Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

Modelación hidrogeológica conceptual y numérica del campo de flujo en geometrías fracturadas, caso: Deslizamiento N°03 –Huancavelica - 2023

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Jean Carlo ORTIZ FLORES

ASESOR

Mg. Rubén Esaú MOGROVEJO GUTIÉRREZ

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Ortiz, J. (2026). *Modelación hidrogeológica conceptual y numérica del campo de flujo en geometrías fracturadas, caso: Deslizamiento N°03 –Huancavelica - 2023*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Jean Carlo Ortiz Flores
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	46189039
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0004-6811-2559
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Rubén Esau Mogrovejo Gutierrez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10623893
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-3254-7636
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Douglas Donal Sarango Julca
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07136313
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Carlos Carbonel Huamán
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08772534
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Rubén Esau Mogrovejo Gutiérrez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10623893
Grupo de investigación	
Agencia de financiamiento	PROPIO

Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Huancavelica Provincia: Tayacaja Distrito: Colcabamba Latitud: 12°21'00'' S Longitud:74°35'00'' W
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2024-2026
URL de disciplinas OCDE	INGENIERÍA MECÁNICA https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01

Datos de investigación	
Línea de investigación	Hidrología, Hidrogeología

UNMSM
Firmado digitalmente por ARAMBULO MANRIQUE Miguel Ernesto FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 09.06.2026 12:42:15 -05:00

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú, Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO DE FLUIDOS

Siendo las 11:00 am del jueves 28 de mayo del 2026, en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, bajo la presidencia del Dr. Ing. DOUGLAS SARANGO JULCA y con la asistencia del asesor Mg. Ing. RUBÉN MOGROVEJO GUTIÉRREZ, y miembro Dr. Ing. CARLOS CARBONEL HUAMÁN se dio inicio a la sesión pública de sustentación de tesis para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la sustentación y aprobación de una tesis del Bachiller:

ORTIZ FLORES JEAN CARLO

El presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la tesis, así corno del resumen del expediente e invitó al citado Bachiller a realizar la presentación y exposición de su tesis titulada "MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA CONCEPTUAL Y NUMÉRICA DEL CAMPO DE FLUJO EN GEOMETRÍAS FRACTURADAS, CASO: DESLIZAMIENTO N°03 – HUANCAVELICA - 2023".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el presidente del mismo, invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la Sala de Sesión, para dar lectura a la calificación obtenida por el Bachiller, la misma que es:

17	DIECISIETE	APROBADO CON HONORES
(NUMERO)	(LETRAS)	(MENCIÓN)

El presidente del Jurado Dr. Ing. DOUGLAS SARANGO JULCA, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller ORTIZ FLORES JEAN CARLO, Ingeniero Mecánico de Fluidos.
Siendo las 12:00 horas del mismo día, se levanta la sesión.

Dr. Ing. DOUGLAS SARANGO JULCA
PRESIDENTE

Dr. Ing. CARLOS CARBONEL HUAMÁN
MIEMBRO TITULAR

Mg. Ing. RUBÉN MOGROVEJO GUTIÉRREZ
ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, RUBEN ESAU MOGROVEJO GUTIERREZ en mi condición de asesor acreditado mediante Dictamen N°003-EPIMF-2026-FCF/UNMSM de la tesis cuyo titulo es: MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA CONCEPTUAL Y NUMÉRICA DEL CAMPO DE FLUJO EN GEOMETRÍAS FRACTURADAS, CASO: DESLIZAMIENTO N°03-HUANCAVELICA-2023 presentado por el bachiller: JEAN CARLO ORTIZ FLORES para optar el titulo Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 10% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos.

RUBEN ESAU
MOGROVEJO GUTIERREZ
Ingeniero Civil
CIP Nº 98657

Lima, 15 de junio de 2026

Firma del Asesor: _____

Nombres y Apellidos del asesor: RUBEN ESAU MOGROVEJO GUTIERREZ

DNI: 10623893

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

Dedicatoria

A mis amados padres Adriano y Felipa quienes siempre han estado conmigo en cada paso de mi vida, brindándome todo su apoyo incondicional y consejos que me han servido para convertirme actualmente en la persona que soy, ellos que se sacrificaron por mí en la parte económica para que nada me falte.

A mi hermano Emanuel por ser un amigo más que me presto ayuda cuando más necesitaba y preocuparse para que todo me vaya bien y a todos mis seres queridos que siempre creyeron en mi desde un principio.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mis profesores de mi escuela Ingeniería Mecánica de fluidos, quienes compartieron sus conocimientos y experiencias para que pudiera completar mi formación académica.

Un agradecimiento especial al Mg. Ing. Rubén Esaú Mogrovejo Gutiérrez por aceptar ser mi asesor, brindarme su comprensión y tiempo dedicado para la realización de esta investigación.

A todas las instituciones que a través de sus estudios realizados contribuyeron con la realización de este trabajo, que espero que sea de total agrado a todos los lectores interesados en este tema.

Finalmente agradezco a la empresa DHI PERÚ por facilitarme la licencia del software FEFLOW 8.1, lo cual me permitió concluir con la presente investigación.

Resumen

Este estudio aborda la hidrogeología y la geología estructural del Derrumbe 3, ubicado en las inmediaciones del embalse Tablachaca, provincia de Tayacaja y región de Huancavelica, próximo a la Central Hidroeléctrica del Mantaro. Esta zona presenta condiciones geológicas y topográficas que favorecen la ocurrencia de procesos de inestabilidad y recarga subterránea, constituyendo un entorno representativo para analizar la dinámica del flujo en materiales fracturados mediante un enfoque integrado que incluye la recopilación, procesamiento y análisis de información de estudios previos, el desarrollo de un modelo conceptual y la implementación de un modelo numérico utilizando FEFLOW v8.1. Los resultados del modelo numérico evidencian que las estructuras geológicas actúan como conductos preferenciales para el flujo subterráneo, con una dirección dominante de sureste a noroeste hacia el río Mantaro. Se determinó que la Grupo Ambo Fracturado es la principal vía de flujo, a través de la cual se infiltra un caudal estimado entre 4.15 a 4.17 L/s. La visualización de las isolíneas de carga hidráulica confirma que el flujo se concentra en estas zonas fracturadas, mientras que el Basamento Rocoso conformado por el Grupo Excelsior ($K < 10^{-7}$ cm/s) actúa como una barrera hidráulica efectiva. Estos hallazgos demuestran la fuerte interacción entre la geología estructural y la dinámica hidrogeológica del Derrumbe 3.

Palabras clave: *Campo de flujo; Medios fracturados; Feflow; Deslizamiento; modelo conceptual y numérico.*

Abstract

This study focuses on the hydrogeology and structural geology of Landslide No. 3, located near the Tablachaca reservoir in the province of Tayacaja, Huancavelica region, close to the Mantaro Hydroelectric Power Plant. The area exhibits geological and topographic conditions that favor instability processes and groundwater recharge, making it a representative environment for analyzing the dynamics of flow in fractured materials through an integrated approach. This approach includes the compilation, processing, and analysis of data from previous studies, the development of a conceptual model, and the implementation of a numerical model using FEFLOW v8.1.

The numerical model results indicate that geological structures act as preferential pathways for groundwater flow, with a dominant direction from southeast to northwest toward the Mantaro River. The Fractured Ambo Group was identified as the main flow conduit, through which an estimated discharge ranging from 4.15 to 4.17 L/s infiltrates. The visualization of hydraulic head isolines confirms that the flow is concentrated in these fractured zones, whereas the bedrock composed of the Excelsior Group ($K < 10^{-7}$ cm/s) behaves as an effective hydraulic barrier. These findings highlight the strong interaction between structural geology and the hydrogeological dynamics of Landslide No. 3.

Keywords *Flow field; Fractured media; Feflow; Slide; conceptual and numerical model.*

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I 1

1.1 INTRODUCCIÓN 1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3
1.2.1 Determinación del problema 3
1.2.2 Formulación del problema 3
1.3 OBJETIVOS 3
1.3.1 Objetivo general 3
1.3.2 Objetivos específicos 4
1.4 IMPORTANCIA Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN 4
1.4.1 Importancia de la investigación 4
1.4.2 Alcance de la investigación 5
1.5 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN 5

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO 6

2.1 ANTECEDENTES 6
2.1.1 Evolución histórica y fundamentos numéricos del modelamiento de flujo en medios fracturados 6
2.1.2 Antecedentes locales y nacionales 8
2.1.3 Antecedentes internacionales 11
2.2 BASES TEÓRICAS 14
2.2.1 Definición de roca 14
2.2.2 Tipos de roca 15
2.2.3 Modelo conceptual hidrogeológico 16
2.2.4 El medio fracturado como sistema hidrogeológico 17
Propiedades hidráulicas de las rocas fracturadas 18
Concepto de doble porosidad y continuo equivalente 20
Permeabilidad y porosidad de las fracturas 22
2.2.5 Modelamiento numérico 23
Dimensiones del modelo 24
Parámetros hidráulicos 25
Definición de las condiciones de contorno 25

Solución del modelo 26
Calibración del modelo 26
Validación del modelo 27
CAPÍTULO III METODOLOGÍA 28
3.1 VARIABLES 28
3.1.1 Modelo hidrogeológico conceptual 28
3.1.2 Modelo hidrogeológico numérico 29
3.2. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES 33
CAPÍTULO IV RESULTADOS 36
4.1 MODELO CONCEPTUAL 36
4.1.1 Geología regional 36
4.1.2 Geología del Derrumbe 3 37
4.1.3 Sistema de fallas y fracturas 39
4.1.4 Propiedades hidráulicas 42
4.1.5 Sistema de flujo 42
4.1.6 Balance hídrico 44
4.1.7 Resultados del modelo conceptual 46
4.2 MODELO NUMÉRICO 48
4.2.1 Dominio 49
4.2.2 Malla 51
4.2.3 Discretización del modelo 52
4.2.4 Asignación de conductividades 56
4.2.5 Asignación de recarga 58
4.2.6 Condición de borde (CB) 60
4.2.7 Convergencia del modelo 67
4.2.8 Campos de flujo 66
4.2.9 Convergencia del modelo 73
CAPÍTULO V 68
5.1 CONCLUSIONES 74
5.2 RECOMENDACIONES 75

REFERENCIAS **76**

ANEXOS **83**

ANEXO 1: UBICACIÓN Y ELABORACIÓN DE SECCIONES GEOTÉCNICAS…84

ANEXO 2: ANÁLISIS HIDROLÓGICO- ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN Y LA RECARGA **87**

ANEXO 3: ESTIMACIÓN DE RECARGA POR TIPO DE GEOLOGÍA APLICANDO EL MÉTODO CURVA NÚMERO **93**

ANEXO 4: SALIDA DEL MODELO FEFLOW **96**

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de porosidad y conductividad hidráulica en suelo y roca (Basado en Custodio y Llamas, 1993) 22

Tabla 2. Muestra la operacionalización de las principales variables involucradas en la modelación hidrogeológica conceptual y numérica en el campo de flujo de las geometrías de las fracturas.....34

Tabla 3. Materiales ensayados en laboratorio para estimar la permeabilidad de los materiales geológicos 42

Tabla 4. Se muestra los datos de precipitación que se empleó de la estación Quichuas 44

Tabla 5. Presentación de los valores de recarga por cada unidad hidrogeológica.....46

Tabla 6. Asignación de conductividades hidráulicas asignadas al modelo tomando como base los datos de los ensayos de permeabilidad en roca 56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Muestra la nota de prensa del diario el Correo que corresponde al año 2012…. 2

Figura 2. Modelo conceptual genérico de un gran valle ribereño con terrazas (tomado de Winter et al, 1998. Este esquema ilustra la interacción entre el flujo regional (controlado por la topografía general) y el flujo local (influenciado por la descarga a un río), un concepto directamente aplicable al sistema del río Mantaro en la zona de estudio.....17

Figura 3. En las fotos se muestra algunos ejemplos de relleno de juntas y el grado de fracturamiento, reconocimiento que se realiza durante el logueo de sondeos 18

Figura 4 En las fotos se muestra los distintos tipos de rugosidad.....19

Figura 5 En las fotos indica la apertura de las fracturas.....19

Figura 6 Representación de diferentes sistemas de fracturas para la construcción de modelos conceptuales (Adaptado de Gale, 1982).....21

Figura 7 Muestra un ejemplo de un dominio 2D discretizando por diferencias y elementos finitos 24

Figura 8 En la figura se muestra un dominio en 2D discretizado los métodos de diferencias y elementos finitos. En las zonas donde no se representa las fracturas las celdas 26

Figura 9 Esquematización de un sistema de modelado del subsuelo mediante la combinación de elementos de características discretas con discretizaciones de volumen del dominio total del estudio.....27

Figura 10 Muestra mediante un flujograma las etapas de la investigación para elaborar el modelo conceptual y numérico.....35

Figura 11 Columna estratigráfica de la cuenca del Mantaro cerca al embalse Tablachaca 37

Figura 12 En la vista se observa un depósito coluvial-deluvial (Q-co/de) compuesto por material inconsolidado con clastos subangulosos englobados en una matriz limo-arcillosa 40

Figura 13 Mapa geológico de la zona del 2D empleado para el modelo conceptual y posteriormente integrado al modelo numérico 41

Figura 14 Vista panorámica del Derrumbe 3 tomado de NE al SW.....41

Figura 15 Según los datos geofísicos disponibles, el nivel freático se ubica entre 8.5 y 36 metros de profundidad, variando según el espesor de los materiales cuaternarios y la litología del Grupo Ambo. Esta estimación es preliminar, basada solo en las perforaciones D3_P_2 y D3_P_3, ya que no se cuenta con piezómetros ni monitoreo para evaluar su variabilidad estacional.....43

Figura 16 En la gráfica se visualiza las precipitaciones de la misma estación para el periodo 1964 al 2005 45

Figura 17 Representa el modelo en 3D, mostrando la forma en que se representaron las capas de la geología del Derrumbe 3, utilizando FEFLOW v8.1 como modelo conceptual y posterior modelo numérico.....48

Figura 18 En el siguiente mapa conceptual muestra los pasos que se llevaron a cabo para realizar el modelo numérico empleando el Software Feflow V8.1. El esquema es una modificado de Anderson, M (2015) adaptado a la información que se cuenta del D3 y al propósito que persigue la tesis.....49

Figura 19. Dominio del modelo del Derrumbe 3 el cual se muestra el recorte de la topografía.....50

Figura 20. Elaboración de la malla en donde se digitalizó los contactos en Feflow V.8. En la figura derecha se muestra la geología del D3, mientras que en la izquierda se observa las fallas en color azul y verde como parte del modelo numérico 52

Figura 21. Discretización vertical: realización del 3D Layering de acuerdo con la geología y definición de estructuras 54

Figura 22. Discretización horizontal: refinamiento de la zona del deslizamiento y fallas. 55

Figura 23. En el modelo muestra por coloración la asignación de los materiales geológicos y sus respectivas conductividades hidráulicas.....57

Figura 24. Asignación de la recarga al modelo en Feflow.....60

Figura 25. Condiciones de recarga de acuerdo con la distribución de materiales geológicos 62

Figura 26. Condiciones de recarga de acuerdo con la distribución de materiales geológicos 65

Figura 27. Condiciones de recarga de acuerdo con la distribución de materiales geológicos 65

Figura 28. Modelamiento geológico tridimensional.....66

Figura 29. Fracturas en el modelo geológico tridimensional 67

Figura 30. Malla numérica tridimensional 68

Figura 31. Líneas de Flujo e Isolíneas de Carga Hidráulica.....69

Figura 32. Vista Ampliada de Isolíneas de Carga Hidráulica 70

Figura 33. Muestra la malla numérica tridimensional utilizada para la discretización del dominio en FEFLOW, reflejando la heterogeneidad geológica y permitiendo la resolución espacial necesaria para capturar el comportamiento hidráulico en medios fracturados (Modelo de fracturas).....71

Figura 34. Flujo de Darcy y Campos de Velocidad. Además, se observa claramente el caudal que atraviesa esas fracturas de 4.15 a 4.17 l/s.....72

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

El estudio previo realizado en el año 2007 se centró en obtener información sobre la aceleración y el espectro de respuesta para el análisis sísmico del Embalse Tablachaca del Proyecto Hidroeléctrico del Mantaro. Este estudio incluyó la investigación de varios aspectos sísmicos y de movimientos del suelo para comprender mejor las condiciones geológicas de la zona.

En el año 2012, la población de Tablachaca denuncio ante las autoridades locales, sobre los constantes derrumbes que existe cerca de la Central Hidroeléctrica del Mantaro, tal como indica la nota de prensa del Diario el Correo (ver Figura 1).

Entre los movimientos identificados destaca el Derrumbe N°03, ubicado en las inmediaciones del embalse Tablachaca, en el distrito de Colcabamba, provincia de Tayacaja, región Huancavelica, formando parte del entorno geotécnico del Complejo Hidroeléctrico del Mantaro, administrado por Electroperú S.A. Esta zona se caracteriza por una topografía abrupta y una litología fracturada, principalmente de origen volcánico y sedimentario, condiciones que favorecen la infiltración del agua subterránea y el aumento de presiones de poro, generando inestabilidad en las laderas adyacentes al embalse.

Recientemente, debido a la actividad de deslizamientos en la región, se ha decidido reevaluar las condiciones de estabilidad del Derrumbe 3 en Huancavelica. La presente investigación se enfocará en utilizar la modelación hidrogeológica conceptual y numérica utilizando el software FEFLOW 8.1 para comprender como las geometrías fracturadas controlan el campo de flujo subterráneo e identificar las trayectorias de velocidad preferencial.

Figura 1

Muestra la nota de prensa del diario el Correo que corresponde al año 2012.



1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 Determinación del problema

Desde el año 2012, el área del Deslizamiento N°03 en Huancavelica ha presentado un notable incremento en su actividad, con eventos de reactivación exacerbados por precipitaciones intensas, particularmente desde octubre de 2017. Estos eventos pluviales aumentan la recarga del sistema acuífero, elevando el nivel freático y generando un aumento crítico en la presión de poros dentro del macizo rocoso fracturado. Esta condición ha provocado asentamientos y desplazamientos significativos, constituyendo un riesgo geotécnico para la infraestructura estratégica del Complejo Hidroeléctrico del Mantaro y las comunidades aledañas.

1.2.2 Formulación del problema

La pregunta clave que guiará la investigación se centra en evaluar cómo el campo de flujo subterráneo en los medios fracturados del Derrumbe 3 se puede determinar su dirección y cuantificar el caudal a través de las fracturas conductoras predominantes mediante la modelación en Feflow v 8.1.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual y numérico para comprender el campo de flujo en el medio fracturado del Derrumbe 3.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las unidades geológicas e hidrogeológicas del Derrumbe 3, integrando datos geológicos, estructurales e hidrogeológicos para determinar sus propiedades y su influencia en el flujo subterráneo.

- Implementar un modelo numérico de flujo subterráneo en FEFLOW. V8.1, incorporando geometrías fracturadas y condiciones de borde representativas para simular el campo de flujo de las geometrías fracturadas.

- Cuantificar el caudal de infiltración a través de las fracturas conductivas mediante el análisis del balance de flujo.

- Analizar el campo de flujo subterráneo y las isolíneas de carga hidráulica para identificar las trayectorias de flujo preferencial.

1.4 IMPORTANCIA Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Importancia de la investigación

La importancia de esta investigación radica en realizar un análisis cuantitativo y predictivo aplicado a la gestión de riesgos geológicos. Al desarrollar un modelo geológico en Feflow v 8.1, aporta conocimientos cruciales sobre la identificación de zonas críticas (trayectorias de flujo preferencial) y cuantificar el caudal de diseño de obras (planificación de medidas de mitigación).

1.4.2 Alcance de la investigación

El alcance de esta investigación se enfoca en el desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual y numérico en FEFLOW 8.1 para analizar el campo de flujo subterráneo en el dominio fracturado del Deslizamiento N°03. La investigación se limita a caracterizar la dinámica del flujo, cuantificar los caudales de infiltración en las estructuras conductivas (como la unidad Ambo Fracturado), y definir las trayectorias de flujo preferencial y la distribución de la carga hidráulica. Si bien este estudio no incluye un análisis de estabilidad geotécnica, sus resultados constituyen el principal insumo técnico para ello, permitiendo generar recomendaciones conceptuales para la ubicación estratégica de posibles soluciones de drenaje orientadas a controlar el flujo de agua en la zona.

1.5 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

A pesar de utilizar una metodología novedosa, la presente tesis reconoce que existe limitaciones inherentes a los datos disponibles como monitoreo de piezómetros, incertidumbre en las pruebas hidráulicas y la convergencia del modelo.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Evolución histórica y fundamentos numéricos del modelamiento de flujo en medios fracturados

El estudio del flujo subterráneo en rocas fracturadas ha representado un desafío histórico en la hidrogeología debido a la alta heterogeneidad, anisotropía y no linealidad que caracteriza a estos sistemas. A diferencia de los medios porosos clásicos, donde la Ley de Darcy describe adecuadamente el comportamiento hidráulico, los macizos fracturados presentan flujos dominados por discontinuidades estructurales, generando zonas de alta conductividad local difíciles de representar numéricamente.

Desde mediados del siglo XX, diversos investigadores propusieron aproximaciones teóricas para abordar este problema. Entre los hitos más relevantes se encuentran:

1956 – 1963: **Snow (1969) y Warren & Root (1963)** introdujeron el concepto de doble porosidad para describir el intercambio entre matriz rocosa y fracturas.

1972 – 1979: **Bear (1972)** formalizó la mecánica de medios porosos, mientras **Freeze & Cherry (1979)** aplicaron estos principios a la hidrogeología, sentando la base conceptual de los modelos de flujo en subsuelo.

1980 – 1985: **Witherspoon et al. (1980)** desarrollaron la Ley Cúbica para flujo en fracturas individuales, y ***Gale (1982)*** avanzó en la caracterización estructural de sistemas fracturados. En paralelo, **Zienkiewicz & Taylor (1980)**

perfeccionaron la formulación del Método de los Elementos Finitos (FEM), que permitió discretizar dominios geológicos complejos.

1979 – 1990: En este contexto, el ingeniero alemán **Hans-Jörg G. Diersch** comenzó a desarrollar en el Instituto de Mecánica de la Academia de Ciencias de Berlín (RDA) un código numérico experimental basado en FEM para simular el flujo subterráneo y transporte de masa y calor, que daría origen al programa FEFLOW (*Finite Element subsurface FLOW system*).

1990 – 2000: El software fue consolidado en la empresa **WASY GmbH (Berlín)**, donde se incorporó la simulación de medios fracturados y anisotrópicos, a través de la formulación Discrete Feature Elements (DFE), que representa las fracturas como elementos 1D o 2D dentro de una matriz 3D porosa.

2000 – 2014**:** Diersch publicó el libro **"FEFLOW – Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media" (Springer, 2014)**, el cual constituye la base teórica oficial del software y describe detalladamente la formulación variacional, la discretización espacial y las condiciones de frontera aplicadas a medios fracturados.

2015 – actualidad: El programa es mantenido por **DHI-WASY GmbH**, incorporando módulos avanzados de transferencia de calor, transporte reactivo y flujo en fracturas discretas (DFE/DFN). Su aplicación se ha extendido a estudios hidrogeológicos, geotérmicos y de estabilidad de laderas en macizos fracturados (Seib et al., 2022; Zhang et al., 2023).

Esta evolución histórica muestra que FEFLOW no se basó en un único artículo científico, sino en un desarrollo progresivo sustentado en teorías de **Darcy, Bear, Zienkiewicz, Freeze & Cherry**, y posteriormente sistematizado por **Diersch (2014).**

En el contexto del Deslizamiento N°03 – Huancavelica, el uso de FEFLOW es particularmente apropiado, ya que su formulación de elementos finitos permite modelar la interacción entre la matriz rocosa del Grupo Excelsior (baja permeabilidad) y las fracturas conductivas del Grupo Ambo, reproduciendo las trayectorias preferenciales del flujo subterráneo y el comportamiento del nivel freático.

2.1.2 Antecedentes locales y nacionales

Mogrovejo, R.E (2016). Modelación numérica con FEFLOW+FMH3 para el estudio definitivo de las galerías de drenaje: caso Derrumbe 5 - Complejo Hidroeléctrico del Mantaro.

La tesis propone un primer modelo conceptual hidrogeológico local en la zona del Derrumbe 5. Caracteriza los acuíferos presentes en la superficie y en la profundidad, y aplica una modelación numérica con FEFLOW+FMH3, con la finalidad de plantear las obras de drenaje y subdrenaje, que permitan mejorar la resistencia de los suelos y modifiquen los parámetros de resistencia en cada unidad geológica.

También analizó los efectos derivados del ciclo del agua local, mediante la cuantificación y delimitación de áreas de drenaje y su relación con las condiciones hidrogeológicas (tipos de acuíferos). Identifica las zonas de recarga y descarga e interpreta el modelo conceptual de interacción de escorrentía superficial, subsuperficial y subterránea.

En función de la información geológica-geotécnica disponible, comprende las unidades hidrogeológicas in situ, con fines de estimar el movimiento del flujo en medios porosos. Predice escenarios hidrogeológicos considerando las obras de estabilización para el deslizamiento, y su relación con los límites del acuífero interpretado. Aplica el modelo FEFLOW+FMH3, para predecir las trayectorias y tasas de flujo de agua, que convergen a las masas del deslizamiento denominado Derrumbe 5, con fines de proyectar las obras civiles de captación subterránea.

Mogrovejo, R.E (2019). Estimación del Caudal de Filtraciones en Macizos Fracturados Usando FEFLOW para las Galerías de Drenaje: Caso Derrumbe 5 – Huancavelica – 2019

El estudio aborda la complejidad de la modelación del escurrimiento subterráneo, centrándose en la estimación del caudal de filtraciones en macizos fracturados. El propósito es comprender la relevancia de realizar estimaciones precisas y un drenaje adecuado de este flujo, al mismo tiempo que se establecen indicadores para el monitoreo y control en las masas geológicas.

Para estimar el caudal de filtraciones, el estudio utilizó datos medidos en campo, como piezómetros, registros de sondeos diamantinos y aforos. Estos datos se utilizaron para crear un modelo conceptual de flujo que representa la geología y las propiedades hidrogeológicas del macizo rocoso fracturado en el Derrumbe 5.

El modelo conceptual se implementó en el software FEFLOW 7.1, utilizando la técnica de elementos finitos. El modelo permitió realizar una aproximación numérica del caudal de filtraciones en el derrumbe. La comparación entre datos observados en campo y resultados del modelo numérico condujo a la obtención de una curva de calibración, con resultados RMS por debajo del 5%, según criterios aceptables de modelación. Los valores estimados para el caudal de filtraciones

en las galerías, situados entre 2.1 l/s y 5.0 l/s, se fundamentaron en la interpretación de datos medidos en campo (aforos) versus estimaciones numéricas.

El estudio concluye que la estimación y el control del caudal de filtraciones en macizos fracturados es un tema importante para la estabilidad de los taludes. El estudio sienta las bases para investigaciones posteriores en áreas como el Derrumbe 3 de Huancavelica.

Jimenez, E.R.P., Gutiérrez, R.E.M., & Gutiérrez, E.J.C. (2023). Influence of Subsurface Flow Recharge on Fractured Massifs. Case: Slippage 1 Huancavelica – Perú. El estudio identificó que los deslizamientos en el sur del Perú se producen en macizos rocosos fracturados, que son medios porosos con alta permeabilidad. El estudio también encontró que los deslizamientos son causados por la combinación de factores, incluyendo la saturación de agua, la pendiente del talud y la actividad sísmica.

El estudio propuso la instalación de drenes horizontales a lo largo del talud para captar el flujo de filtraciones. El estudio utilizó el software Slide 6.0 para modelar el comportamiento del talud con y sin drenes.

Los resultados mostraron que la instalación de drenes mejora significativamente la estabilidad del talud. El factor de seguridad del talud con drenes fue de 1.512 en el escenario estático y de 1.209 en el escenario sísmico. Por lo tanto, la efectividad de la instalación de drenes a lo largo del talud garantizó la estabilidad tanto en condiciones estáticas como dinámicas. Esto permitirá mitigar los deslizamientos y proteger la infraestructura y las áreas circundantes de manera más segura y confiable.

Quines, D. J., & Candiotti, J. C. (2023). “Estimación de los caudales de filtración aplicando la herramienta Seepage, caso: Derrumbe I - Huancavelica - Perú” [Tesis de título profesional, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].

La investigación se desarrolla en el marco del evento de derrumbe identificado como “Derrumbe I” en la zona de Huancavelica (Perú). Se propone estimar los caudales de filtración que atraviesan los estratos geológicos del derrumbe, considerando la creciente interacción entre precipitaciones, aguas subterráneas y masas de suelo/roca en contextos andinos, dada la intensificación de fenómenos climáticos.

Para ello, los autores emplean la herramienta de modelación numérica GeoStudio Seepage (módulo “Seepage”) basada en elementos finitos para simular flujo de aguas subterráneas y presión de poro en estratos parcialmente saturados y no saturados.

2.1.3 Antecedentes internacionales

Gelcich Delgado, J. (2018). La tesis aborda la problemática de los bombeos de barro en minería subterránea, fenómeno peligroso que resulta de la entrada súbita de material fino y agua en los túneles de producción. La investigación se centra en el método Block Caving, ampliamente utilizado pero propenso a estos eventos. Se propone un modelo hidrogeológico conceptual y numérico para analizar la hipótesis de que los bombeos se originan cuando una zona de mayor permeabilidad asciende en una roca fracturada, alcanzando un acuífero previamente aislado.

Los resultados indican la necesidad de vías de flujo preferencial en la zona permeable, con características distintas a un medio poroso clásico, y una roca fracturada prácticamente impermeable. Además, se observa que la ecuación de

Brinkman proporciona caudales menores que la Ley de Darcy fuera de su rango de validez.

