomografía de resistividad o sondeos eléctricos verticales, a fin de reducir la incertidumbre asociada a la delimitación y comportamiento del nivel freático, permitiendo una mejor identificación de zonas saturadas, variaciones litológicas y direcciones de flujo subterráneo, lo que contribuye a obtener simulaciones más confiables de la dinámica hidráulica del acuífero.
4. Se recomienda que las futuras obras de extracción o explotación de aguas subterráneas posean orientaciones perpendiculares a las líneas de flujo subterráneo, que en nuestra investigación son predominantemente hacia el ENE en Kayra y hacia el NNW en Soncco, de tal manera que estas puedan interceptar la mayor cantidad de líneas de flujo, siendo las orientaciones recomendadas NNW-SSE en Kayra y ENE-WSW en Soncco. Además, se recomienda completar con estudios que estimen la reserva de agua subterránea en la microcuenca la Rinconada y con trabajos de mantenimiento de las obras de captación en la zona de recarga del acuífero.

Referencias

Aguirre, B. (2018). *Modelo hidrogeológico numérico conceptual de la microcuenca Huancarqui, distrito Yaurisque.* Cusco, Perú: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie.* Ciudad de México: LIMUSA.

Arqque, W., & Quispe, O. (2023). *Modelamiento hidrogeológico para determinar la influencia del flujo subterráneo a los acuíferos de la cuenca Huanacahuire, San Jerónimo - Cusco.* Cusco: Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

Benitez, L. (1963). *Hidrogeología aplicada.* Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Carlotto, V., Cárdenas, J., & Carlier, G. (2011). *Geología del Cuadrángulo de Cusco Hoja 28-s.* Lima, Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET.

Carlotto, V., Pumayali, R., Peña, F., Yabar, R., Oviedo, M., Tupac Yupanqui, V., & Tintaya, D. (2008). *Una nueva experiencia de galería filtrante en Cusco: Pillao Matao-San Jerónimo.* Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco UNSAAC - INGEMMET - Centro Guaman Poma de Ayala - Universidad Nacional de San Agustín UNSA.

Carpio, J., Peña, F., & Charca, M. &. (2012). *Aspectos hidrogeológicos de la subcuenca Coralaque en base a parámetros físicos e hidráulicos.* San Borja, Lima: INGEMMET.

Castany, G., & Margat, J. (1977). *Dictionnaire français d'hydrogéologie.* Orléans: Editions BRGM.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea.* Omega.

Esquerro, J. (2012). *Iniciación a los métodos númericos.* Logroño: Universidad de La Rioja.

Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology* (4.ª ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall.

Fonseca, D. (2019). *Modelación hidrogeológica con Fleflow para extracción de flujo del acuífero del Río Lurín-Sector Chontay.* Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater.* Englewood, United States of America: Prentice-Hall. Obtenido de Groundwater: https://fc79.gw-project.org/

Gomez, J. (2021). *Simulación tridimensional del flujo de aguas.* Toluca: Universidad Autónoma del estado de México.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica.* Madrid: PEARSON EDUCACION.

Google. (2025). *Google Earth Pro*. Obtenido de https://earth.google.com/

Heath, R. C. (1983). *Basic Ground-Water Hydrology.* Virginia, Reston: U.S. Geological Survey.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación.* Ciudad de México: McGRAW HILL / INTERAMERICANA EDITORES.

Ibáñez Asencio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. (2009). *Morfología de las cuencas hidrográficas.*

Iglesias, J. (2002). *Hidrogeología aplicada.* Madrid: Editorial Síntesis.

Ingol, B., & Castañeda, M. (2017). *Directrices para el modelamiento de aguas subterráneas en Perú* . Autoridad Nacional del Agua.

Lopez De La Torre, C. (2023). *Estudio hidrogeológico para determinar el potencia hídrico en la microcuenca de Ccorao-Mandorani, distrito de San Sebastián, provincia de Cusco, región Cusco-2022.* Cusco, Perú: Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

Maldonado, Y. (27 de Junio de 2020). *Geologiaweb*. Obtenido de https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/ensayo-lefranc/#Video_demostrativo_del_ensayo_lefranc_carca_constante_y_variable

Martínez, C. (2018). *Modelo hidrogeológico conceptual y matemático para el municipio de Castilla La Nueva, ubicado en el departamento del Meta.* Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Martínez, P., Martínez, P., & Castaño, S. (2005). *Fundamentos de Hidrogeología.* Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

Ministerio de Agricultura. (2012). *Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú.* Lima.

Ministerio de Agricultura y Riego. (2014). *Manual N° 5 Medición de agua.* Lima. Obtenido de https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/manual-riego/manual5.pdf

Mogrovejo, R. (2019). *Estimación del caudal de filtraciones en macizos fracturados usando Feflow para galerías de drenaje: Caso Derrumbe 5 - Huancavelica - 2019.* Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Muñoz, M. (2019). *Evaluación de metodologías de modelación numérica 3D para representar un depósito de relaves y su influencia en el flujo de infiltración usando Feflow.* Santiago: Universidad de Chile.

Natural Resources Conservation Service. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds (TR-55).* U.S. Department of Agriculture.

Otzen, T., & Manterola, C. (2017). *Técnicas de muestreo sobre una población a estudio.*

Peña, F., & Santos, B. (2018). *Estudio hidrogeológico para determinar perímetros de protección de la zona de recarga de la galería filtrante de Pillao Matao.* Informe Técnico N° A6800, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET, Cusco.

Rivera Mantilla, H. (2005). *Geología General.* Lima, Perú: Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú.

SENAMHI. (2025). *Datos meteorológicos [Base de datos]*. Obtenido de https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones

Soldevilla, N. (1863). *Arte de descubrir los manantiales.* Madrid. Obtenido de https://www.google.com.pe/books/edition/Arte_de_descubrir_los_manantiales/wutCnujLCcMC?hl=es&gbpv=1&dq=que+son+manantiales&pg=PA62&printsec=frontcover

StudySmarter. (s. f.). *Dinámica del agua subterránea*. Obtenido de https://www.studysmarter.es/resumenes/geografia/geociencias/dinamica-del-agua-subterranea/

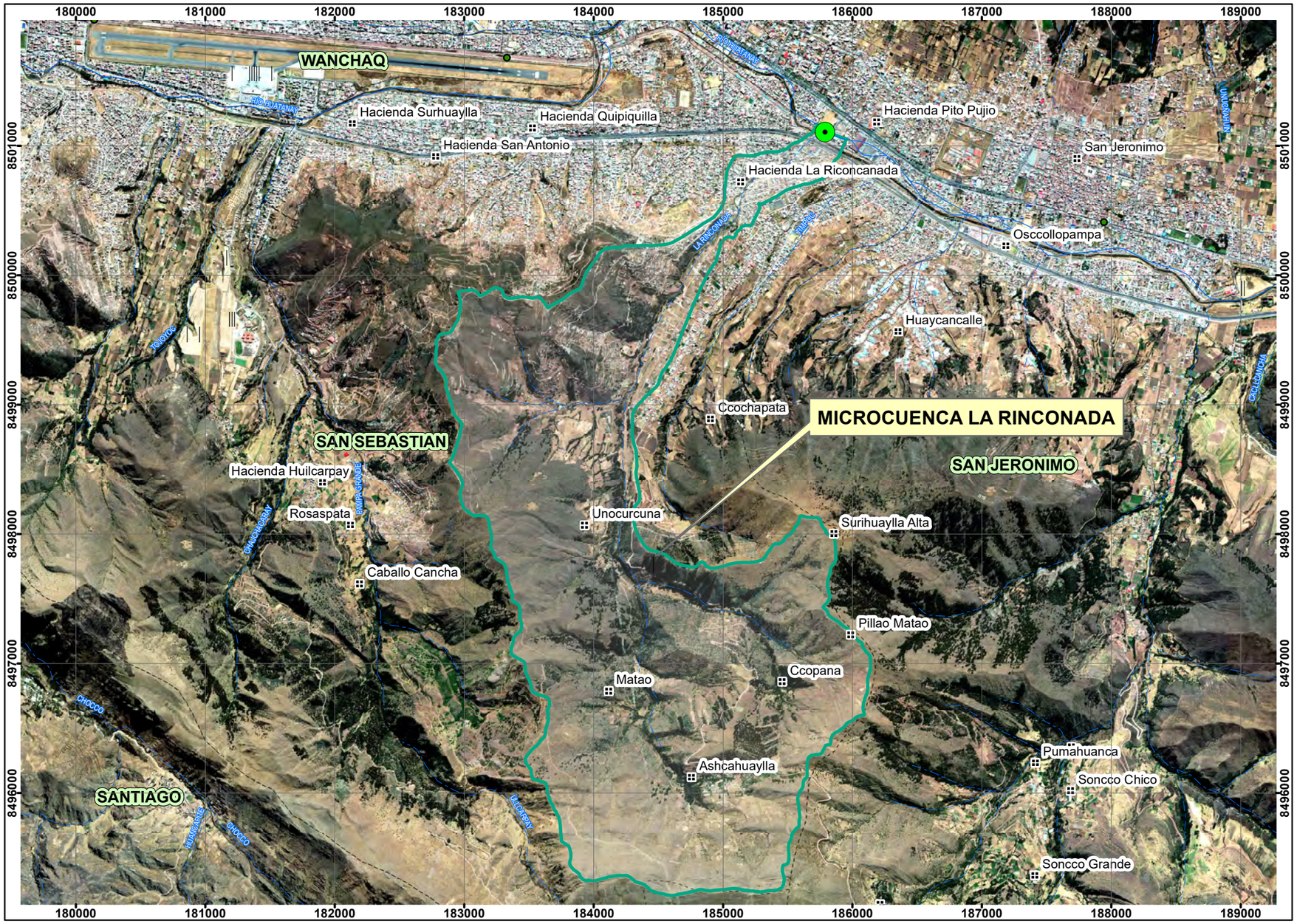
Vera Torres, J. A. (1994). *Estratigrafía Principios y Métodos.* Madrid: Rueda.

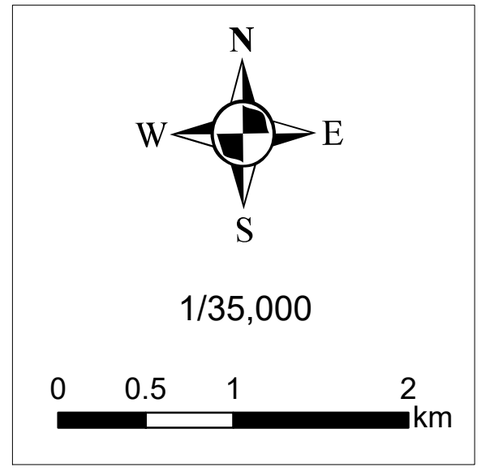
Vilchez Mata, M., & Sosa Senticala, N. (2021). *Peligro geológico por movimientos en masa en la ciudad de Arequipa.* Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima.

Villón Béjar, M. (2006). *Hidrología Estadística.* Lima: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Wyllie, D., & Mah, C. (2004). *Rock Slope Engineering 4th edition.* New York: Taylor and Francis Group.

Anexos





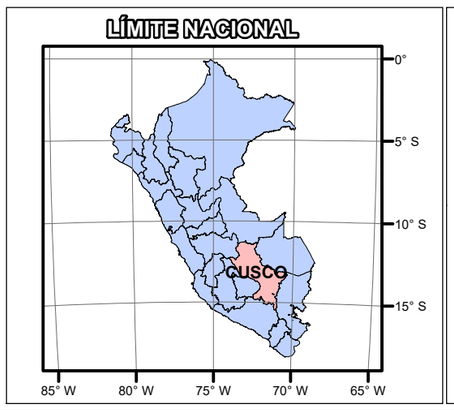
SIMBOLOGÍA

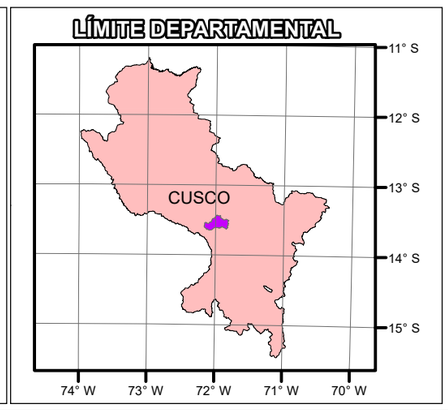
- Punto de aforo
- Pueblos

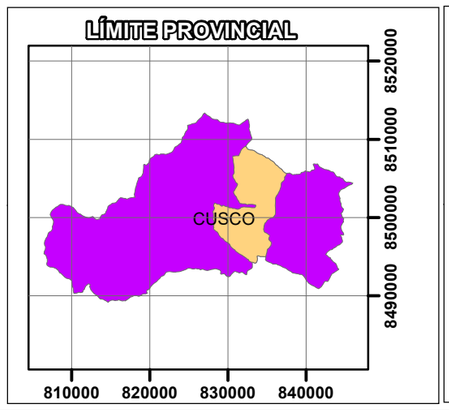
Drenaje

- Quebrada principal
- Quebrada secundaria
- Río
- Microcuenca La Rinconada
- Límite distrital

Punto de aforo	Este	Norte
	185789	8501107









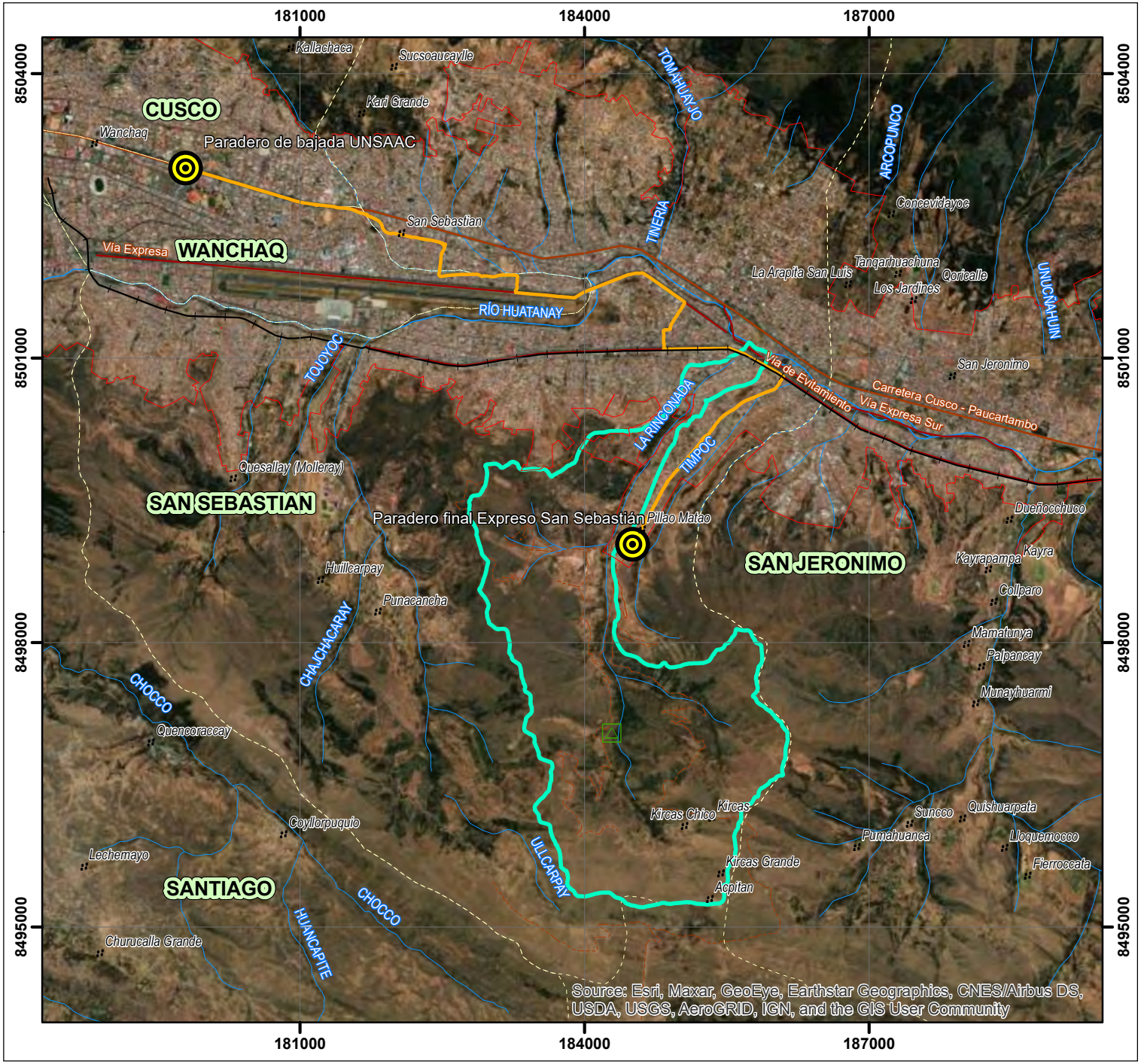
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

"MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA, DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2025"

MAPA DE UBICACIÓN

ELABORADO POR: Pacco Delgado, Carmen Ttito Toribio, Rai Ronaldo	**UBICACIÓN:** **Distrito**: San Sebastián **Provincia:** Cusco **Departamento:** Cusco	**SISTEMA DE COORDENADAS:** WGS84 Zona 19L	**ESCALA:** Indicada	**PLANO:** 01
REVISADO POR: Dr. Ronald Luis López Zapana	**FORMATO:** A-4	**FECHA:** Diciembre - 2024		

Anexo 1b. Mapa de accesibilidad



N
W E
S

1/60,000

0 0.5 1 2
Km

SIMBOLOGÍA

- Pueblos
- Punto de partida/punto final
- Galería filtrante Pillao Matao
- Área urbana
- Ferrocarill
- Accesibilidad
- Microcuenca La Rinconada
- Límite distrital

Vías

Tipo

- Carretera asfaltada interprovincial
- Carretera asfaltada
- Trocha carrozable

Drenaje

TIPO

- Río
- Quebrada

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

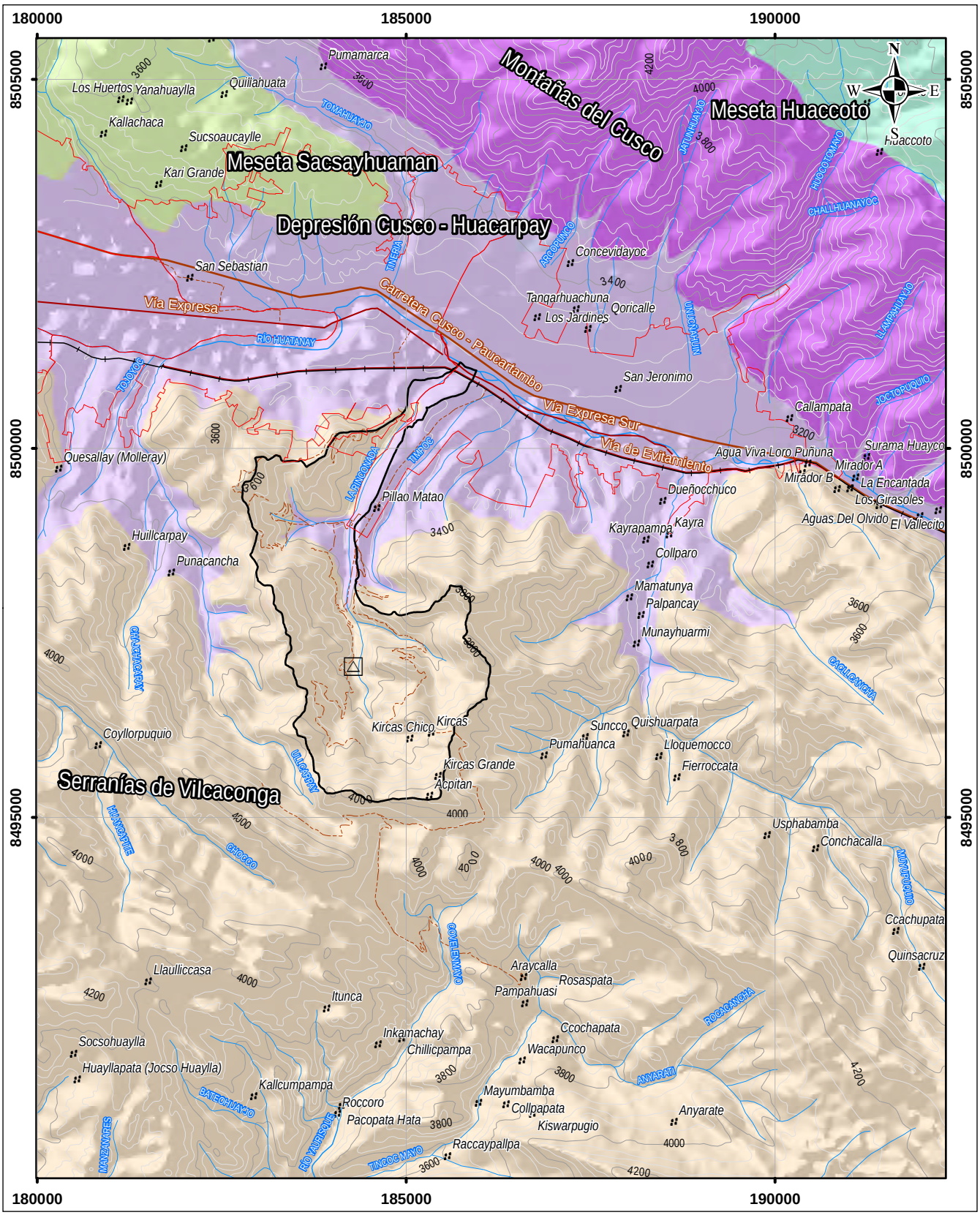
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

"MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA, DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2025"

MAPA DE ACCESIBILIDAD

ELABORADO POR: Pacco Delgado, Carmen Ttito Toribio, Rai Ronaldo	**UBICACIÓN:** **Distrito**: San Sebastián **Provincia:** Cusco **Departamento:** Cusco	**SISTEMA DE COORDENADAS:** WGS84 Zona 19L	**ESCALA:** Indicada	**PLANO:** 02
REVISADO POR: Dr. Ronald Luis López Zapana	**FORMATO:** A-4	**FECHA:** Diciembre - 2024		



SIMBOLOGÍA

- Pueblos
- Galería filtrante Pillao Matao
- Área urbana
- Microcuenca La Rinconada
- Ferrocarill

Vías

- Carretera asfaltada interprovincial
- Carretera asfaltada
- Trocha carrozable

Drenaje

- Río
- Quebrada

Curvas de nivel

- Curvas primarias
- Curvas secundarias

LEYENDA

Geomorfología

Unidades geomorfológicas

- Depresión Cusco - Huacarpay
- Meseta Huaccoto
- Meseta Sacsayhuaman
- Montañas del Cusco
- Serranías de Vilcaconga