Espinoza Marchant, C. (2020). La tesis aborda los desafíos asociados a la gestión del agua en operaciones mineras, centrándose en problemas como el dewatering y despresurizado de taludes. Se propone recalibrar un modelo numérico de un rajo minero, caracterizado como un acuífero fracturado y karstificado, utilizando el software MINEDW.

El objetivo es mejorar la representación de la influencia estructural mediante la incorporación de anisotropía mediante ángulos Eulerianos, con el fin de perfeccionar la capacidad predictiva de la herramienta. La validación de MINEDW se realiza comparando sus resultados con otro programa, Slope Model, que utiliza la metodología de Red de Fracturas Discretas (DFN).

La investigación revela que MINEDW es capaz de modelar sistemas porosos y fracturados a escalas regionales y locales, aunque con cierto margen de error. La tesis también presenta mejoras en el modelo numérico respecto al año 2018, con un índice SRMS de 10,2%. Aunque se logra una herramienta predictiva más robusta en términos de caudales, se destaca la necesidad de abordar la definición de anisotropía basada en información geológica estructural para reproducir con mayor precisión el comportamiento del flujo en el rajo.

Chen, Y.-F., Zeng, J., Shi, H., Wang, Y., Hu, R., Yang, Z., & Zhou, C.-B. (2021). “Variation in hydraulic conductivity of fractured rocks at a dam foundation during operation”. Los autores evalúan cómo cambia la conductividad hidráulica de rocas fracturadas en la fundación de un gran embalse en operación. El trabajo aborda específicamente el comportamiento hidráulico bajo operación de un dique de arco.

El objetivo principal es cuantificar la evolución de la conductividad hidráulica en el macizo rocoso fracturado del fundamento del dique, a través de un enfoque

de modelado inverso, es decir, ajustar parámetros hidráulicos a datos observados de flujo/infiltración en operación.

Suárez Guerrero, N. (2021). La insuficiencia en el abastecimiento de agua, en términos de calidad, oportunidad y cantidad, constituye un desafío persistente en países en desarrollo. El acueducto del Municipio de Santander (MMS) Málaga enfrenta dificultades, especialmente en la cantidad de agua disponible, agravada por el cambio climático.

El objetivo central del estudio es abordar la escasez de agua en el Municipio de Santander (MMS) Málaga, enfocándose en el acueducto, que carece de fuentes superficiales adecuadas. Se busca desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual para evaluar la viabilidad de un sistema acuífero subyacente como complemento al abastecimiento municipal. El modelo integra aspectos geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímica, con el propósito de identificar y caracterizar las fuentes de agua subterránea, priorizando aquellas que pueden satisfacer las necesidades del acueducto.

Los resultados del estudio revelan la existencia de dos acuíferos con características distintivas. El primero, constituido por depósitos coluviales o aluviales, muestra un interflujo promedio de 434,5 mm/año. El segundo, profundo y karstificado, exhibe percolaciones promedio de 445.3 mm/año y almacenamiento de 8030 mm. Aunque las fuentes superficiales resultan poco atractivas para explotar, el acuífero profundo presenta propiedades físicas e hidrológicas adecuadas, mostrándose como una fuente potencialmente explotable y complementaria al sistema de acueductos municipales. Este hallazgo destaca la importancia de considerar fuentes subterráneas en la gestión del agua en el Municipio de Santander (MMS) Málaga.

Abokwiek, R., Al Sharabati, M., Hawileh, R. et al. (2023)

El objetivo de este estudio fue desarrollar un modelo EF para predecir el flujo de filtración de agua debajo de presas de hormigón. El estudio investigó los efectos de las dimensiones de la presa, la carga hidráulica, la permeabilidad del suelo y la temperatura ambiente en la tasa de filtración.

El estudio concluyó que el modelo EF desarrollado puede predecir el flujo de filtración de agua debajo de presas de hormigón con un nivel razonable de precisión.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Definición de roca

Según la perspectiva de Das (2012), una roca puede definirse como un material sólido compuesto por la agregación natural de uno o más minerales, representando la unidad fundamental de la corteza terrestre. Su caracterización implica la identificación de su composición mineralógica, su estructura interna y las condiciones geológicas que dieron origen a su formación.

Para comprender el comportamiento de las rocas en un contexto geotécnico o hidrogeológico, es esencial recopilar y analizar datos sobre sus propiedades físicas y mecánicas, así como su respuesta frente a procesos de meteorización y alteración. Esta síntesis de información permite definir de manera precisa el concepto de roca dentro de un marco geocientífico (Hölting y Coldewey, 2019).

Para el caso de estudio del Deslizamiento 3, esta clasificación es fundamental, ya que el dominio está compuesto por rocas sedimentarias del Grupo Ambo y rocas metamórficas del Grupo Excelsior, cubiertas por depósitos cuaternarios no consolidados, cada una con un comportamiento hidrogeológico distintivo.

2.2.2 Tipos de roca

De acuerdo con Das (2012), la clasificación de las rocas se basa en su origen geológico, lo que permite agruparlas en tres categorías principales: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Esta categorización facilita la interpretación de su formación y evolución a lo largo del tiempo geológico.

Para identificar el tipo de roca en un sitio específico, es necesario analizar sus características petrográficas y estructurales, considerando factores como la textura, el contenido mineral y las condiciones del ambiente geológico en el que se formaron. Esta aproximación permite definir si una roca se originó por la solidificación del magma (ígneas), la acumulación de sedimentos (sedimentarias) o la transformación de rocas preexistentes bajo presión y temperatura extremas (metamórficas) (Hölting y Coldewey, 2019).

Si bien esta clasificación es aplicable de manera universal, el nivel de detalle requerido dependerá del objetivo del estudio, los datos geológicos disponibles y la relevancia de las propiedades específicas para el análisis en cuestión. En este sentido, se busca un enfoque práctico que permita identificar los aspectos más significativos de cada tipo de roca, sin añadir complejidades innecesarias (Freeze y Cherry, 1979).

2.2.3 Modelo conceptual hidrogeológico

Según la perspectiva de Zheng y Bennett (2002), la elaboración de un modelo conceptual se equipará a la "caracterización del sitio", lo que implica la integración de información hidrogeológica pertinente a nivel local y regional. Este proceso implica el uso de suposiciones simplificadoras e interpretaciones cualitativas de los procesos específicos de flujo y transporte en el sitio.

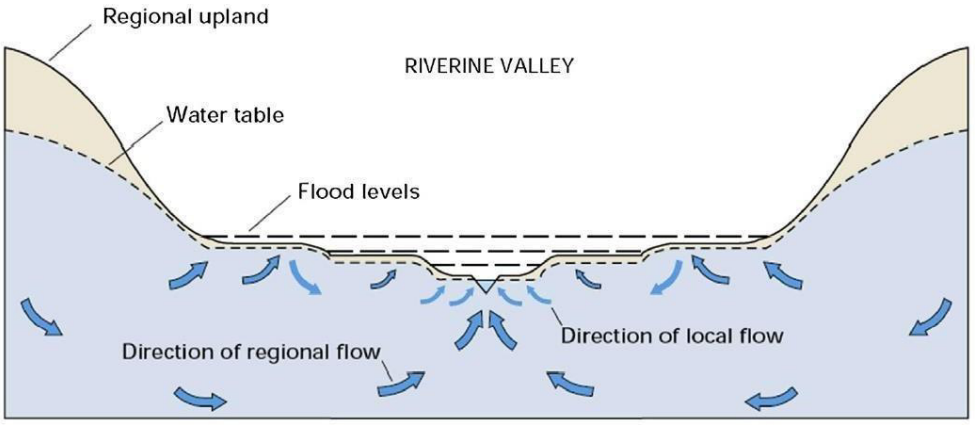
Para resolver cualquier problema de agua subterránea específico del sitio, el hidrogeólogo debe recopilar y analizar los datos de campo relevantes y articular los aspectos importantes del sistema de agua subterránea. La síntesis de lo que se conoce sobre el sitio es un modelo conceptual (Kresic y Mikszewski, 2013).

Si bien generalmente se construye para un entorno hidrogeológico específico del sitio, un modelo conceptual también puede diseñarse para un entorno geológico genérico (Winter, 2001).

El nivel de detalle necesario está determinado por el propósito del modelado, los datos de campo disponibles y los límites prácticos de la complejidad que se puede incorporar al modelo numérico. En la práctica, es deseable buscar la parsimonia en el diseño del modelo conceptual, lo que implica simplificarlo para incluir solo los procesos importantes para abordar el propósito específico (Freeze y Cherry, 1979).

Figura 2

Modelo conceptual genérico de un gran valle ribereño con terrazas (tomado de Winter et al, 1998. Este esquema ilustra la interacción entre el flujo regional (controlado por la topografía general) y el flujo local (influenciado por la descarga a un río), un concepto directamente aplicable al sistema del río Mantaro en la zona de estudio.



Esta figura se puede explicar según su relevancia para el concepto de modelo conceptual en hidrogeología. Por ejemplo, podría ilustrar una representación esquemática de un sistema de aguas subterráneas con diferentes capas geológicas y flujos de agua.

2.2.4 El medio fracturado como sistema hidrogeológico

La principal complejidad hidrogeológica en el área del Derrumbe N°03 radica en que el macizo rocoso no se comporta como un medio poroso homogéneo, sino como un medio fracturado. Autores como Barton et al. (1995) señalan que para una simulación precisa en estos entornos es crucial una descripción detallada de la disposición, densidad, apertura y conectividad de las fracturas.

Propiedades hidráulicas de las rocas fracturadas

La conductividad hidráulica y la porosidad efectiva en rocas fracturadas son críticas para comprender el flujo de agua subterránea. Estas propiedades pueden variar significativamente debido a la presencia de fracturas y la variabilidad espacial de estas características en el medio rocoso.

Las fracturas, juntas y fallas actúan como conductos preferenciales que dominan el flujo subterráneo. Las Figuras 3, 4 y 5 muestran ejemplos del logueo de sondeos en la zona, donde se identifican características clave como el relleno de juntas, la rugosidad y la apertura, factores que controlan directamente la permeabilidad del sistema.

Figura 3

En las fotos se muestra algunos ejemplos de relleno de juntas y el grado de fracturamiento, reconocimiento que se realiza durante el logueo de sondeos.



Figura 4

En las fotos se muestra los distintos tipos de rugosidad.



Figura 5

En las fotos indica la apertura de las fracturas.



El flujo a través de una fractura individual se describe teóricamente mediante la Ley Cúbica, cuya validez fue estudiada por autores como Witherspoon et al. (1980). La fórmula es:

$$Q_f = \frac{w.g.b^3}{12.\mu}.\frac{dh}{dl} \dots 1$$

Donde:

- w es el ancho de la fractura.
- g es la aceleración debido a la gravedad.
- b es la apertura de la fractura.
- μ es la viscosidad del fluido.
- dh/dl es el gradiente hidráulico a lo largo de la fractura.

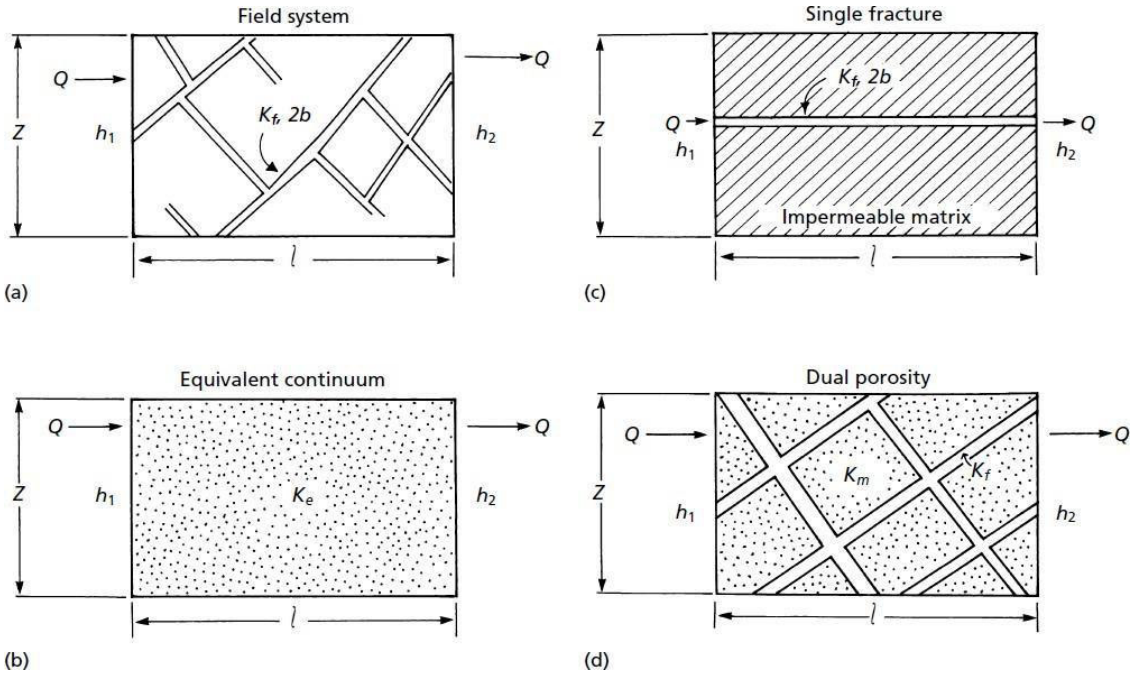
Esta fórmula evidencia que la tasa de flujo es proporcional al cubo de la apertura (b), lo que subraya la extrema sensibilidad del flujo a cambios mínimos en la geometría de la fractura.

Concepto de doble porosidad y continuo equivalente

Para modelar un macizo rocoso fracturado, se pueden emplear diferentes enfoques conceptuales, como los representados en la Figura 6 (Adaptado de Gale, 1982). El modelo de doble porosidad, propuesto originalmente por Warren y Root (1963), considera que el sistema está compuesto por una matriz rocosa de baja permeabilidad (que almacena agua) y una red de fracturas de alta permeabilidad (que la transporta). Alternativamente, el modelo de continuo equivalente asigna propiedades hidráulicas promedio a un volumen de roca, simplificando el sistema. Para esta tesis, se ha adoptado un enfoque híbrido, modelando las fracturas principales como elementos discretos y representando la matriz rocosa como un continuo poroso, lo que permite capturar la heterogeneidad del sistema con mayor fidelidad.

Figura 6

Representación de diferentes sistemas de fracturas para la construcción de modelos conceptuales (Adaptado de Gale, 1982).



La caracterización estructural incluyó la identificación de fracturas, fallas y unidades litológicas que controlan el flujo subterráneo. Según los trabajos de Mogrovejo (2016) y Mogrovejo (2019), las fracturas actúan como vías preferenciales para el flujo, mientras que las unidades menos permeables, como el basamento rocoso, funcionan como barreras hidráulicas.

Otros autores como N. Barton et al. (1995) señalan que para una caracterización estructural en medio fracturados se debe de contar con la descripción detallada de la disposición, densidad y conectividad de las fracturas, para realizar simulaciones precisas.

Permeabilidad y porosidad de las fracturas

La permeabilidad y porosidad son elementos esenciales en el modelado de medios fracturados. Proporcionar datos de referencia sobre permeabilidad y porosidad, como se muestra en la tabla, ayuda a establecer una base para las simulaciones numéricas. Las fuentes citadas (Davis 1969; Freeze y Cherry 1979; UNESCO 1975; Sharp et al. 1993) son reconocidas y confiables en el campo de la hidrogeología.

Tabla 1

Valores de porosidad y conductividad hidráulica en suelo y roca (Basado en Custodio y Llamas, 1993).

Tipo de agregado	**Conductividad hidráulica (Darcy)**
Agregados sueltos	
Grava	10^{2} - 10^{5}
Arena	10^{2} - 10^{3}
Arena muy fina	10^{-2} - 10^{2}
Loess	10_{-4} - 10
Arcilla	10^{-7}-10^{-4}
Agregados macizos	
Roca sedimentaria (arenisca)	10^{-5}-10^{-1}
Roca sedimentaria (caliza)	10-4-10-1
Roca sedimentaria caliza (cárstica)	10-3-10-1
Roca metamórfica (pizarras)	10-8-10-4
Roca (Basalto fracturado)	10-3-10-2
Roca fracturada	10*3 - 10
Roca densa	10^{-8}-10^{-5}

Tipo de roca	**Porosidad (%)**	**Conductividad hidráulica (m/s)**
Basalto		
Denso	0.0-1.1	10^{-11} – 10^{-8}
Vesicular	5-11	10^{-9} – 10^{-8}
fracturado	10-17	10^{-9} – 10^{-2}
Piedra pómez		

Tipo de agregado	Conductividad hidráulica (Darcy)	
Piroclástico (tufos)	87	
Zeolitizado	39	$4x10^{-9}$
Soldado	5-20	$10^{-9} – 10^{-7}$

Fuente: *Libro de Hidrogeología Tomo I y II de Custodio y Llamas, 1993*

2.2.5 Modelamiento numérico

La caracterización del medio en modelos numéricos en medios fracturados implica la asignación de propiedades físicas y mecánicas a los componentes del medio, incluyendo las fracturas. Esto podría incluir parámetros como la permeabilidad, elasticidad, resistencia a la fractura, entre otros. La base bibliográfica para esta etapa puede incluir trabajos como el de Y. Wu et al. (2018) que aborda la caracterización de la permeabilidad en medios fracturados mediante métodos numéricos avanzados.

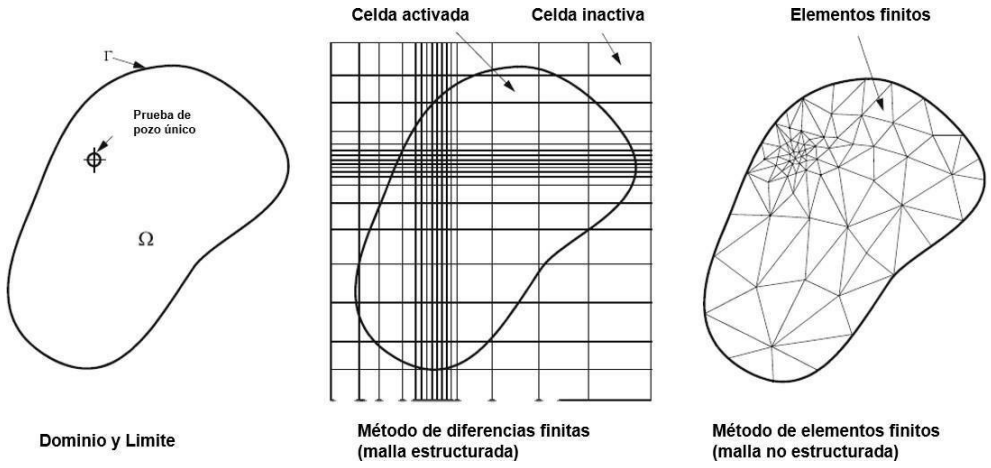
Para simular numéricamente la complejidad del medio fracturado, se empleó el método de elementos finitos (MEF), una técnica robusta y versátil para resolver las ecuaciones de flujo en geometrías complejas (Zienkiewicz y Taylor, 2000). A diferencia de los métodos de diferencias finitas, el MEF permite el uso de mallas no estructuradas, lo cual es esencial para representar con precisión los límites geológicos irregulares y refinar la discretización en zonas de interés, como las fracturas y el cuerpo del deslizamiento (ver Figura 7).

El software elegido, FEFLOW v 8.1, está basado en el MEF y es una herramienta especializada para la modelación de flujo subterráneo. Sus capacidades para integrar características discretas (fracturas) dentro de un dominio poroso tridimensional lo hacen ideal para los objetivos de esta investigación (DHI, 2024). El proceso de modelación, desde la definición del dominio, la asignación de

parámetros (Cui et al., 2017) y las condiciones de contorno (Apel et al., 2015), hasta la calibración y validación (Feinberg et al., 2007; Celia et al., 1990), sigue una metodología estándar en la práctica hidrogeológica

Figura 7

Muestra un ejemplo de un dominio 2D discretizando por diferencias y elementos finitos



Dimensiones del modelo

En el contexto del modelamiento numérico en medios fracturados, las dimensiones se refieren a las características espaciales y temporales del sistema en estudio. En modelos tridimensionales, las dimensiones espaciales incluirían las longitudes, anchuras y profundidades del dominio, mientras que la dimensión temporal abordaría la evolución del sistema a lo largo del tiempo. La elección adecuada de estas dimensiones es crucial para representar fielmente el comportamiento del medio fracturado. La literatura relevante, como el trabajo de A. F. B. Thompson et al. (2009), proporciona directrices para la selección apropiada de dimensiones en modelos numéricos complejos.

Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos son propiedades que describen la conductividad y flujo de fluidos en el medio fracturado. Estos parámetros incluyen la permeabilidad de las fracturas, la porosidad de la matriz y otros factores que afectan el movimiento de fluidos. Investigaciones como el estudio de Y. Cui et al. (2017) se centran en la estimación y calibración de parámetros hidráulicos en modelos numéricos de medios fracturados para mejorar la precisión de las simulaciones.

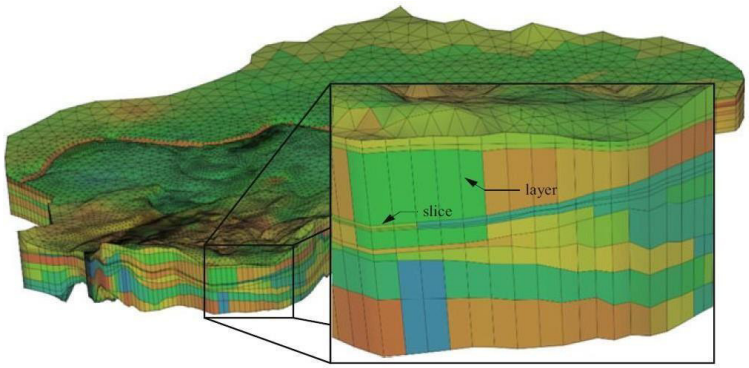
Definición de las condiciones de contorno

Las condiciones de borde definen cómo interactúa el medio modelado con su entorno exterior y cómo se aplica la carga al sistema. En medios fracturados, la especificación adecuada de condiciones de borde y recarga es esencial para simular de manera realista el flujo y transporte de fluidos. La obra de A. N. Strahler (1980) proporciona conceptos fundamentales sobre la influencia de las condiciones de borde en sistemas hidrológicos, que son aplicables al modelamiento de medios fracturados.

La definición de condiciones de contorno es crucial para simular de manera precisa el comportamiento del medio. Esto incluye especificar cómo interactúa el medio modelado con su entorno externo. En medios fracturados, las condiciones de contorno deben abordar la interacción entre las fracturas y la matriz circundante. Investigaciones como el trabajo de J. R. Apel et al. (2015) proporcionan enfoques detallados sobre la definición de condiciones de contorno en modelos numéricos de medios fracturados.

Figura 8

En la figura se muestra un dominio en 2D discretizado los métodos de diferencias y elementos finitos. En las zonas donde no se representa las fracturas las celdas



Fuente: Extraído del Tutorial introductorio Feflow 7.5 Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System.

Solución del modelo

La solución del modelo implica la aplicación de métodos numéricos para resolver las ecuaciones que describen el comportamiento del medio. Para medios fracturados, se utilizan comúnmente métodos de elementos finitos, elementos de contorno, o métodos de elementos discretos, dependiendo de la complejidad del problema. La obra de O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor (2000) proporciona una base sólida para entender los principios generales de los métodos numéricos en ingeniería, aplicables también al modelamiento de medios fracturados.

Calibración del modelo

La calibración implica ajustar los parámetros del modelo para que los resultados simulados coincidan con los datos observados en la realidad. En el caso de medios fracturados, la calibración es un paso crucial para validar y mejorar la precisión del modelo. Trabajos como el de M. D. Feinberg et al. (2007) abordan

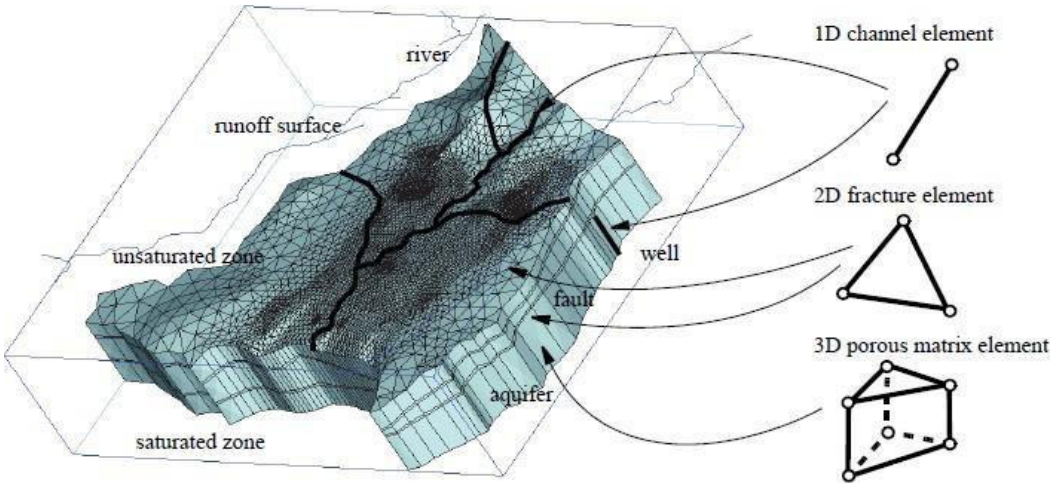
estrategias de calibración en el contexto de modelamiento numérico en medios fracturados, destacando la importancia de la comparación con datos observados para mejorar la confiabilidad del modelo.

Validación del modelo

La validación del modelo implica comparar los resultados numéricos con datos experimentales o soluciones analíticas conocidas para verificar la precisión del modelo desarrollado. En el contexto de medios fracturados, la validación puede ser un desafío debido a la complejidad de los procesos involucrados. Trabajos como el de M. A. Celia et al. (1990) ofrecen ejemplos de validación en el ámbito de la simulación de flujo en medios porosos, que comparten similitudes con el modelado en medios fracturados.

Figura 9

Esquematización de un sistema de modelado del subsuelo mediante la combinación de elementos de características discretas con discretizaciones de volumen del dominio total del estudio.



Fuente: Extraído del Tutorial introductorio Feflow 7.5 Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System.

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA

3.1 VARIABLES

3.1.1 Modelo hidrogeológico conceptual

Definiciones Conceptual y Operacional: El modelo conceptual proporciona una representación simplificada del sistema acuífero, con aspectos importantes como geología, recarga y descarga, unidades hidrogeológicas y piezometría. Esto se alinea con la recomendación de construir un modelo conceptual que refleje las características principales del sistema y se base en información bibliográfica y datos de campo recopilados en estudios anteriores.

Indicadores y Técnicas: Los indicadores (mapa geomorfológico, columna estratigráfica, perfil hidrogeológico) son elementos esenciales para desarrollar un modelo conceptual confiable. Las técnicas utilizadas (revisión bibliográfica, trabajo de campo, software especializado como Argis y FEFLOW) están en línea con las recomendaciones iniciales, enfocadas en el uso de datos de campo y herramientas computacionales para obtener un modelo conceptual coherente.

Caracterización del medio hidrogeológico: De acuerdo con la clasificación hidrogeológica de medios fracturados propuesta por **Custodio y Llamas (1983)** y adaptada para macizos rocosos andinos, el área del Deslizamiento N.º 03 se caracteriza como un sistema fracturado de clase III-IV, correspondiente a un medio con fracturas parcialmente conectadas y conductividades hidráulicas variables en el espacio.

Este tipo de sistema presenta trayectorias preferenciales de flujo, donde la geometría, apertura y orientación de las discontinuidades controlan la dirección y magnitud de los gradientes hidráulicos.

En consecuencia, el modelo conceptual considera una anisotropía del tensor de conductividad hidráulica (K) y una heterogeneidad local, aspectos fundamentales para representar adecuadamente la dinámica de flujo subterráneo en la zona de estudio.

3.1.2 Modelo hidrogeológico numérico

Definiciones Conceptual y Operacional

El modelo numérico utiliza una representación matemática para simular el flujo subterráneo, generalmente a través de ecuaciones de diferencias finitas. En la recomendación anterior, también se sugería el uso de software especializado para el modelado numérico, como FEFLOW, y la resolución de ecuaciones de flujo subterráneo en 3D. El uso de un modelo numérico permite simular escenarios y validar contra datos reales, elementos clave para tu metodología.

Ecuaciones gobernantes del flujo subterráneo:

El modelo hidrogeológico numérico se sustenta en las ecuaciones que describen el flujo de agua subterránea en medios porosos y fracturados. Dicho comportamiento se rige por la Ley de Darcy y la ecuación de continuidad, que garantizan la conservación de masa dentro del dominio hidrogeológico.

La Ley de Darcy establece que la velocidad de filtración del flujo subterráneo (q) es proporcional al gradiente hidráulico, expresada como:

$$q=-K\nabla h$$

Donde:

q= vector de flujo especifico (m/s)

K= conductividad hidráulica (m/s)

∇h= gradiente hidráulico (adimensional)

La ecuación de continuidad, asumiendo la ρ=constante, queda expresada como:

$$\nabla . q = W - S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

$\nabla . q$ = divergencia del flujo (entradas – salidas)

S_s = almacenamiento específico (1/m)

∂h/∂t = variación temporal de la carga hidráulica

W = fuente o sumidero de agua (recarga, descarga o bombeo)

Al combinar la Ley de Darcy con la ecuación de continuidad, se obtiene la ecuación general de flujo subterráneo que resuelve FEFLOW:

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla . (K \nabla h) + W$$

En el presente trabajo, al plantearse un régimen estacionario, el término transitorio se omite, resultando:

$$0 = \nabla . (K \nabla h) + W$$

Implicancias físicas de los términos

Cada término de la ecuación tiene una implicancia directa en la estabilidad y precisión del modelo.

- "El término **K** ∇**h** controla la dirección y magnitud del flujo; en medios fracturados debe considerarse anisotrópico, pues las fracturas generan trayectorias preferenciales de alta permeabilidad".
- "El término **W** representa aportes o pérdidas (recarga, drenaje, bombeo) y se implementa como condición de contorno o carga nodal".
- "El operador ∇ define el balance de flujos entre nodos; su precisión depende del refinamiento de la malla en zonas de gradiente elevado".

Estudios de **Witherspoon et al. (1980), Celia et al. (1990)** y **Bear (2013)** demostraron que pequeñas variaciones en K o en S_s modifican significativamente los frentes de flujo y velocidades de percolación en sistemas fracturados. En este trabajo, la resolución numérica implementada en FEFLOW 8.1 utiliza un esquema iterativo basado en el método del Gradiente Conjugado Precondicionado (PCG), que minimiza los errores de convergencia asociados a la anisotropía del flujo.

De esta forma, los resultados obtenidos representan de manera estable y físicamente coherente la interacción entre la geometría fracturada y el campo de flujo subterráneo del Derrumbe N°03 en la región de Huancavelica.

Dimensiones e Indicadores: Las dimensiones del modelo y los indicadores como K, Ss, Sy, n, entre otros, están alineados con los parámetros que se necesitan para configurar el modelo numérico. El uso de pruebas de bombeo y aforos para calibrar el modelo es una parte importante de la validación, como se mencionó previamente.

Síntesis de la metodología numérica: La resolución del flujo subterráneo se realizó mediante el método de elementos finitos (MEF), formulado bajo el enfoque de Galerkin, técnica ampliamente utilizada para resolver ecuaciones diferenciales parciales en dominios con geometrías irregulares y condiciones mixtas de frontera.

En este esquema, el dominio se divide en elementos finitos donde la variable dependiente (carga hidráulica) se aproxima mediante funciones de forma. La formulación variacional transforma la ecuación de flujo en su forma integral débil, aplicando el método de los residuos ponderados o el principio de energía mínima; de este modo, las derivadas de segundo orden se expresan como integrales sobre el dominio, lo que permite representar adecuadamente medios heterogéneos y anisotrópicos.

El sistema algebraico resultante se expresa como:

$$[K]\{h\} = \{Q\}$$

Donde [K] representa la matriz global de conductividad hidráulica, {h} es el vector de cargas hidráulicas en cada nodo, {Q} corresponde al vector de términos fuente o sumidero.

La implementación computacional se efectuó en FEFLOW v8.1 (DHI-WASY GmbH), que resuelve el flujo tridimensional en régimen estacionario o transitorio mediante integración numérica sobre elementos triangulares no estructurados, lo cual facilita representar fracturas y fallas dentro del macizo rocoso.

Para la resolución numérica, el programa utiliza el método del Gradiente Conjugado Precondicionado (PCG), algoritmo iterativo que minimiza el error residual entre

iteraciones y acelera la convergencia en sistemas anisotrópicos. Se estableció una tolerancia de 10^{-6}, y el modelo se consideró convergente cuando la diferencia entre los flujos totales de entrada y salida fue menor al 1 %.

Entre las opciones metodológicas configuradas en FEFLOW destacan: flujo estacionario, tensor K anisotrópico definido por la orientación de fracturas, condiciones de contorno mixtas (Dirichlet y Neumann) y refinamiento local de malla.

Finalmente, el modelo obtuvo un error normado del gradiente hidráulico de 0.03 y un balance hídrico con discrepancia < 1 %, validando la estabilidad y coherencia física del esquema numérico para representar la dinámica de flujo en el Derrumbe N.º 03 – Huancavelica.

3.2. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Variables Independientes y Dependientes: La separación de variables independientes y dependientes es coherente con la metodología para modelado hidrogeológico. Las variables independientes incluyen la geometría del modelo, propiedades hidráulicas y condiciones de borde, lo que se mencionó en las recomendaciones como elementos clave para definir el sistema. La variable dependiente, el campo de flujo, viene hacer el resultado del modelo numérico y depende directamente de las variables independientes, que deben ajustarse para obtener una simulación realista.

Calibración y Validación: La calibración y validación del modelo numérico mediante datos de campo y comparaciones con observaciones reales es una parte fundamental del proceso. Esto también fue abordado en las recomendaciones, sugiriendo la comparación de resultados simulados con datos de campo para verificar la precisión del modelo.

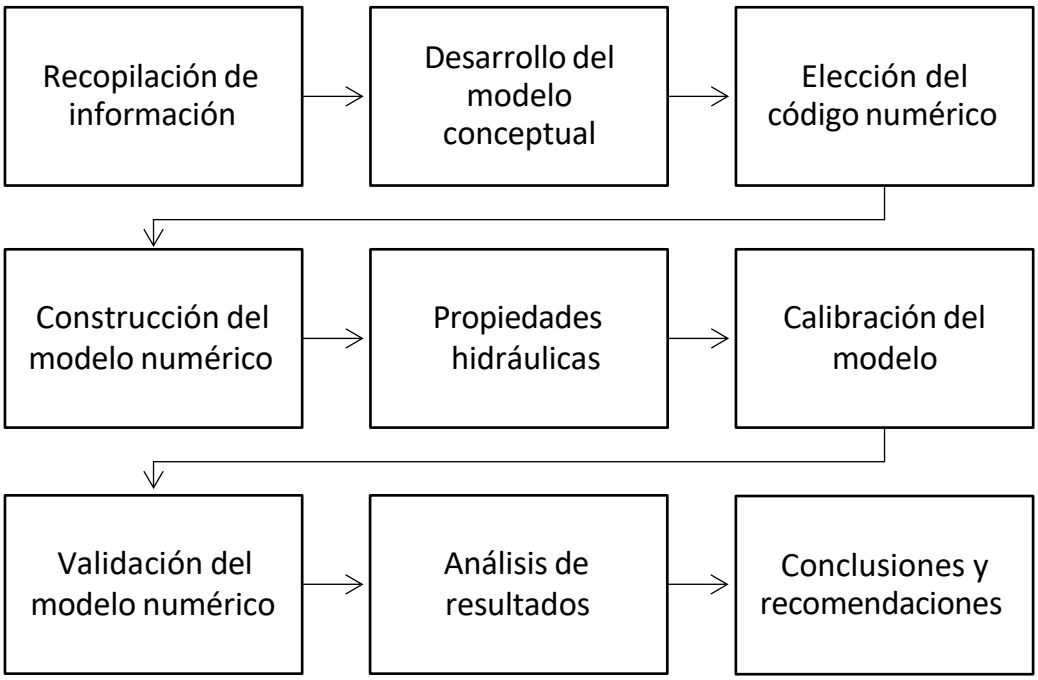
Tabla 2

Muestra la operacionalización de las principales variables involucradas en la modelación hidrogeológica conceptual y numérica en el campo de flujo de las geometrías de las fracturas.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Variable Independiente: Modelo hidrogeológico conceptual y numérica	Es una representación integral que describe procesos y propiedades del sistema hidrogeológico, integrando información como la topografía, geología, geotecnia y la geofísica	Desarrollo de un modelo que utiliza datos geológicos (estructuras, litología, fracturas), hidrogeológicos (niveles piezométricos, recarga, descarga) para simular el comportamiento del acuífero. También realizar la recargar para conocer cuanto ingresa al sistema y cuanto es su escorrentía	Distribución espacial de la unidades geológicas y estructurales, así como los parámetros hidráulicos	-Mapas geológicos - Perfiles geotécnicos - Ensayos de permeabilidad y porosidad. - Tasas de recarga y descarga.
Variable Dependiente: Campo de flujo	Velocidades de flujo y trayectorias modeladas	Utilizan técnicas de visualización avanzadas para representar las velocidades y trayectorias del flujo subterráneo en el modelo numérico, lo que permite una interpretación más precisa de los resultados.	Espacial que corresponde a la extensión y profundidad del acuífero y temporal que se concierne al periodo de simulación y paso de tiempo	Velocidades de flujo, Trayectorias de flujo, Líneas de corriente (m/día)

Figura 10

Muestra mediante un flujograma las etapas de la investigación para elaborar el modelo conceptual y numérico.



Fuente: Extraído y modificado de acuerdo con nuestra investigación de Anderson, M (2015).

CAPÍTULO IV
RESULTADOS

4.1 MODELO CONCEPTUAL

4.1.1 Geología regional

El área de investigación se localiza en la cuenca del río Mantaro, específicamente en la margen derecha del embalse Tablachacla, cerca de la localidad de Mantacra, provincia de Huancavelica. Esta zona se caracteriza por valles jóvenes y una geología compleja, que incluye rocas sedimentarias y metamórficas del Paleozoico, cubiertas por depósitos cuaternarios más recientes.

A continuación, se describe brevemente la geología regional del área investigada:

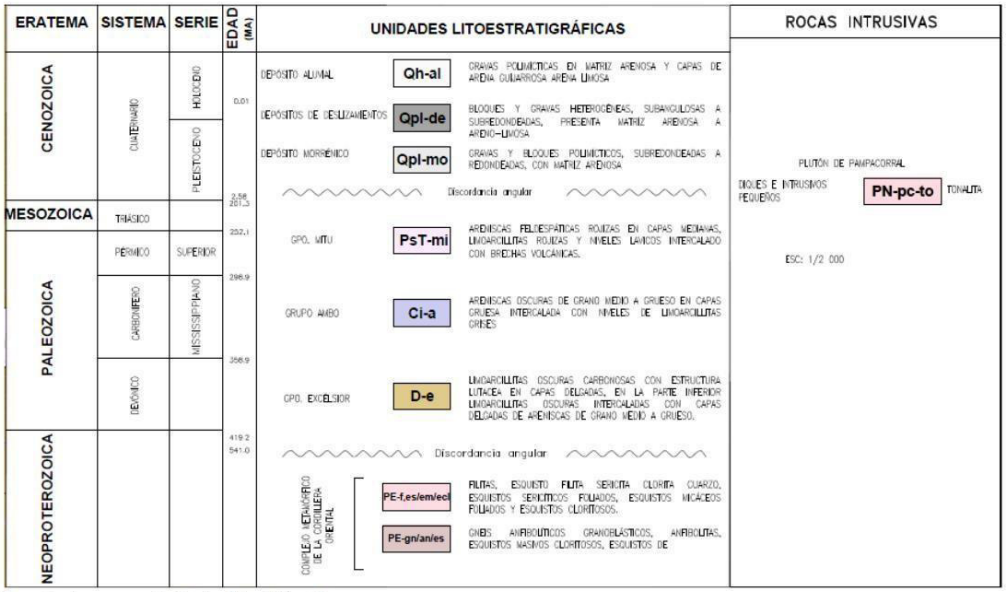
Grupo Excelsior (D-e): El basamento rocoso está representado por el Grupo Excelsior, compuesto por esquistos, filitas micáceas, cuarcitas y pizarras de coloración que varía entre negro y gris oscuro. Estas rocas han sido sometidas a metamorfismo dinámico regional y presentan una intensa foliación y fracturamiento.

Grupo Ambo (Cl-a): Esta unidad está compuesta por una secuencia de areniscas que varían de masivas en la base a capas medias y gruesas hacia la parte superior, con espesores individuales de hasta 5 metros. Se intercalan con niveles delgados de limoarcillitas de color gris oscuro. Las areniscas son de grano medio a fino, con presencia de micas y feldespatos, y presentan una coloración gris oscura característica.

Depósitos Cuaternarios (Q): Cubriendo las formaciones paleozoicas, se encuentran diversos depósitos cuaternarios, incluyendo aluviales, coluviales, deluviales y proluviales, que juegan un papel importante en la hidrogeología local.

Figura 11

Columna estratigráfica de la cuenca del Mantaro cerca al embalse Tablachacla



Fuente: Ingemmet, Carta 25n (III) – Pampas

4.1.2 Geología del Derrumbe 3

La interpretación de los materiales geológicos presentes en el Derrumbe 3 se realizó de forma inferida, basándose en la prospección geofísica, estaciones geomecánicas, cuatro perforaciones y secciones geotécnicas. Es importante destacar que las perforaciones en el sitio no son profundas, alcanzando una profundidad máxima de 50 metros (D3_PL_3). Las secciones geotécnicas se detallan en el Anexo 2.

A continuación, se presenta un resumen de las características geológicas por sección:

Sección A-A'

Predominan depósitos coluviales antiguos (Q-co (ant)) con espesores de 10 a 30 m, que sobreyacen al Grupo Ambo (Ci-a), el cual presenta espesores entre 200 y 300 m. En las zonas fracturadas del Grupo Ambo (Ci-(f5)), el espesor varía entre 50 y 100 m. El basamento Excelsior (D-e) tiene espesores de 30 a 50 m, con zonas fracturadas (D-e (f5)) de 20 a 40 m. Los depósitos superficiales son delgados (0-5 m), lo que indica estabilidad topográfica.

Sección B-B'

Los depósitos coluviales (Q-co) y deluviales residuales (Q-dl/re) presentan espesores entre 20 y 60 m y 5 a 15 m respectivamente. El Grupo Ambo (Ci-a) tiene espesores de 150 a 280 m, con fracturamiento (Ci-(f5)) entre 60 y 90 m. El basamento Excelsior (D-e) varía entre 40 y 70 m, con fracturas (D-e (f5)) de 30 a 50 m, indicando vías preferenciales para flujo subterráneo.

Sección C-C'

Se observan depósitos proluviales (Q-pl) y coluviales deluviales (Q-co/dl) con espesores variables entre 5 y 30 m. El Grupo Ambo (Ci-a) domina con espesores de 180 a 320 m, y fracturamiento (Ci-(f5)) entre 40 y 80 m. El basamento Excelsior (D-e) presenta espesores de 25 a 60 m, con fracturas (D-e (f5)) de 25 a 45 m.

Sección D-D'

Los depósitos coluviales antiguos (Q-co (ant)) y deluviales residuales (Q-dl/re) tienen espesores entre 10 y 45 m y 5 a 15 m respectivamente. El Grupo Ambo (Ci-a) presenta espesores de 170 a 310 m, con fracturamiento (Ci-(f5)) entre 50 y

90 m. El basamento Excelsior (D-e) varía entre 30 y 55 m, con fracturas (D-e (f5)) de 20 a 40 m.

Sección E-E'

Similar a la D-D', con depósitos coluviales y deluviales de espesores entre 15 y 55 m y 5 a 15 m respectivamente. El Grupo Ambo (Ci-a) tiene espesores de 160 a 300 m, con fracturamiento (Ci-(f5)) entre 45 y 85 m. El basamento Excelsior (D-e) presenta fracturas (D-e (f5)) de 25 a 45 m.

Sección F-F'

Destacan depósitos proluviales (Q-pl) y coluviales (Q-co) con espesores entre 20 y 50 m. El Grupo Ambo (Ci-a) y su variante fracturada (Ci-(f5)) presentan espesores de 150 a 290 m y 50 a 80 m respectivamente. El basamento Excelsior (D-e) y fracturado (D-e (f5)) varían entre 30 y 55 m y 20 a 40 m.

Sección G-G'

Presenta depósitos coluviales y deluviales residuales con espesores entre 15 y 45 m y 5 a 15 m. El Grupo Ambo (Ci-a) domina con espesores de 160 a 280 m, y fracturamiento (Ci-(f5)) entre 40 y 75 m. El basamento Excelsior (D-e) y fracturado (D-e (f5)) tienen espesores de 25 a 50 m y 20 a 35 m.

4.1.3 Sistema de fallas y fracturas

Constituido principalmente por roca pizarra fracturada, cuyo parámetro geo-hidráulico más relevantes, puesto es donde se han identificado 5 estructuras que atraviesan el Grupo Ambo de areniscas fracturadas. Estas 5 fracturas importantes son las que controlaría el flujo de las aguas subterráneas dentro de nuestra área de interés.

En las siguientes figuras se muestran las secciones geológicas que fueron interpretadas a partir de la prospección geofísica y las perforaciones.

Figura 12

En la vista se observa un depósito coluvial-deluvial (Q-co/de) compuesto por material inconsolidado con clastos subangulosos englobados en una matriz limo-arcillosa

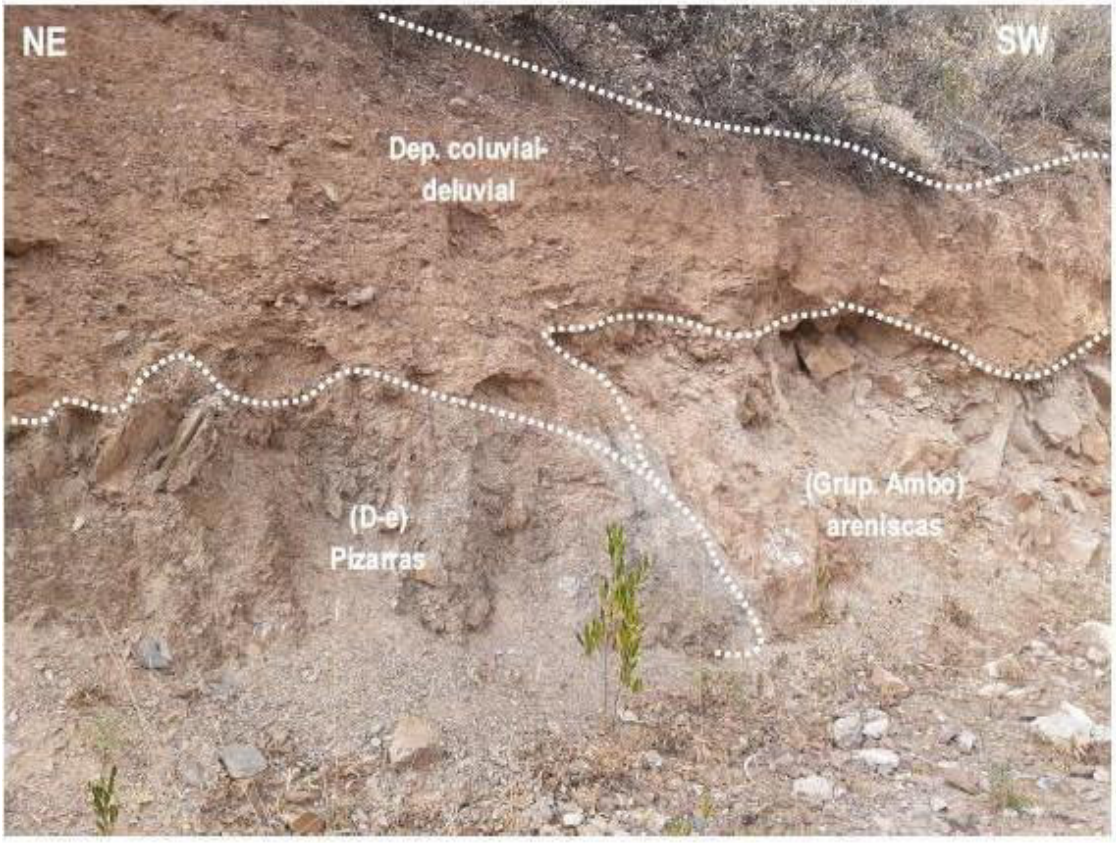


Figura 13

Mapa geológico de la zona del 2D empleado para el modelo conceptual y posteriormente integrado al modelo numérico.

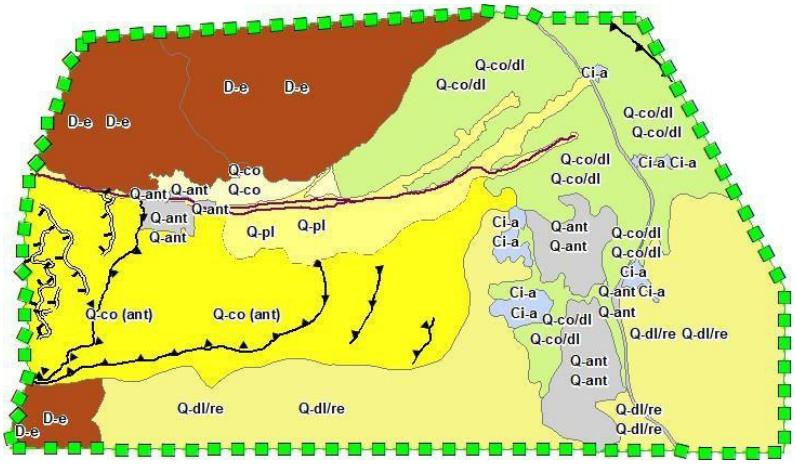


Figura 14

Vista panorámica del Derrumbe 3 tomado de NE al SW.



4.1.4 Propiedades hidráulicas

De acuerdo con los ensayos diamantinos realizado en el D3 se realizaron ensayos de permeabilidad de roca en las perforaciones, aunque también, se enviaron a muestras al laboratorio para obtener las pruebas la permeabilidad de estos materiales geológicos.

Tabla 3

Materiales ensayados en laboratorio para estimar la permeabilidad de los materiales geológicos.

Tipo de Material	Permeabilidad (cm/s)
Depósito Antrópico	1.00E+00
Depósito Coluvial	1.00E-01
Depósitos Coluvial antiguo	1.34E-02
Depósitos Coluvial -Deluvial / Residual / Proluvial	2.00E-02
Grupo Ambo	4.07E-04
Grupo Excelsior	1.00E-07

Fuente: Datos adquiridos del proyecto por Electro Perú, 2019.

4.1.5 Sistema de flujo

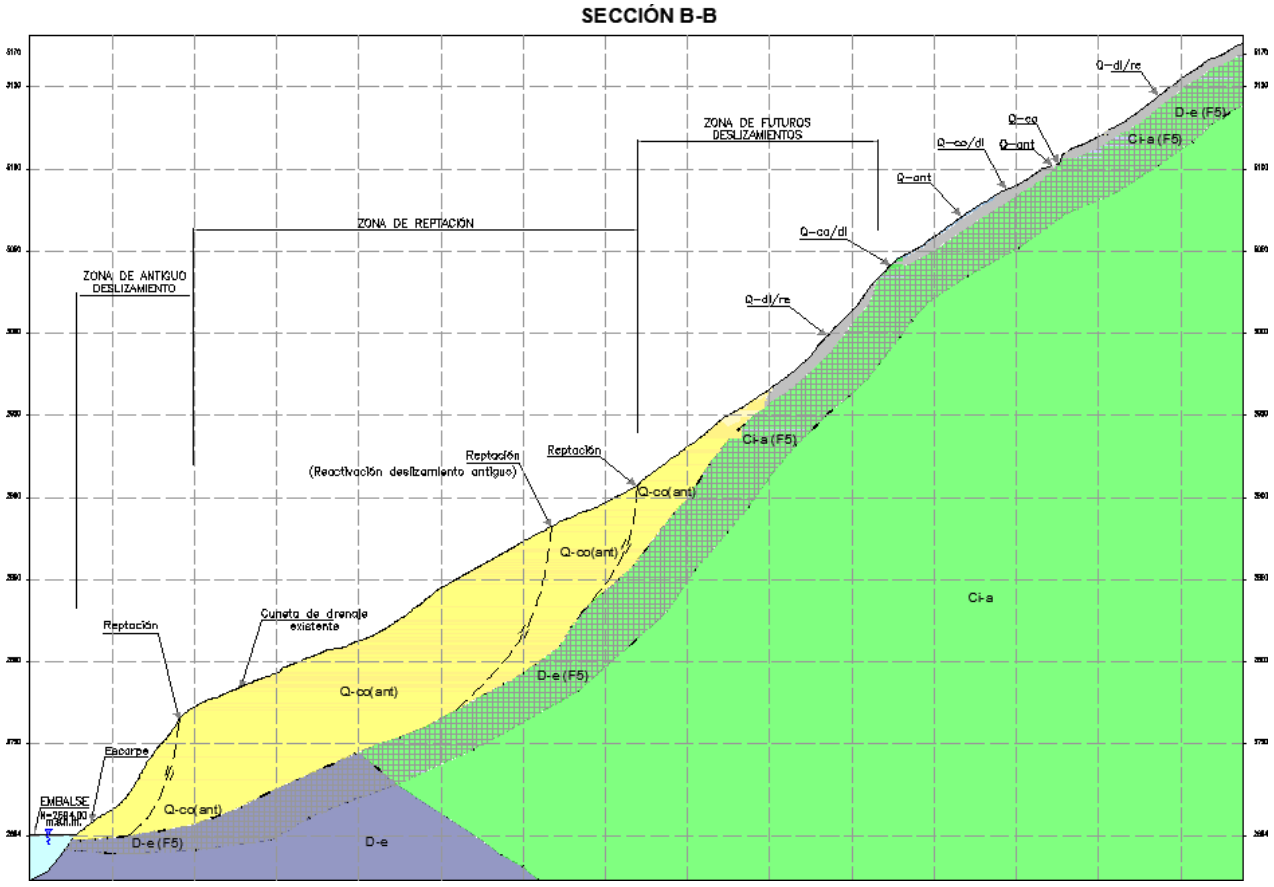
El flujo de aguas subterráneas en el área de estudio se dirige de SE a NW, con un destino final hacia el río Mantaro. Las zonas 3 y 4, asociadas con la Formación Excélsior, presentan un flujo restringido debido al leve fracturamiento de las rocas mientras las fallas y las fracturas del Grupo Ambo (areniscas fracturadas) son las estructuras principales que controlan el flujo de aguas subterráneas, actuando como conductos preferenciales. La profundidad del nivel freático varía entre 8.5 y 36 metros, dependiendo de la pendiente del terreno en el D3 y la disposición de los materiales geológicos.

La profundidad del nivel freático varía dependiendo de la pendiente del terreno en el D3. En áreas con mayor pendiente, el nivel freático puede estar más

profundo, mientras que, en áreas más planas, puede estar más cerca de la superficie (a nivel del río Mantaro). Esta variabilidad en la profundidad del nivel freático puede influir en la dinámica del flujo de aguas subterráneas, afectando la recarga y la descarga del sistema acuífero.

Figura 15

Según los datos geofísicos disponibles, el nivel freático se ubica entre 8.5 y 36 metros de profundidad, variando según el espesor de los materiales cuaternarios y la litología del Grupo Ambo. Esta estimación es preliminar, basada solo en las perforaciones D3_P_2 y D3_P_3, ya que no se cuenta con piezómetros ni monitoreo para evaluar su variabilidad estacional.



4.1.6 Balance hídrico

Para estimar la recarga de aguas subterráneas por cada tipo de material geológico en la zona de estudio, se empleó el método Curva Número (CN), desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos (NRCS). El objetivo fue determinar la cantidad de agua infiltrada en el suelo durante eventos de lluvia, considerando factores como la vegetación, el uso del suelo y las condiciones del terreno.

Para el análisis de recarga y descarga en la parte numérica del estudio, se utilizó la información de precipitación de la estación Quichuas, abarcando el periodo de 1964 a 2005. La Tabla 4 presenta estos datos de precipitación mensual y anual.

Precipitación

Se utilizó la data de la estación Quichuas desde el año 1964 al 2005 para analizar la recarga y descarga de diferentes tipos de suelo y roca en la parte numérica del estudio. La tabla 4 muestra los datos de precipitación mensual y anual, proporcionando una base para estimar la recarga y descarga en la zona de estudio.