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

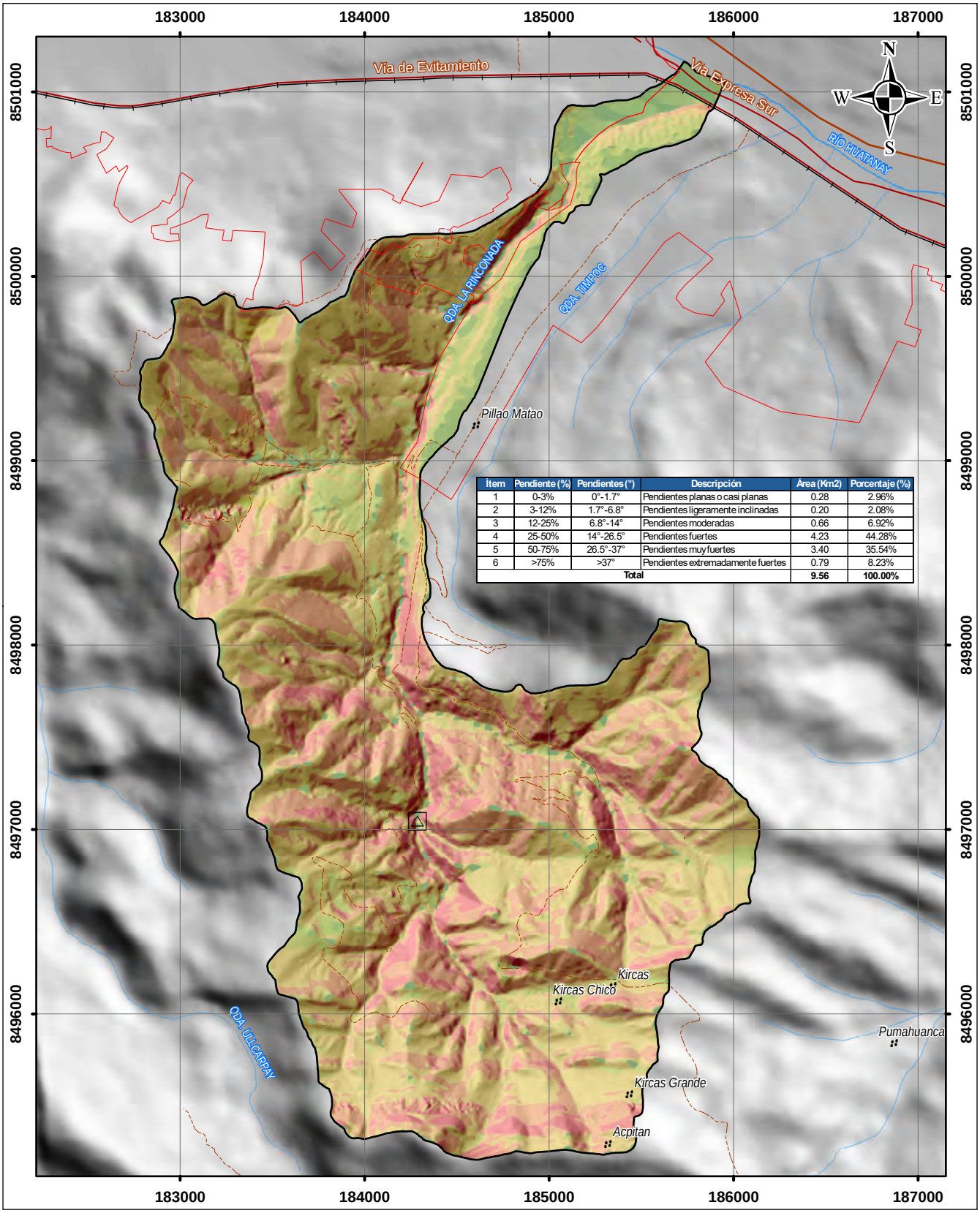
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

"MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA, DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2025"

MAPA GEOMORFOLÓGICO REGIONAL

ELABORADO POR: Pacco Delgado, Carmen Ttito Toribio, Rai Ronaldo	**UBICACIÓN:** **Distrito**: San Sebastián **Provincia:** Cusco **Departamento:** Cusco	**SISTEMA DE COORDENADAS:** WGS84 Zona 19L	**ESCALA:** Indicada	**PLANO:** 03
REVISADO POR: Dr. Ronald Luis López Zapana	**FORMATO:** A-4	**FECHA:** Mayo - 2025		

Nota. Modificado de Carlotto, Cárdenas, & Carlier (2011, p. 10).



Ítem	Pendiente (%)	Pendientes (°)	Descripción	Área (Km2)	Porcentaje (%)
1	0-3%	0°-1.7°	Pendientes planas o casi planas	0.28	2.96%
2	3-12%	1.7°-6.8°	Pendientes ligeramente inclinadas	0.20	2.08%
3	12-25%	6.8°-14°	Pendientes moderadas	0.66	6.92%
4	25-50%	14°-26.5°	Pendientes fuertes	4.23	44.28%
5	50-75%	26.5°-37°	Pendientes muy fuertes	3.40	35.54%
6	>75%	>37°	Pendientes extremadamente fuertes	0.79	8.23%
Total				9.56	100.00%

SIMBOLOGÍA

- Pueblos
- Galería filtrante Pillao Matao
- Área urbana
- Microcuenca La Rinconada
- Ferrocarill

Vías

Tipo

- Carretera asfaltada interprovincial
- Carretera asfaltada
- Trocha carrozable

Drenaje

TIPO

- Río
- Quebrada

0 0.25 0.5 1 Km

1/30,000

LEYENDA

Pendientes

Clasificación

- 0-3% Pendientes planas o casi planas
- 3-12% Pendientes ligeramente inclinadas
- 12-25% Pendientes moderadas
- 25-50% Pendientes fuertes
- 50-75% Pendientes muy fuertes
- >75% Pendientes extremadamente fuertes

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

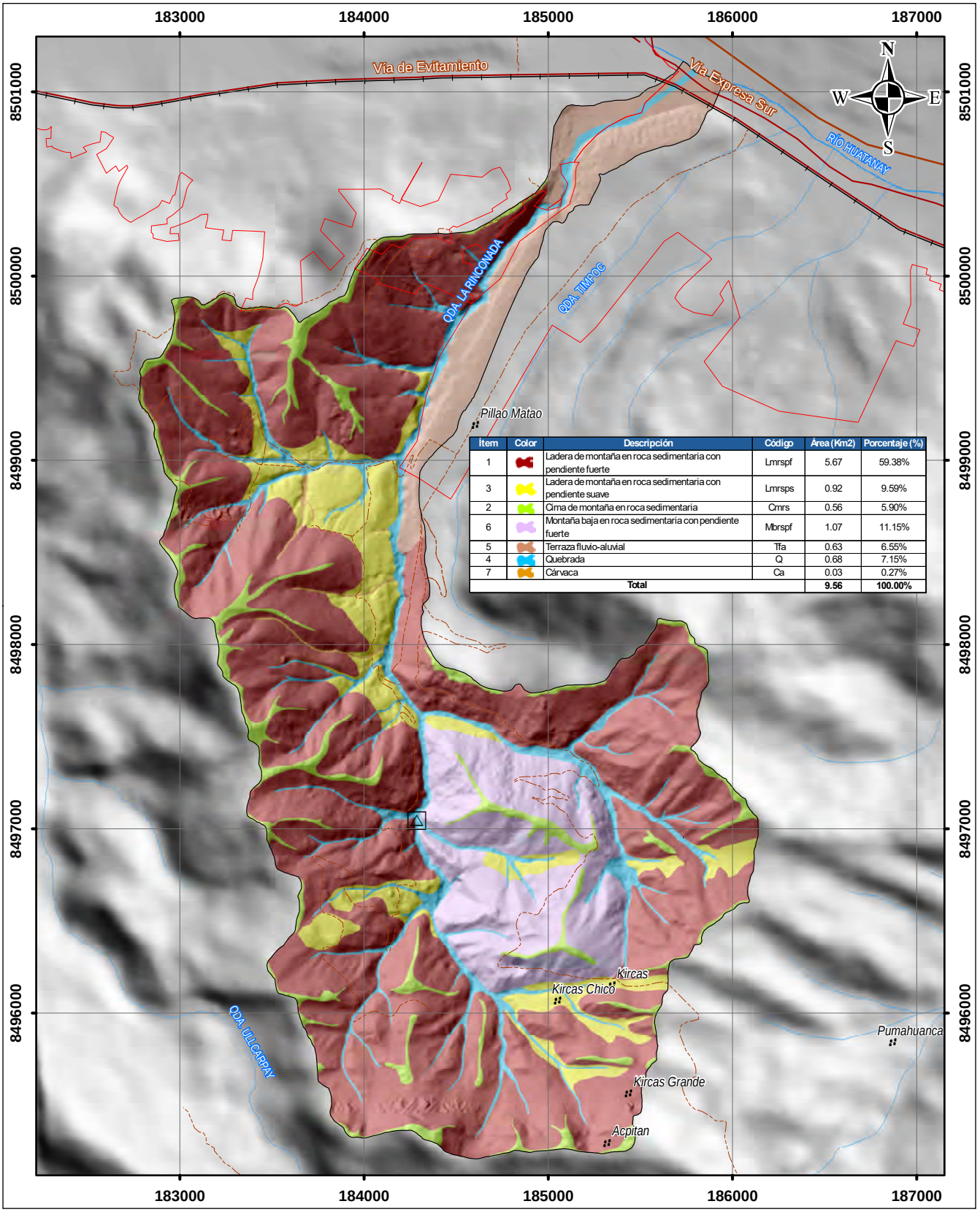
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

"MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA, DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2025"

MAPA DE PENDIENTES

ELABORADO POR: Pacco Delgado, Carmen Ttito Toribio, Rai Ronaldo	**UBICACIÓN:** **Distrito**: San Sebastián **Provincia:** Cusco **Departamento:** Cusco	**SISTEMA DE COORDENADAS:** WGS84 Zona 19L	**ESCALA:** Indicada	**PLANO:** 04
REVISADO POR: Dr. Ronald Luis López Zapana	**FORMATO:** A-4	**FECHA:** Octubre - 2025		



Ítem	Color	Descripción	Código	Área (Km2)	Porcentaje (%)
1		Ladera de montaña en roca sedimentaria con pendiente fuerte	Lmrspf	5.67	59.38%
3		Ladera de montaña en roca sedimentaria con pendiente suave	Lmrsps	0.92	9.59%
2		Cima de montaña en roca sedimentaria	Cmrs	0.56	5.90%
6		Montaña baja en roca sedimentaria con pendiente fuerte	Mbrspf	1.07	11.15%
5		Terraza fluvio-aluvial	Tfa	0.63	6.55%
4		Quebrada	Q	0.68	7.15%
7		Cárvaca	Ca	0.03	0.27%
Total				9.56	100.00%

SIMBOLOGÍA

- Pueblos
- Galería filtrante Pillao Matao
- Microcuenca La Rinconada
- Área urbana
- Ferrocarill

Vías

Tipo

- Carretera asfaltada interprovincial
- Carretera asfaltada
- Trocha carrozable

Drenaje

TIPO

- Río
- Quebrada

0 0.25 0.5 1 Km

1/30,000

LEYENDA

Unidades geomorfológicas

- Lmrspf Ladera de montaña en roca sedimentaria con pendiente fuerte
- Lmrsps Ladera de montaña en roca sedimentaria con pendiente suave
- Cmrs Cima de montaña en roca sedimentaria
- Mbrspf Montaña baja en roca sedimentaria con pendiente fuerte
- Tfa Terraza fluvio-aluvial
- Q Quebrada
- Ca Cárcava

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

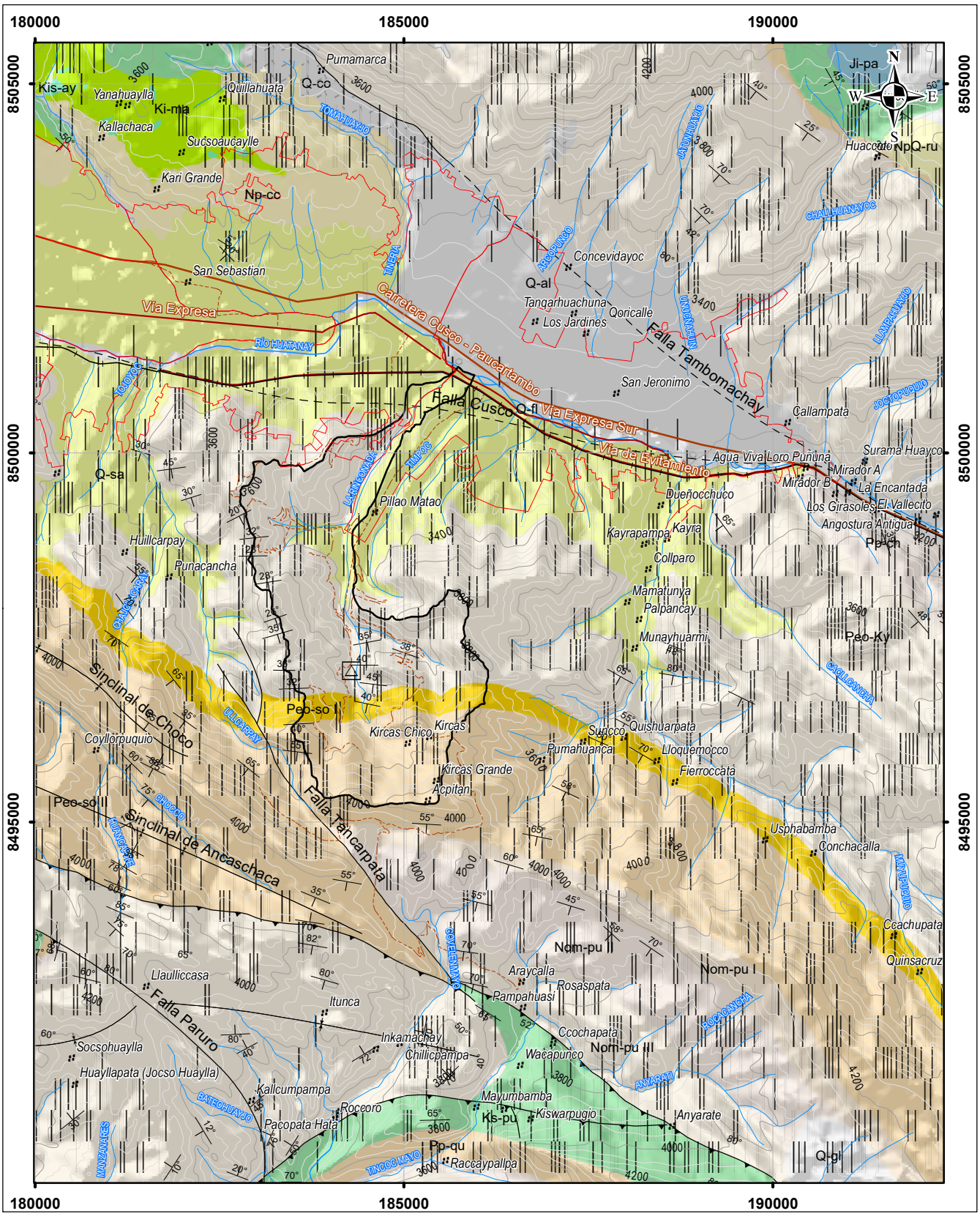
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

"MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA, DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2025"

MAPA GEOMORFOLÓGICO LOCAL

ELABORADO POR: Pacco Delgado, Carmen Ttito Toribio, Rai Ronaldo	**UBICACIÓN:** **Distrito**: San Sebastián **Provincia:** Cusco **Departamento:** Cusco	**SISTEMA DE COORDENADAS:** WGS84 Zona 19L	**ESCALA:** Indicada	**PLANO:** 05
REVISADO POR: Dr. Ronald Luis López Zapana	**FORMATO:** A-4	**FECHA:** Octubre - 2025		



SIMBOLOGÍA

- Pueblos
- Galería filtrante Pillao Matao
- Área urbana
- Microcuenca La Rinconada
- Carretera asfaltada interprovincial
- Carretera asfaltada
- Trocha carrozable
- Ferrocarril

Drenaje
- Río
- Quebrada

Estructuras
- Falla
- Falla inferida
- Falla Inversa
- Anticlinal
- Sinclinal
- Curvas de nivel primarias
- Curvas de nivel secundarias
- Buzamiento

LEYENDA

GEOLOGÍA

Unidades Geológicas

- Q-co Depósito Coluvial
- Q-al Depósito Aluvial
- Q-fl Depósito Fluvial
- Q-gl Depósito Glaciar
- Q-sa Formación San Sebastian
- NpQ-ru Formación Rumicolca
- Np-cc Formación Chincheros
- Nom-pu III Formación Punacancha
- Nom-pu II Formación Punacancha
- Nom-pu I Formación Punacancha
- Peo-so II Grupo San Jerónimo, Formación Soncco
- Peo-so I Grupo San Jerónimo, Formación Soncco
- Peo-Ky Grupo San Jerónimo, Formación Kayra
- Pp-ch Formación Chilca
- Pp-qu Formación Quilque
- Ks-pu Grupo Yuncaypata, Formación Puquin
- Kis-ay Grupo Yuncaypata, Formación Ayabacas
- Ki-ma Grupo Yuncaypata, Formación Maras
- Ji-pa Grupo Mitu, Formación Pachatusan

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

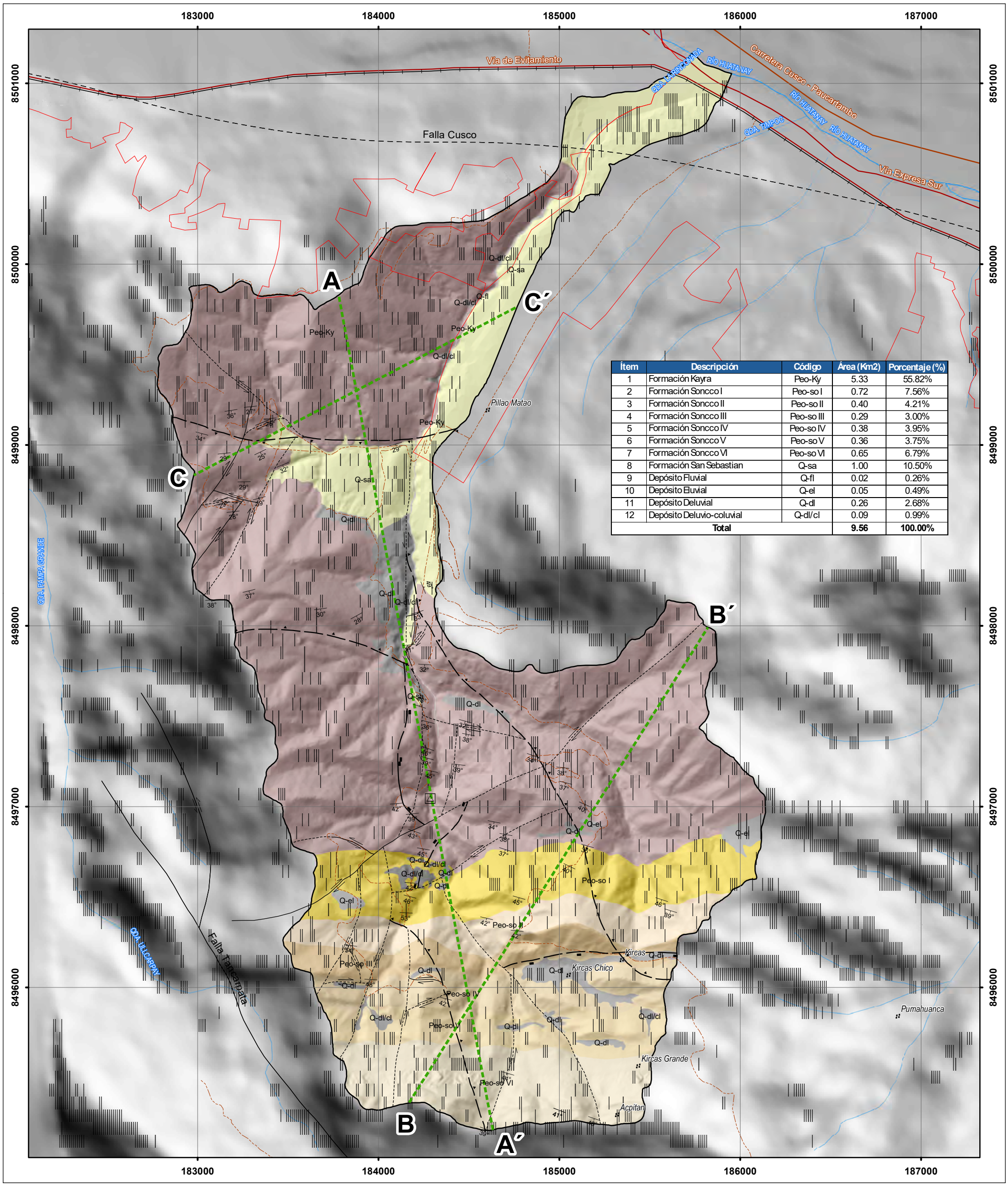
"MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA, DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2025"

MAPA GEOLÓGICO REGIONAL

ELABORADO POR: Pacco Delgado, Carmen Ttito Toribio, Rai Ronaldo	**UBICACIÓN:** **Distrito**: San Sebastián **Provincia:** Cusco **Departamento:** Cusco	**SISTEMA DE COORDENADAS:** WGS84 Zona 19L	**ESCALA:** Indicada	**PLANO:** 06
REVISADO POR: Dr. Ronald Luis López Zapana	**FORMATO:** A-4	**FECHA:** Octubre - 2025		

Nota. Modificado de INGEMMET (2025).