Tabla 4

Se muestra los datos de precipitación que se empleó de la estación Quichuas

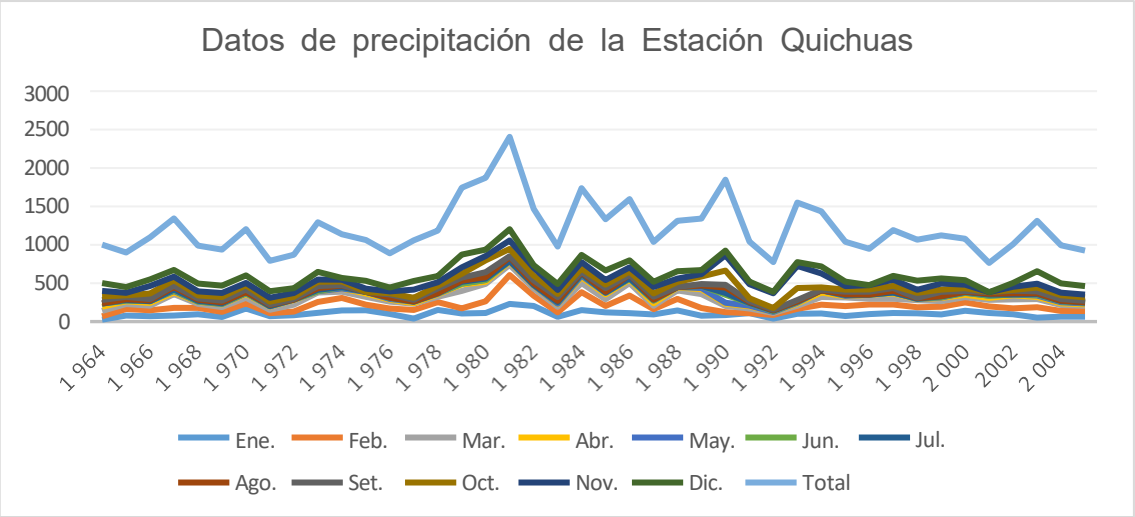
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
1 964	25	43	71	54	42	0	0	3	43	48	71	101	501
1 965	78	86	65	34	10	1	8	9	32	17	35	75	450
1 966	69	79	60	36	21	1	0	11	16	73	97	86	549
1 967	79	100	179	23	18	8	10	32	19	71	45	88	672
1 968	95	84	52	25	4	2	9	14	16	40	52	102	495
1 969	59	67	62	36	4	5	5	14	20	48	52	96	468
1 970	171	66	73	47	11	5	11	1	33	54	32	98	602
1 971	69	40	45	41	5	2	0	14	6	37	51	86	396
1 972	83	48	89	61	5	0	0	0	10	27	50	62	435
1 973	113	142	123	17	0	2	17	21	27	57	28	100	647
1 974	144	164	81	39	2	20	0	20	6	46	23	24	569
1 975	148	72	103	43	20	0	0	0	0	0	43	102	531
1 976	99	72	88	26	10	12	4	0	42	17	22	52	444
1 977	39	112	82	8	17	1	2	0	22	26	107	113	529
1 978	151	103	69	30	9	7	1	1	60	34	46	82	593
1 979	106	66	228	82	14	0	22	14	40	51	83	166	872
1 980	112	151	228	28	22	1	18	18	65	154	56	83	936

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
1 981	230	376	133	39	11	0	0	51	11	95	110	147	1203
1 982	203	133	95	38	3	6	1	19	38	63	102	33	734
1 983	62	58	72	35	6	19	2	16	47	43	51	77	488
1 984	150	233	119	77	18	20	4	20	7	44	83	94	869
1 985	121	83	87	63	18	7	0	9	46	46	60	126	666
1 986	110	228	164	45	13	0	5	44	0	43	53	93	798
1 987	92	70	44	32	34	4	10	1	38	41	86	67	519
1 988	146	150	109	39	5	0	0	0	3	64	43	97	656
1 989	77	99	182	64	14	27	0	8	17	98	33	52	671
1 990	84	38	82	29	13	104	23	71	35	184	202	59	924
1 991	110	0	59	30	9	30	5	12	13	35	183	35	521
1 992	38	48	26	13	0	11	7	4	7	22	193	18	387
1 993	101	64	41	29	12	8	5	4	16	156	289	50	775
1 994	105	116	99	58	29	0	0	1	8	30	181	91	718
1 995	73	128	112	16	5	13	1	8	33	26	47	58	520
1 996	97	125	76	51	3	0	0	0	36	30	56	0	474
997	112	111	74	69	12	1	0	22	36	30	79	50	596
1 998	107	79	93	12	2	6	0	6	4	65	39	120	533
1 999	92	101	72	43	6	3	12	2	56	29	79	66	561
2 000	141	108	68	33	24	5	5	5	11	35	46	58	539
2 001	111	87	84	26	28	1	14	10	21	0	0	0	382
2002	96	77	115	54	12	0	0	13	35	10	42	50	504
2 003	52	135	106	27	18	13	8	8	25	52	49	163	656
2 004	63	75	78	21	15	11	6	3	22	48	35	120	497
2 005	64	72	70	19	11	9	5	2	19	45	36	110	462
Prom.	102	102	94	38	13	9	5	12	25	51	73	80	603
Max.	230	376	228	82	42	104	23	71	65	184	289	166	1203
Min.	25	0	26	8	0	0	0	0	0	0	0	0	382

Nota: esta información fue tomada de la tesis del Ing. Mogrovejo 2016 y 2019. Información limpia y procesada.

Figura 16

En la gráfica se visualiza las precipitaciones de la misma estación para el periodo 1964 al 2005



Resultados del balance hídrico

A continuación, se presentan los valores de recarga de aguas subterráneas estimados para las distintas unidades hidrogeológicas de la zona de estudio. Estos datos reflejan tanto la recarga anual en milímetros (mm/año) como el porcentaje que cada unidad representa dentro del total de recarga estimado.

Tabla 5

Presentación de los valores de recarga por cada unidad hidrogeológica

Unidad hidrogeológica	Recarga (mm/año)	Recarga %
Cuaternario Coluvial	406.91	0.6744
Cuaternario Deluvial	319.17	0.529
Formación Ambo	297.56	0.4932
Grupo Excélsior	324.36	0.5376

De acuerdo con los datos obtenidos, la unidad hidrogeológica Cuaternario Coluvial presenta la mayor recarga, con 406.91 mm/año, lo que representa el 0.6744% del total de la recarga. Este valor superior sugiere que esta unidad es especialmente eficiente en términos de infiltración de agua, probablemente debido a sus características geológicas y de uso del suelo. Por otro lado, la unidad Cuaternario Deluvial muestra una recarga de 319.17 mm/año y representa

el 0.529% de la recarga total, lo que indica un desempeño ligeramente inferior en términos de infiltración.

Por su parte, la Formación Ambo presenta la menor recarga en términos absolutos, con 297.56 mm/año, lo que corresponde al 0.4932% de la recarga total. Esta menor recarga podría estar asociada a características del suelo o a un tipo de uso del suelo que limita la infiltración. Esta menor recarga podría estar asociada a características del suelo o a un tipo de uso del suelo que limita la infiltración. No obstante, es fundamental destacar que, una vez que el agua ingresa al subsuelo, las fracturas de la Formación Ambo actúan como vías de alta conductividad, concentrando y canalizando el flujo subterráneo de manera preferencial

Finalmente, la unidad Grupo Excélsior muestra una recarga de 324.36 mm/año, que representa el 0.5376% del total, un valor intermedio entre los otros materiales geológicos. Aunque posee esta recarga, es importante señalar que el Grupo Excelsior, al ser un basamento rocoso de baja permeabilidad, actúa principalmente como una barrera hidráulica dentro del sistema de flujo subterráneo, restringiendo el movimiento del agua a través de su masa.

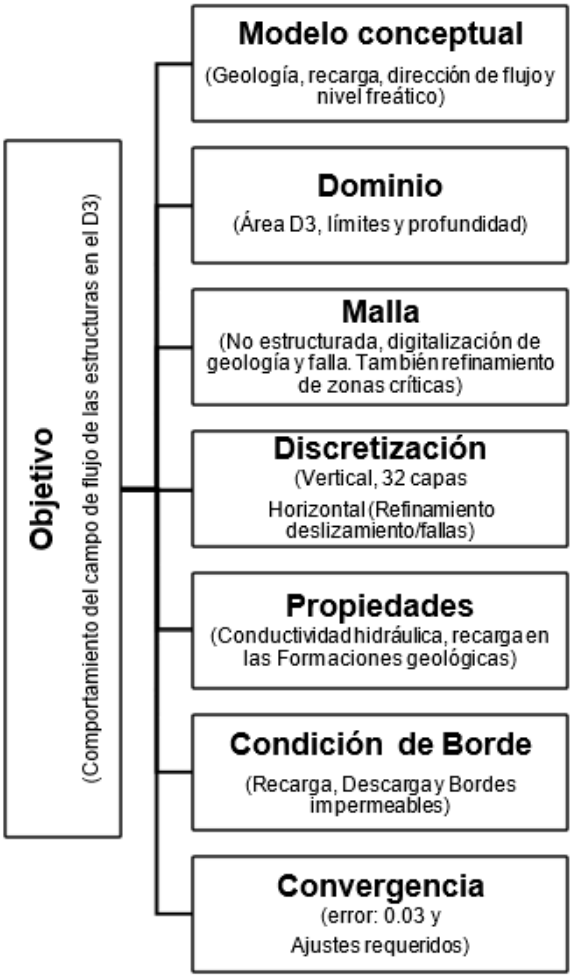
4.1.7 Resultados del modelo conceptual

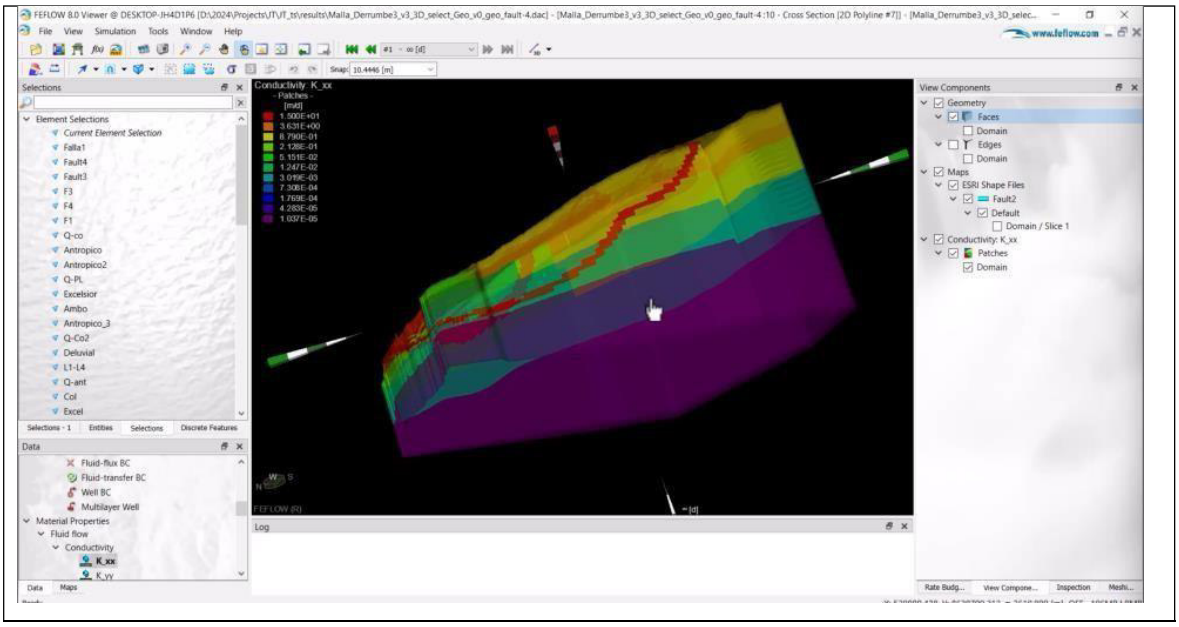
El modelo conceptual revela la identificación de 7 fracturas importantes pertenecientes al Grupo Ambo, las cuales atraviesan el Grupo Excelsior y controlan el flujo de agua subterránea en la zona del Derrumbe 3. Además, el modelo también muestra las diferentes formaciones geológicas presentes en la región. El color amarillo representa los depósitos coluviales, mientras que el color mostaza a los deluviales. Por otro lado, el color morado y el magenta representan al Grupo Ambo y la Formación Excélsior, respectivamente.

Respecto a la recarga, los depósitos coluviales presentan un valor superior que favorece la infiltración. En contraste, el Grupo Ambo presenta menor recarga. Las unidades del Deluvial y el Grupo Excélsior muestran recargas intermedias.

Figura 17

Representa el modelo en 3D, mostrando la forma en que se representaron las capas de la geología del Derrumbe 3, utilizando FEFLOW v8.1 como modelo conceptual y posterior modelo numérico.



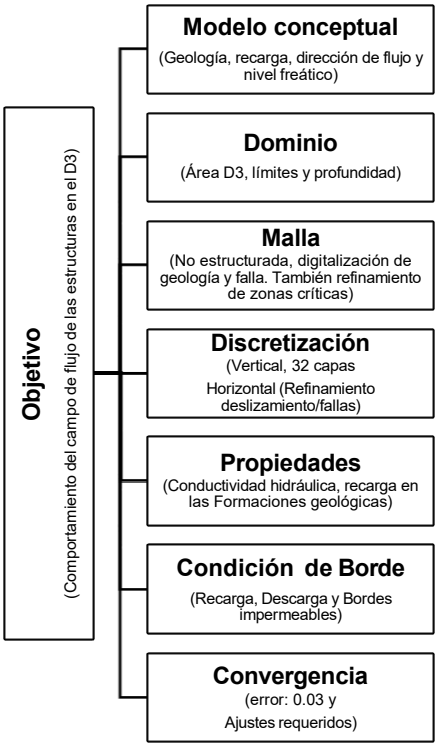


4.2 MODELO NUMÉRICO

La implementación del modelo numérico se realizó utilizando FEFLOW v8, una de las versiones más recientes del software desarrollado por el Grupo DHI, especializado en simular el flujo subterráneo en contextos hidrogeológicos complejos como el del Derrumbe 3. El objetivo principal del modelo es simular el comportamiento del flujo de agua subterránea dentro del dominio fracturado del Derrumbe 3, evaluando cómo las fracturas interactúan con el flujo subterráneo para comprender mejor su impacto en la estabilidad geotécnica del área.

Figura 18

En el siguiente mapa conceptual muestra los pasos que se llevaron a cabo para realizar el modelo numérico empleando el Software Feflow V8.1. El esquema es una modificado de Anderson, M (2015) adaptado a la información que se cuenta del D3 y al propósito que persigue la tesis.



A continuación, se detallan los aspectos fundamentales de la descripción de los pasos para la construcción del modelo numérico y cómo estos se alinean con los objetivos de la tesis.

4.2.1 Dominio

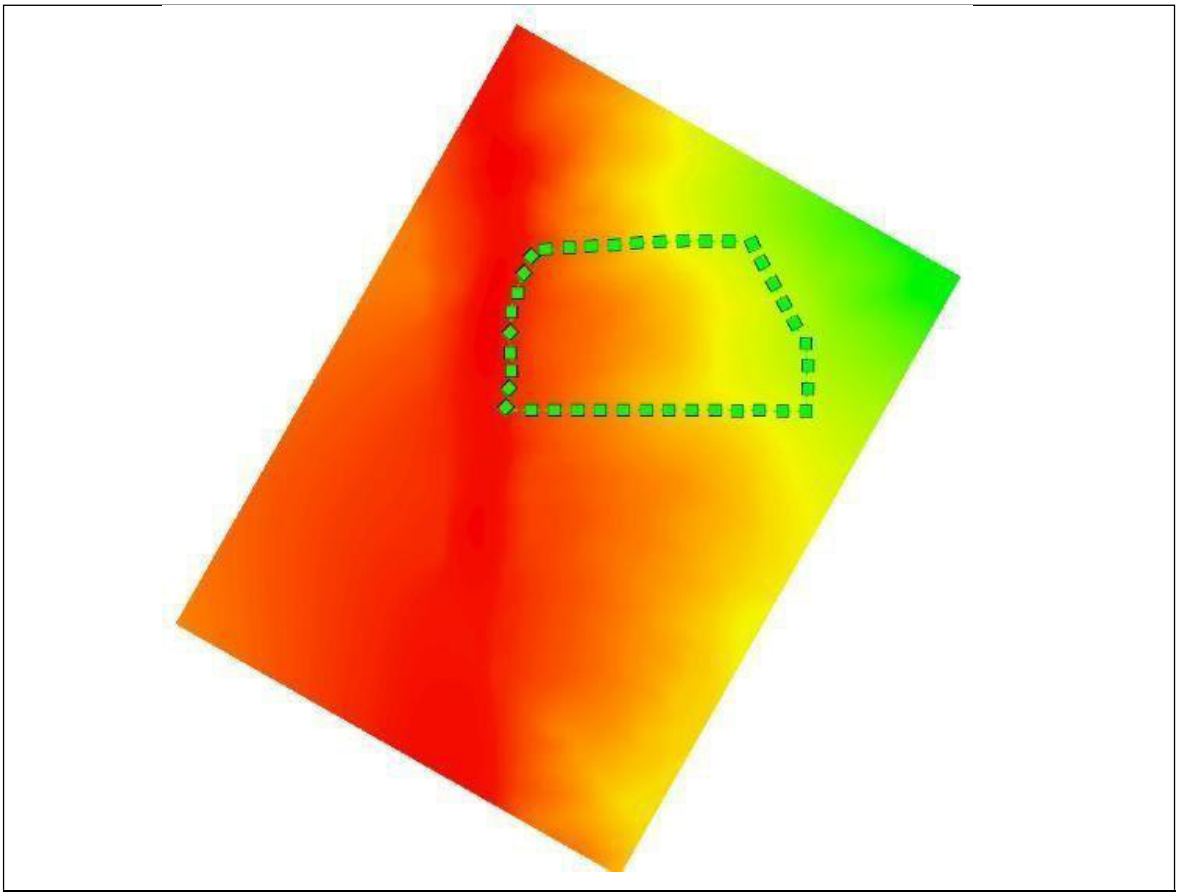
El modelo numérico se define para cubrir toda el área afectada por el Derrumbe 3, tanto en superficie como en profundidad tomando como información las perforaciones descritas en el modelo conceptual. Se estableció límites y de profundidad, en los que se asume que el acuífero está confinado por capas impermeables en los bordes laterales y en la base.

La selección del dominio responde a la necesidad de representar las características geológicas y estructurales del terreno de manera precisa, incorporando las áreas con mayor influencia en el flujo subterráneo y la estabilidad del talud. Este recorte topográfico fue integrado en el modelo numérico para garantizar que la simulación se enfoque en los puntos críticos del Derrumbe 3, permitiendo un refinamiento adicional en las zonas más relevantes para el análisis.

Cabe señalar que las características del dominio y de la malla que será explicado más adelante, fue tomado de la geología en 3D que se representó en la conceptualización de los resultados del modelo conceptual hidrogeológico usando Feflow v8.1

Figura 19

Dominio del modelo del Derrumbe 3 el cual se muestra el recorte de la topografía.



4.2.2 Malla

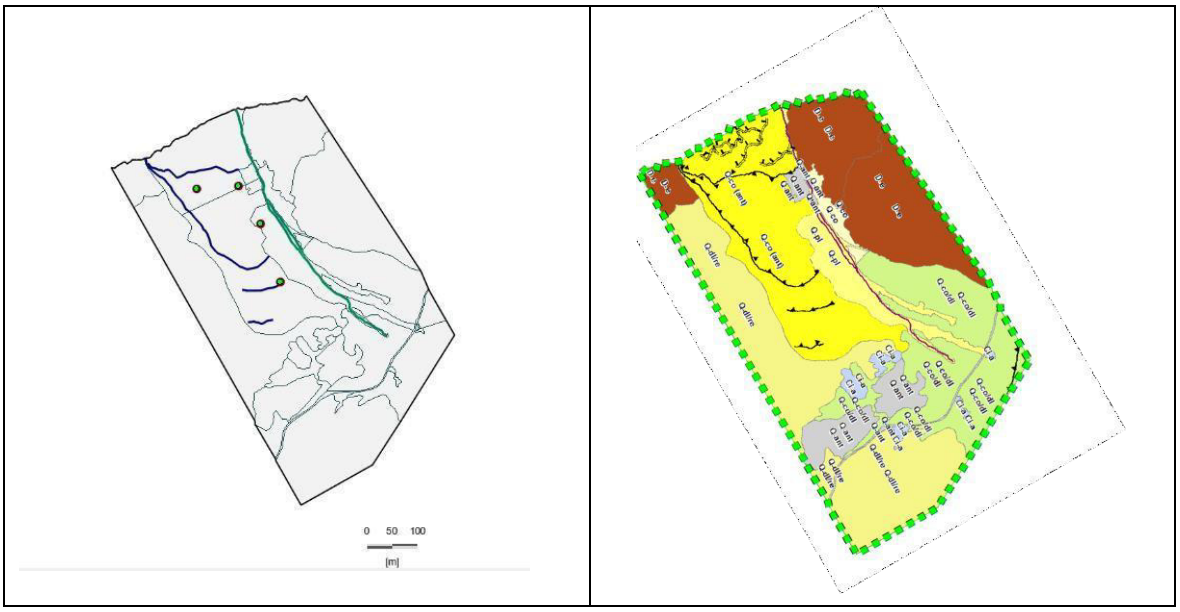
Para construir esta malla, se digitalizaron manualmente los contactos geológicos y estructurales directamente en el software, asegurando que las propiedades geológicas y las estructuras principales del Derrumbe 3 se representaran con precisión. Este proceso de digitalización permitió capturar de forma detallada las unidades hidrogeológicas y las principales fallas y fracturas presentes en el área.

La malla se diseñó como una malla no estructurada, lo que permitió un refinamiento especial en zonas de interés, como las áreas de deslizamiento y las principales estructuras geológicas. Este refinamiento es esencial para aumentar la resolución y precisión de las simulaciones en los puntos críticos donde el flujo subterráneo y las condiciones geotécnicas tienen mayor impacto. Además, la delimitación del dominio de la malla (marcada con líneas verdes discontinuas) garantiza que la simulación abarque todas las zonas relevantes, desde las áreas de recarga hasta las de descarga.

Este diseño de malla no solo asegura la estabilidad numérica del modelo, sino también su capacidad para capturar fenómenos locales que podrían influir significativamente en la estabilidad del talud y el comportamiento hidrogeológico del Derrumbe 3.

Figura 20

Elaboración de la malla en donde se digitalizó los contactos en Feflow V.8. En la figura derecha se muestra la geología del D3, mientras que en la izquierda se observa las fallas en color azul y verde como parte del modelo numérico.



4.2.3 Discretización del modelo

La Figura 21 muestra la discretización vertical realizada en el modelo numérico mediante la configuración de capas en 3D (Layering) en FEFLOW v8.1 Esta etapa es esencial para representar de manera precisa las condiciones geológicas y estructurales del área del Derrumbe 3, lo que garantiza que las propiedades hidrogeológicas sean correctamente asignadas a lo largo de las distintas profundidades del dominio modelado.

Discretización vertical:

Se definieron 32 cortes (slices) y capas que dividen el modelo en secciones horizontales a diferentes elevaciones, cada una asignada de acuerdo con la topografía, las capas geológicas y las estructuras principales, como fracturas y

fallas. Estas capas permiten capturar la heterogeneidad vertical del terreno.

- Las capas fueron clasificadas como "movibles", lo que indica que pueden ajustarse en función de los datos geológicos y estructurales para reflejar la geometría real del subsuelo.

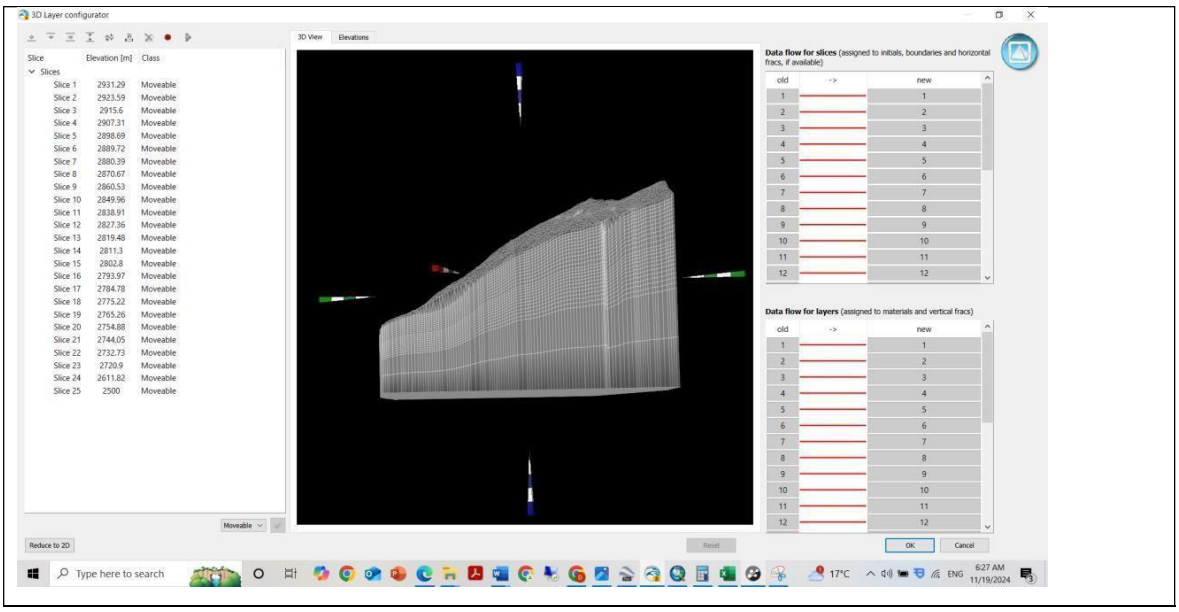
Propósito de la discretización vertical:

- **Representar la geología:** Cada capa corresponde a una unidad litológica o hidrogeológica, asignándole propiedades específicas como la conductividad hidráulica y el almacenamiento.
- **Capturar estructuras:** Las fallas y fracturas presentes en el dominio del modelo fueron integradas en esta discretización, permitiendo evaluar su interacción con el flujo subterráneo.

La precisión en la discretización vertical es fundamental para garantizar la fidelidad del modelo, ya que permite una representación más detallada del flujo subterráneo y su relación con las condiciones geológicas y estructurales del Derrumbe 3. Este enfoque asegura que el modelo capture los fenómenos críticos que influyen en la estabilidad del talud y el comportamiento hidrogeológico de la zona.

Figura 21

Discretización vertical: realización del 3D Layering de acuerdo con la geología y definición de estructuras.



Discretización horizontal:

La Figura 22 presenta la discretización horizontal del modelo numérico, donde se ha aplicado un refinamiento especial en las zonas más relevantes, como el área del deslizamiento y las fallas principales del Derrumbe 3. Este enfoque permite capturar con mayor detalle las interacciones hidrogeológicas y estructurales que influyen en el flujo subterráneo y la estabilidad geotécnica del terreno.

Refinamiento de la Malla Horizontal

Zona del deslizamiento: El refinamiento de la malla en esta área se diseñó para representar de manera precisa los gradientes hidráulicos y las condiciones de flujo subterráneo que afectan directamente la estabilidad del talud.

Fallas principales: Se integraron las fallas como elementos discretos en la malla, garantizando que estas estructuras se modelen adecuadamente como zonas de alta permeabilidad o caminos preferenciales para el flujo subterráneo.

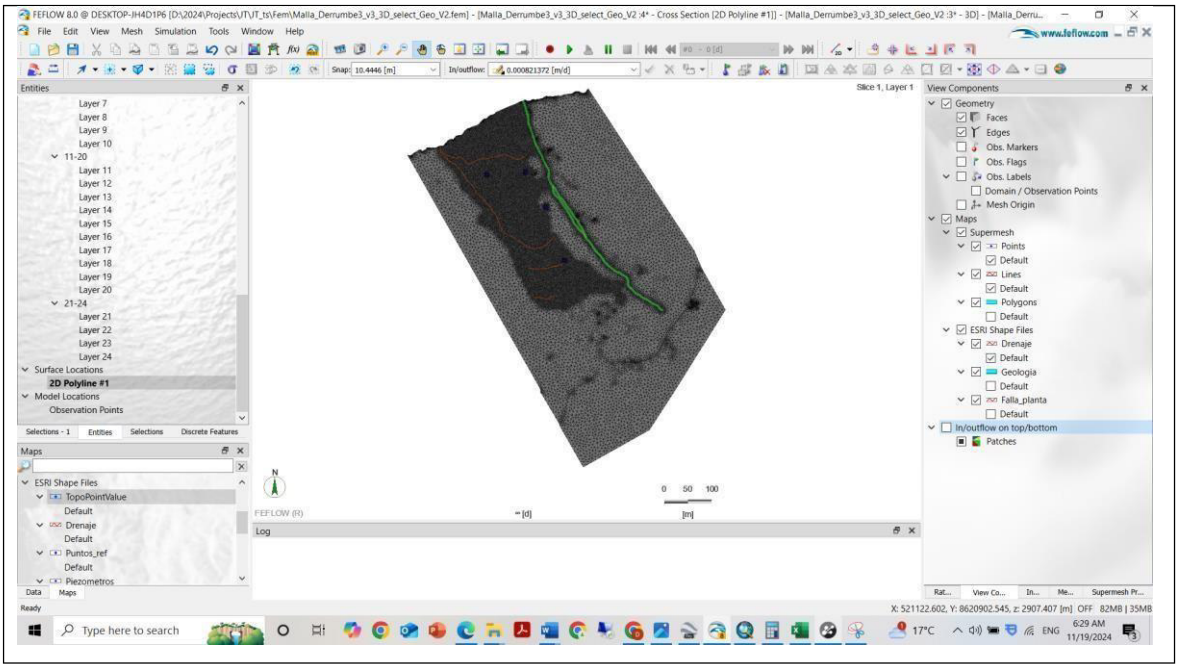
Características Clave

Malla no estructurada: Se utilizó una malla no estructurada, que permite un diseño flexible y adaptado a la complejidad del terreno. Esta configuración es crucial para representar zonas de alta heterogeneidad, como las áreas fracturadas y de deslizamiento.

Resolución variable: En áreas críticas, como las proximidades de las fallas y el deslizamiento, se utilizaron elementos más pequeños para incrementar la precisión del modelo, mientras que en zonas periféricas se mantuvieron elementos más grandes para optimizar los recursos computacionales.

Figura 22

Discretización horizontal: refinamiento de la zona del deslizamiento y fallas.



4.2.4 Asignación de conductividades

La Tabla 6 presenta detalla las conductividades hidráulicas asignadas al modelo numérico, basadas en los datos obtenidos de ensayos de permeabilidad en roca. Estas propiedades son fundamentales para simular el comportamiento del flujo subterráneo dentro del dominio modelado del Derrumbe 3 y reflejan la heterogeneidad hidrogeológica del área.

Tabla 6

Asignación de conductividades hidráulicas asignadas al modelo tomando como base los datos de los ensayos de permeabilidad en roca.

Zona	Material	Kh (cm/s)	Kv (cm/s)	Kh/Kv	Dirección
1	Cuaternario Coluvial (Q-c) Depósitos	10^{-2}	10^{-3}	1.0	0
2	Coluvial - Deluvial / Residual / Proluvial	$2.0*10^{-2}$	$2.0*10^{-4}$	1.0	0
3	Grupo Ambo	$3.5*10^{-4}$	$3.5*10^{-5}$	0.7	150
4	Basamento rocoso (D-e)	$1.2*10^{-7}$	$1.2*10^{-9}$	1.0	0

Nota: el basamento rocoso hace referencia al Grupo Excelsior.

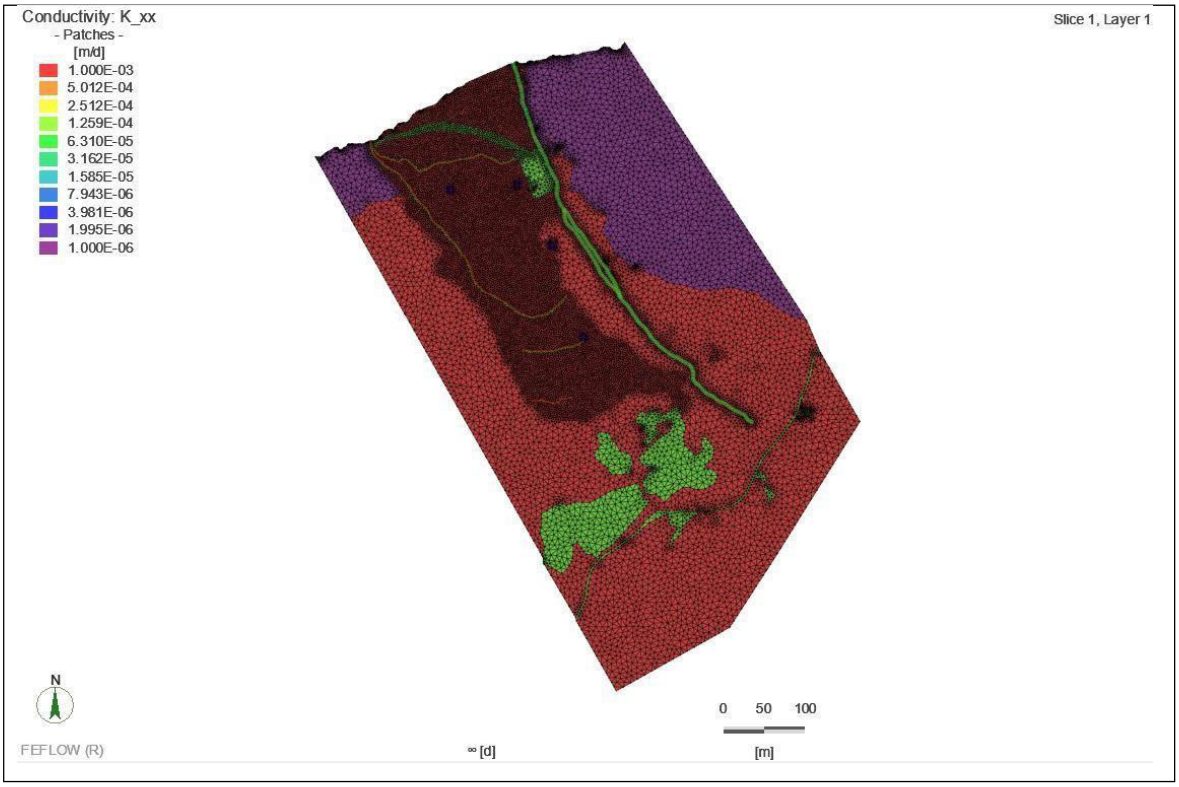
La Figura 23 muestra la distribución espacial de las conductividades hidráulicas dentro del dominio modelado. Las diferentes tonalidades reflejan las variaciones en los valores de Kx, que representan la conductividad horizontal del flujo subterráneo en cada celda de la malla.

Zonas de alta conductividad: Corresponden a los materiales del Cuaternario Coluvial y Paleo Derrumbe, donde el flujo subterráneo se concentra debido a la mayor permeabilidad.

Zonas de baja conductividad: Asociadas al Basamento Rocoso, que actúa como una barrera para el flujo subterráneo.

Figura 23

En el modelo muestra por coloración la asignación de los materiales geológicos y sus respectivas conductividades hidráulicas



La correcta asignación de las conductividades hidráulicas permite capturar las heterogeneidades del sistema hidrogeológico y modelar adecuadamente los

gradientes hidráulicos y las trayectorias del flujo subterráneo. Esto es clave para identificar zonas críticas de saturación y evaluar el impacto del flujo en la estabilidad del talud en el Derrumbe 3.

4.2.5 Asignación de recarga

La Figura 24 muestra el modelo numérico donde, además de las conductividades hidráulicas previamente asignadas a los materiales geológicos, se visualiza la recarga implementada en el dominio. La recarga, expresada en términos de flujo vertical en la parte superior del modelo, es un componente esencial para representar el ingreso de agua al sistema hidrogeológico.

Distribución de la Recarga

Colores en la figura: La coloración azulada indica los valores de recarga aplicados en cada celda de la malla. Este valor representa la cantidad de agua infiltrada en el terreno debido a la precipitación, menos las pérdidas por escorrentía y evapotranspiración.

Homogeneidad: En este caso, la recarga se aplicó como un valor uniforme en todo el dominio modelado, con base en las condiciones climáticas promedio y los parámetros hidrogeológicos de la región.

Metodología de Asignación

La asignación de recarga se realizó considerando:

Datos climáticos locales: Promedios históricos de precipitación anual y balances hídricos para la zona del Derrumbe 3.

Características del suelo: El nivel de infiltración calculado depende de la permeabilidad de las capas superiores, dominadas por materiales coluviales y depósitos del derrumbe.

Condiciones iniciales: La recarga se estableció como flujo positivo en la superficie del modelo, representando la entrada de agua al sistema.

Impacto de la Recarga en el Modelo

La recarga asignada tiene un impacto directo en:

Flujos subterráneos: Alimenta los acuíferos y afecta la distribución de gradientes hidráulicos dentro del dominio modelado.

Saturación del terreno: Incrementa la presión intersticial en las zonas del deslizamiento y las fallas, aspectos críticos para evaluar la estabilidad geotécnica del talud.

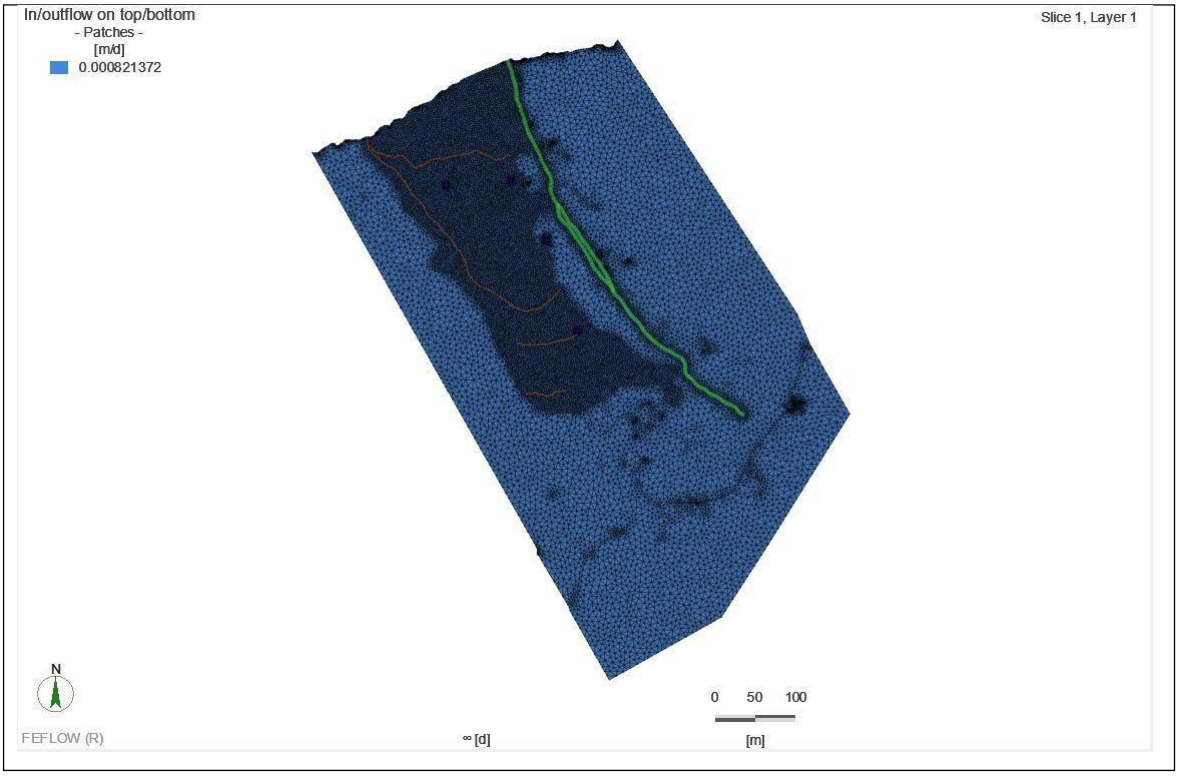
Importancia en la Simulación

La correcta representación de la recarga es esencial para modelar las dinámicas de flujo subterráneo bajo diferentes condiciones climáticas. Esta asignación permite analizar cómo eventos de recarga intensa, como lluvias extremas, pueden influir en la estabilidad del terreno y en el comportamiento hidrogeológico general del Derrumbe 3.

Este enfoque asegura que el modelo capture con precisión el impacto del agua infiltrada en las condiciones locales, facilitando la evaluación de escenarios críticos para la gestión del riesgo geológico.

Figura 24

Asignación de la recarga al modelo en Feflow.



4.2.6 Condición de borde (CB)

La Figura 25 muestra la asignación de las condiciones de borde (CB) dentro del modelo numérico, que son fundamentales para definir los flujos de entrada y salida del sistema hidrogeológico en el área del Derrumbe 3. Estas condiciones se establecen en función de la distribución de los materiales geológicos, las características hidrogeológicas del dominio y las interacciones esperadas entre el flujo subterráneo y las estructuras geológicas principales.

Definición de Condiciones de Borde

Condiciones de Recarga:

En la parte superior del modelo, las condiciones de borde representan la recarga directa proveniente de la infiltración de agua de lluvia. Esta recarga se

distribuye de acuerdo con la permeabilidad de los materiales geológicos en cada zona.

Las áreas de mayor recarga corresponden a los materiales más permeables, como el Cuaternario Coluvial (Q-c), mientras que, en materiales menos permeables, como el Basamento Rocoso (D-e), la recarga es limitada.

Condiciones de Descarga:

Las zonas de descarga se modelan principalmente en las fallas, representadas como elementos lineales de alta conductividad que facilitan la salida del flujo subterráneo hacia la superficie o cuerpos de agua superficiales.

Estas condiciones permiten simular cómo el agua subterránea emerge en las áreas cercanas a los deslizamientos y las fracturas dominantes.

Bordes Laterales y Base del Modelo:

Los límites laterales y la base del dominio se definieron con condiciones de frontera de tipo Neumann, las cuales permiten especificar el flujo subterráneo a través de dichos contornos. Este flujo puede ser nulo (caso impermeable) o distinto de cero, representando recarga o descarga según la configuración hidráulica del sistema.

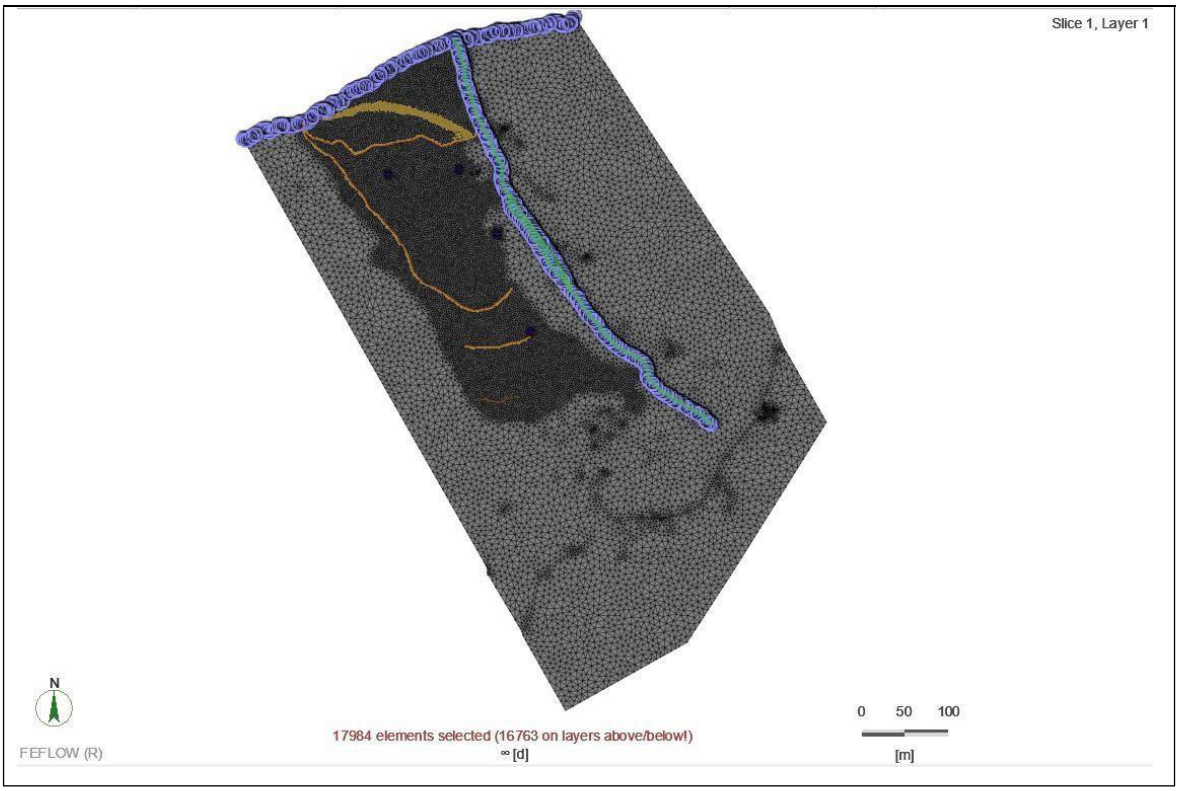
En las zonas donde se asumió ausencia de flujo fuera del área de estudio, se aplicó un flujo igual a cero (Neumann homogénea), garantizando el confinamiento del modelo dentro del dominio simulado.

Asimismo, las condiciones de Dirichlet se asignaron en sectores de recarga en cotas altas y descarga hacia el río Mantaro y fracturas principales, donde la carga hidráulica (h) se impuso de manera estimada, según la topografía y la interpretación hidrogeológica.

Esta configuración permitió representar de manera coherente las entradas y salidas de agua subterránea, así como los límites de no flujo, asegurando una representación física realista del sistema hidrogeológico del Derrumbe N.º 03 – Huancavelica.

Figura 25

Condiciones de recarga de acuerdo con la distribución de materiales geológicos



En la figura también se muestra algunos aspectos que se debe de mencionar:

Selección de Elementos:

En la figura 25 se destacan los elementos seleccionados (en color azul) que representan las condiciones de borde aplicadas. Se incluyen un total de 17 984 elementos distribuidos en todas las capas del modelo.

Distribución por Materiales Geológicos:

Las condiciones de recarga y descarga están asociadas a la heterogeneidad geológica del terreno, lo que permite capturar la influencia de los diferentes materiales sobre el flujo subterráneo.

4.2.7 Convergencia del modelo

La Figura 26 y 27 ilustra la evaluación de la convergencia del modelo numérico implementado en FEFLOW v8 para el Derrumbe 3, un paso crítico en la validación de los resultados de la simulación. La convergencia del modelo asegura que el sistema de ecuaciones numéricas que describe el flujo subterráneo haya alcanzado una solución estable y precisa, lo que es esencial para garantizar la confiabilidad de las simulaciones.

Monitoreo del Proceso de Convergencia

Historial del Error Normado del Gradiente Hidráulico (Head Error Norm History):

En el gráfico de la derecha, se muestra la disminución progresiva del error normado del gradiente hidráulico a lo largo de las iteraciones.

El modelo alcanzó un error final de 0.03, superior al valor objetivo de 0.01, lo que indica que, aunque se acerca a la convergencia, se deben considerar ajustes adicionales para mejorar la precisión.

Iteraciones:

El gráfico refleja que el modelo converge rápidamente en las primeras iteraciones, con una disminución significativa del error, pero luego se estabiliza en valores cercanos al límite establecido.

Visualización del Modelo en Corte Transversal

El corte transversal del modelo (izquierda) muestra la distribución de la conductividad hidráulica (Kxx) por material geológico y profundidad.

Zonas Críticas:

Las áreas con mayores valores de conductividad (en colores más claros) corresponden a materiales como el Cuaternario Coluvial (Q-c) y las fracturas principales, que son claves para entender el comportamiento del flujo subterráneo.

Las zonas de baja conductividad (en colores más oscuros) se asocian al Basamento Rocoso (D-e), que actúa como barrera hidráulica.

Consideraciones para Mejorar la Convergencia
Refinamiento de la Malla:

Un mayor refinamiento en las zonas de mayor gradiente hidráulico, como las fallas principales, puede mejorar la estabilidad y precisión del modelo.

Ajustes en los Parámetros Hidrogeológicos:

Revisar los valores asignados a propiedades como la conductividad hidráulica y el almacenamiento específico, especialmente en áreas de transición geológica.

Condiciones de Contorno:

Verificar la coherencia de las condiciones de recarga y descarga, asegurando que estén alineadas con los datos de campo.

Importancia de la Convergencia

La convergencia del modelo es un indicador de la robustez y estabilidad de la simulación. Garantizar que el modelo alcance un error normado aceptable permite:

- Aumentar la confianza en los resultados obtenidos.
- Validar el modelo para escenarios futuros, como simulaciones de eventos extremos o ajustes en las condiciones de borde.
- Proporcionar información confiable para la evaluación de la estabilidad del talud en el Derrumbe 3.

Este análisis de convergencia reafirma que, aunque el modelo está cerca de cumplir los criterios de estabilidad, se deben realizar ajustes adicionales para garantizar la precisión y fiabilidad de los resultados en aplicaciones críticas.

Figura 26

Condiciones de recarga de acuerdo con la distribución de materiales geológicos

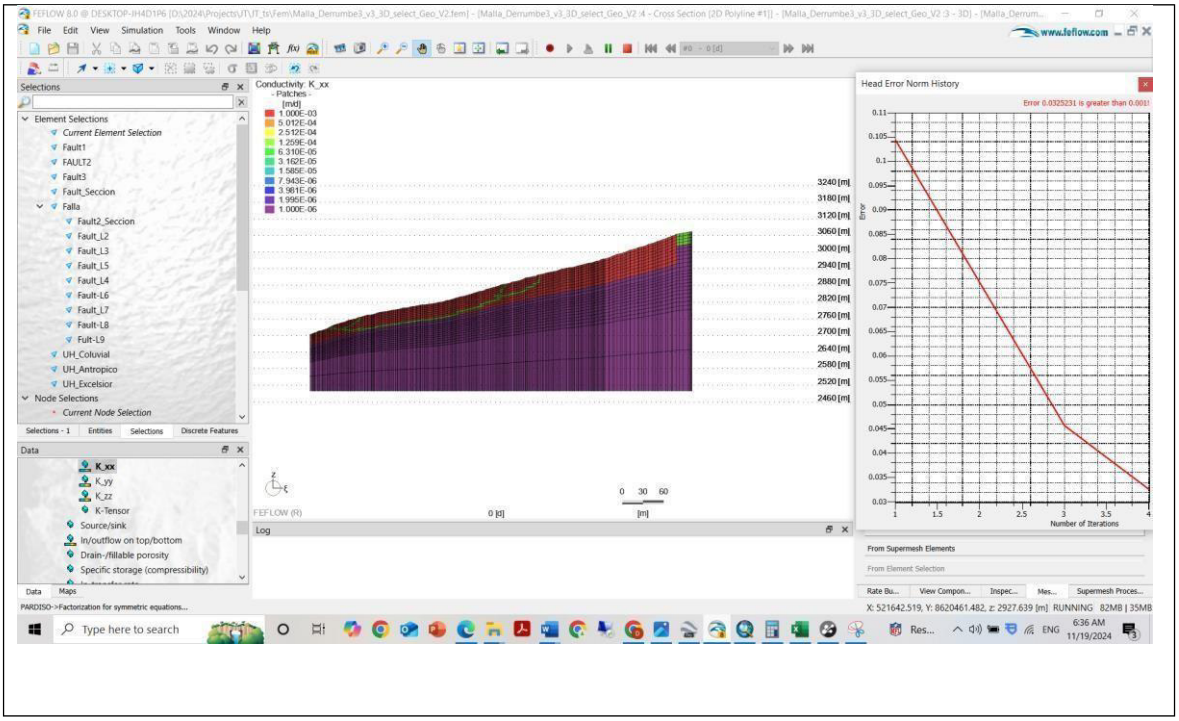
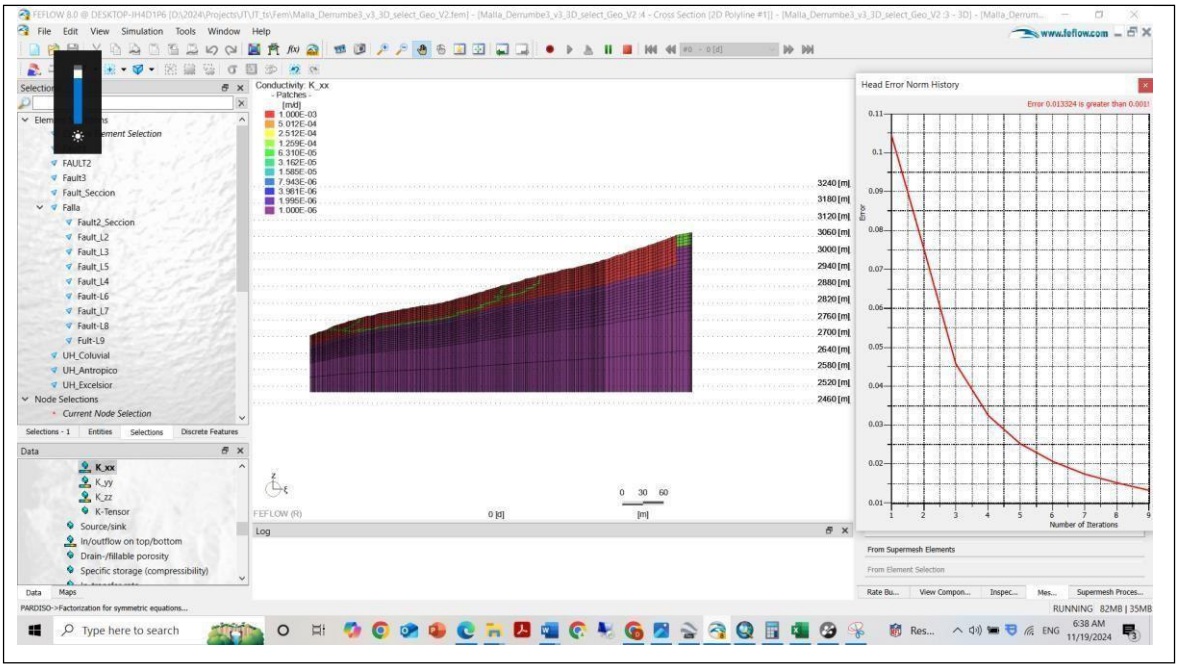


Figura 27

Condiciones de recarga de acuerdo con la distribución de materiales geológicos



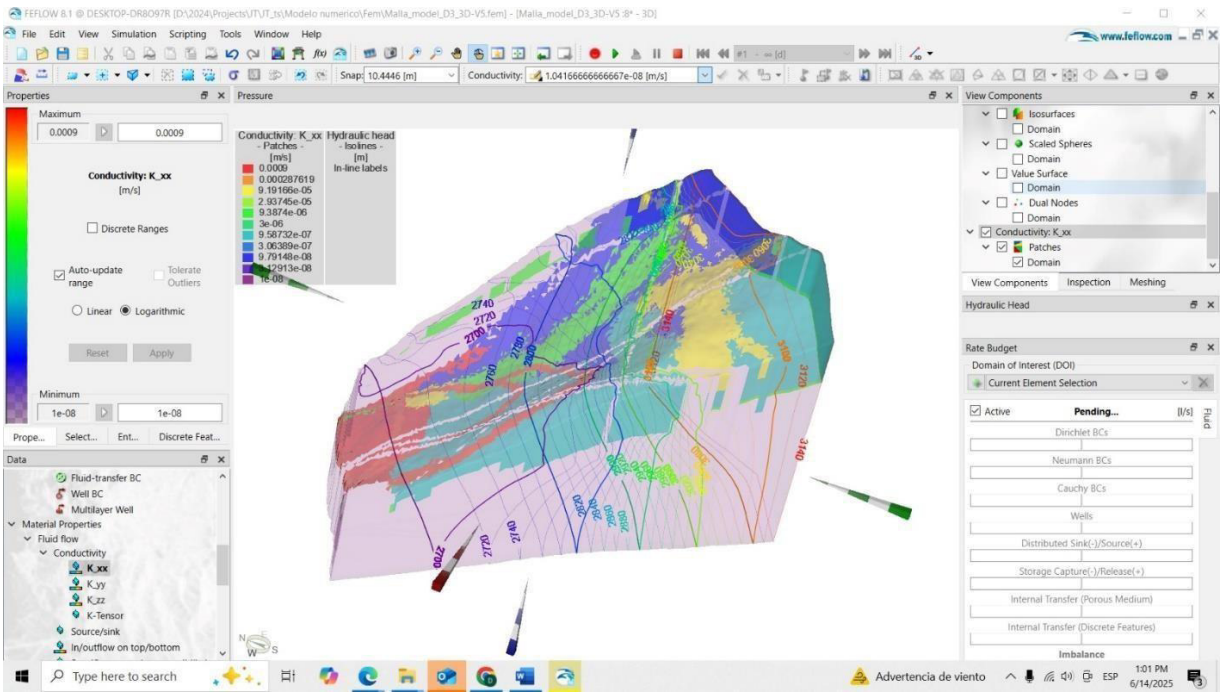
4.2.8 Campos de flujo

En este estudio, se utilizaron las funcionalidades de visualización del software FEFLOW v8.1 para generar líneas de flujo y mapas de velocidad en estratos representativos, siguiendo las recomendaciones técnicas descritas por DHI Group (2024). Estas visualizaciones contribuyen a validar el modelo conceptual y numérico, evidenciando la coherencia entre la geología, las propiedades hidráulicas y el comportamiento simulado del acuífero.

Este apartado presenta la visualización del campo de flujo subterráneo obtenido a partir de las simulaciones numéricas realizadas con el software FEFLOW, utilizando la malla tridimensional desarrollada para el área de estudio. La modelación considera la heterogeneidad geológica y la presencia de fracturas, lo cual es fundamental para representar adecuadamente el comportamiento hidráulico del acuífero.

Figura 28

Modelamiento geológico tridimensional.

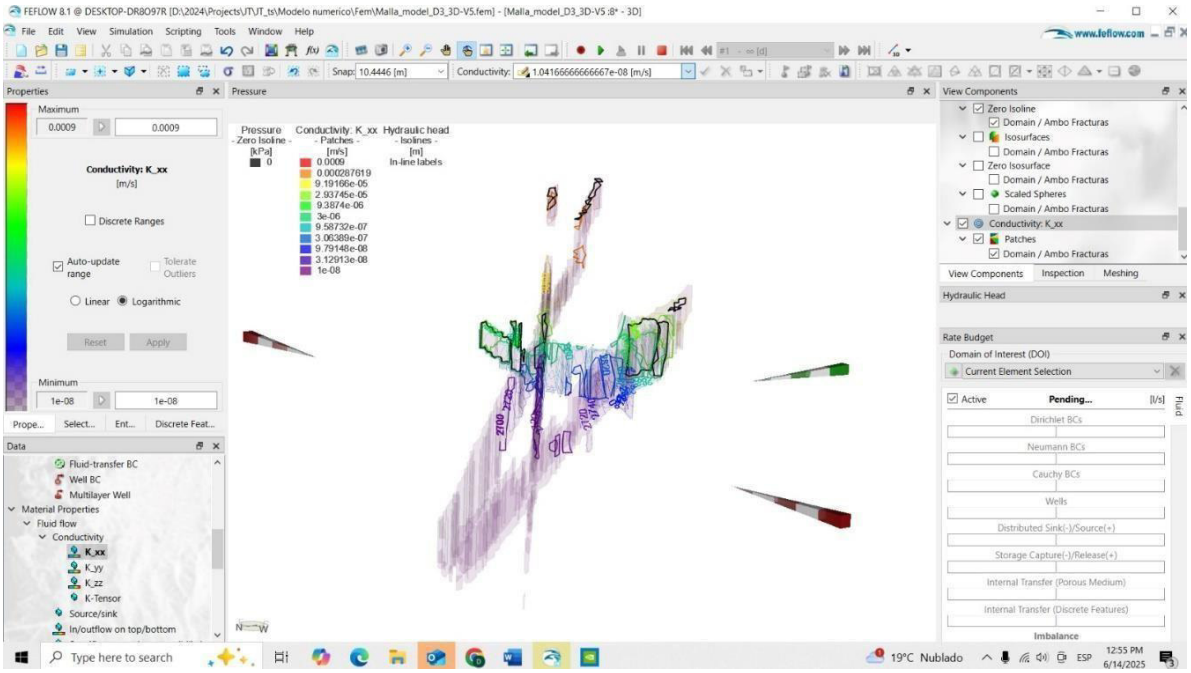


Esta figura 28 presenta el modelo geológico tridimensional del área de estudio, mostrando la distribución espacial de las unidades geológicas como Depósito Coluvial, Grupo Ambo y Grupo Excelsior, diferenciadas por colores

sólidos. Las isolíneas de carga hidráulica se superponen a estas unidades, ilustrando la influencia de la geología en la distribución de la presión del agua y la dirección del flujo. Se observan los valores de conductividad horizontal (Kxx) en m/s en el panel de propiedades.