Anexo 1g. Mapa geológico local



Ítem	Descripción	Código	Área (Km2)	Porcentaje (%)
1	Formación Kayra	Peo-Ky	5.33	55.82%
2	Formación Soncco I	Peo-so I	0.72	7.56%
3	Formación Soncco II	Peo-so II	0.40	4.21%
4	Formación Soncco III	Peo-so III	0.29	3.00%
5	Formación Soncco IV	Peo-so IV	0.38	3.95%
6	Formación Soncco V	Peo-so V	0.36	3.75%
7	Formación Soncco VI	Peo-so VI	0.65	6.79%
8	Formación San Sebastian	Q-sa	1.00	10.50%
9	Depósito Fluvial	Q-fl	0.02	0.26%
10	Depósito Eluvial	Q-el	0.05	0.49%
11	Depósito Deluvial	Q-dl	0.26	2.68%
12	Depósito Deluvio-coluvial	Q-dl/cl	0.09	0.99%
	Total		**9.56**	**100.00%**

SIMBOLOGÍA

- Pueblos
- Galería filtrante Pillao Matao
- Buzamiento
- Falla
- Falla inferida
- Falla normal
- Falla inversa
- Área urbana
- Microcuenca La Rinconada
- Ferrocarill

Vías

- Carretera asfaltada interprovincial
- Carretera asfaltada
- Trocha carrozable

Drenaje

- Río
- Quebrada

LEYENDA

Unidades Geológicas

- Depósito Deluvio-coluvial
- Depósito Deluvial
- Depósito Eluvial
- Depósito Fluvial
- Formación San Sebastian
- Formación Soncco VI
- Formación Soncco V
- Formación Soncco IV
- Formación Soncco III
- Formación Soncco II
- Formación Soncco I
- Formación Kayra

N W E S

0 0.5 1 2 Km

1/20,000

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

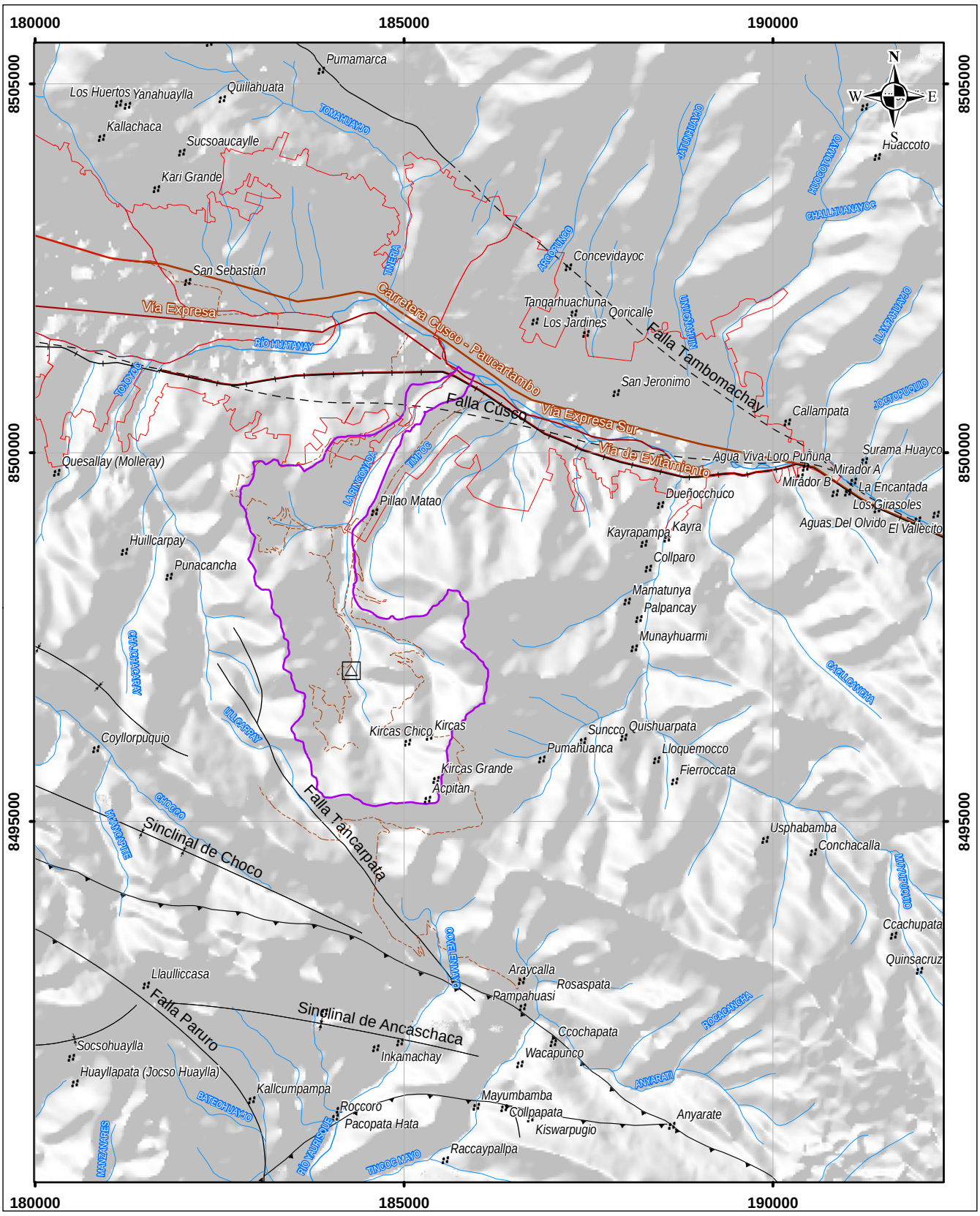
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

"MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA, DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2025"

MAPA GEOLÓGICO LOCAL

ELABORADO POR: Pacco Delgado, Carmen Ttito Toribio, Rai Ronaldo	**UBICACIÓN:** **Distrito**: San Sebastián **Provincia:** Cusco **Departamento:** Cusco	**SISTEMA DE COORDENADAS:** WGS84 Zona 19L	**ESCALA:** Indicada	**PLANO:** 07
REVISADO POR: Dr. Ronald Luis López Zapana	**FORMATO:** A-3	**FECHA:** Octubre - 2025		

Anexo 1h. Mapa geológico estructural regional



SIMBOLOGÍA

- Pueblos
- Galería filtrante Pillao Matao
- Área urbana
- Ferrocarill
- Microcuenca La Rinconada

Vías
- Carretera asfaltada interprovincial
- Carretera asfaltada
- Trocha carrozable

Drenaje
- Río
- Quebrada

Pliegues
- Anticlinal
- Sinclinal

Fallas
- Falla
- Falla inferida
- Falla Inversa

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

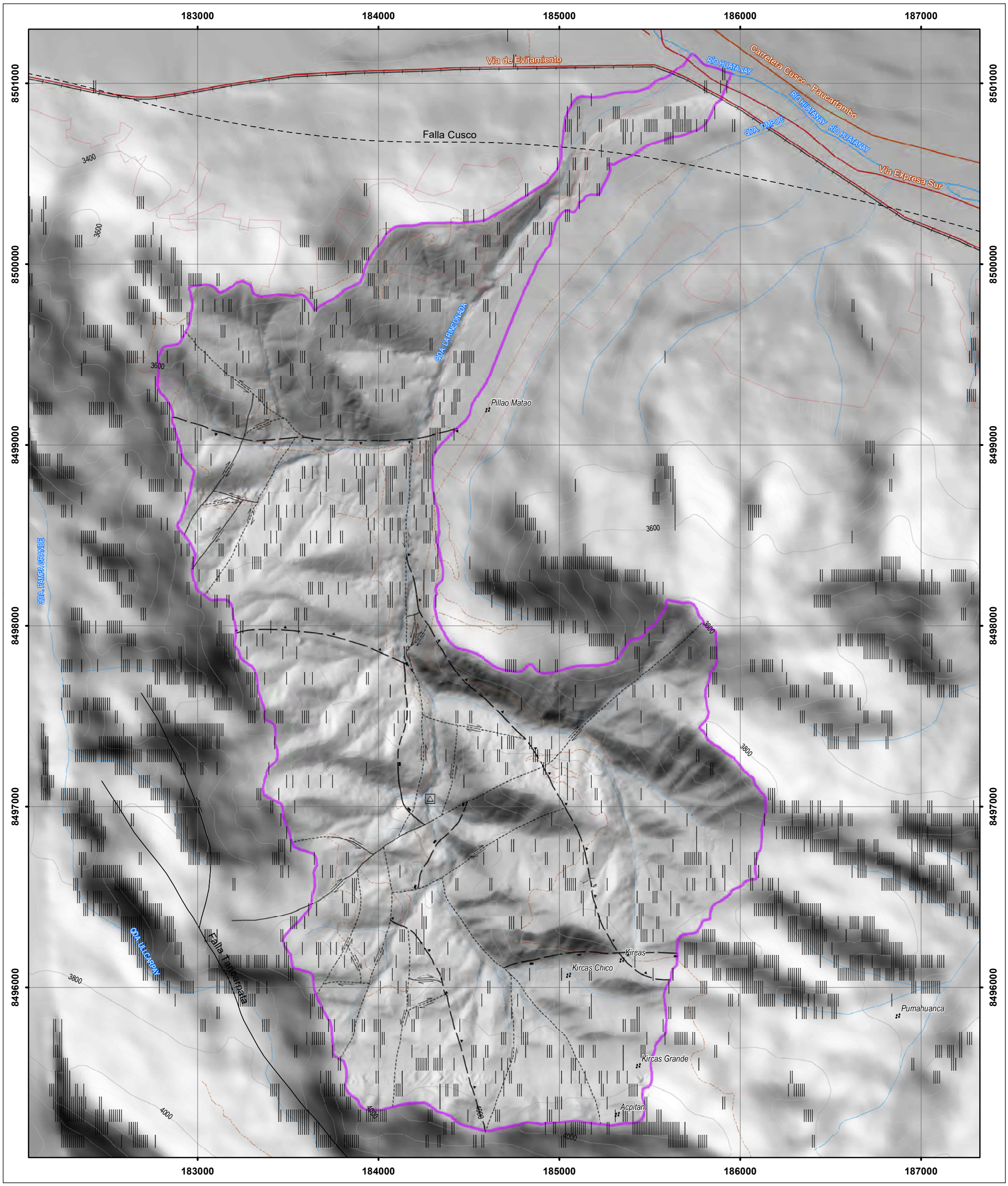
"MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA, DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2025"

MAPA GEOLÓGICO ESTRUCTURAL REGIONAL

ELABORADO POR: Pacco Delgado, Carmen Ttito Toribio, Rai Ronaldo	**UBICACIÓN:** **Distrito**: San Sebastián **Provincia:** Cusco **Departamento:** Cusco	**SISTEMA DE COORDENADAS:** WGS84 Zona 19L	**ESCALA:** Indicada	**PLANO:** 08
REVISADO POR: Dr. Ronald Luis López Zapana	**FORMATO:** A-4	**FECHA:** Octubre - 2025		

Nota. Modificado de Carlotto, Cárdenas, & Carlier (2011, p. 93).

Anexo 1i. Mapa geológico estructural local



SIMBOLOGÍA

- Pueblos
- Galería filtrante Pillao Matao

Fallas

- Falla certera
- Falla inferida
- Falla normal
- Falla inversa
- Área urbana
- Microcuenca La Rinconada

Curvas de nivel

- Curvas primarias
- Curvas secundarias

Vías

- Carretera asfaltada interprovincial
- Carretera asfaltada
- Trocha carrozable
- Ferrocarill

Drenaje

- Río
- Quebrada

N W E S

0 0.5 1 2 Km

1/20,000

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

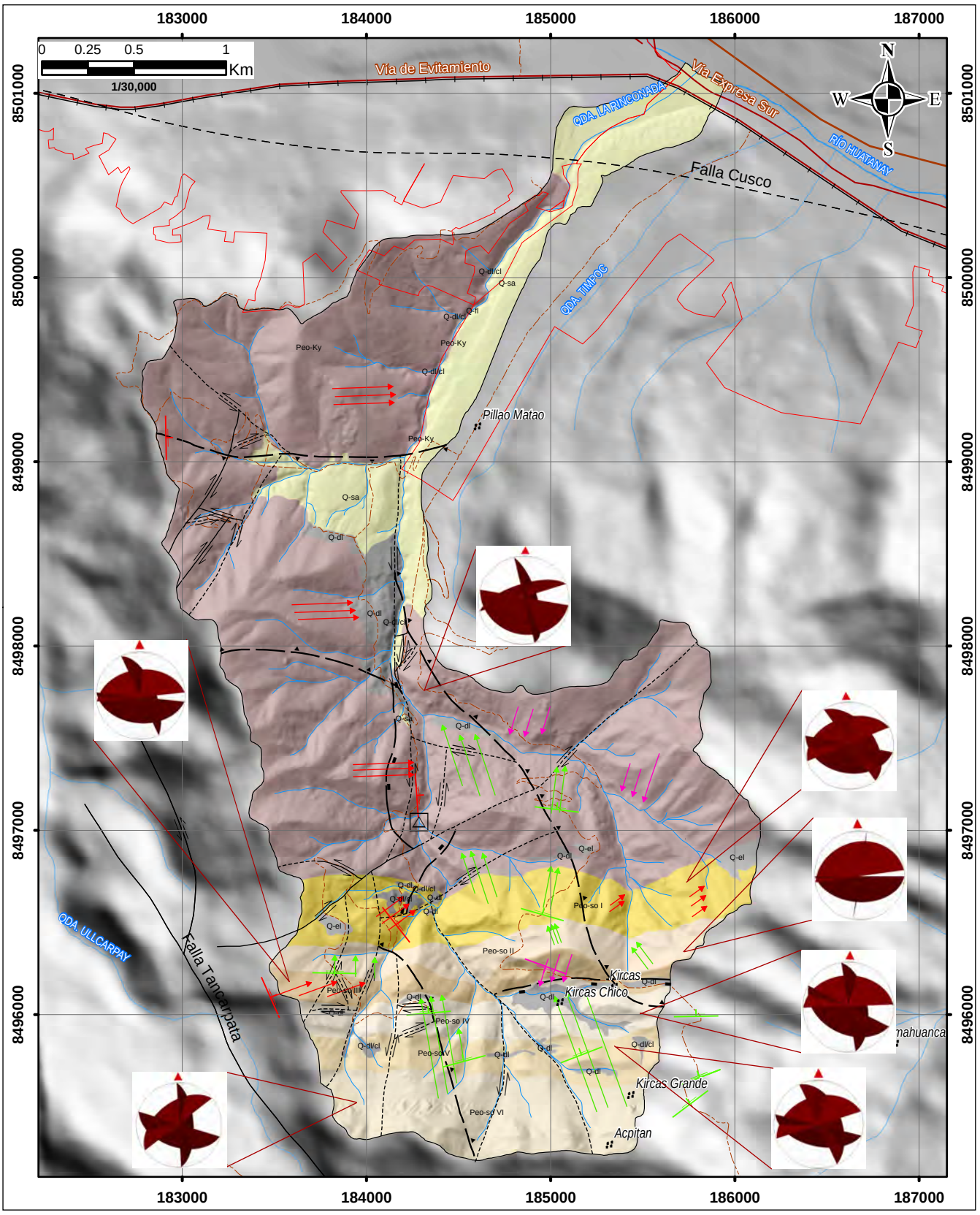
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

"MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA, DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2025"

MAPA GEOLÓGICO ESTRUCTURAL LOCAL

ELABORADO POR: Pacco Delgado, Carmen Ttito Toribio, Rai Ronaldo	**UBICACIÓN:** **Distrito**: San Sebastián **Provincia:** Cusco **Departamento:** Cusco	**SISTEMA DE COORDENADAS:** WGS84 Zona 19L	**ESCALA:** Indicada	**PLANO:** 09
REVISADO POR: Dr. Ronald Luis López Zapana	**FORMATO:** A-3	**FECHA:** Abril - 2026		

Anexo 1j. Mapa de sistemas de discontinuidades y de direcciones de flujo subterráneo



SIMBOLOGÍA

- Pueblos
- Galería filtrante Pillao Matao
- Microcuenca La Rinconada
- Área urbana
- Ferrocarill

Vías

Tipo

- Carretera asfaltada interprovincial
- Carretera asfaltada
- Trocha carrozable

Fallas

Tipo

- Falla
- Falla inferida
- Falla normal
- Falla inversa

Sistema de discontinuidades

Nro. de familia

- F1 (Estratificación)
- F2 (Fracturamiento)
- F3 (Fracturamiento)

Dirección de flujo

- Dirección de flujo por estratificación F1
- Dirección de flujo por fracturamiento F2
- Dirección de flujo por fracturamiento F3

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

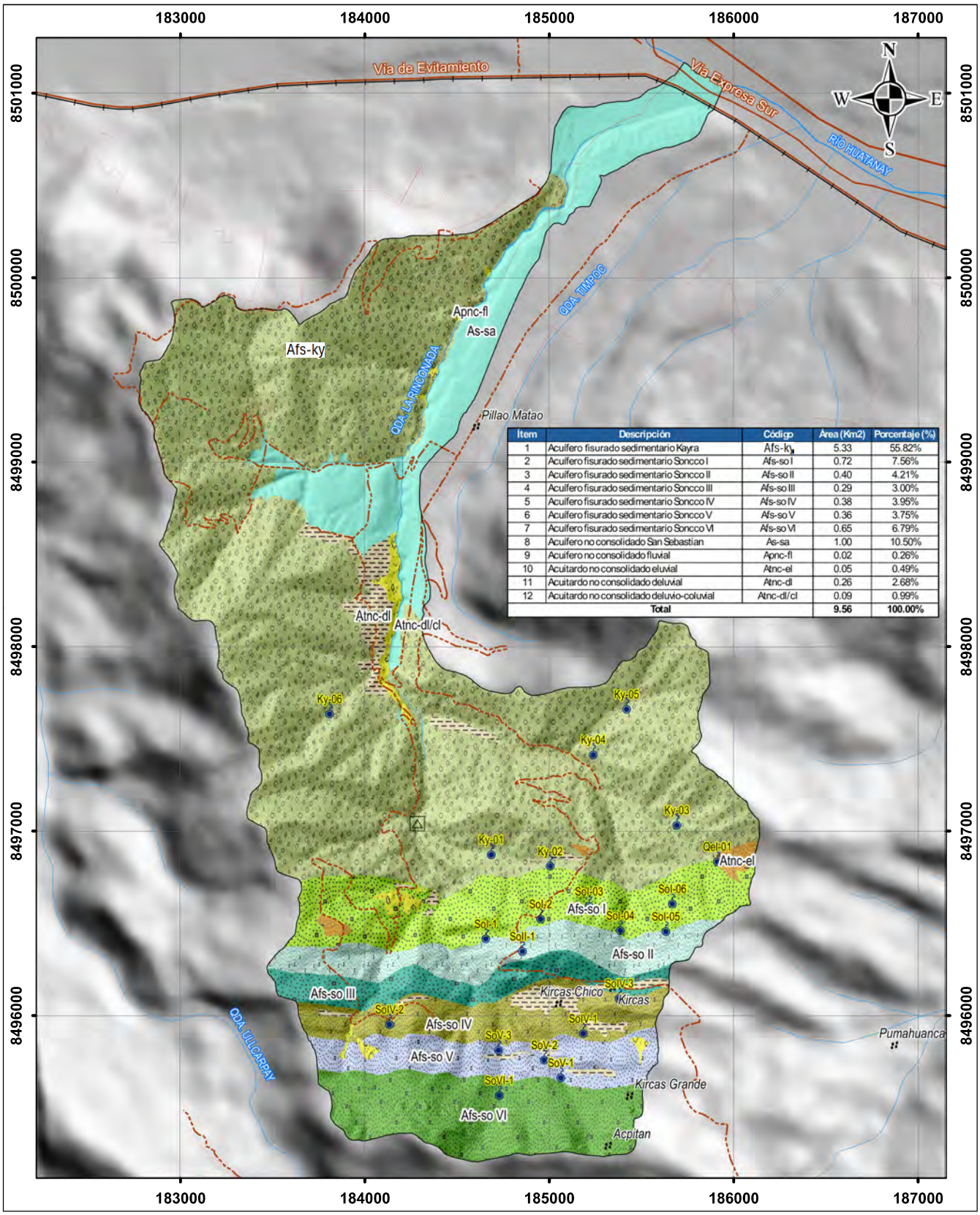
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

"MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA, DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2025"

MAPA DE SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES Y DE DIRECCIONES DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

ELABORADO POR: Pacco Delgado, Carmen Ttito Toribio, Rai Ronaldo	**UBICACIÓN:** **Distrito**: San Sebastián **Provincia:** Cusco **Departamento:** Cusco	**SISTEMA DE COORDENADAS:** WGS84 Zona 19L	**ESCALA:** Indicada	**PLANO:** 10
REVISADO POR: Dr. Ronald Luis López Zapana	**FORMATO:** A-4	**FECHA:** Abril - 2026		

Anexo 1k. Mapa hidrogeológico local



Item	Descripción	Código	Área (Km2)	Porcentaje (%)
1	Acuífero fisurado sedimentario Kayra	Afs-ky	5.33	55.82%
2	Acuífero fisurado sedimentario Soncco I	Afs-so I	0.72	7.56%
3	Acuífero fisurado sedimentario Soncco II	Afs-so II	0.40	4.21%
4	Acuífero fisurado sedimentario Soncco III	Afs-so III	0.29	3.00%
5	Acuífero fisurado sedimentario Soncco IV	Afs-so IV	0.38	3.95%
6	Acuífero fisurado sedimentario Soncco V	Afs-so V	0.36	3.75%
7	Acuífero fisurado sedimentario Soncco VI	Afs-so VI	0.65	6.79%
8	Acuífero no consolidado San Sebastian	As-sa	1.00	10.50%
9	Acuífero no consolidado fluvial	Apnc-fl	0.02	0.26%
10	Acuitardo no consolidado eluvial	Atnc-el	0.05	0.49%
11	Acuitardo no consolidado deluvial	Atnc-dl	0.26	2.68%
12	Acuitardo no consolidado deluvio-coluvial	Atnc-dl/cl	0.09	0.99%
	Total		**9.56**	**100.00%**

SIMBOLOGÍA

- Pueblos
- Manantes
- Galería filtrante Pillao Matao
- Microcuenca La Rinconada
- Área urbana
- Ferrocarill

Vías

Tipo

- Carretera asfaltada interprovincial
- Carretera asfaltada
- Trocha carrozable

Drenaje

TIPO

- Río
- Quebrada

0 0.25 0.5 1 Km

1/30,000

LEYENDA

Hidrogeología

Unidades hidrogeológicas

- Acuitardo no consolidado deluvio-coluvial
- Acuitardo no consolidado deluvial
- Acuitardo no consolidado eluvial
- Acuífero no consolidado fluvial
- Acuífero no consolidado San Sebastian
- Acuífero fisurado sedimentario Soncco VI
- Acuífero fisurado sedimentario Soncco V
- Acuífero fisurado sedimentario Soncco IV
- Acuífero fisurado sedimentario Soncco III
- Acuífero fisurado sedimentario Soncco II
- Acuífero fisurado sedimentario Soncco I
- Acuífero fisurado sedimentario Kayra

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

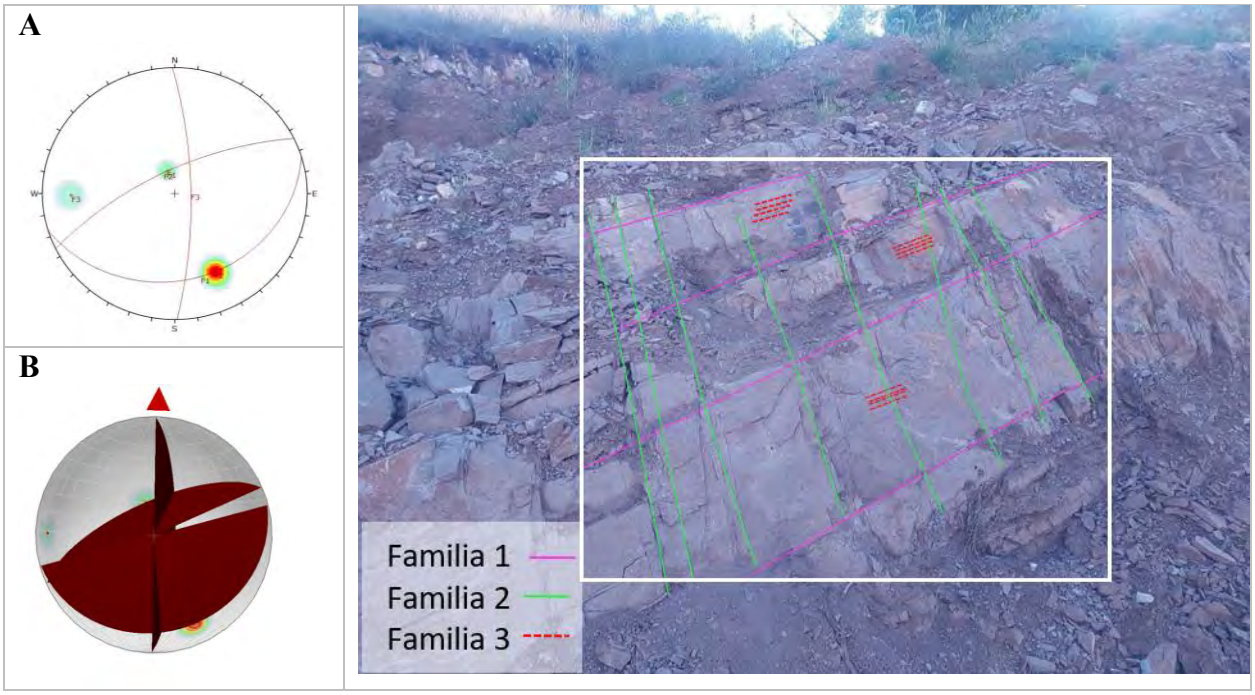
"MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA, DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2025"