Figura 29

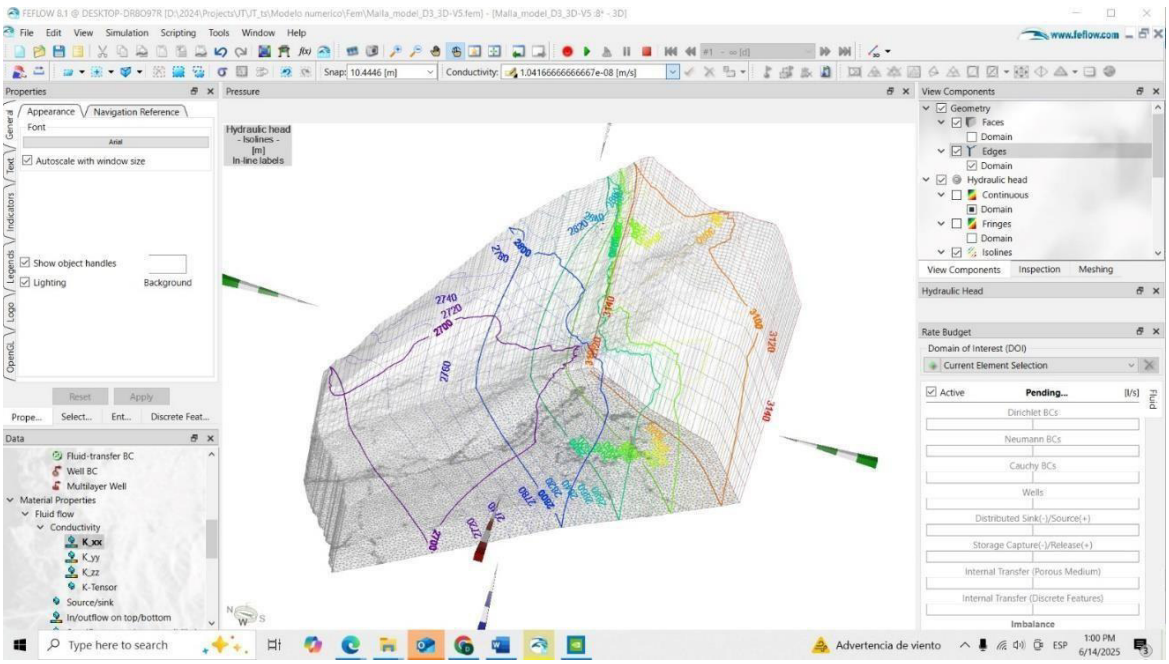
Fracturas en el modelo geológico tridimensional.



Esta figura 29 ilustra la interacción entre la visualización de la conductividad hidráulica (Kxx) y las fracturas del modelo. Las fracturas se muestran como elementos discretos, actuando como vías de alta conductividad, mientras que los colores de fondo representan los valores de conductividad de las unidades geológicas, que van desde 1×10−8 hasta 9×10−4 m/s. Se evidencia cómo las fracturas se vinculan con la conductividad del medio, reflejando la heterogeneidad y las estructuras fracturadas como componentes hidráulicos clave.

Figura 30

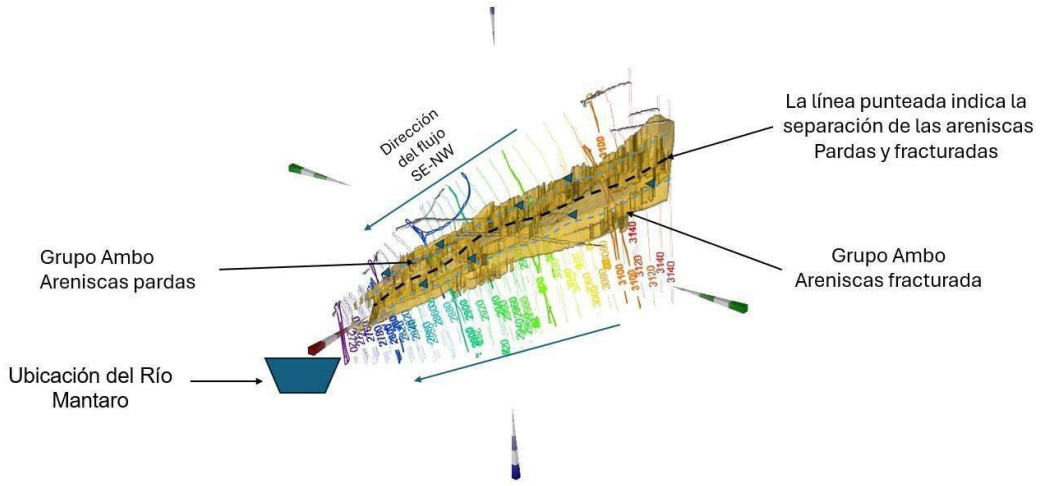
Malla numérica tridimensional.



Esta figura 30 presenta la malla numérica tridimensional utilizada para la discretización del dominio en FEFLOW. La malla, no estructurada, refleja la heterogeneidad geológica y permite la resolución espacial necesaria para capturar el comportamiento hidráulico en medios fracturados. En ella se pueden observar las isolíneas de carga hidráulica dentro del modelo.

Figura 31

Líneas de Flujo e Isolíneas de Carga Hidráulica

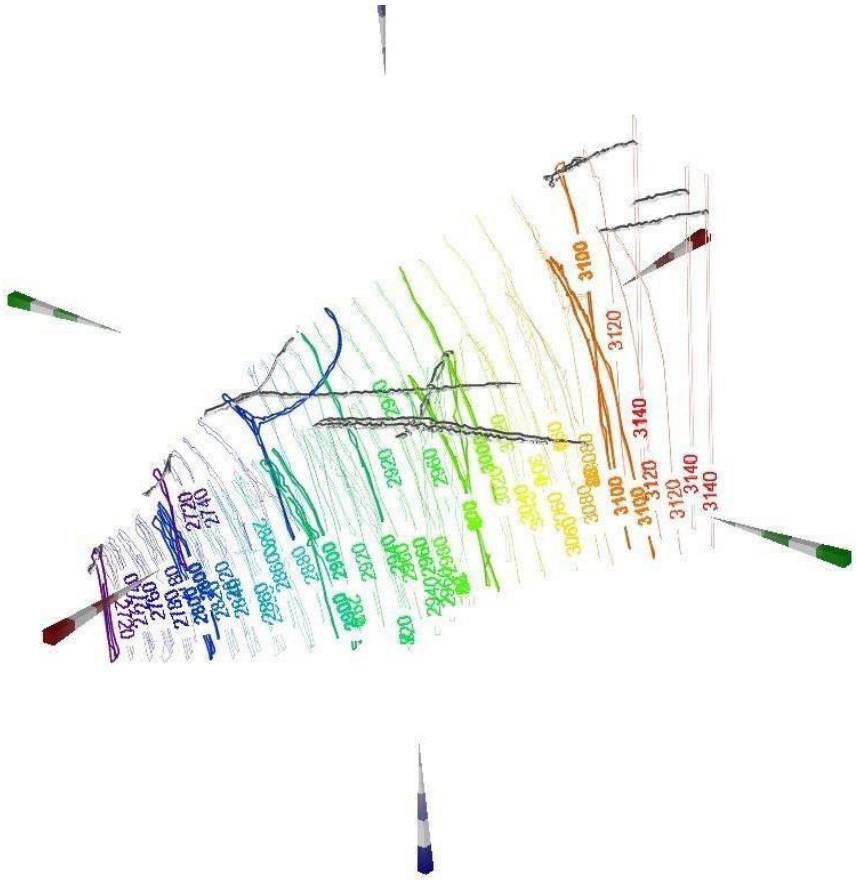


La Figura 31 presenta el modelo 3D del dominio de estudio, ilustrando la ubicación de las cargas hidráulicas dentro del Grupo Ambo y el comportamiento del campo de flujo subterráneo. Se observan líneas de contorno (isolíneas) que representan la carga hidráulica (niveles piezométricos) en metros, con valores que varían desde 3140 hasta 2120. Estas isolíneas, junto con las streamlines (líneas de flujo) y los puntos de control, indican la dirección del movimiento del agua subterránea (SE-NW)

Específicamente, las cargas hidráulicas se localizan en las areniscas pardas del Grupo Ambo, que constituyen un nivel más somero en contacto con los materiales del Cuaternario. Por otro lado, las areniscas fracturadas, que representan un nivel más profundo, están en contacto directo con el Grupo Excélsior (el basamento).

Figura 32

Vista Ampliada de Isolíneas de Carga Hidráulica.



Esta figura 32 presenta una vista ampliada del modelo 3D con las isolíneas de carga hidráulica. Permite una apreciación más clara de la distribución de la presión del agua y el patrón de flujo general, mostrando la influencia de las estructuras en este patrón.

Figura 33

Muestra la malla numérica tridimensional utilizada para la discretización del dominio en FEFLOW, reflejando la heterogeneidad geológica y permitiendo la resolución espacial necesaria para capturar el comportamiento hidráulico en medios fracturados (Modelo de fracturas).

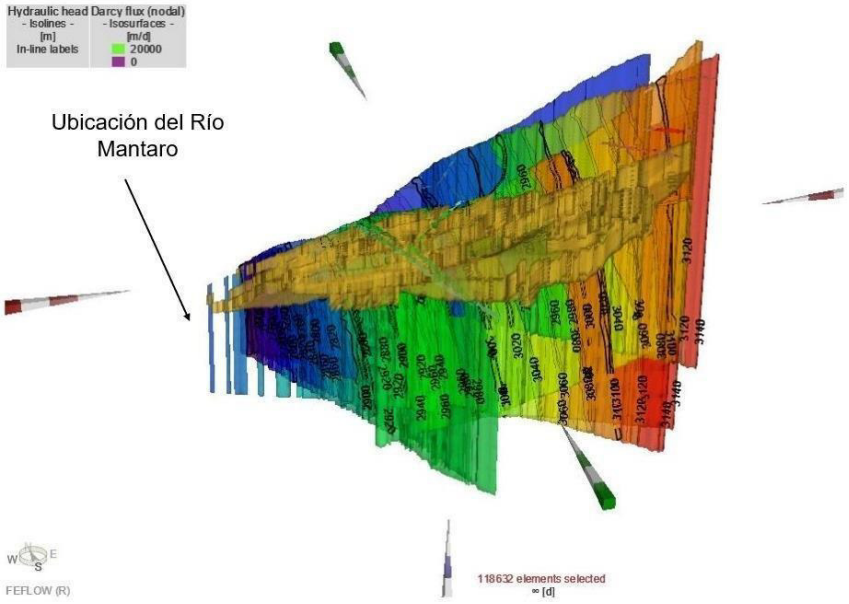
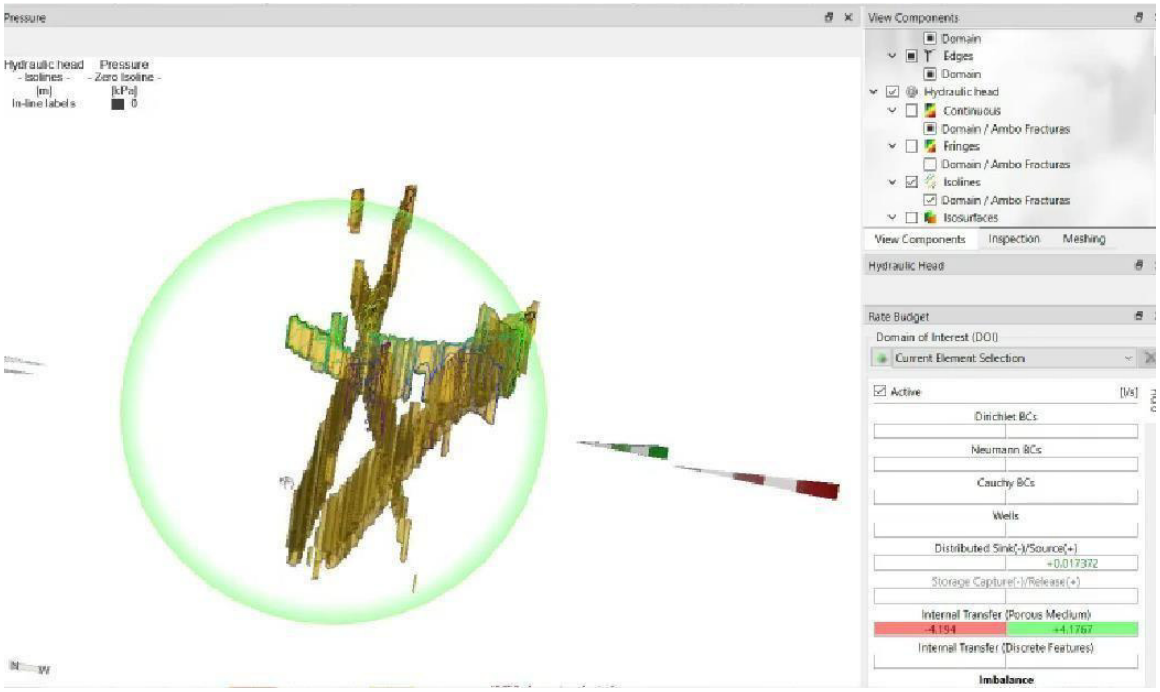


Figura 34

Flujo de Darcy y Campos de Velocidad. Además, se observa claramente el caudal que atraviesa esas fracturas de 4.15 a 4.17 l/s.



4.2.9 Convergencia del modelo

- El modelo numérico cubre toda el área afectada por el Derrumbe 3, tanto en superficie como en profundidad, utilizando información descritas en el modelo conceptual.
- Se digitalizaron manualmente los contactos geológicos y estructurales en el software FEFLOW v8.1, utilizando una malla no estructurada para un refinamiento especial en zonas de interés como el deslizamiento y las fracturas principales del Grupo Ambo.
- Se definieron 32 cortes y capas para dividir el modelo en secciones horizontales, clasificadas como "movibles" para ajustarse a los datos geológicos y estructurales (discretización vertical). Se aplicó un refinamiento especial en la zona del deslizamiento y las fallas principales, utilizando una malla no estructurada con resolución variable (discretización horizontal).
- Se asignaron conductividades hidráulicas basadas en ensayos de permeabilidad en roca y de laboratorio información provenientes de Electro Luz. Las zonas de alta conductividad corresponden a materiales como el Cuaternario Coluvial y Paleo Derrumbe, mientras que el Basamento Rocoso actúa como una barrera para el flujo subterráneo.
- Se asignaron condiciones de borde en función de la distribución de los materiales geológicos y las características hidrogeológicas del dominio. Las condiciones de recarga se aplicaron en la parte superior del modelo, mientras que las condiciones de descarga se modelaron en las fracturas. Los bordes laterales y la base del dominio se definieron como impermeables.
- Se evaluó la convergencia del modelo numérico, monitoreando el error normado del gradiente hidráulico a lo largo de las iteraciones. El modelo alcanzó un error final de 0.03, superior al valor objetivo de 0.01, indicando que se acerca a la convergencia, pero requiere ajustes adicionales.
- La visualización del campo de flujo permitió identificar claramente las zonas de mayor permeabilidad y fracturación activa, así como las áreas donde el flujo se ralentiza o se desvía debido a barreras hidráulicas o cambios en la litología.

CAPÍTULO V

5.1 CONCLUSIONES

- Se logró desarrollar un modelo conceptual y numérico adecuado que representa el movimiento de un flujo subterráneo y preferente en el medio fracturado del Derrumbe 3 (Brecha), identificando los controles estructurales más importantes como las 5 fracturas del Grupo Ambo y la geología en 3D.
- Se caracterizaron cuatro unidades principales (Coluvial, Deluvial, Grupo Ambo y Grupo Excélsior), observándose que los depósitos coluviales presentan mayor capacidad de recarga (406.91 mm/año), mientras que el basamento rocoso actúa como barrera hidráulica o basamento rocoso impermeable y este pertenece al Grupo Excelsior.
- El modelo numérico, implementado en FEFLOW v8.1, evidenció que las fracturas principales del Grupo Ambo ejercen un control significativo sobre las trayectorias preferenciales del flujo subterráneo. Estas fracturas facilitan la canalización o movimiento del agua, generando zonas de alta permeabilidad con un caudal aproximado de 4.15 a 4.17 litros por segundo, y una dirección de flujo predominante del suroeste al noreste.
- A través del análisis del balance hídrico y la recarga asignada, se cuantificó la infiltración sobre el dominio modelado, destacando la infiltración efectiva en zonas con materiales coluviales y proluviales, con conductividades horizontales de hasta 10^{-2} cm/s.
- Las simulaciones mostraron un patrón de flujo preferente con la geología estructural y la geomorfología local, validado mediante líneas de flujo, isolíneas de carga hidráulica y campos de velocidad. Aunque se alcanzó una convergencia parcial (con error de 0.03), el modelo refleja adecuadamente el comportamiento del acuífero y las masas geológicas.
- Los resultados del modelo numérico confirman el comportamiento típico de un medio fracturado de clase III-IV, donde flujo subterráneo ocurre por fracturas conectadas, generando anisotropía hidráulica. Se evidencia la necesidad de emplear múltiples valores de conductividad hidráulica (K) para mejorar la estimación del tensor de permeabilidad y reflejar con mayor precisión la complejidad de la dinámica hidráulica del macizo rocoso.

5.2 RECOMENDACIONES

- Instalar una red de piezómetros en puntos clave (fracturas activas y zonas de recarga/descarga) a fin de seguir con el proceso de validación continua del modelo numérico y captar la variabilidad estacional del nivel freático.
- Implementar una etapa de calibración y validación transitoria con datos de nivel y caudal medidos en campo, mejorando la precisión de las simulaciones frente a eventos climáticos extremos.
- Realizar campañas adicionales de tomografía eléctrica y georradar para delimitar con mayor precisión la geometría y conectividad de las fracturas y zonas conductivas.
- Ejecutar una campaña de seis (06) estaciones geomecánicas a fin de mejorar las direcciones y buzamiento del macizo rocoso y su grado de fracturamiento.
- Incluir escenarios de lluvia intensa o eventos sísmicos que puedan modificar la conectividad del sistema fracturado, a fin de evaluar la estabilidad del talud en condiciones dinámicas considerando estas forzantes externas e internas.
- Utilizar el modelo numérico como herramienta base para futuras evaluaciones de estabilidad de taludes que incluyan la interacción del agua, para el diseño de obras de drenaje subterráneo y/o estudios de remediación en zonas susceptibles al deslizamiento.

REFERENCIAS

Anderson, M. P. y Bates, B. P. (2001). Model validation: A critical review. Water Resources Research, 37(7), 1925-1944.

Anderson, M. P., & Woessner, W. W. (1992). Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press.

Apel, J. R., Johnson, J. D., & Brown, S. R. (2015). Boundary Conditions for Fractured Media in Numerical Simulations. Journal of Hydrology, 520, 149-161.

ASTM International, 2008. Standard guide for developing and evaluating groundwater modeling codes, D6025e08. American Society of Testing and Materials, Book of Standards 04 (09), 17 p.

Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2016). Términos de Referencia Comunes del contenido hídrico que deberán cumplirse en la elaboración de los estudios ambientales.

Baghbanan, A., & Jing, L. (2011). Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48(8), 1304-1315. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.09.004

Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1995). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics and Rock Engineering, 6*(4), 189-236. https://doi.org/10.1007/BF01239496

Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier.

Betancur, T., Palacio, C. A., & Escobar, J. F. (2012). Conceptual Models in Hydrogeology. In G. A. Kazemi (Ed.), *Hydrogeology - A Global Perspective (pp. 7, 204-211).* IntechOpen. https://doi.org/10.5772/3124

Bredehoeft, J. D. y Konikow, L. F. (1993). Comment on "Ground-water models cannot be validated" by L. F. Konikow and J. D. Bredehoeft. Water Resources Research, 29(12), 4269-4270.

Bredehoeft, J. D. y Konikow, L. F. (2012). Validation of ground-water models: A critical appraisal. Ground Water, 50(1), 10-17.

Chen, Y.-F., Zeng, J., Shi, H., Wang, Y., Hu, R., Yang, Z., & Zhou, C.-B. (2021). Variation in hydraulic conductivity of fractured rocks at a dam foundation during operation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 13*(2), 351–367. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.09.007.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). Hidrología subterránea, Tomo I. Recuperado de https://www.academia.edu/41067940/Custodio_Llamas_Tomo.

DHI-WASY GmbH. (2007). FEFLOW: Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System. Reference Manual.

DHI. (2024). FEFLOW 8.1: Tutorial Introductorio. Recuperado de https://cms.dhigroup.com/media/toamtztf/feflow_introductory_tutorial.pdf

DHI Group. (2024). Using streamlines and velocity vectors in FEFLOW. Knowledge Base Articule KA-01158. Recuperado de https://support.dhigroup.com/knowledgebase/article/KA-01158/en-us.

Diersch, H.-J. G. (2014). *FEFLOW: Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38739-5

Doherty, J.E., Hunt, R.J., 2010. Approaches to Highly Parameterized Inversion: A Guide to Using PEST for Groundwater-Model Calibration. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010e5169, 60 p. http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5169/.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater. Prentice-Hall*

Espinoza Marchant, C. (2020). Recalibración de un modelo numérico de flujo 3D de un rajo minero en un medio fracturado de baja permeabilidad incorporando anisotropía en la conductividad hidráulica utilizando el software MINEDW. Disponible en https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/178402

Feinberg, M. D., & Soltanian, M. R. (2007). Calibration Strategies for Numerical Modeling of Fractured Media. Groundwater, 45(5), 633-646.

Folch, A., del Val, L., Luquot, L., Martínez, L., Bellmunt, F., Le Lay, H., Rodellas, V., Ferrer, N., Canora, C., Ledo, J. et al. (2020). FEFLOW 7. 1: Finite element subsurface flow & transport simulation system. User manual. Release 7(1).

Gelcich Delgado, J. (2018). Modelación hidrogeológica para proyectos mineros de extracción por block caving. Disponible en https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/169958

Gutiérrez, E. J. C., & Gutiérrez, R. E. M. (2022). Análisis hidrogeológico del interflujo con FEFLOW para una presa de relaves – Arequipa. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, *25*(50), 137–149. https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.22649

Ingeoexpert. (2024). *Curso de Introducción a la Modelización de Aguas Subterráneas con FEFLOW*. Recuperado de https://ingeoexpert.com/cursos/curso-de-modelizacion-numerica-de-aguas-subterraneas-con-feflow/

Jimenez, E. R. P., Gutiérrez, R. E. M., & Gutiérrez, E. J. C. Influence of Subsurface Flow Recharge on Fractured Massifs. Case: Slippage 1 Huancavelica-Peru.

Jimenez, ERP, Gutiérrez, REM y Gutiérrez, EJC Influencia de la recarga del flujo subterráneo en macizos fracturados. Caso: Deslizamiento 1 Huancavelica-Perú.

Kolditz, O., Ratke, R., Diersch, H. J., & Zielke, W. (1998). Coupled groundwater flow and transport: 1. Verification of variable density flow and transport models. Advances in Water Resources, 21(1), 27-46. https://doi.org/10.1016/S0309-1708(96)00038-0

Kordnaeij, A., & Saffarzadeh, A. (2020). Three-dimensional numerical analysis of water flow through fractured rock masses. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 1-12. https://doi.org/10.1007/s40996-020-00437-7

Lee, H., Lee, H.S., Oh, H.J. et al. (2020). Development of a three-dimensional numerical model for predicting groundwater flow and contaminant transport in fractured rock masses. Geosystem Engineering, 23, 359–373. https://doi.org/10.1080/12269328.2019.1691856

Lei, Q., Latham, JP y Tsang, CF (2017). El uso de redes de fracturas discretas para modelar el comportamiento geomecánico e hidrológico acoplado de rocas fracturadas. Computadoras y Geotecnia , 85 , 151-176.

Linares, C. G., Gutiérrez, R. E. M., & Francia, G. V. (2016). Modelación numérica con el código FEFLOW-FMH3 para la Interpretación hidrogeológica en las masas geológicas del derrumbe 5 del talud derecho del embalse Tablachaca. Paradigmas, 4(1).

Mogrovejo Gutiérrez, R. E. (2017). Modelación numérica con FEFLOW+ FMH3 para el estudio definitivo de las galerías de drenaje: caso Derrumbe 5-Complejo Hidroeléctrico del Mantaro.

Mogrovejo Gutiérrez, R. E. (2019). *Estimación del caudal de filtraciones en macizos fracturados usando FEFLOW para las galerías de drenaje: Caso Derrumbe 5 – Huancavelica – 2019* [Tesis de título profesional, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].

Mogrovejo, R. (2023). Influence of Subsurface Flow Recharge in Fractured Massifs – Case Landslide 1 – Huancavelica - Perú. Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology. https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.956.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., van Genuchten, M. T., Wesseling, J. J., y van Walsum, P. A. (2012). Model evaluation in watershed hydrology. Journal of Hydrology, 464-465, 1-11.

Pinder, G. F., & Celia, M. A. (2006). *Subsurface hydrology*. John Wiley & Sons.

Quines, D. J., & Candiotti, J. C. (2023). *Estimación de los caudales de filtración aplicando la herramienta Seepage: Caso Derrumbe I – Huancavelica – Perú* [Tesis de título profesional, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].

Salas García, J. A. (2007). Caracterización y modelación numérica unidimensional de la infiltración en la zona vadosa fracturada en Santiago Tianguistenco, México [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México].

Seib, L., Hähnlein, S., Kohl, T., & Diersch, H.-J. G. (2022). Finite element simulation of permeable fault influence on medium-deep geothermal systems using FEFLOW. *Geothermal Energy*, 10(1), 1–19. https://doi.org/10.1186/s40517-022-00233-0

Suárez Guerrero, N. (2021). Construcción de modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero bajo el casco urbano del municipio de Málaga, Santander. Universidad Nacional de Colombia.

Trefry, M. G., & Muffels, C. T. (2007). FEFLOW: A finite-element groundwater flow and transport modeling tool. Groundwater, 45(5), 525–528. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00320.x

Witherspoon, P. A., Wang, J. S. Y., Iwai, K., & Gale, J. E. (1980). Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. Water Resources Research, 16(6), 1016-1024. https://doi.org/10.1029/WR016i006p01016

Warren, J. E., & Root, P. J. (1963). The behavior of naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal,* *3*(3), 245–255. https://doi.org/10.2118/426-PA

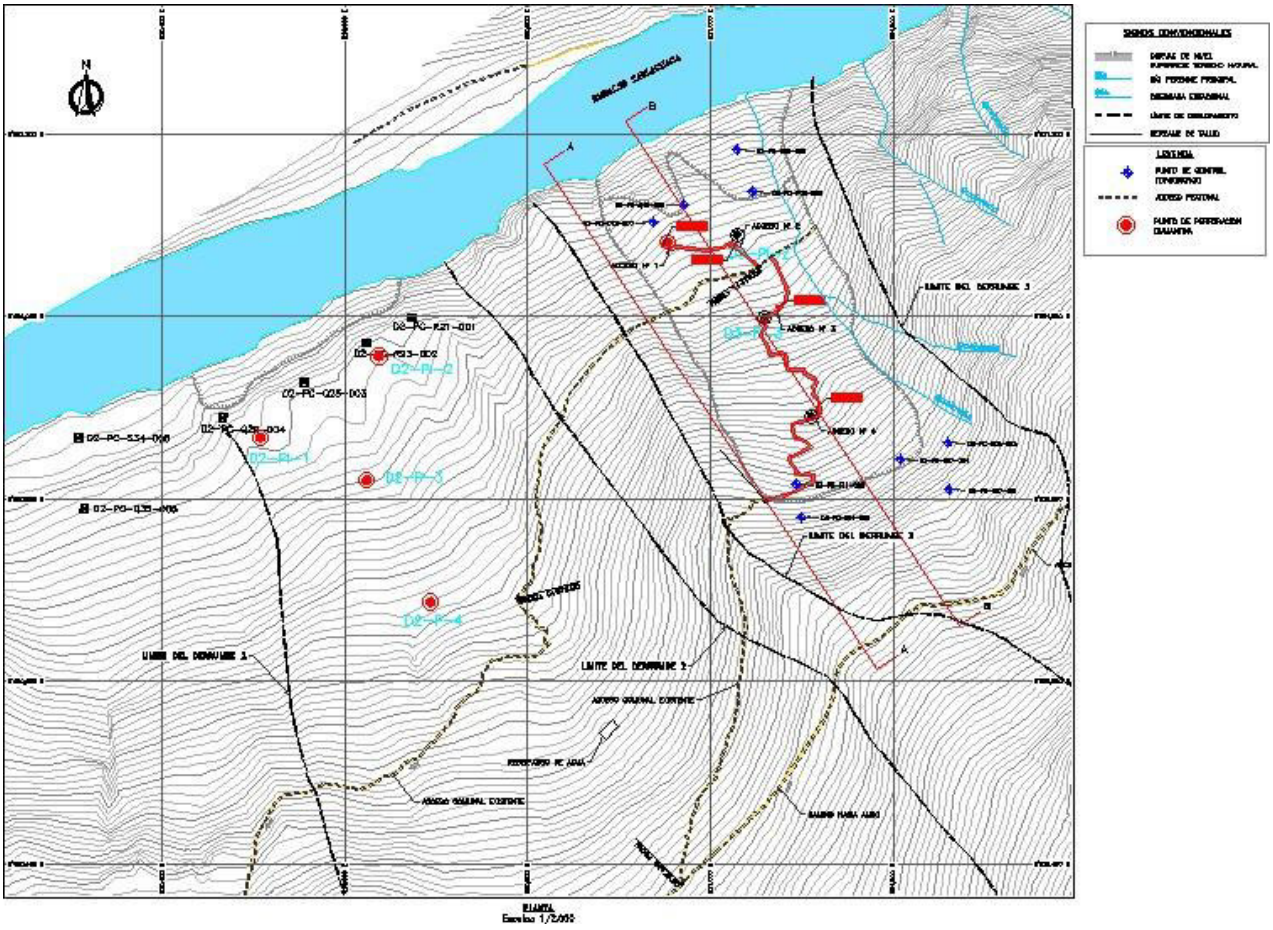
Zhang, Y., Zhou, M., Yuan, Y., Li, J., & Wu, J. (2023). Identifying the change of seepage field in karst aquifers under tunnel engineering: Insight from FEFLOW modeling. *Lithosphere, 2023*(1), 1–12. https://doi.org/10.2113/2023/7192751

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The finite element method* (Vols. 1–2). Butterworth-Heinemann.

Zhi Dou, Songxuan Tang, Xueyi Zhang, Richeng Liu, Chao Zhuang, Jinguo Wang, Zhifang Zhou; Influencia del desplazamiento por cizallamiento en el flujo de fluido y el transporte de solutos en una fractura rugosa 3D. Litosfera 2021; 2021 (Especial 4): 1569736. doi: https://doi.org/10.2113/2021/1569736

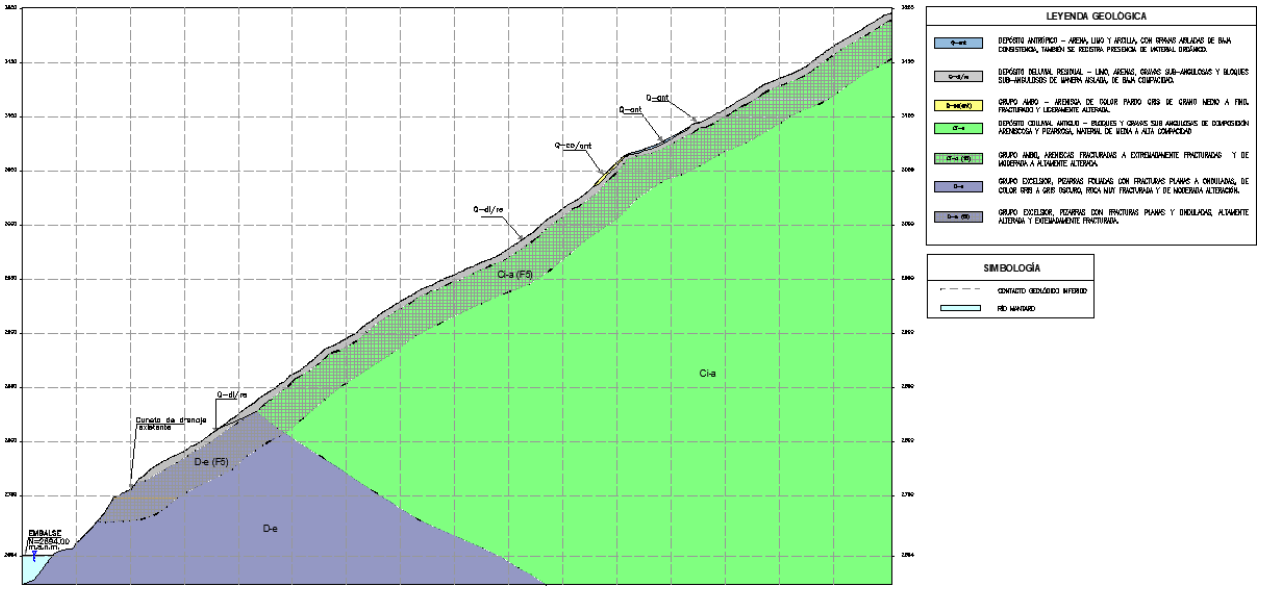
ANEXOS

ANEXO 1: UBICACIÓN Y ELABORACIÓN DE SECCIONES GEOTÉCNICAS

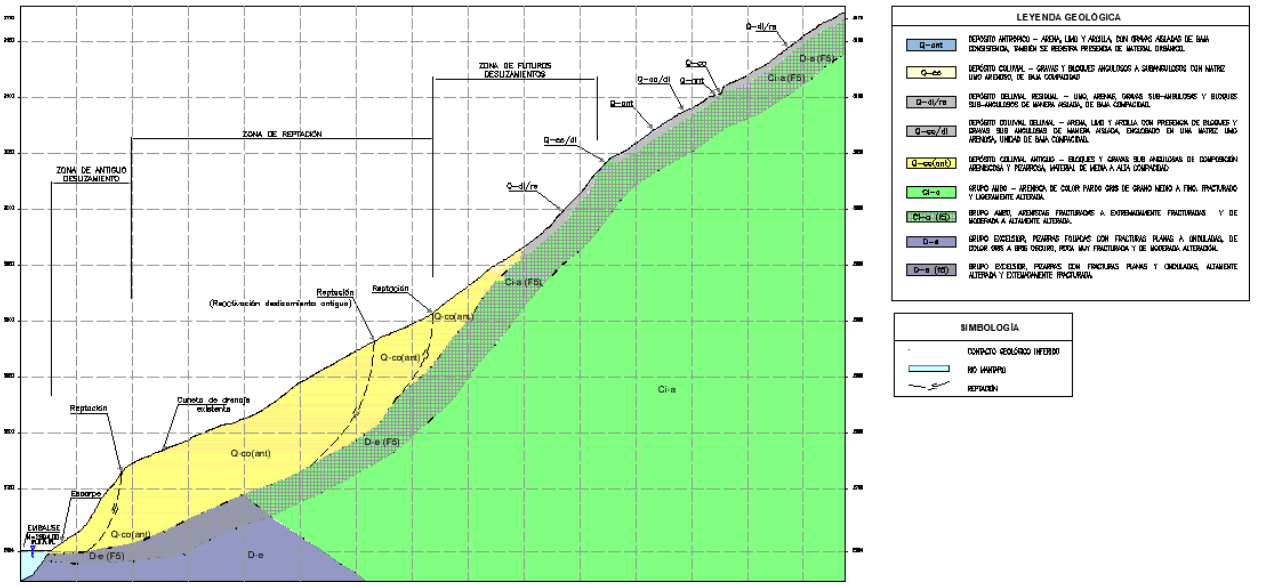


PLANTA
Escala 1/2000

SECCIÓN A-A



SECCIÓN B-B



ANEXO 2: ANÁLISIS HIDROLÓGICO- ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN Y LA RECARGA

Fecha	Año	Año	Mes	días	P(mm)	PTA (mm)	ETP(mm)	P-ETP	ETR (mm)	Reserva del suelo (mm)	ΔS	Xcedente (mm	Escurrimiento (mm)	Recarga (mm)	RTA (mm)
23377	1964	1981	1	31	25		15.32	9.68	15.32	9.68	9.68	0.00	0.00	0.00	
23408	1964		2	28	43		13.74	29.26	13.74	10.50	0.82	28.43	7.52	20.92	
23437	1964		3	31	71		14.79	56.21	14.79	10.50	0.00	56.21	1.44	54.77	
23468	1964		4	30	54		13.77	40.23	13.77	10.50	0.00	40.23	4.30	35.93	
23498	1964		5	31	47		13.19	26.81	13.19	10.50	0.00	26.81	7.40	21.41	
23529	1964		6	30	0		11.54	-11.54	10.50	0.00	-10.50	0.00	0.00	0.00	
23559	1964		7	31	0		11.68	-11.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
23590	1964		8	31	3		12.83	-9.83	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
23621	1964		9	30	43		9.41	33.59	9.41	10.50	10.50	23.09	9.32	13.77	
23651	1964		10	31	48		14.91	33.09	14.91	10.50	0.00	33.09	6.13	26.96	
23682	1964		11	30	71		15.66	55.34	15.66	10.50	0.00	55.34	1.56	53.78	
23712	1964		12	31	101	501	15.85	85.15	15.85	10.50	0.00	85.15	0.08	85.07	312.60
23743	1965	1982	1	31	78		15.32	62.68	15.32	10.50	0.00	62.68	0.74	61.94	
23774	1965		2	28	86		13.74	72.26	13.74	10.50	0.00	72.26	0.13	72.13	
23802	1965		3	31	65		14.79	50.21	14.79	10.50	0.00	50.21	2.32	47.88	
23833	1965		4	30	34		13.77	20.23	13.77	10.50	0.00	20.23	10.38	9.85	
23863	1965		5	31	10		13.19	-3.19	13.19	7.31	-3.19	0.00	0.00	0.00	
23894	1965		6	30	1		11.54	-10.54	8.31	0.00	-7.31	0.00	0.00	0.00	
23924	1965		7	31	8		11.68	-3.68	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
23955	1965		8	31	9		12.83	-3.83	9.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
23986	1965		9	30	32		9.41	22.59	9.41	10.50	10.50	12.09	13.78	0.00	
24016	1965		10	31	17		14.91	2.09	14.91	10.50	0.00	2.09	18.71	0.00	
24047	1965		11	30	36		15.66	19.34	15.66	10.50	0.00	19.34	10.72	8.62	
24077	1965		12	31	75	450	15.85	59.15	15.85	10.50	0.00	59.15	1.06	58.09	258.47
24108	1966	1983	1	31	69		15.32	53.68	15.32	10.50	0.00	53.68	1.76	51.88	
24138	1966		2	28	79		13.74	65.26	13.74	10.50	0.00	65.26	0.53	64.73	
24167	1966		3	31	60		14.79	45.21	14.79	10.50	0.00	45.21	3.23	41.98	
24198	1966		4	30	36		13.77	22.23	13.77	10.50	0.00	22.23	9.63	12.59	
24228	1966		5	31	21		13.19	7.81	13.19	10.50	0.00	7.81	15.77	0.00	
24259	1966		6	30	1		11.54	-10.54	11.50	0.00	-10.50	0.00	0.00	0.00	
24289	1966		7	31	0		11.68	-11.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
24320	1966		8	31	11		12.83	-1.83	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
24351	1966		9	30	16		9.41	6.59	9.41	6.59	6.59	0.00	0.00	0.00	
24381	1966		10	31	73		14.91	58.09	14.91	10.50	3.91	54.18	1.72	52.46	
24412	1966		11	30	97		15.66	81.34	15.66	10.50	0.00	81.34	0.01	81.33	
24442	1966		12	31	88	549	15.85	72.15	15.85	10.50	0.00	72.15	0.22	69.93	374.91
24473	1967	1984	1	31	79		15.32	63.68	15.32	10.50	0.00	63.68	0.65	63.02	
24504	1967		2	28	100		13.74	86.26	13.74	10.50	0.00	86.26	0.11	86.14	
24532	1967		3	31	179		14.79	164.21	14.79	10.50	0.00	164.21	14.00	149.31	
24563	1967		4	30	23		13.77	9.23	13.77	10.50	0.00	9.23	15.08	0.00	
24593	1967		5	31	18		13.19	4.81	13.19	10.50	0.00	4.81	17.27	0.00	
24624	1967		6	30	8		11.54	-3.54	11.54	6.96	-3.54	0.00	0.00	0.00	
24654	1967		7	31	10		11.68	-1.68	11.68	5.28	-1.68	0.00	0.00	0.00	
24685	1967		8	31	32		12.83	19.17	12.83	10.50	5.22	13.94	12.94	1.00	
24716	1967		9	30	19		9.41	9.59	9.41	10.50	0.00	9.59	14.91	0.00	
24746	1967		10	31	71		14.91	56.09	14.91	10.50	0.00	56.09	1.46	54.63	
24777	1967		11	30	45		15.66	29.34	15.66	10.50	0.00	29.34	7.24	22.10	
24807	1967		12	31	88	672	15.85	72.15	15.85	10.50	0.00	72.15	0.14	72.01	448.23
24838	1968	1985	1	31	95		15.32	79.68	15.32	10.50	0.00	79.68	0.00	79.68	
24869	1968		2	29	84		13.74	70.26	13.74	10.50	0.00	70.26	0.22	70.04	
24898	1968		3	31	52		14.79	37.21	14.79	10.50	0.00	37.21	5.03	32.18	
24929	1968		4	30	25		13.77	11.23	13.77	10.50	0.00	11.23	14.15	0.00	
24959	1968		5	31	4		13.19	-9.19	13.19	1.31	-9.19	0.00	0.00	0.00	
24990	1968		6	30	7		11.54	-9.54	3.31	0.00	-1.31	0.00	0.00	0.00	
25020	1968		7	31	8		11.68	-2.68	9.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
25051	1968		8	31	14		12.83	1.17	12.83	1.17	1.17	0.00	0.00	0.00	
25082	1968		9	30	18		9.41	8.59	9.41	7.76	6.59	0.00	0.00	0.00	
25112	1968		10	31	40		14.91	25.09	14.91	10.50	2.74	22.35	0.59	12.76	
25143	1968		11	30	52		15.66	36.34	15.66	10.50	0.00	36.34	5.25	31.08	
25173	1968		12	31	102	495	15.85	86.15	15.85	10.50	0.00	86.15	0.11	86.04	311.79
25204	1969	1986	1	31	59		15.32	43.68	15.32	10.50	0.00	43.68	2.54	40.13	
25235	1969		2	28	67		13.74	53.26	13.74	10.50	0.00	53.26	1.85	51.41	
25263	1969		3	31	62		14.79	47.21	14.79	10.50	0.00	47.21	2.85	44.36	
25294	1969		4	30	36		13.77	22.23	13.77	10.50	0.00	22.23	9.63	12.59	
25324	1969		5	31	4		13.19	-9.19	13.19	1.31	-9.19	0.00	0.00	0.00	
25355	1969		6	30	5		11.54	-6.54	6.31	0.00	-1.31	0.00	0.00	0.00	
25385	1969		7	31	5		11.68	-6.68	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
25416	1969		8	31	14		12.83	1.17	12.83	1.17	1.17	0.00	0.00	0.00	
25447	1969		9	30	20		9.41	10.59	9.41	10.50	9.33	1.26	19.17	0.00	
25477	1969		10	31	48		14.91	33.09	14.91	10.50	0.00	33.09	6.13	26.96	
25508	1969		11	30	52		15.66	36.34	15.66	10.50	0.00	36.34	5.25	31.08	
25538	1969		12	31	98	488	15.85	82.15	15.85	10.50	0.00	82.15	0.00	82.15	286.70
25569	1970	1987	1	31	171		15.32	155.68	15.32	10.50	0.00	155.68	12.27	143.41	
25600	1970		2	28	68		13.74	52.26	13.74	10.50	0.00	52.26	2.00	50.26	
25628	1970		3	31	73		14.79	58.21	14.79	10.50	0.00	58.21	1.20	57.01	
25659	1970		4	30	47		13.77	33.23	13.77	10.50	0.00	33.23	6.09	27.14	
25689	1970		5	31	11		13.19	-2.19	13.19	8.31	-2.19	0.00	0.00	0.00	
25720	1970		6	30	5		11.54	-6.54	11.54	1.76	-6.54	0.00	0.00	0.00	
25750	1970		7	31	11		11.68	-0.68	11.68	1.08	-0.68	0.00	0.00	0.00	
25781	1970		8	31	1		12.83	-11.83	2.08	0.00	-1.08	0.00	0.00	0.00	
25812	1970		9	30	33		9.41	23.59	9.41	10.50	10.50	13.09	13.31	0.00	
25842	1970		10	31	54		14.91	39.09	14.91	10.50	0.00	39.09	4.57	34.52	
25873	1970		11	30	32		15.66	16.34	15.66	10.50	0.00	16.34	11.92	4.42	
25903	1970		12	31	98	602	15.85	82.15	15.85	10.50	0.00	82.15	0.07	82.08	388.89
25934	1971	1988	1	31	69		15.32	53.68	15.32	10.50	0.00	53.68	1.76	51.88	
25965	1971		2	28	40		13.74	26.26	13.74	10.50	0.00	26.26	0.22	26.04	
25993	1971		3	31	45		14.79	30.21	14.79	10.50	0.00	30.21	6.97	23.24	
26024	1971		4	30	41		13.77	27.23	13.77	10.50	0.00	27.23	7.91	19.32	
26054	1971		5	31	5		13.19	-8.19	13.19	2.31	-8.19	0.00	0.00	0.00	
26085	1971		6	30	2		11.54	-9.54	4.31	0.00	2.31	0.00	0.00	0.00	
26115	1971		7	31	0		11.68	-11.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
26146	1971		8	31	14		12.83	1.17	12.83	1.17	1.17	0.00	0.00	0.00	
26177	1971		9	30	8		9.41	3.41	7.17	0.00	1.17	0.00	0.00	0.00	
26207	1971		10	31	37		14.91	22.09	14.91	10.50	10.50	11.59	13.98	0.00	
26238	1971		11	30	51		15.66	35.34	15.66	10.50	0.00	35.34	5.51	29.83	
26268	1971		12	31	86	396	15.85	70.15	15.85	10.50	0.00	70.15	0.22	69.93	212.24
26299	1972	1989	1	31	83		15.32	67.68	15.32	10.50	0.00	67.68	0.26	67.32	
26330	1972		2	29	48		13.74	34.26	13.74	10.50	0.00	34.26	5.80	28.46	
26359	1972		3	31	89		14.79	74.21	14.79	10.50	0.00	74.21	0.07	74.14	
26390	1972		4	30	61		13.77	47.23	13.77	10.50	0.00	47.23	2.85	44.38	
26420	1972		5	31	5		13.19	-8.19	13.19	2.31	-8.19	0.00	0.00	0.00	
26451	1972		6	30	0		11.54	-11.54	2.31	0.00	-2.31	0.00	0.00	0.00	
26481	1972		7	31	0		11.68	-11.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
26512	1972		8	31	0		12.83	-12.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
26543	1972		9	30	10		9.41	0.59	9.41	0.59	0.59	0.00	0.00	0.00	
26573	1972		10	31	27		14.91	12.09	14.91	10.50	9.91	2.18	18.68	0.00	

Fecha	Año	Año	Mes	días	P(mm)	PTA (mm)	ETP(mm)	P-ETP	ETR (mm)	Reserva del suelo (mm)	ΔS	Xcedente (mm	Escurrimiento (mm)	Recarga (mm)	PTA (mm)
26604	1972		11	30	50		15.66	34.34	15.66	10.50	0.00	34.34	5.78	28.56	
26634	1972		12	31	62	435	15.85	46.15	15.85	10.50	0.00	46.15	3.85	43.10	285.96
26665	1973	1890	1	31	113		15.32	97.68	15.32	10.50	0.00	97.68	0.80	96.88	
26696	1973		2	28	142		13.74	128.26	13.74	10.50	0.00	128.26	5.34	122.92	
26724	1973		3	31	193		14.79	178.21	14.79	10.50	0.00	178.21	1.84	176.37	
26755	1973		4	30	17		13.77	3.23	13.77	10.50	0.00	3.23	15.10	0.00	
26785	1973		5	31	0		13.19	-13.19	10.50	0.00	-10.50	0.00	0.00	0.00	
26816	1973		6	30	2		11.54	-9.54	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
26846	1973		7	31	17		11.68	5.32	11.68	5.32	5.32	0.00	0.00	0.00	
26877	1973		8	31	21		12.83	8.17	12.83	10.50	5.18	2.99	18.23	0.00	
26908	1973		9	30	27		9.41	17.59	9.41	10.50	0.00	17.59	11.41	6.18	
26938	1973		10	31	57		14.91	42.09	14.91	10.50	0.00	42.09	3.88	38.21	
26969	1973		11	30	28		15.66	12.34	15.66	10.50	0.00	12.34	13.64	0.00	
26999	1973		12	31	100	647	15.85	84.15	15.85	10.50	0.00	84.15	0.05	84.10	454.55
27030	1974	1891	1	31	144		15.32	128.68	15.32	10.50	0.00	128.68	5.40	123.28	
27061	1974		2	28	164		13.74	150.26	13.74	10.50	0.00	150.26	10.71	139.55	
27089	1974		3	31	81		14.79	66.21	14.79	10.50	0.00	66.21	0.46	65.75	
27120	1974		4	30	39		13.77	25.23	13.77	10.50	0.00	25.23	8.57	16.65	
27150	1974		5	31	2		13.19	-11.19	12.50	0.00	-10.50	0.00	0.00	0.00	
27181	1974		6	30	20		11.54	8.46	11.54	8.46	8.46	0.00	0.00	0.00	
27211	1974		7	31	0		11.68	-11.68	8.46	0.00	-8.46	0.00	0.00	0.00	
27242	1974		8	31	20		12.83	7.17	12.83	7.17	7.17	0.00	0.00	0.00	
27273	1974		9	30	6		9.41	-3.41	9.41	3.76	-3.41	0.00	0.00	0.00	
27303	1974		10	31	46		14.91	31.09	14.91	10.50	6.74	24.35	8.88	15.47	
27334	1974		11	30	23		15.66	7.34	15.66	10.50	0.00	7.34	15.98	0.00	
27364	1974		12	31	24	569	15.85	8.15	15.85	10.50	0.00	8.15	15.60	0.00	360.67
27395	1975	1892	1	31	148		15.32	132.68	15.32	10.50	0.00	132.68	6.29	126.39	
27426	1975		2	28	72		13.74	58.26	13.74	10.50	0.00	58.26	1.19	57.06	
27454	1975		3	31	103		14.79	88.21	14.79	10.50	0.00	88.21	0.19	88.02	
27485	1975		4	30	43		13.77	29.23	13.77	10.50	0.00	29.23	7.27	21.96	
27515	1975		5	31	20		13.19	6.81	13.19	10.50	0.00	6.81	16.26	0.00	
27546	1975		6	30	0		11.54	-11.54	10.50	0.00	-10.50	0.00	0.00	0.00	
27576	1975		7	31	0		11.68	-11.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
27607	1975		8	31	0		12.83	-12.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
27638	1975		9	30	0		9.41	-9.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
27668	1975		10	31	0		14.91	-14.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
27699	1975		11	30	43		15.66	27.34	15.66	10.50	10.50	16.84	11.72	5.12	
27729	1975		12	31	102	531	15.85	86.15	15.85	10.50	0.00	86.15	0.11	86.04	384.98
27760	1976	1893	1	31	99		15.32	83.68	15.32	10.50	0.00	83.68	0.04	83.62	
27791	1976		2	28	72		13.74	58.26	13.74	10.50	0.00	58.26	1.19	57.06	
27820	1976		3	31	88		14.79	73.21	14.79	10.50	0.00	73.21	0.10	73.11	
27851	1976		4	30	26		13.77	12.23	13.77	10.50	0.00	12.23	13.69	0.00	
27881	1976		5	31	10		13.19	-3.19	13.19	7.31	-3.19	0.00	0.00	0.00	
27912	1976		6	30	12		11.54	0.46	11.54	7.76	0.46	0.00	0.00	0.00	
27942	1976		7	31	4		11.68	-7.68	11.68	0.08	-7.68	0.00	0.00	0.00	
27973	1976		8	31	0		12.83	12.83	0.08	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	
28004	1976		9	30	42		9.41	32.59	9.41	10.50	10.50	22.09	9.68	12.41	
28034	1976		10	31	17		14.91	2.09	14.91	10.50	0.00	2.09	18.71	0.00	
28065	1976		11	30	22		15.66	6.34	15.66	10.50	0.00	6.34	16.49	0.00	
28095	1976		12	31	52	444	15.85	36.15	15.85	10.50	0.00	36.15	5.30	30.85	257.07
28126	1977	1894	1	31	39		15.32	23.68	15.32	10.50	0.00	23.68	9.11	14.57	
28157	1977		2	28	112		13.74	98.26	13.74	10.50	0.00	98.26	0.85	97.41	
28185	1977		3	31	82		14.79	67.21	14.79	10.50	0.00	67.21	0.38	66.82	
28216	1977		4	30	8		13.77	-5.77	13.77	4.73	-5.77	0.00	0.00	0.00	
28246	1977		5	31	17		13.19	3.81	13.19	8.53	3.81	0.00	0.00	0.00	
28277	1977		6	30	1		11.54	-10.54	9.53	0.00	-8.53	0.00	0.00	0.00	
28307	1977		7	31	2		11.68	-9.68	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
28338	1977		8	31	0		12.83	-12.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
28369	1977		9	30	22		9.41	12.59	9.41	10.50	10.50	2.09	18.71	0.00	
28399	1977		10	31	25		14.91	11.09	14.91	10.50	0.00	11.09	14.21	0.00	
28430	1977		11	30	107		15.66	91.34	15.66	10.50	0.00	91.34	0.25	90.99	
28460	1977		12	31	113	529	15.85	97.15	15.85	10.50	0.00	97.15	0.75	96.40	396.19
28491	1978	1895	1	31	151		15.32	135.68	15.32	10.50	0.00	135.68	6.97	128.71	
28522	1978		2	28	103		13.74	89.26	13.74	10.50	0.00	89.26	0.24	89.02	
28550	1978		3	31	69		14.79	54.21	14.79	10.50	0.00	54.21	1.71	52.50	
28581	1978		4	30	30		13.77	16.23	13.77	10.50	0.00	16.23	11.97	4.26	
28611	1978		5	31	8		13.19	-4.19	13.19	8.31	-4.19	0.00	0.00	0.00	
28642	1978		6	30	7		11.54	-4.54	11.54	1.76	-2.54	0.00	0.00	0.00	
28672	1978		7	31	1		11.68	-10.68	2.76	0.00	-1.76	0.00	0.00	0.00	
28703	1978		8	31	1		12.83	-11.83	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
28734	1978		9	30	50		9.41	40.59	9.41	10.50	10.50	40.09	4.33	35.76	
28764	1978		10	31	34		14.91	19.09	14.91	10.50	0.00	19.09	10.82	8.27	
28795	1978		11	30	43		15.66	30.34	15.66	10.50	0.00	30.34	8.93	21.41	
28825	1978		12	31	82	593	15.85	66.15	15.85	10.50	0.00	66.15	0.46	65.69	407.62
28856	1979	1896	1	31	106		15.32	90.68	15.32	10.50	0.00	90.68	0.31	90.37	
28887	1979		2	28	66		13.74	52.26	13.74	10.50	0.00	52.26	2.00	50.26	
28915	1979		3	31	228		14.79	213.21	14.79	10.50	0.00	213.21	33.69	179.52	
28946	1979		4	30	82		13.77	68.23	13.77	10.50	0.00	68.23	0.33	67.90	
28976	1979		5	31	14		13.19	0.81	13.19	10.50	0.00	0.81	19.41	0.00	
29007	1979		6	30	0		11.54	-11.54	10.50	0.00	-10.50	0.00	0.00	0.00	
29037	1979		7	31	22		11.68	10.32	11.68	10.32	10.32	0.00	0.00	0.00	
29068	1979		8	31	14		12.83	1.17	12.83	10.50	0.18	0.98	19.31	0.00	
29099	1979		9	30	40		9.41	30.59	9.41	10.50	0.00	30.59	6.85	23.74	
29129	1979		10	31	51		14.91	36.09	14.91	10.50	0.00	36.09	5.31	30.77	
29160	1979		11	30	83		15.66	67.34	15.66	10.50	0.00	67.34	0.38	66.96	
29190	1979		12	31	166	872	15.85	150.15	15.85	10.50	0.00	150.15	10.68	139.47	848.89
29221	1980	1897	1	31	112		15.32	96.68	15.32	10.50	0.00	96.68	0.72	95.96	
29252	1980		2	29	151		13.74	137.26	13.74	10.50	0.00	137.26	7.34	129.92	
29281	1980		3	31	228		14.79	213.21	14.79	10.50	0.00	213.21	33.69	179.52	
29312	1980		4	30	28		13.77	14.23	13.77	10.50	0.00	14.23	12.81	1.41	
29342	1980		5	31	22		13.19	8.81	13.19	10.50	0.00	8.81	15.28	0.00	
29373	1980		6	30	1		11.54	-10.54	11.50	0.00	-10.50	0.00	0.00	0.00	
29403	1980		7	31	18		11.68	6.32	11.68	6.32	6.32	0.00	0.00	0.00	
29434	1980		8	31	18		12.83	5.17	12.83	10.50	4.18	0.99	19.31	0.00	
29465	1980		9	30	65		9.41	55.59	9.41	10.50	0.00	55.59	1.53	54.06	
29495	1980		10	31	154		14.91	139.09	14.91	10.50	0.00	139.09	7.78	131.31	
29526	1980		11	30	56		15.66	40.34	15.66	10.50	0.00	40.34	4.27	36.07	
29556	1980		12	31	83	936	15.85	67.15	15.85	10.50	0.00	67.15	0.26	66.76	695.01
29587	1981	1898	1	31	230		15.32	214.68	15.32	10.50	0.00	214.68	34.34	180.34	
29618	1981		2	28	376		13.74	362.26	13.74	10.50	0.00	362.26	117.60	244.66	
29646	1981		3	31	133		14.79	118.21	14.79	10.50	0.00	118.21	3.44	114.77	
29677	1981		4	30	39		13.77	25.23	13.77	10.50	0.00	25.23	8.57	16.65	
29707	1981		5	31	11		13.19	-2.19	13.19	8.31	-2.19	0.00	0.00	0.00	
29738	1981		6	30	0		11.54	-11.54	8.31	0.00	-8.31	0.00	0.00	0.00	
29768	1981		7	31	0		11.68	-11.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
29799	1981		8	31	51		12.83	38.17	12.83	10.50	10.50	27.67	7.76	19.90	