MAPA HIDROGEOLÓGICO LOCAL

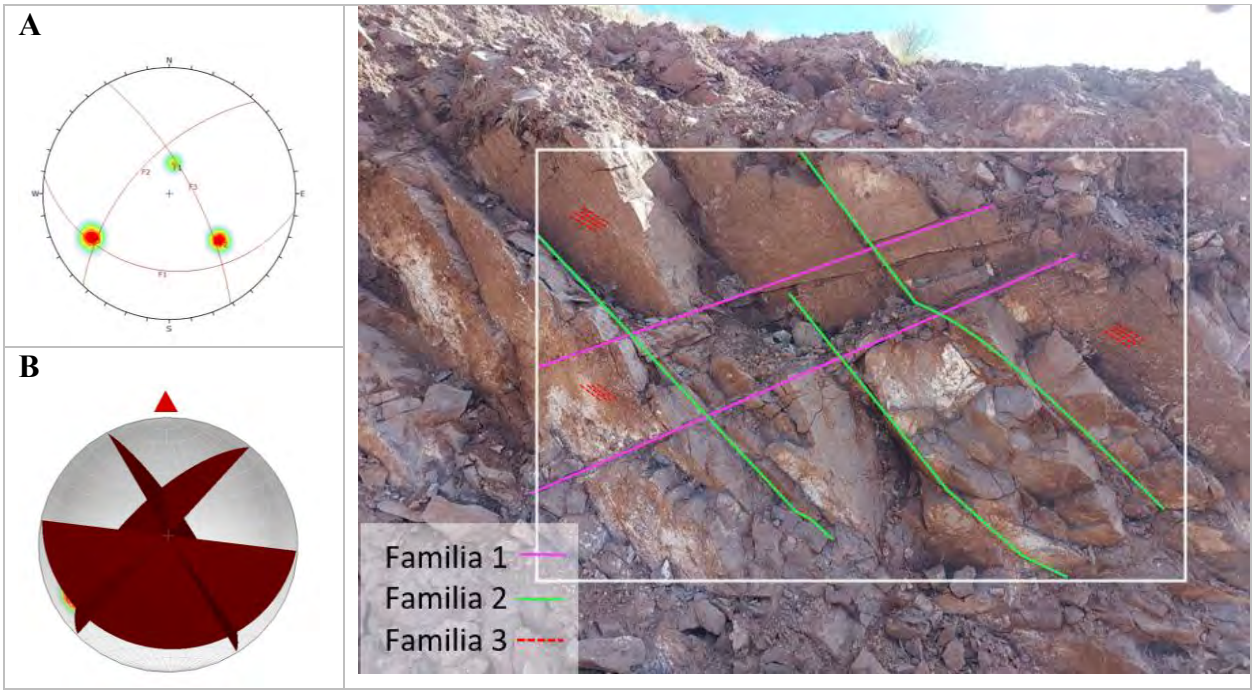
ELABORADO POR: Pacco Delgado, Carmen Ttito Toribio, Rai Ronaldo	**UBICACIÓN:** **Distrito**: San Sebastián **Provincia:** Cusco **Departamento:** Cusco	**SISTEMA DE COORDENADAS:** WGS84 Zona 19L	**ESCALA:** Indicada	**PLANO:** 13
REVISADO POR: Dr. Ronald Luis López Zapana	**FORMATO:** A-4	**FECHA:** Abril - 2026		

Anexo 2. Ventanas estructurales en las formaciones geológicas

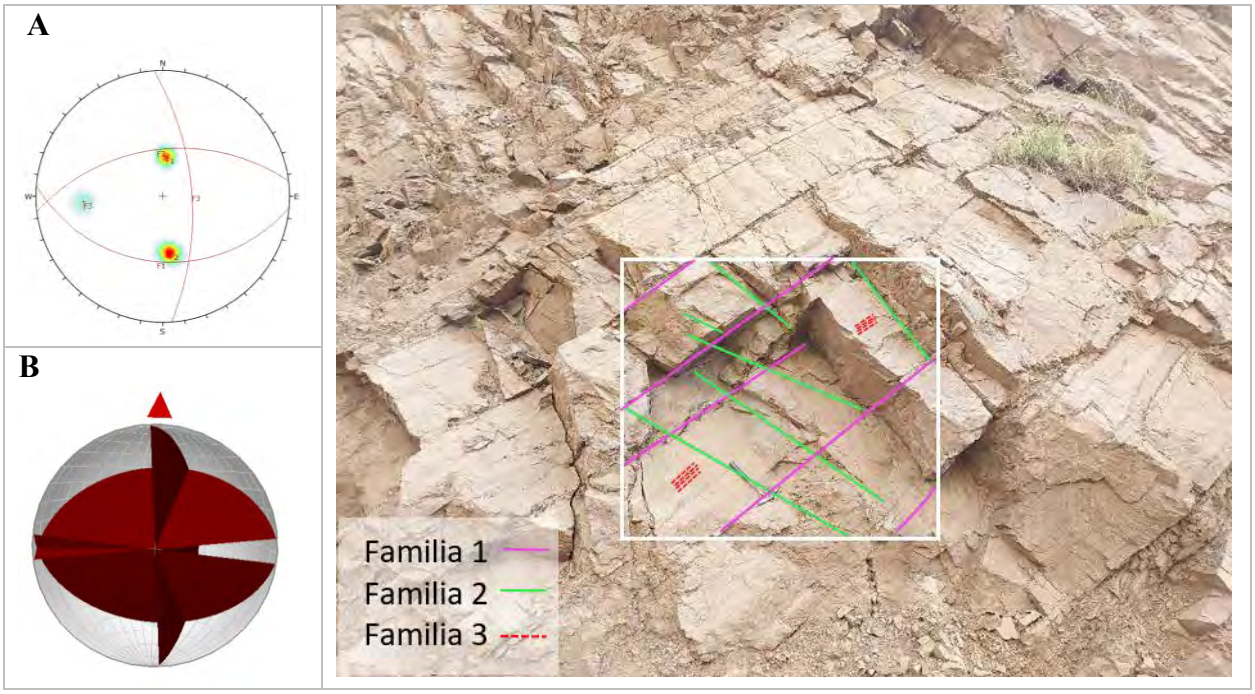
Anexo 2a. Ventana estructural en la Formación Kayra



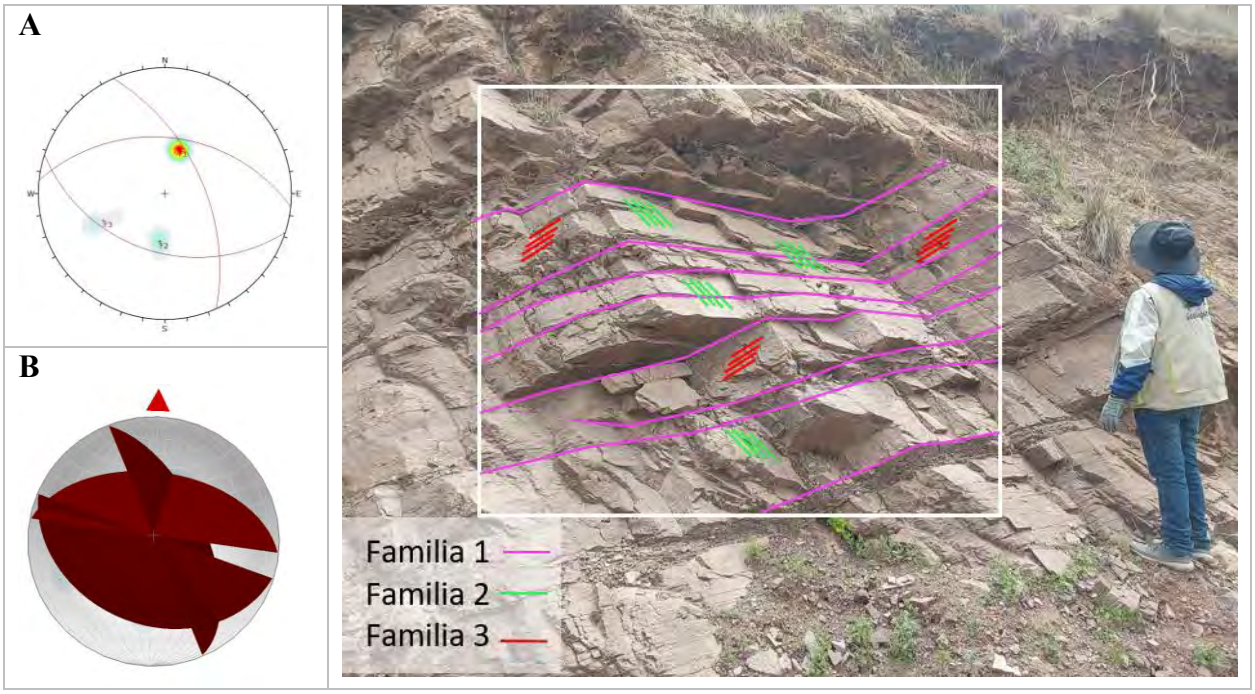
N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	54.33 cm	>20 m	0.55 mm	Lisa	Duro (calcita)	No meteorizado
F2	Diaclasa	30.86 cm	3.20 m	0.58 mm	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
F3	Diaclasa	37.50 cm	3.17 m	1.00 mm	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
Coordenadas UTM				E=182930; N=8499130			
Dimensiones				2x2 m			
Ubicación				Parte media			



N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	50.00 cm	>20 m	1.05 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	62.50 cm	>20 m	0.10 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	52.50 cm	2.27 m	1.03 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM				E=183152; N=8498559			
Dimensiones				2x3 m			
Ubicación				Parte media			

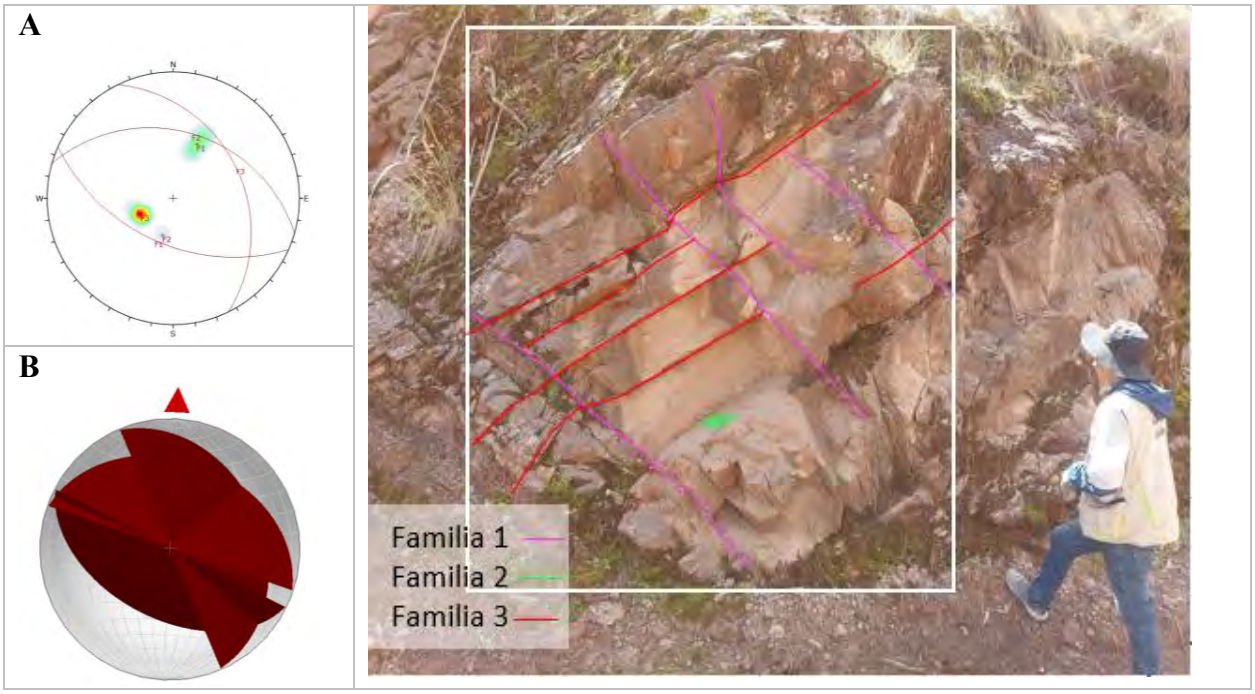


N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	63.50 cm	>20 m	1.00 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	25.80 cm	1.27 m	0.48 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	70.00 cm	>20 m	1.00 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM				E=184292; N=8497190			
Dimensiones				2x2 m			
Ubicación				Parte media			

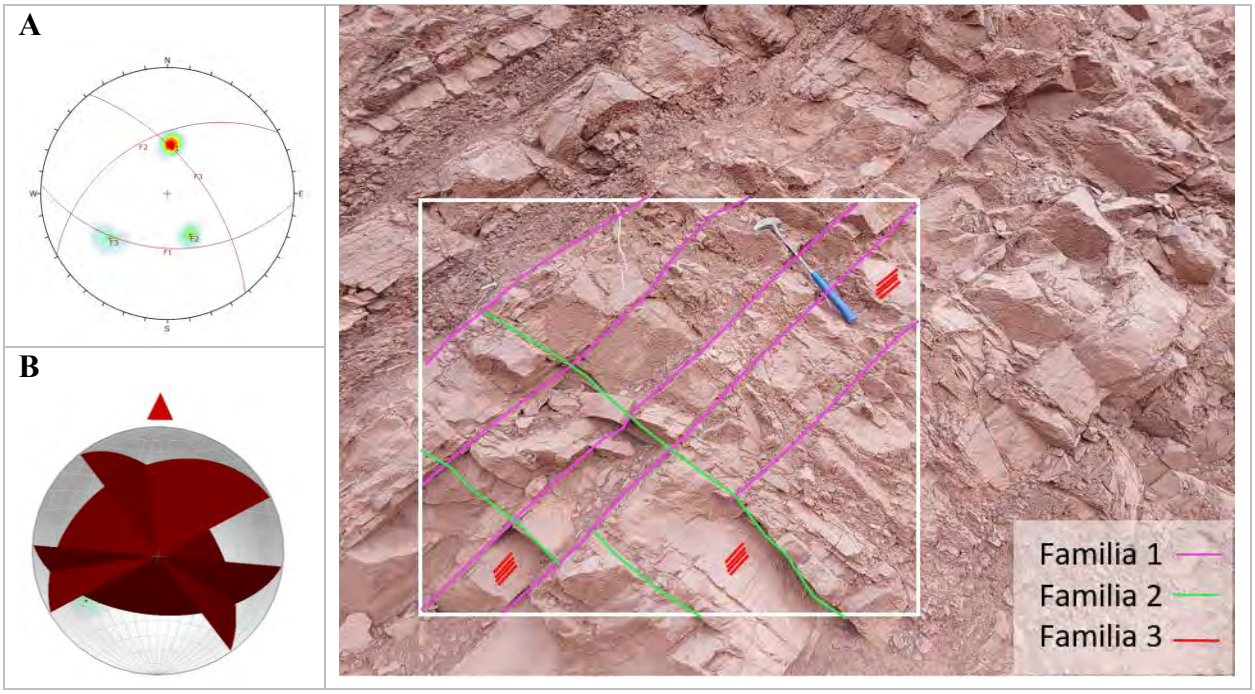


N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	27.86 cm	11.50 m	0.43 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	14.67 cm	1.74 m	0.38 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	20.55 cm	2.10 m	0.17 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM				E=184961; N=8496561			
Dimensiones				3x3 m			
Ubicación				Lado sureste			

Anexo 2b. Ventana estructural en la Formación Soncco secuencia I

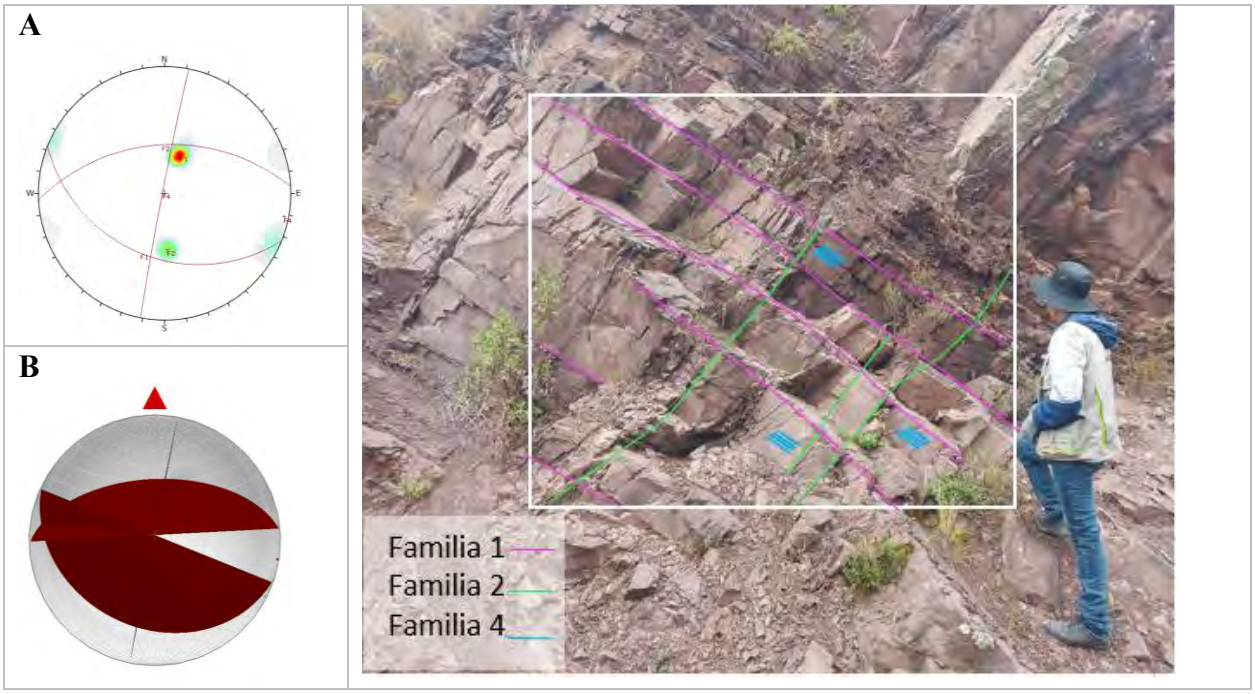


N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	47.67 cm	7.95 m	0.30 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	-	5.00 m	2.00 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	22.50 cm	1.34 m	1.42 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM			E=184961; N=8496561				
Dimensiones			3x3 m				
Ubicación			Lado sureste				

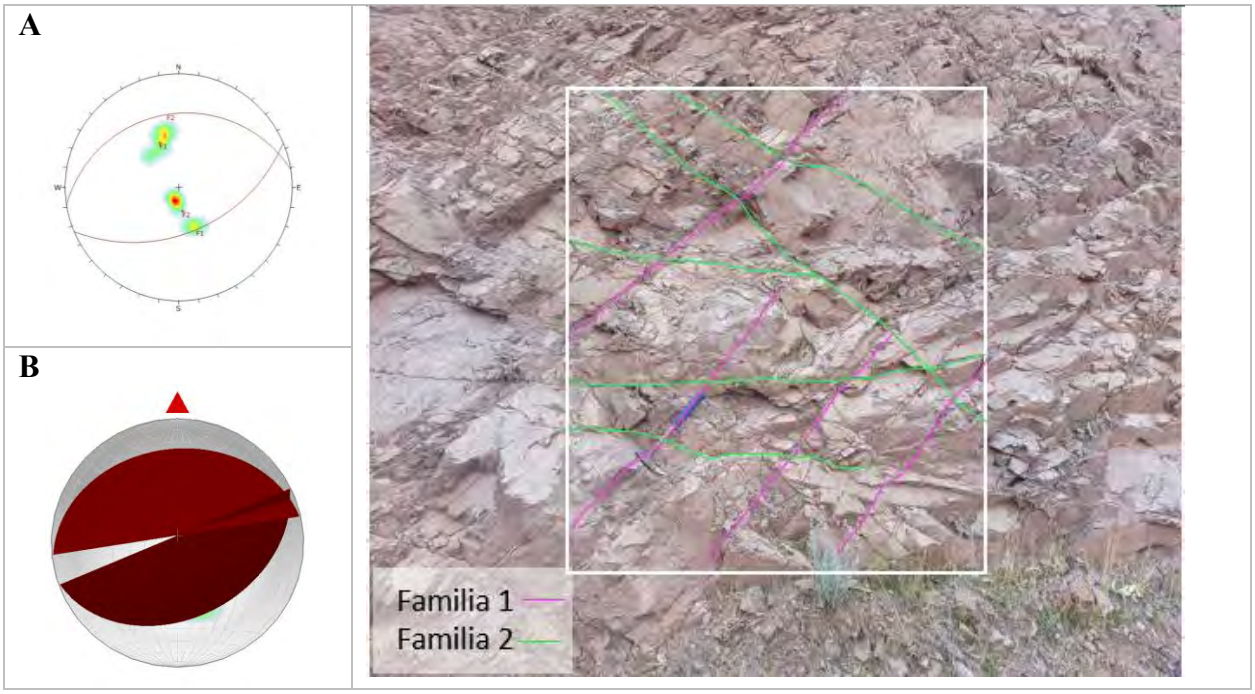


N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	25.50 cm	>20 m	0.42 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	19.50 cm	2.00 m	0.67 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	26.50 cm	0.83 m	1.33 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM			E=184176; N=8496498				
Dimensiones			1x1 m				
Ubicación			Lado suroeste				

Anexo 2c. Ventana estructural en la Formación Soncco secuencia II

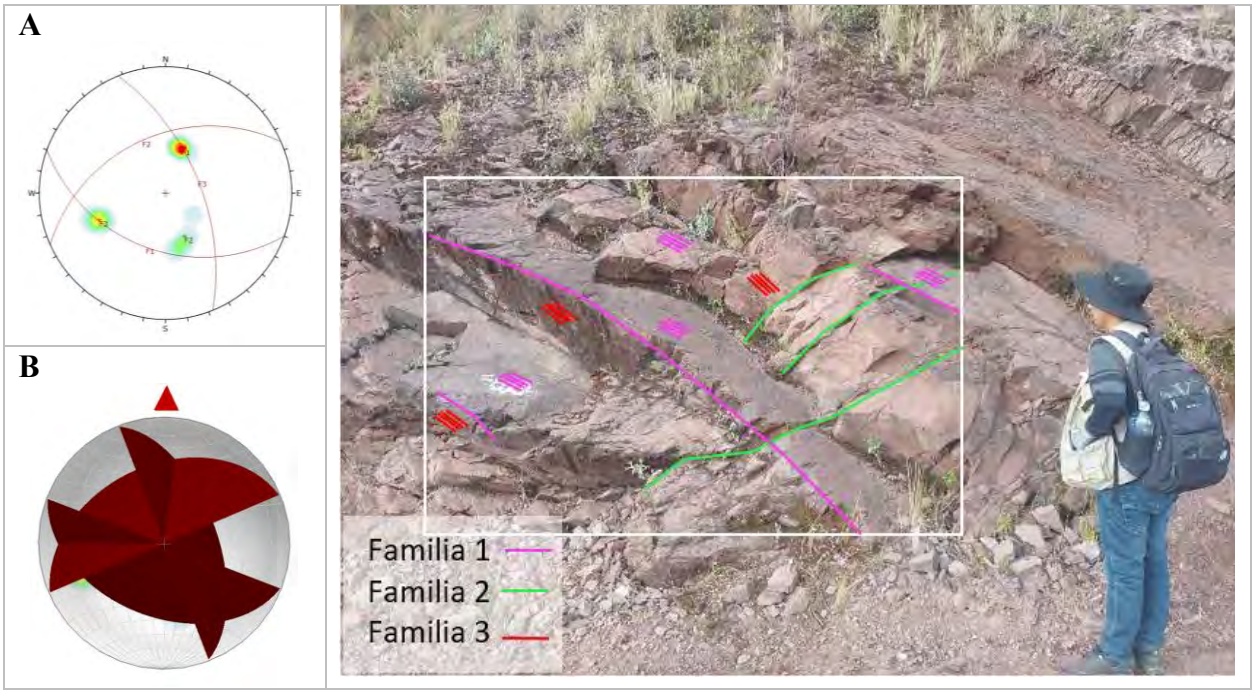


N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	37.60 cm	4.92 m	1.25 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	46.00 cm	1.97 m	0.83 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F4	Diaclasa	56.00 cm	2.33 m	0.10 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM	E=184849; N=8496409						
Dimensiones	2x2 m						

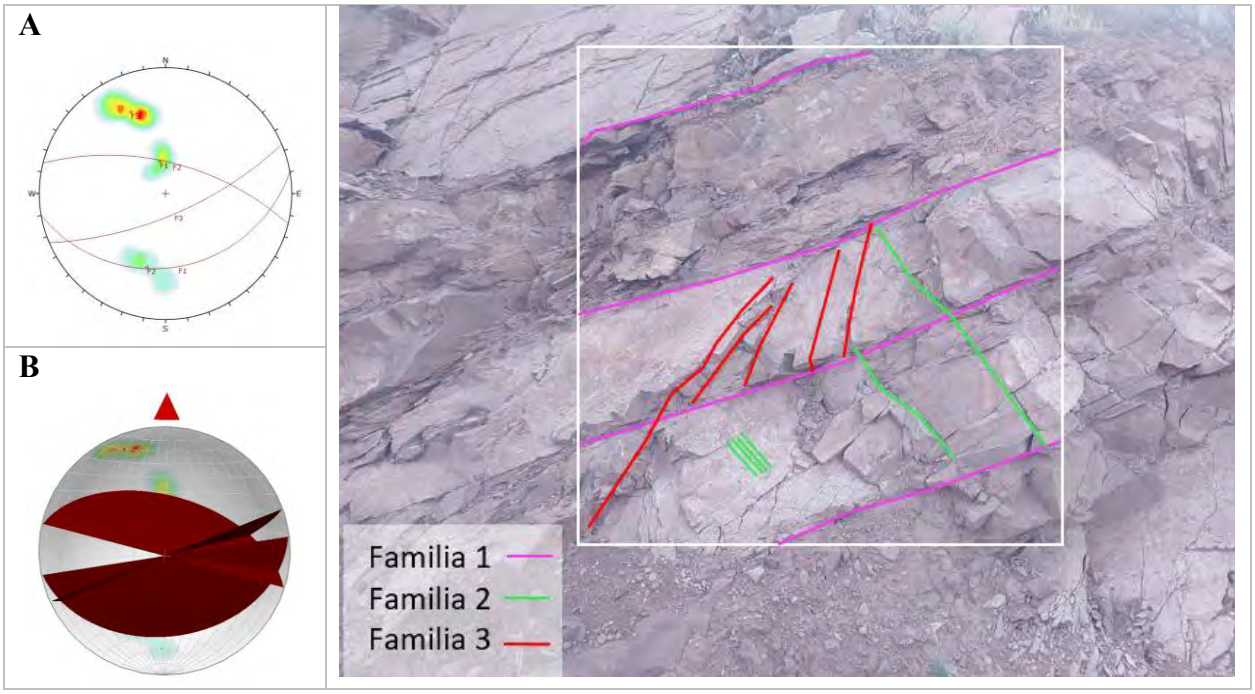


N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	52.00 cm	4.13 m	0.43 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	43.75 cm	3.00 m	1.60 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM				E=183828; N=8496244			
Dimensiones				2x2 m			
Ubicación				Lado suroeste			

Anexo 2d. Ventana estructural en la Formación Soncco secuencia III

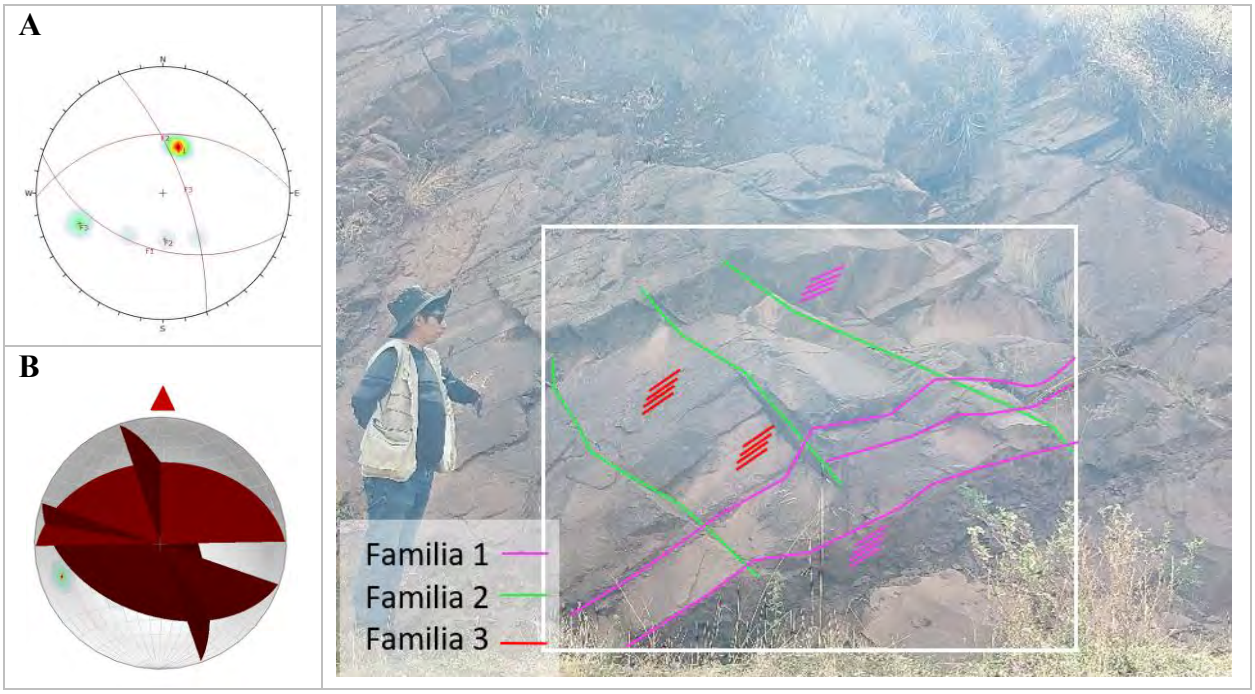


N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	44.33 cm	3.75 m	0.88 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	24.67 cm	1.95 m	0.65 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	66.00 cm	2.67 m	0.53 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM			E=184967; N=8496244				
Dimensiones			2x3 m				
Ubicación			Lado sureste				

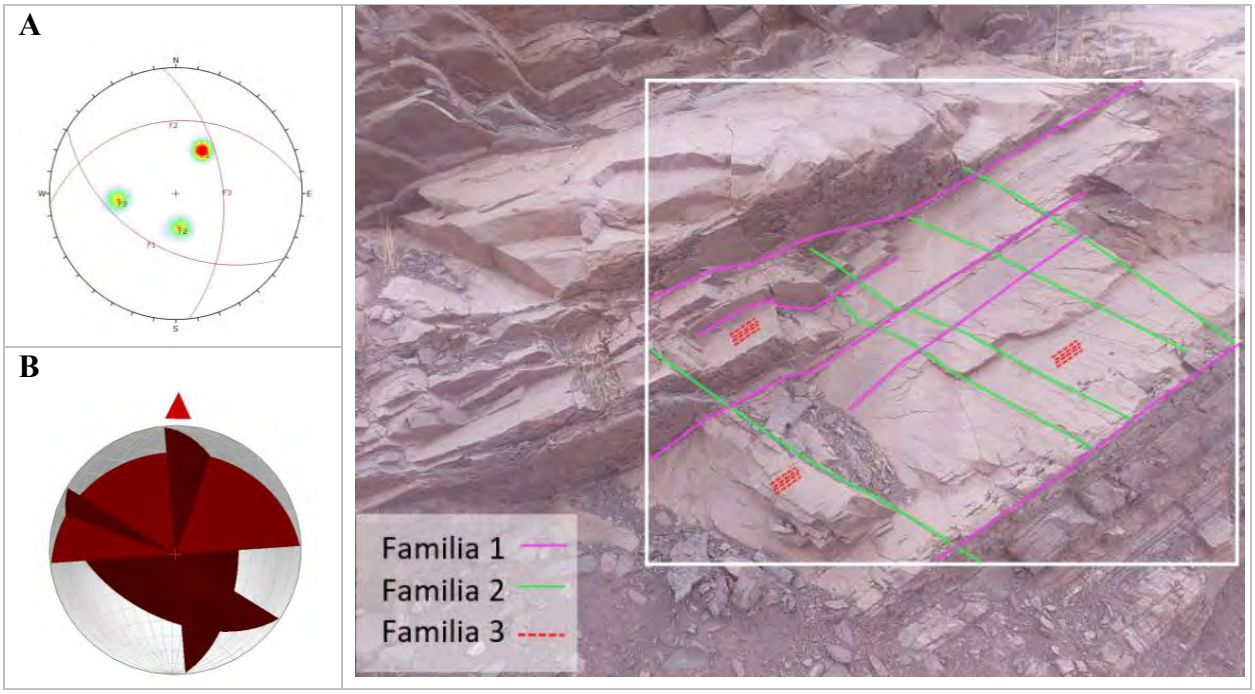


N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	26.50 cm	>20 m	3.00 mm	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
F2	Diaclasa	60.00 cm	0.87 m	1.33 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	20.50 cm	1.66 m	3.20 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM			E=184526; N=8495765				
Dimensiones			2x2 m				
Ubicación			Lado suroeste				

Anexo 2e. Ventana estructural en la Formación Soncco secuencia IV

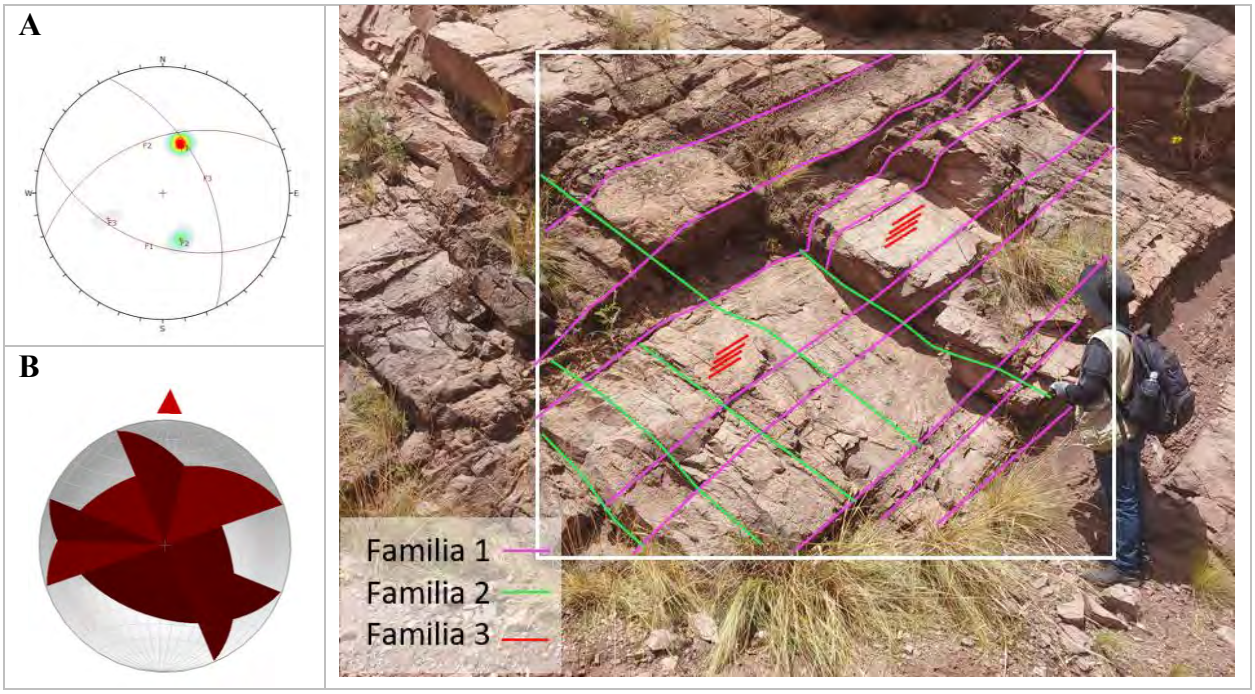


N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
1	Estrato	44.25 cm	5.00 m	0.70 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
2	Diaclasa	92.50 cm	1.64 m	0.77 mm	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
3	Diaclasa	25.00 cm	2.17 m	0.30 mm	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
Coordenadas UTM			E=185790; N=8496009				
Dimensiones			2x3 m				
Ubicación			Lado sureste				

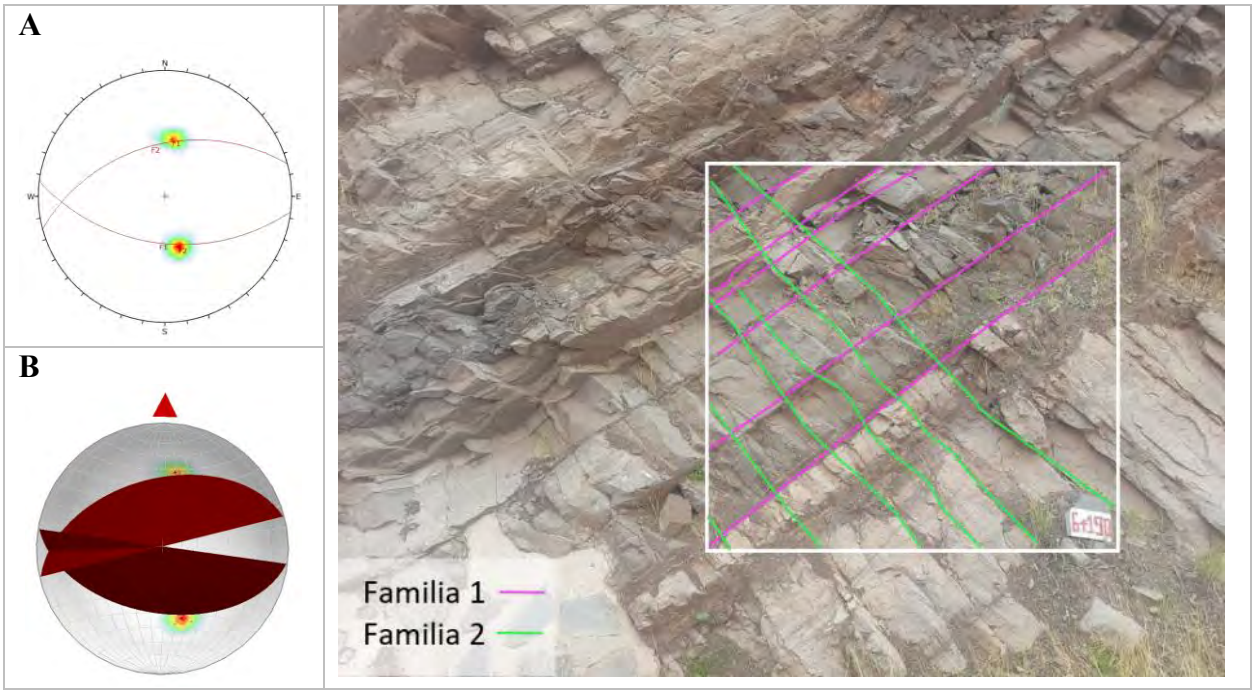


N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
1	Estrato	65.00 cm	>20 m	0.20 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
2	Diaclasa	65.00 cm	5.60 m	0.90 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
3	Diaclasa	26.67 cm	2.25 m	0.00 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM			E=184568; N=8495339				
Dimensiones			2x2 m				
Ubicación			Lado suroeste				

Anexo 2f. Ventana estructural en la Formación Soncco secuencia V

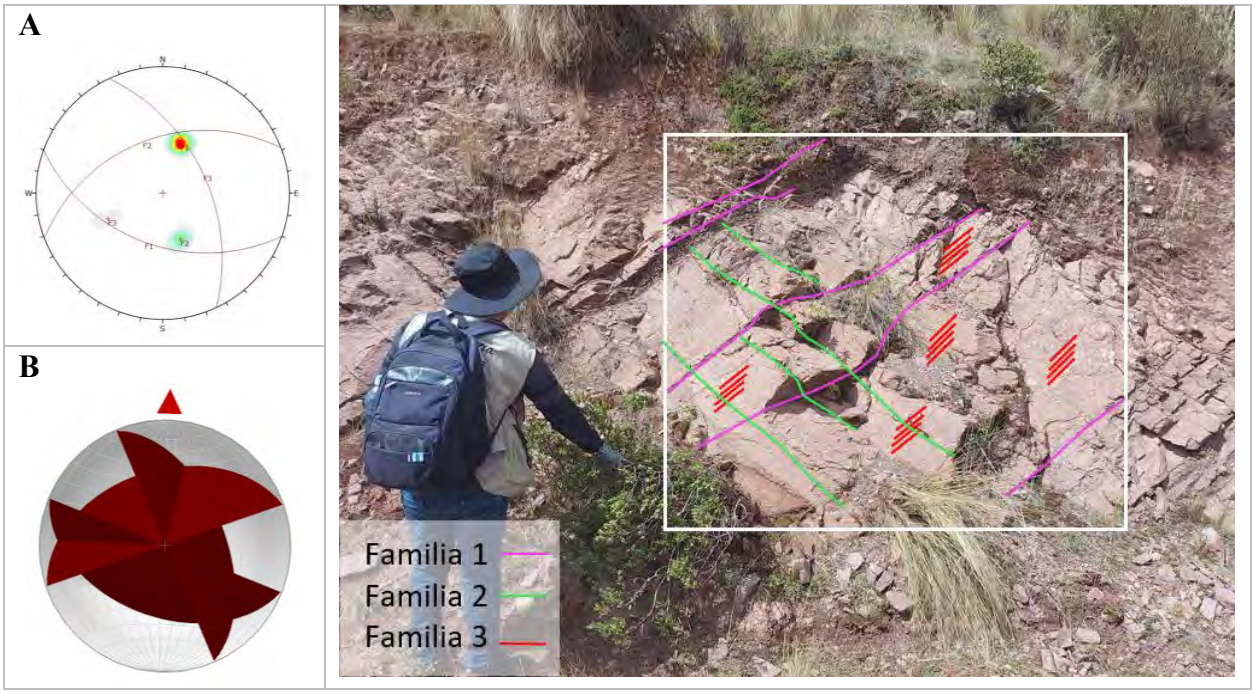


N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	40.00 cm	11.44 m	0.61 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	60.50 cm	14.40 m	0.84 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	48.00 cm	13.00 m	0.10 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM			E=185804; N=8495676				
Dimensiones			3x3 m				
Ubicación			Lado sureste				

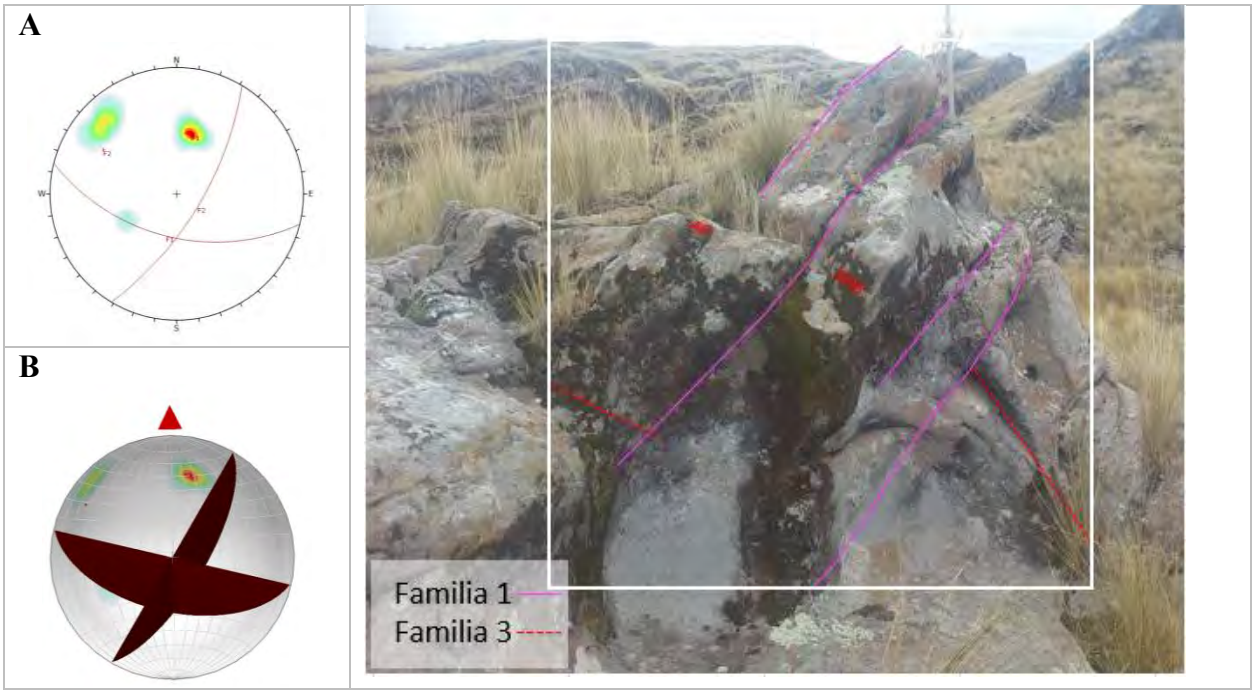


N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
1	Estrato	39.20 cm	>20 m	0.33 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
2	Diaclasa	24.80 cm	6.08 m	0.83 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM				E=184526; N=8495765			
Dimensiones				2x2 m			
				Lado suroeste			

Anexo 2g. Ventana estructural en la Formación Soncco secuencia VI



N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	37.25 cm	2.64 m	1.04 mm	Lisa	Ninguna	No meteorizado
F2	Diaclasa	32.00 cm	1.55 m	0.78 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	22.75 cm	1.99 m	0.60 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM	E=185748; N=8495531						
Dimensiones	2.5x2.5 m						
Ubicación	Lado sureste						



N° de familia	Tipo	Espaciado	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración
F1	Estrato	29.33 cm	>20 m	0.50 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
F3	Diaclasa	25.33 cm	0.86 m	0.00 mm	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
Coordenadas UTM				E=184568; N=8495339			
Dimensiones				2x2 m			
Ubicación				Lado suroeste			

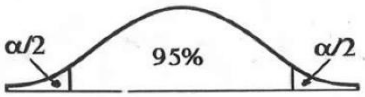
Anexo 3. Datos Crudos de Precipitación Anual y Mensual - Estación Granja Kayra

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PP anual	PP media mensual
1985	129.10	119.40	74.20	33.20	15.60	11.60	0.90	0.00	43.30	62.10	116.50	122.40	728.30	60.69
1986	76.40	92.20	125.70	65.50	6.20	0.00	1.80	4.20	7.50	17.30	69.60	102.70	569.10	47.43
1987	224.30	87.90	48.60	13.10	2.10	1.30	9.20	0.00	8.20	26.50	101.80	107.60	630.60	52.55
1988	163.80	84.30	166.50	108.90	4.60	0.00	0.00	0.00	9.90	36.20	47.60	103.70	725.50	60.46
1989	151.40	126.80	119.30	38.60	6.40	9.10	0.00	6.10	30.70	15.70	60.70	88.50	653.30	54.44
1990	157.60	90.40	60.20	47.40	7.50	31.80	0.00	5.80	13.30	73.70	86.90	66.50	641.10	53.43
1991	97.60	163.60	105.20	45.10	11.00	5.10	1.50	0.00	21.40	49.30	83.60	99.00	682.40	56.87
1992	114.10	102.40	104.00	14.90	0.00	19.40	0.00	21.40	8.00	50.70	117.40	57.00	609.30	50.78
1993	206.70	110.50	75.80	18.80	0.90	0.00	2.70	6.90	18.00	46.20	111.90	201.50	799.90	66.66
1994	177.02	163.90	173.90	45.50	11.80	0.00	0.00	0.00	25.70	40.20	40.50	119.90	798.42	66.54
1995	122.00	94.80	95.30	17.80	0.00	0.00	0.60	1.20	28.80	26.70	70.20	102.60	560.00	46.67
1996	131.90	98.00	70.50	32.30	11.00	0.00	0.00	6.30	19.60	**S/D**	**S/D**	**S/D**	369.60	41.07
1997	123.30	127.73	104.80	31.00	4.80	0.00	0.00	7.10	12.30	44.40	201.50	148.40	805.33	67.11
1998	116.30	156.20	22.60	31.00	1.60	1.90	**S/D**	1.60	4.30	49.80	34.60	58.90	478.80	43.53
1999	89.30	92.20	92.00	42.80	1.30	3.40	1.00	0.00	43.10	18.80	39.70	119.50	543.10	45.26
2000	197.40	137.30	119.50	10.90	2.60	5.80	2.70	4.50	10.70	49.30	29.30	82.00	652.00	54.33
2001	233.00	173.10	137.40	36.40	11.50	0.00	17.40	10.20	20.60	38.30	96.80	89.40	864.10	72.01
2002	134.50	184.60	112.70	21.60	16.20	2.50	27.10	3.70	10.30	78.70	97.80	132.40	822.10	68.51
2003	163.90	135.50	142.90	56.50	2.00	6.40	0.00	21.30	3.70	34.60	23.10	123.80	713.70	59.48
2004	173.70	125.80	66.50	21.00	2.40	20.50	17.00	9.00	21.70	25.60	60.90	87.90	632.00	52.67
2005	140.80	**S/D**	120.20	33.10	3.20	0.40	1.20	4.00	4.50	39.10	59.30	102.50	508.30	46.21
2006	203.40	155.50	145.90	40.90	0.20	4.90	0.00	10.50	7.50	72.50	67.80	147.20	856.30	71.36
2007	140.80	58.70	107.30	93.60	5.80	0.00	4.00	0.00	1.00	49.40	74.00	88.40	623.00	51.92
2008	108.80	109.20	64.40	7.60	8.70	2.10	0.00	3.90	13.90	51.70	90.20	120.50	581.00	48.42
2009	112.50	108.30	79.10	21.30	5.30	0.00	3.30	0.70	15.10	8.30	88.70	82.90	525.50	43.79
2010	268.50	168.50	129.20	16.60	1.30	0.00	1.40	4.70	8.20	70.00	40.00	174.10	882.50	73.54
2011	103.40	187.00	131.90	67.60	3.90	3.20	3.70	0.00	38.90	38.20	60.20	110.20	748.20	62.35
2012	70.50	157.90	41.70	48.10	4.50	1.20	0.00	0.10	18.40	19.50	138.20	179.50	679.60	56.63
2013	187.30	137.20	75.50	13.00	25.30	6.10	2.00	12.40	6.30	105.00	86.00	159.40	815.50	67.96
2014	161.90	116.50	40.00	35.00	10.10	0.00	3.20	5.80	5.60	**S/D**	29.60	156.00	563.70	51.25
2015	169.80	146.50	66.70	69.80	18.60	3.90	10.30	4.60	16.10	19.10	48.60	113.00	687.00	57.25
2016	104.00	153.10	54.30	24.40	3.00	0.00	4.50	0.50	7.00	79.50	28.00	89.80	548.10	45.68
2017	111.20	86.90	122.80	47.50	11.20	5.90	0.00	8.40	19.00	33.70	61.40	101.70	609.70	50.81
2018	134.70	162.20	145.70	19.60	0.20	16.20	15.80	7.10	7.00	80.70	80.80	95.20	765.20	63.77
2019	121.00	115.20	164.40	38.90	28.20	1.50	3.70	0.00	9.80	82.40	111.70	140.40	817.20	68.10
2020	124.50	153.30	80.20	**S/D**	**S/D**	0.00	8.20	1.00	14.60	17.50	40.90	139.70	579.90	57.99
2021	150.50	116.50	74.10	90.50	6.70	11.50	3.00	4.30	1.50	38.20	102.30	106.10	705.20	58.77
PP máx. (mm)	268.50	187.00	173.90	108.90	28.20	31.80	27.10	21.40	43.30	105.00	201.50	201.50	882.50	73.54
PP mín. (mm)	70.50	58.70	22.60	7.60	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	8.30	23.10	57.00	369.60	41.07
SD (mm)	44.62	32.32	38.38	24.19	6.88	7.15	6.24	5.33	10.89	23.36	36.87	33.25	121.21	9.04
PP media (mm)	145.86	127.75	98.95	38.88	7.10	4.75	4.06	4.79	15.01	45.40	74.95	114.45	669.58	56.65
N° de datos	37.00	36.00	37.00	36.00	36.00	37.00	36.00	37.00	37.00	35.00	36.00	36.00	37.00	37.00
CV	0.31	0.25	0.39	0.62	0.97	1.51	1.54	1.11	0.73	0.51	0.49	0.29	0.18	0.16

Nota. Modificado del SENAMHI (2025) y SNIRH (2025).

Anexo 4. Tablas Referenciales de Valores de t y F

Anexo 4a. Valores de t



v	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.025$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.005$	v
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	1
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	2
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	3
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	4
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	6
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	7
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	8
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	9
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	10
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	11
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	12
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	13
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	14
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	15
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	16
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	17
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	18
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	19
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	20
21	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	21
22	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	22
23	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	23
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	24
25	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	25
26	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	26
27	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	27
28	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	28
29	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	29
inf.	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	inf.

Fuente: Villón Béjar (2006, p. 364).

Anexo 4b. Valores de F con significación al 5

v2= *Degrees of freedom for denominator*	v1 = *Degrees of freedom for numerator*																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	246	248	249	250	251	252	253	254
2	18.50	19.00	19.20	19.20	19.30	19.30	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50
3	10.10	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.80	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.80	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

Fuente: Villón Béjar (2006, p. 362).

Anexo 5. Medición de Dip/ Dip direction y Parámetros de las Discontinuidades mediante Ventanas Estructurales

Ítem	N° de VE	Ubicación	Este	Norte	Dip	Dip_dir	Tipo de discontinuidad	N° de familia	Espaciado_cm	Persistencia_m	Abertura_mm	Rugosidad	Relleno	Alteración
1	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	22	163	Estrato	F1	75.00	>20	1	Lisa	Duro (calcita)	No meteorizado
2	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	23	160	Estrato	F1	34.00	>20	0.1	Lisa	Duro (calcita)	No meteorizado
3	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	20	165	Estrato	F1	54.00	>20	1	Lisa	Duro (calcita)	No meteorizado
4	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	21	163	Estrato	F1		>20	0.1	Lisa	Duro (calcita)	No meteorizado
5	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	69	334	Secundaria	F2	10.00	4	2	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
6	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	71	333	Secundaria	F2	22.00	4	1	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
7	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	68	334	Secundaria	F2	40.00	4	0.1	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
8	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	65	331	Secundaria	F2	40.00	3	0.1	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
9	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	72	336	Secundaria	F2	39.00	6	0.1	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
10	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	69	335	Secundaria	F2	30.00	0.9	0.2	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
11	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	70	332	Secundaria	F2	35.00	1.7	0.1	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
12	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	70	334	Secundaria	F2		2	1	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
13	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	76	89	Secundaria	F3	25.00	3	1	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
14	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	77	90	Secundaria	F3	50.00	1.5	1	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
15	1	Formación Kayra medio	182930	8499130	76	88	Secundaria	F3		5	1	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
16	2	Formación Kayra medio	183152	8499130	28	187	Estrato	F1	50	>20	2	Lisa	Ninguna	No meteorizado
17	2	Formación Kayra medio	183152	8499130	26	189	Estrato	F1		>20	0.1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
18	2	Formación Kayra medio	183152	8499130	70	61	Secundaria	F3	65	3.5	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
19	2	Formación Kayra medio	183152	8499130	72	58	Secundaria	F3	40	1.5	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
20	2	Formación Kayra medio	183152	8499130	69	63	Secundaria	F3		1.8	2	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
21	2	Formación Kayra medio	183152	8499130	57	313	Secundaria	F2	80	>20	0.1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
22	2	Formación Kayra medio	183152	8499130	59	314	Secundaria	F2	45	>20	0.1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
23	2	Formación Kayra medio	183152	8499130	54	312	Secundaria	F2		>20	0.1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
24	3	Formación Kayra medio	184292	8497190	35	185	Estrato	F1	94	>20	0	Lisa	Ninguna	No meteorizado
25	3	Formación Kayra medio	184292	8497190	32	188	Estrato	F1	60	4	3	Lisa	Ninguna	No meteorizado
26	3	Formación Kayra medio	184292	8497190	34	184	Estrato	F1	40	>20	1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
27	3	Formación Kayra medio	184292	8497190	38	185	Estrato	F1	60	>20	1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
28	3	Formación Kayra medio	184292	8497190	35	183	Estrato	F1		>20	0	Lisa	Ninguna	No meteorizado
29	3	Formación Kayra medio	184292	8497190	48	354	Secundaria	F2	47	3	2	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
30	3	Formación Kayra medio	184292	8497190	50	351	Secundaria	F2	28	2	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
31	3	Formación Kayra medio	184292	8497190	45	357	Secundaria	F2	20	0.7	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
32	3	Formación Kayra medio	184292	8497190	48	350	Secundaria	F2	8	0.6	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
33	3	Formación Kayra medio	184292	8497190	52	348	Secundaria	F2	26	0.8	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
34	3	Formación Kayra medio	184292	8497190	49	360	Secundaria	F2		0.5	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
35	3	Formación Kayra medio	184292	8497190	65	86	Secundaria	F3	70	>20	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
36	3	Formación Kayra medio	184292	8497190	63	85	Secundaria	F3		>20	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
37	4	Formación Soncco VI suroeste	184568	8495339	58	188	Estrato	F1	30	>20	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
38	4	Formación Soncco VI suroeste	184568	8495339	54	196	Estrato	F1	40	>20	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
39	4	Formación Soncco VI suroeste	184568	8495339	47	189	Estrato	F1	18	>20	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
40	4	Formación Soncco VI suroeste	184568	8495339	51	205	Estrato	F1		>20	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
41	4	Formación Soncco VI suroeste	184568	8495339	48	62	Secundaria	F3	10	0.7	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado

Ítem	N° de VE	Ubicación	Este	Norte	Dip	Dip_dir	Tipo de discontinuidad	N° de familia	Espaciado_cm	Persistencia_m	Abertura_mm	Rugosidad	Relleno	Alteración
42	4	Formación Soncco VI suroeste	184568	8495339	75	84	Secundaria	F3	32	0.45	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
43	4	Formación Soncco VI suroeste	184568	8495339	80	91	Secundaria	F3	34	0.8	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
44	4	Formación Soncco VI suroeste	184568	8495339	78	75	Secundaria	F3		1.5	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
45	5	Formación Soncco V suroeste	184526	8495765	49	180	Estrato	F1	60	>20	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
46	5	Formación Soncco V suroeste	184526	8495765	49	195	Estrato	F1	10	>20	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
47	5	Formación Soncco V suroeste	184526	8495765	50	175	Estrato	F1	36	>20	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
48	5	Formación Soncco V suroeste	184526	8495765	48	184	Estrato	F1	50	>20	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
49	5	Formación Soncco V suroeste	184526	8495765	50	188	Estrato	F1	40	>20	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
50	5	Formación Soncco V suroeste	184526	8495765	49	195	Estrato	F1		>20	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
51	5	Formación Soncco V suroeste	184526	8495765	47	342	Secundaria	F2	15	2.5	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
52	5	Formación Soncco V suroeste	184526	8495765	48	351	Secundaria	F2	36	2.5	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
53	5	Formación Soncco V suroeste	184526	8495765	39	353	Secundaria	F2	20	3.5	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
54	5	Formación Soncco V suroeste	184526	8495765	46	349	Secundaria	F2	18	3.5	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
55	5	Formación Soncco V suroeste	184526	8495765	41	334	Secundaria	F2	35	22	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
56	5	Formación Soncco V suroeste	184526	8495765	49	339	Secundaria	F2		2.5	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
57	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	42	212	Estrato	F1	35	>20	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
58	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	44	211	Estrato	F1	40	>20	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
59	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	44	214	Estrato	F1	55	>20	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
60	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	45	210	Estrato	F1	130	>20	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
61	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	42	210	Estrato	F1		>20	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
62	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	30	343	Secundaria	F2	110	6	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
63	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	35	350	Secundaria	F2	30	4	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
64	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	25	359	Secundaria	F2	80	5	2	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
65	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	33	371	Secundaria	F2	40	6	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
66	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	31	351	Secundaria	F2		7	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
67	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	45	83	Secundaria	F3	20	2	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
68	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	49	89	Secundaria	F3	25	1	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
69	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	53	83	Secundaria	F3	35	2	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
70	6	Formación Soncco IV suroeste	184337	8496027	51	81	Secundaria	F3		4	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
71	7	Formación Soncco III suroeste	183496	8496100	39	173	Estrato	F1	2	>20	1	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
72	7	Formación Soncco III suroeste	183496	8496100	23	145	Estrato	F1	70	>20	2	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
73	7	Formación Soncco III suroeste	183496	8496100	24	174	Estrato	F1	8	>20	9	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
74	7	Formación Soncco III suroeste	183496	8496100	32	181	Estrato	F1		>20	0	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
75	7	Formación Soncco III suroeste	183496	8496100	69	1	Secundaria	F2	70	1	2	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
76	7	Formación Soncco III suroeste	183496	8496100	60	28	Secundaria	F2	50	0.4	2	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
77	7	Formación Soncco III suroeste	183496	8496100	59	15	Secundaria	F2		1.2	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
78	7	Formación Soncco III suroeste	183496	8496100	64	78	Secundaria	F3	8	2.8	7	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
79	7	Formación Soncco III suroeste	183496	8496100	78	57	Secundaria	F3	12	2.4	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
80	7	Formación Soncco III suroeste	183496	8496100	77	62	Secundaria	F3	30	1.1	4	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
81	7	Formación Soncco III suroeste	183496	8496100	70	68	Secundaria	F3	32	1	2	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
82	7	Formación Soncco III suroeste	183496	8496100	64	62	Secundaria	F3		1	2	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
83	8	Formación Soncco II suroeste	183828	8496244	41	158	Estrato	F1	66	6	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
84	8	Formación Soncco II suroeste	183828	8496244	41	137	Estrato	F1	55	2	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
85	8	Formación Soncco II suroeste	183828	8496244	52	160	Estrato	F1	35	2.5	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado

Ítem	N° de VE	Ubicación	Este	Norte	Dip	Dip_dir	Tipo de discontinuidad	N° de familia	Espaciado_cm	Persistencia_m	Abertura_mm	Rugosidad	Relleno	Alteración
86	8	Formación Soncco II suroeste	183828	8496244	53	170	Estrato	F1		6	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
87	8	Formación Soncco II suroeste	183828	8496244	39	346	Secundaria	F2	60	3	2	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
88	8	Formación Soncco II suroeste	183828	8496244	42	332	Secundaria	F2	30	3.5	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
89	8	Formación Soncco II suroeste	183828	8496244	12	7	Secundaria	F2	50	3	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
90	8	Formación Soncco II suroeste	183828	8496244	21	3	Secundaria	F2	35	3	3	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
91	8	Formación Soncco II suroeste	183828	8496244	12	36	Secundaria	F2		2.5	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
92	9	Formación Soncco I suroeste	184176	8496498	46	185	Estrato	F1	15	>20	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
93	9	Formación Soncco I suroeste	184176	8496498	38	178	Estrato	F1	22	>20	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
94	9	Formación Soncco I suroeste	184176	8496498	43	187	Estrato	F1	40	>20	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
95	9	Formación Soncco I suroeste	184176	8496498	44	186	Estrato	F1	25	>20	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
96	9	Formación Soncco I suroeste	184176	8496498	42	184	Estrato	F1		>20	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
97	9	Formación Soncco I suroeste	184176	8496498	38	324	Secundaria	F2	7	0.6	0.5	Lisa	Ninguna	No meteorizado
98	9	Formación Soncco I suroeste	184176	8496498	41	337	Secundaria	F2	32	2.8	0.5	Lisa	Ninguna	No meteorizado
99	9	Formación Soncco I suroeste	184176	8496498	43	331	Secundaria	F2		2.6	1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
100	9	Formación Soncco I suroeste	184176	8496498	62	60	Secundaria	F3	28	0.9	3	Lisa	Ninguna	No meteorizado
101	9	Formación Soncco I suroeste	184176	8496498	55	45	Secundaria	F3	25	1	1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
102	9	Formación Soncco I suroeste	184176	8496498	64	51	Secundaria	F3		0.6	0	Lisa	Ninguna	No meteorizado
103	10	Formación Soncco I sureste	184961	8496561	45	204	Estrato	F1	86	7	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
104	10	Formación Soncco I sureste	184961	8496561	55	206	Estrato	F1	24	1.85	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
105	10	Formación Soncco I sureste	184961	8496561	43	199	Estrato	F1	33	11.60	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
106	10	Formación Soncco I sureste	184961	8496561	58	206	Estrato	F1		11.35	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
107	10	Formación Soncco I sureste	184961	8496561	34	16	Secundaria	F2		5	2	Lisa	Ninguna	No meteorizado
108	10	Formación Soncco I sureste	184961	8496561	32	64	Secundaria	F3	10	1	2	Lisa	Ninguna	No meteorizado
109	10	Formación Soncco I sureste	184961	8496561	30	59	Secundaria	F3	31	1.30	0.5	Lisa	Ninguna	No meteorizado
110	10	Formación Soncco I sureste	184961	8496561	30	62	Secundaria	F3	28	1.2	0.5	Lisa	Ninguna	No meteorizado
111	10	Formación Soncco I sureste	184961	8496561	37	75	Secundaria	F3	21	1.1	0.1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
112	10	Formación Soncco I sureste	184961	8496561	33	60	Secundaria	F3		2.1	4	Lisa	Ninguna	No meteorizado
113	11	Formación Soncco II sureste	184849	8496409	34	195	Estrato	F1	38	2	2	Lisa	Ninguna	No meteorizado
114	11	Formación Soncco II sureste	184849	8496409	34	200	Estrato	F1	46	4	1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
115	11	Formación Soncco II sureste	184849	8496409	35	202	Estrato	F1	35	6	1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
116	11	Formación Soncco II sureste	184849	8496409	34	199	Estrato	F1	24	6.5	1.5	Lisa	Ninguna	No meteorizado
117	11	Formación Soncco II sureste	184849	8496409	35	209	Estrato	F1	45	5	1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
118	11	Formación Soncco II sureste	184849	8496409	46	206	Estrato	F1		6	1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
119	11	Formación Soncco II sureste	184849	8496409	49	358	Secundaria	F2	18	2	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
120	11	Formación Soncco II sureste	184849	8496409	47	356	Secundaria	F2	74	1	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
121	11	Formación Soncco II sureste	184849	8496409	48	356	Secundaria	F2		2.9	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
122	11	Formación Soncco II sureste	184849	8496409	87	**299**	Secundaria	F4	46	3	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
123	11	Formación Soncco II sureste	184849	8496409	89	**291**	Secundaria	F4	66	2	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
124	11	Formación Soncco II sureste	184849	8496409	89	**252**	Secundaria	F4		2	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
125	12	Formación Soncco III sureste	184967	8496244	40	210	Estrato	F1	64	3	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
126	12	Formación Soncco III sureste	184967	8496244	42	195	Estrato	F1	20	2	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
127	12	Formación Soncco III sureste	184967	8496244	40	196	Estrato	F1	49	6	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
128	12	Formación Soncco III sureste	184967	8496244	41	198	Estrato	F1		4	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado

Ítem	N° de VE	Ubicación	Este	Norte	Dip	Dip_dir	Tipo de discontinuidad	N° de familia	Espaciado_cm	Persistencia_m	Abertura_mm	Rugosidad	Relleno	Alteración
129	12	Formación Soncco III sureste	184967	8496244	47	342	Secundaria	F2	44	4	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
130	12	Formación Soncco III sureste	184967	8496244	31	308	Secundaria	F2	12	2	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
131	12	Formación Soncco III sureste	184967	8496244	49	351	Secundaria	F2	18	1	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
132	12	Formación Soncco III sureste	184967	8496244	42	333	Secundaria	F2		0.8	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
133	12	Formación Soncco III sureste	184967	8496244	59	67	Secundaria	F3	72	2	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
134	12	Formación Soncco III sureste	184967	8496244	63	71	Secundaria	F3	60	5	1.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
135	12	Formación Soncco III sureste	184967	8496244	56	66	Secundaria	F3		1	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
136	13	Formación Soncco IV sureste	184967	8496244	42	193	Estrato	F1	120	3.5	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
137	13	Formación Soncco IV sureste	185790	8496009	41	206	Estrato	F1	19	2.3	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
138	13	Formación Soncco IV sureste	185790	8496009	42	189	Estrato	F1	28	8	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
139	13	Formación Soncco IV sureste	185790	8496009	41	203	Estrato	F1	10	2.2	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
140	13	Formación Soncco IV sureste	185790	8496009	44	199	Estrato	F1		9	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
141	13	Formación Soncco IV sureste	185790	8496009	40	355	Secundaria	F2	95	2.3	1.2	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
142	13	Formación Soncco IV sureste	185790	8496009	46	399	Secundaria	F2	90	0.92	0.1	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
143	13	Formación Soncco IV sureste	185790	8496009	48	322	Secundaria	F2		1.7	1	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
144	13	Formación Soncco IV sureste	185790	8496009	71	69	Secundaria	F3	25	3	0.1	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
145	13	Formación Soncco IV sureste	185790	8496009	69	71	Secundaria	F3		1.34	0.5	Ligeramente rugosa	Duro (calcita)	No meteorizado
146	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	47	203	Estrato	F1	80	11	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
147	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	43	194	Estrato	F1	34	12	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
148	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	45	198	Estrato	F1	25	8	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
149	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	47	204	Estrato	F1	51	11	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
150	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	41	204	Estrato	F1	22	13	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
151	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	46	203	Estrato	F1	70	9	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
152	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	45	196	Estrato	F1	13	13	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
153	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	44	193	Estrato	F1	25	13	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
154	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	47	201	Estrato	F1		13	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
155	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	44	341	Secundaria	F2	63	22	2	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
156	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	40	336	Secundaria	F2	24	7	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
157	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	44	340	Secundaria	F2	95	18	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
158	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	45	349	Secundaria	F2	60	8	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
159	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	41	330	Secundaria	F2		17	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
160	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	57	66	Secundaria	F3	48	24	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
161	14	Formación Soncco V sureste	185804	8495676	45	64	Secundaria	F3		2	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
162	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	48	202	Estrato	F1	24	3	2	Lisa	Ninguna	No meteorizado
163	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	42	196	Estrato	F1	74	2.5	0.1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
164	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	47	198	Estrato	F1	21	2	2	Lisa	Ninguna	No meteorizado
165	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	45	202	Estrato	F1	30	4	1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
166	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	46	203	Estrato	F1		1.7	0.1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
167	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	41	324	Secundaria	F2	33	2.2	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
168	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	46	319	Secundaria	F2	29	1.3	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
169	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	54	316	Secundaria	F2	34	2	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
170	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	44	334	Secundaria	F2		0.7	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
171	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	61	91	Secundaria	F3	45	2	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado

Ítem	N° de VE	Ubicación	Este	Norte	Dip	Dip_dir	Tipo de discontinuidad	N° de familia	Espaciado_cm	Persistencia_m	Abertura_mm	Rugosidad	Relleno	Alteración
172	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	60	99	Secundaria	F3	21	2.15	0	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
173	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	61	94	Secundaria	F3	14	2.3	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
174	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	62	98	Secundaria	F3	11	1.7	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
175	15	Formación Soncco VI sureste	185748	8495531	59	94	Secundaria	F3		1.8	1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
176	16	Formación Kayra este	184961	8496561	39	197	Estrato	F1	55	12	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
177	16	Formación Kayra este	184961	8496561	42	199	Estrato	F1	14	13	0.1	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
178	16	Formación Kayra este	184961	8496561	42	191	Estrato	F1	18	3	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
179	16	Formación Kayra este	184961	8496561	38	196	Estrato	F1	17	13	0.3	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
180	16	Formación Kayra este	184961	8496561	38	203	Estrato	F1	20	5	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
181	16	Formación Kayra este	184961	8496561	37	199	Estrato	F1	25	15	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
182	16	Formación Kayra este	184961	8496561	38	197	Estrato	F1	46	15	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
183	16	Formación Kayra este	184961	8496561	46	203	Estrato	F1		16	0.5	Ligeramente rugosa	Ninguna	No meteorizado
184	16	Formación Kayra este	184961	8496561	37	4	Secundaria	F2	7	3	0.3	Lisa	Ninguna	No meteorizado
185	16	Formación Kayra este	184961	8496561	38	10	Secundaria	F2	6	1.1	1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
186	16	Formación Kayra este	184961	8496561	44	8	Secundaria	F2	31	1.85	0.1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
187	16	Formación Kayra este	184961	8496561	50	4	Secundaria	F2		1	0.1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
188	16	Formación Kayra este	184961	8496561	65	66	Secundaria	F3	1	4	0.1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
189	16	Formación Kayra este	184961	8496561	59	66	Secundaria	F3	40	0.9	0.1	Lisa	Ninguna	No meteorizado
190	16	Formación Kayra este	184961	8496561	45	65	Secundaria	F3		1.4	0.3	Lisa	Ninguna	No meteorizado

Anexo 6. Tablas de Intensidades de Precipitación

Intensidades de precipitación, para diferentes duraciones y periodos de retorno.										
Duración	**TR2**	**TR5**	**TR10**	**TR30**	**TR50**	**TR75**	**TR100**	**TR200**	**TR500**	**TR1000**
1-hr	**11.9**(11.3-12.5)	**13.5**(12.8-14.4)	**15.0**(14.1-16.1)	**17.5**(16.3-19.1)	**18.9**(17.5-20.6)	**20.0**(18.5-22.0)	**20.8**(19.3-23.0)	**23.0**(21.2-25.6)	**26.3**(24.0-29.5)	**29.0**(26.4-32.9)
2-hr	**8.0**(7.6-8.4)	**9.1**(8.6-9.7)	**10.0**(9.4-10.8)	**11.8**(11.0-12.8)	**12.7**(11.8-13.9)	**13.4**(12.4-14.8)	**14.0**(12.9-15.4)	**15.5**(14.2-17.2)	**17.6**(16.1-19.8)	**19.5**(17.7-22.1)
3-hr	**6.3**(6.0-6.6)	**7.2**(6.8-7.7)	**8.0**(7.5-8.5)	**9.3**(8.7-10.1)	**10.0**(9.3-11.0)	**10.6**(9.9-11.7)	**11.1**(10.2-12.2)	**12.2**(11.3-13.6)	**14.0**(12.8-15.7)	**15.4**(14.1-17.5)
4-hr	**5.3**(5.1-5.6)	**6.1**(5.8-6.5)	**6.7**(6.3-7.2)	**7.9**(7.4-8.6)	**8.5**(7.9-9.3)	**9.0**(8.3-9.9)	**9.4**(8.7-10.4)	**10.4**(9.6-11.5)	**11.8**(10.8-13.3)	**13.1**(11.9-14.8)
5-hr	**4.7**(4.5-5.0)	**5.4**(5.1-5.7)	**5.9**(5.6-6.4)	**6.9**(6.5-7.6)	**7.5**(6.9-8.2)	**7.9**(7.3-8.7)	**8.3**(7.6-9.1)	**9.1**(8.4-10.2)	**10.4**(9.5-11.7)	**11.5**(10.5-13.0)
6-hr	**4.2**(4.0-4.5)	**4.8**(4.6-5.1)	**5.3**(5.0-5.7)	**6.3**(5.8-6.8)	**6.7**(6.3-7.4)	**7.1**(6.6-7.8)	**7.4**(6.9-8.2)	**8.2**(7.6-9.1)	**9.4**(8.6-10.5)	**10.4**(9.4-11.7)
7-hr	**3.9**(3.7-4.1)	**4.4**(4.2-4.7)	**4.9**(4.6-5.2)	**5.7**(5.3-6.2)	**6.2**(5.7-6.7)	**6.5**(6.1-7.2)	**6.8**(6.3-7.5)	**7.5**(6.9-8.4)	**8.6**(7.8-9.6)	**9.5**(8.6-10.7)
8-hr	**3.6**(3.4-3.8)	**4.1**(3.9-4.4)	**4.5**(4.3-4.9)	**5.3**(4.9-5.8)	**5.7**(5.3-6.2)	**6.0**(5.6-6.6)	**6.3**(5.8-7.0)	**7.0**(6.4-7.7)	**7.9**(7.3-8.9)	**8.8**(8.0-10.0)
9-hr	**3.4**(3.2-3.5)	**3.8**(3.6-4.1)	**4.2**(4.0-4.5)	**5.0**(4.6-5.4)	**5.3**(5.0-5.8)	**5.7**(5.2-6.2)	**5.9**(5.4-6.5)	**6.5**(6.0-7.2)	**7.4**(6.8-8.3)	**8.2**(7.5-9.3)
10-hr	**3.2**(3.0-3.3)	**3.6**(3.4-3.8)	**4.0**(3.7-4.3)	**4.7**(4.3-5.1)	**5.0**(4.7-5.5)	**5.3**(4.9-5.8)	**5.5**(5.1-6.1)	**6.1**(5.6-6.8)	**7.0**(6.4-7.9)	**7.7**(7.0-8.8)
11-hr	**3.0**(2.8-3.1)	**3.4**(3.2-3.6)	**3.8**(3.5-4.0)	**4.4**(4.1-4.8)	**4.8**(4.4-5.2)	**5.0**(4.7-5.5)	**5.2**(4.9-5.8)	**5.8**(5.3-6.5)	**6.6**(6.1-7.4)	**7.3**(6.7-8.3)
12-hr	**2.8**(2.7-3.0)	**3.2**(3.1-3.5)	**3.6**(3.4-3.8)	**4.2**(3.9-4.6)	**4.5**(4.2-4.9)	**4.8**(4.4-5.3)	**5.0**(4.6-5.5)	**5.5**(5.1-6.1)	**6.3**(5.8-7.1)	**7.0**(6.3-7.9)
13-hr	**2.7**(2.6-2.9)	**3.1**(2.9-3.3)	**3.4**(3.2-3.7)	**4.0**(3.7-4.4)	**4.3**(4.0-4.7)	**4.6**(4.2-5.0)	**4.8**(4.4-5.3)	**5.3**(4.9-5.9)	**6.0**(5.5-6.8)	**6.6**(6.0-7.5)
14-hr	**2.6**(2.5-2.7)	**3.0**(2.8-3.2)	**3.3**(3.1-3.5)	**3.8**(3.6-4.2)	**4.1**(3.8-4.5)	**4.4**(4.1-4.8)	**4.6**(4.2-5.0)	**5.0**(4.6-5.6)	**5.8**(5.3-6.5)	**6.4**(5.8-7.2)
15-hr	**2.5**(2.4-2.6)	**2.9**(2.7-3.0)	**3.2**(3.0-3.4)	**3.7**(3.4-4.0)	**4.0**(3.7-4.3)	**4.2**(3.9-4.6)	**4.4**(4.1-4.8)	**4.9**(4.5-5.4)	**5.5**(5.1-6.2)	**6.1**(5.6-6.9)
16-hr	**2.4**(2.3-2.5)	**2.7**(2.6-2.9)	**3.0**(2.9-3.3)	**3.6**(3.3-3.9)	**3.8**(3.6-4.2)	**4.1**(3.8-4.5)	**4.2**(3.9-4.7)	**4.7**(4.3-5.2)	**5.3**(4.9-6.0)	**5.9**(5.4-6.7)
17-hr	**2.3**(2.2-2.5)	**2.7**(2.5-2.8)	**2.9**(2.8-3.1)	**3.4**(3.2-3.7)	**3.7**(3.4-4.0)	**3.9**(3.6-4.3)	**4.1**(3.8-4.5)	**4.5**(4.2-5.0)	**5.2**(4.7-5.8)	**5.7**(5.2-6.5)
18-hr	**2.3**(2.1-2.4)	**2.6**(2.4-2.7)	**2.8**(2.7-3.0)	**3.3**(3.1-3.6)	**3.6**(3.3-3.9)	**3.8**(3.5-4.2)	**4.0**(3.7-4.4)	**4.4**(4.0-4.9)	**5.0**(4.6-5.6)	**5.5**(5.0-6.2)
19-hr	**2.2**(2.1-2.3)	**2.5**(2.4-2.7)	**2.8**(2.6-3.0)	**3.2**(3.0-3.5)	**3.5**(3.2-3.8)	**3.7**(3.4-4.0)	**3.8**(3.5-4.2)	**4.2**(3.9-4.7)	**4.8**(4.4-5.4)	**5.3**(4.9-6.1)
20-hr	**2.1**(2.0-2.2)	**2.4**(2.3-2.6)	**2.7**(2.5-2.9)	**3.1**(2.9-3.4)	**3.4**(3.1-3.7)	**3.6**(3.3-3.9)	**3.7**(3.4-4.1)	**4.1**(3.8-4.6)	**4.7**(4.3-5.3)	**5.2**(4.7-5.9)
21-hr	**2.1**(2.0-2.2)	**2.4**(2.2-2.5)	**2.6**(2.4-2.8)	**3.0**(2.8-3.3)	**3.3**(3.0-3.6)	**3.5**(3.2-3.8)	**3.6**(3.3-4.0)	**4.0**(3.7-4.4)	**4.6**(4.2-5.1)	**5.0**(4.6-5.7)
22-hr	**2.0**(1.9-2.1)	**2.3**(2.2-2.4)	**2.5**(2.4-2.7)	**3.0**(2.8-3.2)	**3.2**(3.0-3.5)	**3.4**(3.1-3.7)	**3.5**(3.3-3.9)	**3.9**(3.6-4.3)	**4.4**(4.1-5.0)	**4.9**(4.5-5.6)
23-hr	**2.0**(1.9-2.1)	**2.2**(2.1-2.4)	**2.5**(2.3-2.6)	**2.9**(2.7-3.1)	**3.1**(2.9-3.4)	**3.3**(3.1-3.6)	**3.4**(3.2-3.8)	**3.8**(3.5-4.2)	**4.3**(4.0-4.9)	**4.8**(4.4-5.4)
24-hr	**1.9**(1.8-2.0)	**2.2**(2.1-2.3)	**2.4**(2.3-2.6)	**2.8**(2.6-3.1)	**3.0**(2.8-3.3)	**3.2**(3.0-3.5)	**3.4**(3.1-3.7)	**3.7**(3.4-4.1)	**4.2**(3.9-4.8)	**4.7**(4.3-5.3)

Fuente: SENAMHI (2025).

Anexo 7. Inventario y Aforo Volumétrico en Manantiales

N°	Código	Fecha	Caudal total (l/s)	Caudal parcial (l/s)	Volumen (l)	Tiempo 1 (s)	Tiempo 2 (s)	Tiempo 3 (s)	Tiempo 4 (s)	Tiempo 5 (s)	Tiempo 6 (s)	Tiempo 7 (s)	Tiempo promedio (s)
1	SoIV-3	30/01/2025	0.76	0.53	4.50	8.62	8.51	8.37	8.36	8.23			8.42
				0.23	4.50	20.14	20.00	19.89	18.82	20.38			19.85
				0.10	2.00	19.62	20.16	19.88	19.69	19.09			19.69
				0.09	4.00	43.12	41.04	42.02	43.02	43.41			42.52
2	SoIV-1	30/01/2025	0.71	0.03	3.75	127.57	127.98	129.70	132.06	135.06			130.47
				0.06	2.75	42.92	46.18	47.41	49.60	46.61			46.54
				0.24	4.00	16.63	16.97	16.32	16.50	16.57			16.60
				0.19	4.50	23.72	24.24	24.01	23.68	24.52			24.03
3	SoII-1	30/01/2025	0.01	0.01	1.50	160.73	159.47	160.99	147.23	147.85			155.25
4	SoI-2	30/01/2025	0.02	0.02	2.00	85.01	81.93	80.25	80.76	80.32			81.65
5	Ky-01	5/02/2025	0.03	0.03	1.00	39.85	39.90	40.05	39.16	38.76			39.54
				0.05	1.00	18.31	19.54	19.00	19.40	18.86			19.02
6	SoV-3	5/02/2025	0.94	0.07	1.00	13.92	13.83	13.77	13.88	13.34			13.75
				0.81	4.00	5.11	4.94	5.00	4.70	4.84			4.92
7	SoIV-2	5/02/2025	0.67	0.67	4.00	6.19	6.19	5.80	5.72	6.15			6.01
8	SoI-1	5/02/2025	0.02	0.02	1.00	55.78	56.37	53.37	53.87	53.40			54.56
9	SoVI-1	3/02/2025	1.21	0.13	1.00	7.90	7.76	8.07	7.60	7.86			7.84
				0.12	1.00	8.30	8.12	8.42	8.64	8.44			8.38
				0.10	1.00	9.97	9.67	9.51	9.36	9.41			9.58
				0.61	4.00	6.42	6.82	6.49	6.47	6.64			6.57
				0.12	1.00	8.22	7.87	8.35	7.97	7.98			8.08
				0.13	1.00	7.92	7.44	7.81	7.60	7.64			7.68
				0.84	4.00	4.76	4.54	4.63	4.82	4.97			4.74
10	SoV-1	3/02/2025	1.75	0.59	4.00	6.57	6.72	6.70	6.94	7.00			6.79
				0.32	4.00	12.65	13.03	12.42	12.62	12.41			12.63
11	SoV-2	3/02/2025	1.12	0.79	4.00	5.34	4.95	5.12	5.14	4.87			5.08
				0.33	4.00	11.70	12.02	11.94	12.31	12.19			12.03
12	Ky-02	19/02/2025	0.02	0.02	1.00	51.48	49.95	49.42	48.57	50.00			49.88
13	SoI-03	19/02/2025	0.01	0.01	1.00	130.82	130.49	132.01	131.23	133.75			131.66
14	SoI-04	19/02/2025	0.03	0.03	1.00	31.76	31.21	31.46	31.64	31.82			31.58
15	SoI-05	19/02/2025	0.13	0.13	1.00	7.12	7.47	7.60	7.75	7.35			7.46
16	SoI-06	19/02/2025	0.05	0.05	1.00	18.60	18.41	17.92	18.13	18.12			18.24
17	Qel-01	19/02/2025	0.20	0.20	1.00	5.61	4.26	5.37	4.97	4.88			5.02
18	Ky-03	19/02/2025	0.10	0.10	1.00	10.13	9.58	9.94	9.42	9.77			9.77
19	Ky-04	19/02/2025	0.11	0.11	1.00	8.94	9.05	8.92	8.98	8.87			8.95
20	Ky-05	19/02/2025	0.86	0.86	4.00	4.14	4.87	4.64	4.72	4.78	4.68	4.79	4.66
21	Ky-06	20/02/2025	0.07	0.07	2.75	40.10	40.10	40.10	40.10	40.10			40.10

Anexo 8. Ensayo de Permeabilidad Lefranc en Depósitos No Consolidados

ENSAYO DE PERMEABILIDAD LEFRANC			
PROYECTO: MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA EN EL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2024-2025			**ENSAYO:** K-1
			FECHA DE EJECUCIÓN: 25 - 01 - 2025
			LITOLOGÍA: SUELO LIMO-ARENOSO (DEPÓSITO ELUVIAL)
COORDENADAS:	**E:** 186039	**N:** 8496750	**REGISTRADO:** CARMEN PACCO / RAI R. TTITO

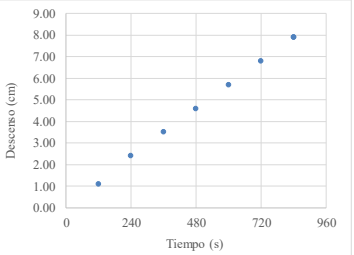
DATOS DE POZO

Longitud de la zona filtrante en cm (L)	150.00
Diámetro de la zona filtrante en cm (d)	5.08

CARGA VARIABLE

Tiempo (s)	Descenso (cm)	Δ Descenso (cm)	h1 (cm)	h2 (cm)	LN(h1/h2)	K (cm/s)	K (m/s)
120	1.10	1.10	150.00	148.90	0.01	5.38E-06	5.38E-08
240	2.40	1.30	148.90	147.60	0.01	6.41E-06	6.41E-08
360	3.50	1.10	147.60	146.50	0.01	5.47E-06	5.47E-08
480	4.60	1.10	146.50	145.40	0.01	5.51E-06	5.51E-08
600	5.70	1.10	145.40	144.30	0.01	5.55E-06	5.55E-08
720	6.80	1.10	144.30	143.20	0.01	5.59E-06	5.59E-08
840	7.90	1.10	143.20	142.10	0.01	5.64E-06	5.64E-08

K (cm/s)	5.65E-06
K (m/s)	5.65E-08
K (m/día)	4.88E-03







ENSAYO DE PERMEABILIDAD LEFRANC			
PROYECTO: MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA EN EL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2024-2025			**ENSAYO:** K-2
			FECHA DE EJECUCIÓN: 25 - 01 - 2025
			LITOLOGÍA: SUELO LIMO-ARCILLOSO (DEPÓSITO DELUVIAL)
COORDENADAS:	**E:** 185486	**N:** 8496211	**REGISTRADO:** CARMEN PACCO / RAI R. TTITO

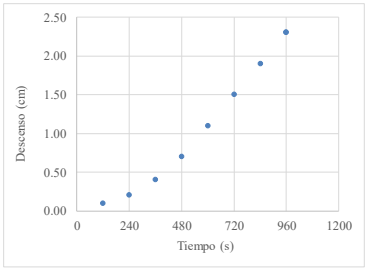
DATOS DE POZO

Longitud de la zona filtrante en cm (L)	150.00
Diámetro de la zona filtrante en cm (d)	5.08

CARGA VARIABLE

Tiempo (s)	Descenso (cm)	Δ Descenso (cm)	h1 (cm)	h2 (cm)	LN(h1/h2)	K (cm/s)	K (m/s)
120	0.10	0.10	150.00	149.90	0.001	4.87E-07	4.87E-09
240	0.20	0.10	149.90	149.80	0.001	4.88E-07	4.88E-09
360	0.40	0.20	149.80	149.60	0.001	9.76E-07	9.76E-09
480	0.70	0.30	149.60	149.30	0.002	1.47E-06	1.47E-08
600	1.10	0.40	149.30	148.90	0.003	1.96E-06	1.96E-08
720	1.50	0.40	148.90	148.50	0.003	1.97E-06	1.97E-08
840	1.90	0.40	148.50	148.10	0.003	1.97E-06	1.97E-08
960	2.30	0.40	148.10	147.70	0.003	1.98E-06	1.98E-08

K (cm/s)	1.41E-06
K (m/s)	1.41E-08
K (m/día)	1.22E-03







ENSAYO DE PERMEABILIDAD LEFRANC

PROYECTO: MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA EN EL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2024-2025	**ENSAYO:** K-3
	FECHA DE EJECUCIÓN: 26 - 01 - 2025
	LITOLOGÍA: SUELO LIMOSO (DEPÓSITO DELUVIO-COLUVIAL)
COORDENADAS: **E:** 183933 **N:** 8495924	**REGISTRADO:** CARMEN PACCO / RAI R. TTITO

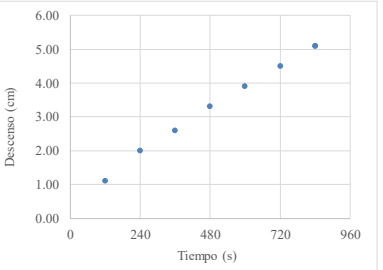
DATOS DE POZO

Longitud de la zona filtrante en cm (L)	150.00
Diámetro de la zona filtrante en cm (d)	5.08

CARGA VARIABLE

Tiempo (s)	Descenso (cm)	Δ Descenso (cm)	h1 (cm)	h2 (cm)	LN(h1/h2)	K (cm/s)	K (m/s)
120	1.10	1.10	150.00	148.90	0.007	5.38E-06	5.38E-08
240	2.00	0.90	148.90	148.00	0.006	4.43E-06	4.43E-08
360	2.60	0.60	148.00	147.40	0.004	2.97E-06	2.97E-08
480	3.30	0.70	147.40	146.70	0.005	3.48E-06	3.48E-08
600	3.90	0.60	146.70	146.10	0.004	3.00E-06	3.00E-08
720	4.50	0.60	146.10	145.50	0.004	3.01E-06	3.01E-08
840	5.10	0.60	145.50	144.90	0.004	3.02E-06	3.02E-08

K (cm/s)	3.61E-06
K (m/s)	3.61E-08
K (m/día)	3.12E-03







ENSAYO DE PERMEABILIDAD LEFRANC

PROYECTO: MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA EN EL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2024-2025	**ENSAYO:** K-4
	FECHA DE EJECUCIÓN: 24 - 01 - 2025
	LITOLOGÍA: SUELO ARENOSO-LIMOSO (DEPÓSITO DELUVIAL)
COORDENADAS: **E:** 185458 **N:** 8495947	**REGISTRADO:** CARMEN PACCO / RAI R. TTITO

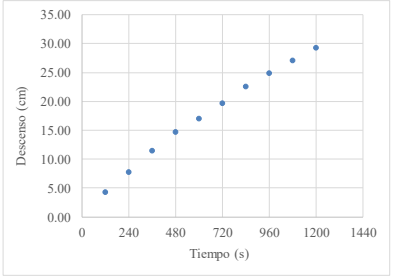
DATOS DE POZO

Longitud de la zona filtrante en cm (L)	150.00
Diámetro de la zona filtrante en cm (d)	5.08

CARGA VARIABLE

Tiempo (s)	Descenso (cm)	Δ Descenso (cm)	h1 (cm)	h2 (cm)	LN(h1/h2)	K (cm/s)	K (m/s)
120	4.20	4.20	150.00	145.80	0.03	2.08E-05	2.08E-07
240	7.70	3.50	145.80	142.30	0.02	1.78E-05	1.78E-07
360	11.40	3.70	142.30	138.60	0.03	1.93E-05	1.93E-07
480	14.70	3.30	138.60	135.30	0.02	1.76E-05	1.76E-07
600	17.00	2.30	135.30	133.00	0.02	1.25E-05	1.25E-07
720	19.60	2.60	133.00	130.40	0.02	1.44E-05	1.44E-07
840	22.50	2.90	130.40	127.50	0.02	1.64E-05	1.64E-07
960	24.80	2.30	127.50	125.20	0.02	1.33E-05	1.33E-07
1080	27.00	2.20	125.20	123.00	0.02	1.30E-05	1.30E-07
1200	29.20	2.20	123.00	120.80	0.02	1.32E-05	1.32E-07

K (cm/s)	1.58E-05
K (m/s)	1.58E-07
K (m/día)	1.37E-02







ENSAYO DE PERMEABILIDAD LEFRANC

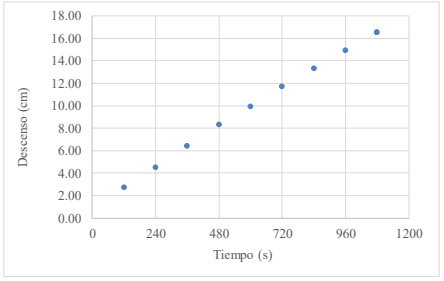
PROYECTO: MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA EN EL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2024-2025	**ENSAYO:** K-5
	FECHA DE EJECUCIÓN: 26 - 01 - 2025
	LITOLOGÍA: SUELO LIMO-ARENOSO (DEPÓSITO DELUVIO-COLUVIAL)
COORDENADAS: **E:** 183957 **N:** 8495843	**REGISTRADO:** CARMEN PACCO / RAI R. TTITO

DATOS DE POZO

Longitud de la zona filtrante en cm (L)	150.00
Diámetro de la zona filtrante en cm (d)	5.08

CARGA VARIABLE

Tiempo (s)	Descenso (cm)	Δ Descenso (cm)	h1 (cm)	h2 (cm)	LN(h1/h2)	K (cm/s)	K (m/s)
120	2.70	2.70	150.00	147.30	0.02	1.33E-05	1.33E-07
240	4.50	1.80	147.30	145.50	0.01	8.99E-06	8.99E-08
360	6.40	1.90	145.50	143.60	0.01	9.61E-06	9.61E-08
480	8.30	1.90	143.60	141.70	0.01	9.74E-06	9.74E-08
600	9.90	1.60	141.70	140.10	0.01	8.30E-06	8.30E-08
720	11.70	1.80	140.10	138.30	0.01	9.45E-06	9.45E-08
840	13.30	1.60	138.30	136.70	0.01	8.51E-06	8.51E-08
960	14.90	1.60	136.70	135.10	0.01	8.61E-06	8.61E-08
1080	16.50	1.60	135.10	133.50	0.01	8.71E-06	8.71E-08
K (cm/s)		9.46E-06					
K (m/s)		9.46E-08					
K (m/día)		8.18E-03					







ENSAYO DE PERMEABILIDAD LEFRANC

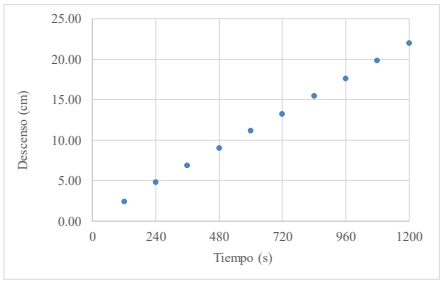
PROYECTO: MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DE LA MICROCUENCA LA RINCONADA EN EL DISTRITO DE SAN SEBASTIÁN – CUSCO 2024-2025	**ENSAYO:** K-6
	FECHA DE EJECUCIÓN: 01 - 02 - 2025
	LITOLOGÍA: SUELO ARENOSO (FM. SAN SEBASTIÁN)
COORDENADAS: **E:** 183957 **N:** 8495843	**REGISTRADO:** CARMEN PACCO / RAI R. TTITO

DATOS DE POZO

Longitud de la zona filtrante en cm (L)	150.00
Diámetro de la zona filtrante en cm (d)	5.08

CARGA VARIABLE

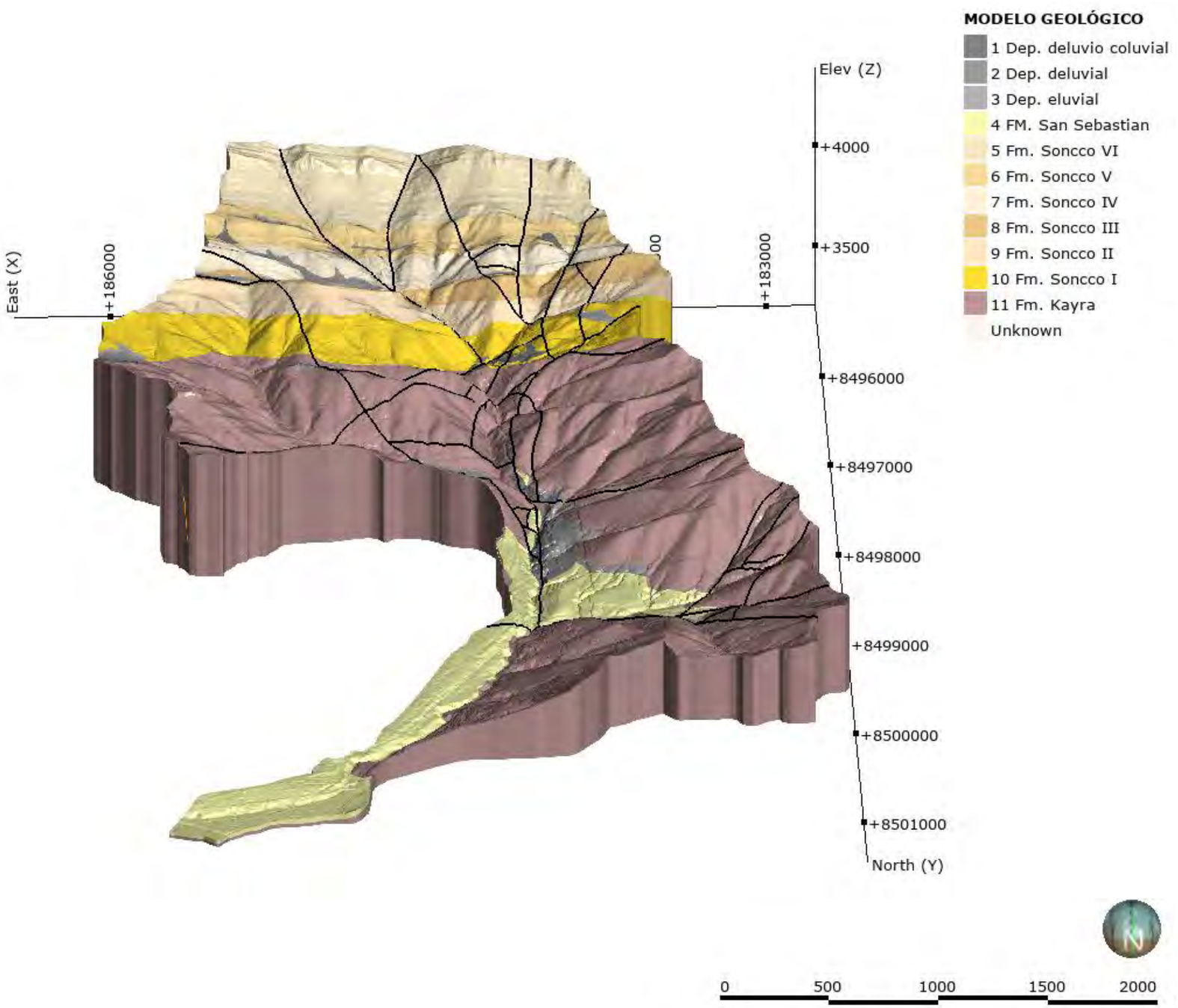
Tiempo (s)	Descenso (cm)	Δ Descenso (cm)	h1 (cm)	h2 (cm)	LN(h1/h2)	K (cm/s)	K (m/s)
120	2.40	2.40	150.00	147.60	0.02	1.18E-05	1.18E-07
240	4.80	2.40	147.60	145.20	0.02	1.20E-05	1.20E-07
360	6.80	2.00	145.20	143.20	0.01	1.01E-05	1.01E-07
480	9.00	2.20	143.20	141.00	0.02	1.13E-05	1.13E-07
600	11.10	2.10	141.00	138.90	0.02	1.10E-05	1.10E-07
720	13.20	2.10	138.90	136.80	0.02	1.11E-05	1.11E-07
840	15.40	2.20	136.80	134.60	0.02	1.18E-05	1.18E-07
960	17.60	2.20	134.60	132.40	0.02	1.20E-05	1.20E-07
1080	19.80	2.20	132.40	130.20	0.02	1.22E-05	1.22E-07
1200	22.00	2.20	130.20	128.00	0.02	1.25E-05	1.25E-07
K (cm/s)		1.16E-05					
K (m/s)		1.16E-07					
K (m/día)		1.00E-02					



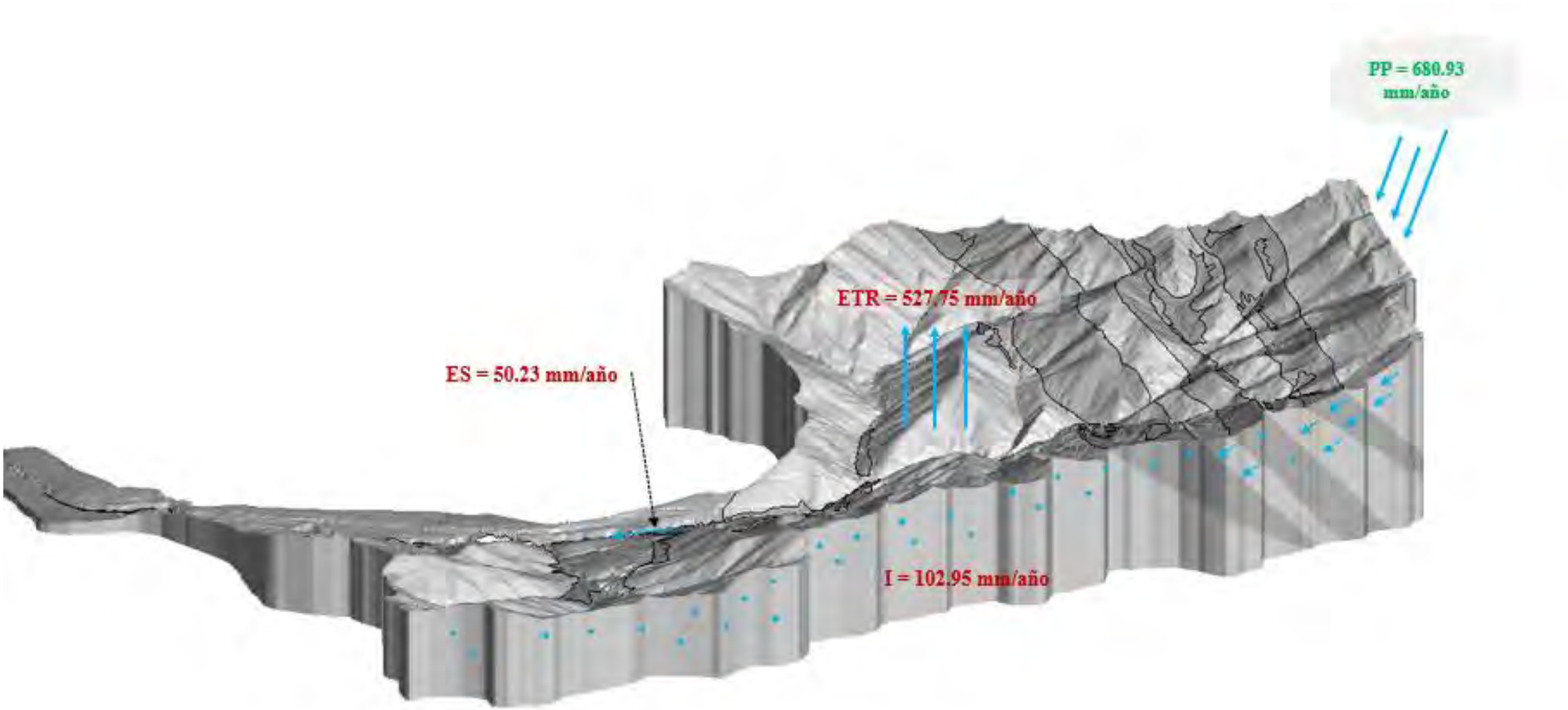


Anexo 9. Modelos

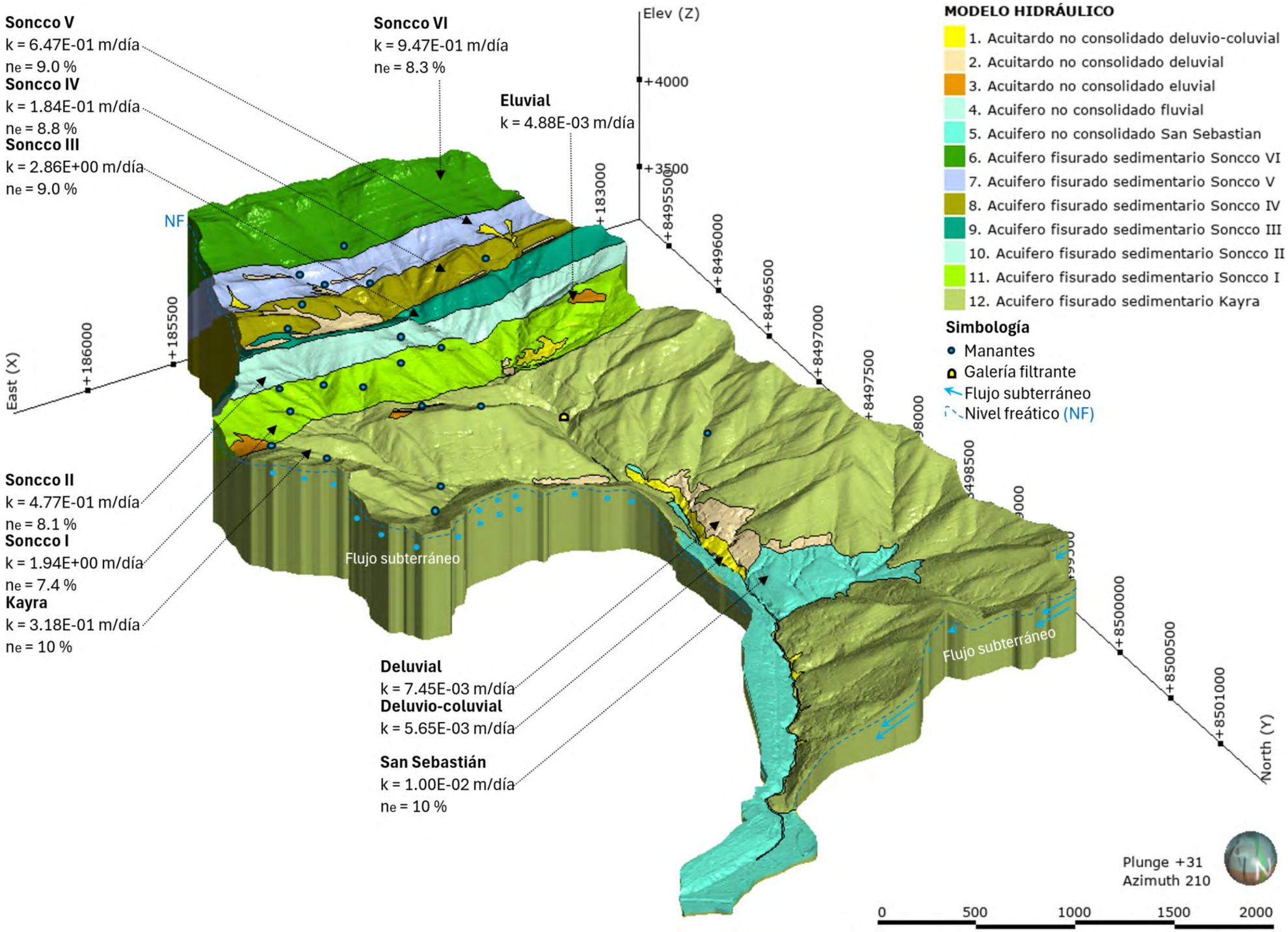
Anexo 9a. Modelo geológico



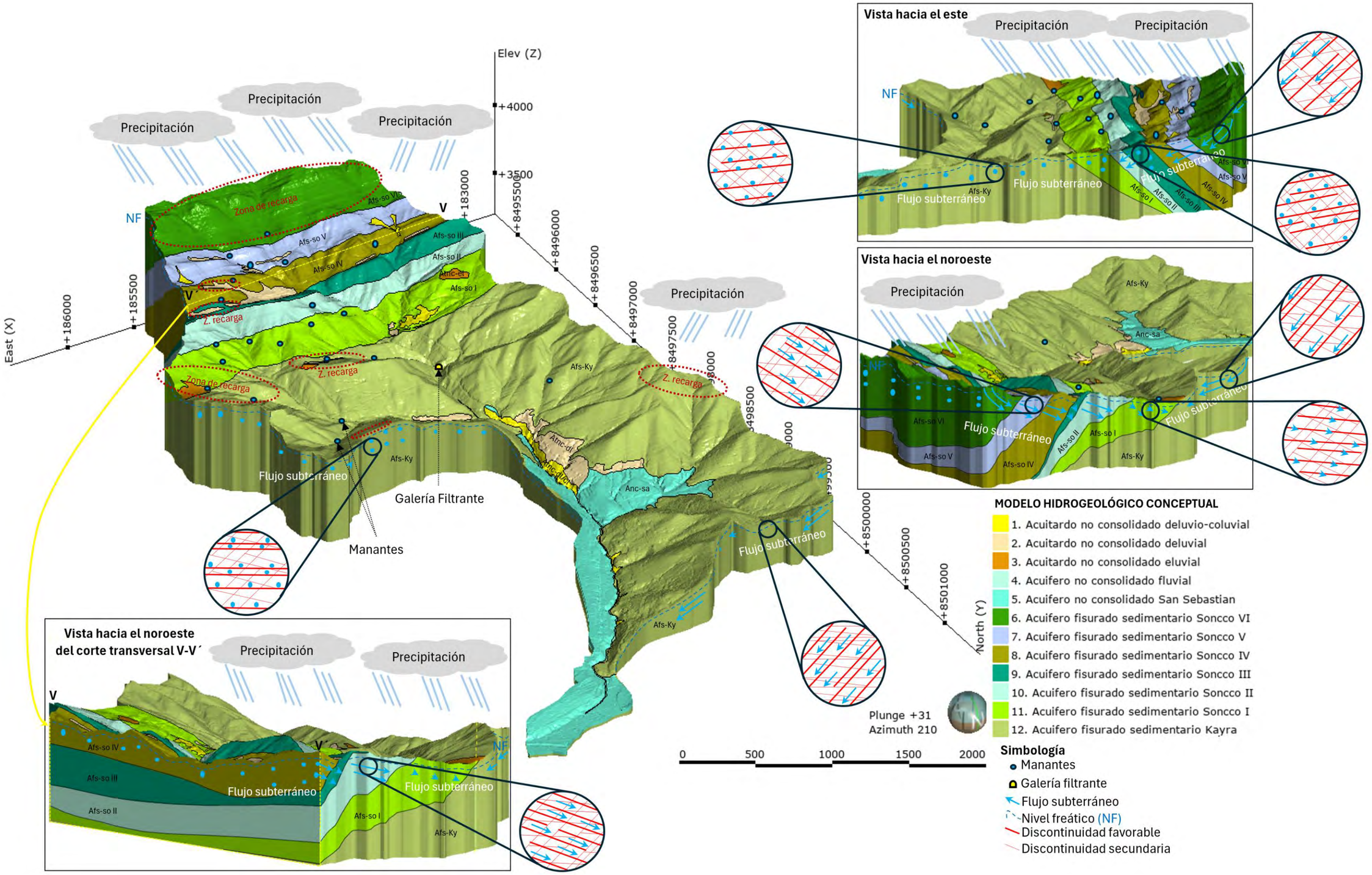
Anexo 9b. Modelo hidrológico



Anexo 9c. Modelo hidráulico



Anexo 9d. Modelo hidrogeológico conceptual



Anexo 10. Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Metodología
Problema general	**Objetivo general**	**Hipótesis general**	
¿Cómo es la dinámica del flujo subterráneo en la microcuenca La Rinconada mediante el desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual y numérico para su gestión sostenible?	Determinar la dinámica del flujo subterráneo mediante el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual y numérico	El modelo hidrogeológico conceptual y numérico permite determinar la dinámica del flujo subterráneo	
Problemas específicos	**Objetivos específicos**	**Hipótesis específicas**	
1. ¿Cuáles son las características geomorfológicas y geológicas de la microcuenca La Rinconada para definir su influencia en la dinámica del flujo subterráneo? 2. ¿Cuáles son los parámetros hidrológicos que favorecen a la recarga del flujo subterráneo de la microcuenca La Rinconada? 3. ¿Cuáles son los parámetros y las unidades hidrogeológicas para determinar las direcciones preferenciales del flujo subterráneo? 4. ¿Cómo es el modelo hidrogeológico conceptual de la microcuenca La Rinconada para la interpretación de la dinámica del flujo subterráneo? 5. ¿Cómo es el modelo hidrogeológico numérico mediante el software FEFLOW para la interpretación de la dinámica del flujo subterráneo?	1. Caracterizar geomorfológica y geológicamente la microcuenca La Rinconada para definir su influencia en la dinámica del flujo subterráneo. 2. Determinar los parámetros hidrológicos que favorecen a la recarga del flujo subterráneo de la microcuenca La Rinconada. 3. Determinar los parámetros hidrogeológicos y definir las unidades hidrogeológicas para determinar las direcciones preferenciales del flujo subterráneo. 4. Desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual de la microcuenca La Rinconada para interpretar la dinámica del flujo subterráneo. 5. Desarrollar y calibrar el modelo hidrogeológico numérico mediante el software FEFLOW para interpretar la dinámica del flujo subterráneo.	1. En el contexto geomorfológico las laderas de montaña baja con pendiente fuerte y en el contexto geológico las formaciones Kayra y Soncco controlan la dinámica del flujo subterráneo porque estas permiten la infiltración del agua. 2. El parámetro hidrológico que aporta a la recarga de los acuíferos fisurados sedimentarios de Kayra y Soncco es la precipitación. 3. Los parámetros hidrogeológicos de conductividad hidráulica y de porosidad efectiva son mayores a 10^{-2} m/día y a 5% respectivamente, y poseen condiciones favorables para el transporte del flujo subterráneo, teniendo a los acuíferos fisurados sedimentarios Kayra y Soncco que influyen en la dirección del flujo subterráneo dado por su porosidad secundaria, obteniéndose una dirección preferencial del flujo subterráneo hacia el norte, que se ajusta a la gradiente hidráulica. 4. El desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual es producto de la integración del contexto geomorfológico-geológico, hidrológico e hidrogeológico en la microcuenca La Rinconada que permite representar las líneas de flujo subterráneo con dirección predominante hacia el norte. 5. El modelo numérico muestra el comportamiento del flujo subterráneo mediante el software FEFLOW en base a la piezometría determinada por los manantiales aflorantes en superficie, con un RMS Normalizado menor al 10%.	• **Enfoque de la Investigación:** Mixto. • **Tipo de Investigación:** I. Aplicada. • **Alcance de Investigación:** Explicativo. • **Diseño de Investigación:** D. no experimental. • **Población:** La microcuenca La Rinconada • **Muestra:** No probabilística. • **Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos:** Cartografiado, ensayos Lefranc, aforos y modelado hidrogeológico conceptual y numérico con FEFLOW