Fecha	Año	Año	Mes	días	P(mm)	PTA (mm)	ETP(mm)	P-ETP	ETR (mm)	Reserva del suelo (mm)	ΔS	Xcedente (mm	Escurrimiento (mm)	Recarga (mm)	PTA (mm)
28830	1981		9	30	11		9.41	1.59	9.41	10.50	0.00	1.59	18.96	0.00	
28860	1981		10	31	95		14.91	80.09	14.91	10.50	0.00	80.09	0.00	80.08	
28891	1981		11	30	110		15.66	94.34	15.66	10.50	0.00	94.34	0.54	93.80	
28921	1981		12	31	147	1203	15.85	131.15	15.85	10.50	0.00	131.15	5.85	125.29	875.41
28952	1982	1999	1	31	203		15.32	187.68	15.32	10.50	0.00	187.68	23.17	164.51	
28983	1982		2	28	133		13.74	119.26	13.74	10.50	0.00	119.26	3.62	115.63	
29011	1982		3	31	95		14.79	80.21	14.79	10.50	0.00	80.21	0.00	80.21	
29042	1982		4	30	38		13.77	24.23	13.77	10.50	0.00	24.23	8.92	15.31	
29072	1982		5	31	3		13.19	-10.19	13.19	0.31	-10.19	0.00	0.00	0.00	
29103	1982		6	30	6		11.54	-5.54	6.31	0.00	-0.31	0.00	0.00	0.00	
29133	1982		7	31	1		11.68	-10.68	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
29164	1982		8	31	19		12.83	6.17	12.83	6.17	6.17	0.00	0.00	0.00	
29195	1982		9	30	38		9.41	28.59	9.41	10.50	4.33	24.26	8.91	15.35	
29225	1982		10	31	63		14.91	48.09	14.91	10.50	0.00	48.09	2.69	45.40	
29256	1982		11	30	102		15.66	86.34	15.66	10.50	0.00	86.34	0.12	86.22	
29286	1982		12	31	33	734	15.85	17.15	15.85	10.50	0.00	17.15	11.59	5.56	528.19
29317	1983	2000	1	31	62		15.32	46.68	15.32	10.50	0.00	46.68	2.85	43.73	
29348	1983		2	28	58		13.74	44.26	13.74	10.50	0.00	44.26	5.47	40.64	
29376	1983		3	31	72		14.79	57.21	14.79	10.50	0.00	57.21	1.32	55.88	
29407	1983		4	30	35		13.77	21.23	13.77	10.50	0.00	21.23	10.00	11.22	
29437	1983		5	31	6		13.19	-7.19	13.19	3.31	-7.19	0.00	0.00	0.00	
29468	1983		6	30	19		11.54	7.46	11.54	10.50	7.19	0.28	19.72	0.00	
29498	1983		7	31	2		11.68	-9.68	11.68	0.82	-9.68	0.00	0.00	0.00	
29529	1983		8	31	16		12.83	3.17	12.83	3.99	3.17	0.00	0.00	0.00	
29560	1983		9	30	47		9.41	37.59	9.41	10.50	6.51	31.08	6.71	24.37	
29590	1983		10	31	43		14.91	28.09	14.91	10.50	0.00	28.09	7.63	20.46	
29621	1983		11	30	51		15.66	35.34	15.66	10.50	0.00	35.34	5.51	29.83	
29651	1983		12	31	77	486	15.85	61.15	15.85	10.50	0.00	61.15	0.88	60.27	286.60
29682	1984	2014	1	31	150		15.32	134.68	15.32	10.50	0.00	134.68	6.74	127.94	
29713	1984		2	28	233		13.74	219.26	13.74	10.50	0.00	219.26	36.38	182.87	
29742	1984		3	31	119		14.79	104.21	14.79	10.50	0.00	104.21	1.45	102.76	
29773	1984		4	30	77		13.77	63.23	13.77	10.50	0.00	63.23	0.68	62.53	
29803	1984		5	31	18		13.19	4.81	13.19	10.50	0.00	4.81	17.27	0.00	
29834	1984		6	30	20		11.54	8.46	11.54	10.50	0.00	8.46	15.45	0.00	
29864	1984		7	31	4		11.68	-7.68	11.68	2.82	-7.68	0.00	0.00	0.00	
29895	1984		8	31	20		12.83	7.17	12.83	9.99	7.17	0.00	0.00	0.00	
29926	1984		9	30	7		9.41	-2.41	9.41	7.58	-2.41	0.00	0.00	0.00	
29956	1984		10	31	44		14.91	29.09	14.91	10.50	2.92	26.17	8.26	17.91	
29987	1984		11	30	83		15.66	67.34	15.66	10.50	0.00	67.34	0.36	66.98	
30017	1984		12	31	94	889	15.85	78.15	15.85	10.50	0.00	78.15	0.00	78.15	889.11
30048	1985	2002	1	31	121		15.32	105.68	15.32	10.50	0.00	105.68	1.62	104.05	
30079	1985		2	28	83		13.74	69.26	13.74	10.50	0.00	69.26	0.27	68.99	
30107	1985		3	31	87		14.79	72.21	14.79	10.50	0.00	72.21	0.13	72.08	
30138	1985		4	30	63		13.77	49.23	13.77	10.50	0.00	49.23	2.49	46.74	
30168	1985		5	31	18		13.19	4.81	13.19	10.50	0.00	4.81	17.27	0.00	
30199	1985		6	30	7		11.54	-4.54	11.54	5.96	-4.54	0.00	0.00	0.00	
30229	1985		7	31	0		11.68	-11.68	5.96	0.00	-5.96	0.00	0.00	0.00	
30260	1985		8	31	8		12.83	-3.83	9.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
30291	1985		9	30	40		9.41	30.59	9.41	10.50	10.50	26.09	8.28	17.81	
30321	1985		10	31	46		14.91	31.09	14.91	10.50	0.00	31.09	6.70	24.38	
30352	1985		11	30	60		15.66	44.34	15.66	10.50	0.00	44.34	3.41	40.93	
30382	1985		12	31	126	666	15.85	110.15	15.85	10.50	0.00	110.15	2.20	107.95	482.83
30413	1986	2003	1	31	110		15.32	94.68	15.32	10.50	0.00	94.68	0.56	94.11	
30444	1986		2	28	228		13.74	214.26	13.74	10.50	0.00	214.26	34.15	180.11	
30472	1986		3	31	164		14.79	149.21	14.79	10.50	0.00	149.21	10.42	138.79	
30503	1986		4	30	45		13.77	31.23	13.77	10.50	0.00	31.23	6.66	24.56	
30533	1986		5	31	13		13.19	-0.19	13.19	10.31	-0.19	0.00	0.00	0.00	
30564	1986		6	30	0		11.54	-11.54	10.31	0.00	-10.31	0.00	0.00	0.00	
30594	1986		7	31	5		11.68	-6.68	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
30625	1986		8	31	44		12.83	31.17	12.83	10.50	10.50	20.67	10.21	10.46	
30656	1986		9	30	0		9.41	-9.41	9.41	1.09	-9.41	0.00	0.00	0.00	
30686	1986		10	31	43		14.91	28.09	14.91	10.50	9.41	18.68	10.98	7.70	
30717	1986		11	30	53		15.66	37.34	15.66	10.50	0.00	37.34	4.99	32.34	
30747	1986		12	31	93	798	15.85	77.15	15.85	10.50	0.00	77.15	0.01	77.14	565.21
30778	1987	2004	1	31	92		15.32	76.68	15.32	10.50	0.00	76.68	0.02	76.66	
30809	1987		2	28	78		13.74	56.26	13.74	10.50	0.00	56.26	1.44	54.82	
30837	1987		3	31	44		14.79	29.21	14.79	10.50	0.00	29.21	7.27	21.94	
30868	1987		4	30	32		13.77	18.23	13.77	10.50	0.00	18.23	11.18	7.07	
30898	1987		5	31	34		13.19	20.81	13.19	10.50	0.00	20.81	10.15	10.65	
30929	1987		6	30	4		11.54	-7.54	11.54	2.96	-7.54	0.00	0.00	0.00	
30959	1987		7	31	10		11.68	-1.68	11.68	1.28	-1.68	0.00	0.00	0.00	
30990	1987		8	31	1		12.83	-11.83	2.28	0.00	-1.28	0.00	0.00	0.00	
31021	1987		9	30	38		9.41	28.59	9.41	10.50	10.50	18.09	11.21	6.88	
31051	1987		10	31	41		14.91	26.09	14.91	10.50	0.00	26.09	8.28	17.81	
31082	1987		11	30	86		15.66	70.34	15.66	10.50	0.00	70.34	0.21	70.12	
31112	1987		12	31	67	519	15.85	51.15	15.85	10.50	0.00	51.15	2.17	48.98	314.62
31143	1988	2005	1	31	146		15.32	130.68	15.32	10.50	0.00	130.68	5.85	124.83	
31174	1988		2	28	150		13.74	136.26	13.74	10.50	0.00	136.26	7.11	129.15	
31203	1988		3	31	109		14.79	94.21	14.79	10.50	0.00	94.21	0.53	93.68	
31234	1988		4	30	39		13.77	25.23	13.77	10.50	0.00	25.23	8.57	16.65	
31264	1988		5	31	5		13.19	-8.19	13.19	2.31	-8.19	0.00	0.00	0.00	
31295	1988		6	30	0		11.54	-11.54	2.31	0.00	-2.31	0.00	0.00	0.00	
31325	1988		7	31	0		11.68	-11.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
31356	1988		8	31	0		12.83	-12.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
31387	1988		9	30	3		9.41	-6.41	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
31417	1988		10	31	54		14.91	39.09	14.91	10.50	10.50	28.59	4.69	23.90	
31448	1988		11	30	43		15.66	27.34	15.66	10.50	0.00	27.34	7.87	19.47	
31478	1988		12	31	97	956	15.85	81.15	15.85	10.50	0.00	81.15	0.01	81.14	498.83
31509	1989	2006	1	31	77		15.32	61.68	15.32	10.50	0.00	61.68	0.83	60.84	
31540	1989		2	28	99		13.74	85.26	13.74	10.50	0.00	85.26	0.08	85.17	
31568	1989		3	31	182		14.79	167.21	14.79	10.50	0.00	167.21	15.88	151.33	
31599	1989		4	30	60		13.77	50.23	13.77	10.50	0.00	50.23	2.32	47.90	
31629	1989		5	31	14		13.19	0.81	13.19	10.50	0.00	0.81	19.41	0.00	
31660	1989		6	30	27		11.54	15.46	11.54	10.50	0.00	15.46	12.29	3.17	
31690	1989		7	31	0		11.68	-11.68	10.50	0.00	-10.50	0.00	0.00	0.00	
31721	1989		8	31	8		12.83	-4.83	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
31752	1989		9	30	17		9.41	7.59	9.41	7.59	7.59	0.00	0.00	0.00	
31782	1989		10	31	98		14.91	83.09	14.91	10.50	2.91	80.18	0.00	80.18	
31813	1989		11	30	33		15.66	17.34	15.66	10.50	0.00	17.34	11.51	5.83	
31843	1989		12	31	52	671	15.85	36.15	15.85	10.50	0.00	36.15	5.30	30.85	465.26
31874	1990	2007	1	31	84		15.32	68.68	15.32	10.50	0.00	68.68	0.30	68.38	
31905	1990		2	28	38		13.74	24.26	13.74	10.50	0.00	24.26	8.91	15.35	
31933	1990		3	31	82		14.79	67.21	14.79	10.50	0.00	67.21	0.59	66.62	
31964	1990		4	30	28		13.77	15.23	13.77	10.50	0.00	15.23	12.28	2.94	
31994	1990		5	31	13		13.19	-0.19	13.19	10.31	-0.19	0.00	0.00	0.00	
32025	1990		6	30	104		11.54	92.46	11.54	10.50	0.19	92.28	0.40	91.88	

Fecha	Año	Año	Mes	días	P(mm)	PIA (mm)	ETP(mm)	P-ETP	ETR (mm)	Reserva del suelo (mm)	ΔS	Xcedente (mm	Escurrimiento (mm)	Recarga (mm)	RIA (mm)
33055	1980		7	31	23		11.68	11.32	11.68	10.50	0.00	11.32	14.10	0.00	
33086	1980		8	31	71		12.83	58.17	12.83	10.50	0.00	58.17	1.21	58.96	
33117	1980		9	30	35		9.41	25.59	9.41	10.50	0.00	25.59	8.45	17.14	
33147	1980		10	31	184		14.91	169.09	14.91	10.50	0.00	169.09	16.50	152.59	
33178	1980		11	30	202		15.66	186.34	15.66	10.50	0.00	186.34	22.66	163.68	
33208	1980		12	31	59	924	15.85	43.15	15.85	10.50	0.00	43.15	3.65	39.50	875.12
33239	1981	2008	1	31	110		15.32	94.68	15.32	10.50	0.00	94.68	0.56	94.11	
33270	1981		2	28	0		13.74	-13.74	10.50	0.00	-10.50	0.00	0.00	0.00	
33298	1981		3	31	59		14.79	44.21	14.79	10.50	10.50	33.71	5.95	27.76	
33329	1981		4	30	30		13.77	16.23	13.77	10.50	0.00	16.23	11.97	4.26	
33359	1981		5	31	6		13.19	-4.19	13.19	6.31	-4.19	0.00	0.00	0.00	
33390	1981		6	30	30		11.54	18.46	11.54	10.50	4.19	14.26	12.80	1.46	
33420	1981		7	31	5		11.68	-6.68	11.68	3.82	-6.68	0.00	0.00	0.00	
33451	1981		8	31	12		12.83	-0.83	12.83	2.98	-0.83	0.00	0.00	0.00	
33482	1981		9	30	13		9.41	3.59	9.41	6.50	3.59	0.00	0.00	0.00	
33512	1981		10	31	35		14.91	20.09	14.91	10.50	3.92	16.17	11.99	4.17	
33543	1981		11	30	183		15.66	167.34	15.66	10.50	0.00	167.34	15.92	151.42	
33573	1981		12	31	35	521	15.85	19.15	15.85	10.50	0.00	19.15	10.78	8.36	291.54
33604	1982	2009	1	31	58		15.32	27.68	15.32	10.50	0.00	27.68	8.47	19.21	
33635	1982		2	28	48		13.74	34.26	13.74	10.50	0.00	34.26	5.80	28.46	
33664	1982		3	31	25		14.79	11.21	14.79	10.50	0.00	11.21	14.15	0.00	
33695	1982		4	30	13		13.77	-0.77	13.77	9.73	-0.77	0.00	0.00	0.00	
33725	1982		5	31	0		13.19	-13.19	9.73	0.00	-9.73	0.00	0.00	0.00	
33756	1982		6	30	11		11.54	-0.54	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
33786	1982		7	31	7		11.68	-4.68	7.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
33817	1982		8	31	4		12.83	-8.83	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
33848	1982		9	30	7		9.41	-2.41	7.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
33878	1982		10	31	22		14.91	7.09	14.91	7.09	7.09	0.00	0.00	0.00	
33909	1982		11	30	183		15.66	177.34	15.66	10.50	3.41	173.93	18.15	155.78	
33939	1982		12	31	18	387	15.85	2.15	15.85	10.50	0.00	2.15	18.68	0.00	197.44
33970	1983	2010	1	31	101		15.32	85.68	15.32	10.50	0.00	85.68	0.10	85.58	
34001	1983		2	28	64		13.74	50.26	13.74	10.50	0.00	50.26	2.32	47.94	
34029	1983		3	31	41		14.79	26.21	14.79	10.50	0.00	26.21	8.24	17.97	
34060	1983		4	30	29		13.77	15.23	13.77	10.50	0.00	15.23	12.39	2.84	
34090	1983		5	31	12		13.19	-1.19	13.19	9.31	-1.19	0.00	0.00	0.00	
34121	1983		6	30	8		11.54	-3.54	11.54	5.76	-3.54	0.00	0.00	0.00	
34151	1983		7	31	5		11.68	-6.68	10.76	0.00	-5.76	0.00	0.00	0.00	
34182	1983		8	31	4		12.83	-8.83	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
34213	1983		9	30	19		9.41	9.59	9.41	9.99	5.99	0.00	0.00	0.00	
34243	1983		10	31	196		14.91	141.09	14.91	10.50	3.91	137.18	7.32	129.86	
34274	1983		11	30	289		15.66	273.34	15.66	10.50	0.00	273.34	63.59	209.75	
34304	1983		12	31	50	775	15.85	34.15	15.85	10.50	0.00	34.15	5.93	28.22	522.26
34335	1984	2011	1	31	105		15.32	89.68	15.32	10.50	0.00	89.68	0.26	89.42	
34366	1984		2	28	116		13.74	102.26	13.74	10.50	0.00	102.26	1.24	101.02	
34394	1984		3	31	99		14.79	84.21	14.79	10.50	0.00	84.21	0.06	84.15	
34425	1984		4	30	58		13.77	44.23	13.77	10.50	0.00	44.23	3.43	40.80	
34455	1984		5	31	29		13.19	15.81	13.19	10.50	0.00	15.81	12.14	3.66	
34486	1984		6	30	0		11.54	-11.54	10.50	0.00	-10.50	0.00	0.00	0.00	
34516	1984		7	31	0		11.68	-11.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
34547	1984		8	31	1		12.83	-11.83	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
34578	1984		9	30	8		9.41	-1.41	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
34608	1984		10	31	30		14.91	15.09	14.91	10.50	10.50	4.58	17.38	0.00	
34639	1984		11	30	181		15.66	165.34	15.66	10.50	0.00	165.34	15.27	150.07	
34669	1984		12	31	91	718	15.85	75.15	15.85	10.50	0.00	75.15	0.05	75.10	544.23
34700	1985	2012	1	31	73		15.32	57.68	15.32	10.50	0.00	57.68	1.26	56.41	
34731	1985		2	28	125		13.74	114.26	13.74	10.50	0.00	114.26	2.80	111.45	
34759	1985		3	31	112		14.79	97.21	14.79	10.50	0.00	97.21	0.76	96.45	
34790	1985		4	30	19		13.77	2.23	13.77	10.50	0.00	2.23	18.64	0.00	
34820	1985		5	31	5		13.19	-8.19	13.19	2.31	-8.19	0.00	0.00	0.00	
34851	1985		6	30	13		11.54	1.46	11.54	3.76	1.46	0.00	0.00	0.00	
34881	1985		7	31	1		11.68	-10.68	4.76	0.00	-3.76	0.00	0.00	0.00	
34912	1985		8	31	8		12.83	-4.83	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
34943	1985		9	30	33		9.41	23.59	9.41	10.50	10.50	13.09	13.31	0.00	
34973	1985		10	31	26		14.91	11.09	14.91	10.50	0.00	11.09	14.21	0.00	
35004	1985		11	30	47		15.66	31.34	15.66	10.50	0.00	31.34	6.63	24.71	
35034	1985		12	31	58	520	15.85	42.15	15.85	10.50	0.00	42.15	3.87	38.28	327.31
35065	1986	2013	1	31	97		15.32	81.68	15.32	10.50	0.00	81.68	0.01	81.66	
35096	1986		2	28	125		13.74	111.26	13.74	10.50	0.00	111.26	2.36	108.90	
35125	1986		3	31	79		14.79	64.21	14.79	10.50	0.00	64.21	0.88	63.33	
35156	1986		4	30	51		13.77	37.23	13.77	10.50	0.00	37.23	5.02	32.20	
35186	1986		5	31	3		13.19	-10.19	13.19	0.31	-10.19	0.00	0.00	0.00	
35217	1986		6	30	0		11.54	-11.54	0.31	0.00	-0.31	0.00	0.00	0.00	
35247	1986		7	31	0		11.68	-11.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
35278	1986		8	31	0		12.83	-12.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
35309	1986		9	30	36		9.41	26.59	9.41	10.50	10.50	16.09	12.02	4.06	
35339	1986		10	31	30		14.91	15.09	14.91	10.50	0.00	15.09	12.45	2.64	
35370	1986		11	30	56		15.66	40.34	15.66	10.50	0.00	40.34	4.27	36.07	
35400	1986		12	31	0	474	15.85	-15.85	10.50	0.00	-10.50	0.00	0.00	0.00	325.88
35431	1987	2014	1	31	112		15.32	96.68	15.32	10.50	10.50	86.18	0.11	86.06	
35462	1987		2	28	111		13.74	97.26	13.74	10.50	0.00	97.26	0.76	96.48	
35490	1987		3	31	74		14.79	59.21	14.79	10.50	0.00	59.21	1.09	58.12	
35521	1987		4	30	69		13.77	55.23	13.77	10.50	0.00	55.23	1.57	53.65	
35551	1987		5	31	12		13.19	-1.19	13.19	9.31	-1.19	0.00	0.00	0.00	
35582	1987		6	30	1		11.54	-10.54	10.31	0.00	-9.31	0.00	0.00	0.00	
35612	1987		7	31	0		11.68	-11.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
35643	1987		8	31	22		12.83	9.17	12.83	9.17	9.17	0.00	0.00	0.00	
35674	1987		9	30	38		9.41	28.59	9.41	10.50	1.33	25.25	8.56	16.69	
35704	1987		10	31	30		14.91	15.09	14.91	10.50	0.00	15.09	12.45	2.64	
35735	1987		11	30	79		15.66	63.34	15.66	10.50	0.00	63.34	0.68	62.66	
35765	1987		12	31	50	590	15.85	34.15	15.85	10.50	0.00	34.15	5.93	28.22	404.65
35796	1988	2015	1	31	107		15.32	91.68	15.32	10.50	0.00	91.68	0.36	91.31	
35827	1988		2	28	79		13.74	65.26	13.74	10.50	0.00	65.26	0.53	64.73	
35855	1988		3	31	93		14.79	78.21	14.79	10.50	0.00	78.21	0.00	78.21	
35886	1988		4	30	12		13.77	1.77	13.77	8.73	1.77	0.00	0.00	0.00	
35916	1988		5	31	2		13.19	-11.19	10.73	0.00	-8.73	0.00	0.00	0.00	
35947	1988		6	30	6		11.54	-5.54	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
35977	1988		7	31	0		11.68	-11.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
36008	1988		8	31	6		12.83	-6.83	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
36038	1988		9	30	4		9.41	-5.41	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
36069	1988		10	31	65		14.91	50.09	14.91	10.50	10.50	39.59	4.45	35.14	
36100	1988		11	30	38		15.66	23.34	15.66	10.50	0.00	23.34	9.23	14.11	
36130	1988		12	31	120	533	15.85	104.15	15.85	10.50	0.00	104.15	1.46	102.71	386.21
36161	1989	2016	1	31	92		15.32	76.68	15.32	10.50	0.00	76.68	0.02	76.66	
36192	1989		2	28	101		13.74	87.26	13.74	10.50	0.00	87.26	0.15	87.11	
36220	1989		3	31	72		14.79	57.21	14.79	10.50	0.00	57.21	1.32	55.88	
36251	1989		4	30	43		13.77	29.23	13.77	10.50	0.00	29.23	7.27	21.96	

Fecha	Año	Año	Mes	días	P(mm)	PTA (mm)	ETP(mm)	P-ETP	ETR (mm)	Reserva del suelo (mm)	ΔS	Xcedente (mm	Escurrimiento (mm)	Recarga (mm)	RTA (mm)
36281	1998		5	31	6		13.19	-7.19	13.19	3.31	-7.19	0.00	0.00	0.00	
36312	1998		6	30	3		11.54	-8.54	8.31	0.00	-3.31	0.00	0.00	0.00	
36342	1998		7	31	12		11.68	0.32	11.68	0.32	0.32	0.00	0.00	0.00	
36373	1998		8	31	2		12.83	-10.83	2.32	0.00	-0.32	0.00	0.00	0.00	
36404	1998		9	30	56		9.41	46.59	9.41	10.50	10.50	36.09	5.31	30.78	
36434	1998		10	31	29		14.93	14.07	14.93	10.50	0.00	14.08	12.67	1.22	
36465	1998		11	30	79		15.66	63.34	15.66	10.50	0.00	63.34	0.88	62.66	
36495	1998		12	31	68	551	15.85	50.15	15.85	10.50	0.00	50.15	2.33	47.82	384.08
36528	2000	2017	1	31	141		15.32	125.68	15.32	10.50	0.00	125.68	4.82	120.86	
36557	2000		2	29	108		13.74	94.26	13.74	10.50	0.00	94.26	0.53	93.73	
36586	2000		3	31	68		14.79	53.21	14.79	10.50	0.00	53.21	1.86	51.35	
36617	2000		4	30	33		13.77	19.23	13.77	10.50	0.00	19.23	10.76	8.46	
36647	2000		5	31	24		13.19	10.81	13.19	10.50	0.00	10.81	14.34	0.00	
36678	2000		6	30	5		11.54	-6.54	11.54	3.96	-6.54	0.00	0.00	0.00	
36708	2000		7	31	5		11.68	-6.68	8.96	0.00	-3.96	0.00	0.00	0.00	
36739	2000		8	31	5		12.83	-7.83	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
36770	2000		9	30	11		9.41	1.59	9.41	1.59	1.59	0.00	0.00	0.00	
36800	2000		10	31	35		14.93	20.08	14.93	10.50	8.91	11.18	14.17	0.00	
36831	2000		11	30	46		15.66	30.34	15.66	10.50	0.00	30.34	6.93	23.41	
36861	2000		12	31	58	539	15.85	42.15	15.85	10.50	0.00	42.15	3.87	38.29	336.10
36892	2001	2018	1	31	111		15.32	95.68	15.32	10.50	0.00	95.68	0.84	95.04	
36923	2001		2	28	87		13.74	73.26	13.74	10.50	0.00	73.26	0.10	73.16	
36951	2001		3	31	84		14.79	69.21	14.79	10.50	0.00	69.21	0.27	68.94	
36982	2001		4	30	26		13.77	12.23	13.77	10.50	0.00	12.23	13.63	0.00	
37012	2001		5	31	28		13.19	14.81	13.19	10.50	0.00	14.81	12.57	2.24	
37043	2001		6	30	1		11.54	-10.54	11.50	0.00	10.50	0.00	0.00	0.00	
37073	2001		7	31	14		11.68	2.32	11.68	2.32	2.32	0.00	0.00	0.00	
37104	2001		8	31	10		12.83	-2.83	12.32	0.00	2.32	0.00	0.00	0.00	
37135	2001		9	30	21		9.41	11.59	9.41	10.50	10.50	1.09	19.26	0.00	
37165	2001		10	31	0		14.93	-14.93	10.50	0.00	-10.50	0.00	0.00	0.00	
37196	2001		11	30	0		15.66	-15.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
37226	2001		12	31	0	382	15.85	-15.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	239.08
37257	2002	2019	1	31	96		15.32	80.68	15.32	10.50	10.50	70.18	0.22	69.96	
37288	2002		2	28	77		13.74	63.26	13.74	10.50	0.00	63.26	0.69	62.57	
37316	2002		3	31	115		14.79	100.21	14.79	10.50	0.00	100.21	1.03	99.18	
37347	2002		4	30	54		13.77	40.23	13.77	10.50	0.00	40.23	4.30	35.93	
37377	2002		5	31	12		13.19	-1.19	13.19	9.31	-1.19	0.00	0.00	0.00	
37408	2002		6	30	0		11.54	-11.54	9.31	0.00	-9.31	0.00	0.00	0.00	
37438	2002		7	31	0		11.68	-11.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
37469	2002		8	31	13		12.83	0.17	12.83	0.17	0.17	0.00	0.00	0.00	
37500	2002		9	30	35		9.41	25.59	9.41	10.50	10.33	15.26	12.37	2.88	
37530	2002		10	31	10		14.93	-4.93	14.93	5.56	-4.93	0.00	0.00	0.00	
37561	2002		11	30	42		15.66	26.34	15.66	10.50	4.93	21.43	9.93	11.50	
37591	2002		12	31	50	504	15.85	34.15	15.85	10.50	0.00	34.15	5.83	28.32	310.34
37622	2003	2020	1	31	52		15.32	36.68	15.32	10.50	0.00	36.68	5.16	31.51	
37653	2003		2	28	135		13.74	121.26	13.74	10.50	0.00	121.26	3.98	117.28	
37681	2003		3	31	106		14.79	91.21	14.79	10.50	0.00	91.21	0.34	90.87	
37712	2003		4	30	27		13.77	13.23	13.77	10.50	0.00	13.23	13.25	0.00	
37742	2003		5	31	18		13.19	4.81	13.19	10.50	0.00	4.81	17.27	0.00	
37773	2003		6	30	13		11.54	1.46	11.54	10.50	0.00	1.46	19.06	0.00	
37803	2003		7	31	8		11.68	-3.68	11.68	6.82	-3.68	0.00	0.00	0.00	
37834	2003		8	31	8		12.83	-4.83	12.83	1.98	-4.83	0.00	0.00	0.00	
37865	2003		9	30	25		9.41	15.59	9.41	10.50	8.51	7.08	16.12	0.00	
37895	2003		10	31	59		14.93	37.09	14.93	10.50	0.00	37.09	5.06	32.03	
37926	2003		11	30	49		15.66	33.34	15.66	10.50	0.00	33.34	5.06	27.28	
37956	2003		12	31	163	996	15.85	147.15	15.85	10.50	0.00	147.15	9.86	127.30	496.28
37987	2004	2021	1	31	63		15.32	47.68	15.32	10.50	0.00	47.68	2.76	44.91	
38018	2004		2	29	75		13.74	61.26	13.74	10.50	0.00	61.26	0.87	60.38	
38047	2004		3	31	78		14.79	63.21	14.79	10.50	0.00	63.21	0.69	62.52	
38078	2004		4	30	21		13.77	7.23	13.77	10.50	0.00	7.23	16.06	0.00	
38108	2004		5	31	15		13.19	1.81	13.19	10.50	0.00	1.81	18.88	0.00	
38139	2004		6	30	11		11.54	-0.54	11.54	9.96	-0.54	0.00	0.00	0.00	
38169	2004		7	31	6		11.68	-5.68	11.68	4.28	-5.68	0.00	0.00	0.00	
38200	2004		8	31	3		12.83	-9.83	7.28	0.00	-4.28	0.00	0.00	0.00	
38231	2004		9	30	22		9.41	12.59	9.41	10.50	10.50	2.09	18.71	0.00	
38261	2004		10	31	46		14.93	33.09	14.93	10.50	0.00	33.09	6.13	26.96	
38292	2004		11	30	35		15.66	19.34	15.66	10.50	0.00	19.34	10.72	8.62	
38322	2004		12	31	120	497	15.85	104.15	15.85	10.50	0.00	104.15	1.46	102.71	306.10
38353	2005	2022	1	31	64		15.32	48.68	15.32	10.50	0.00	48.68	2.58	46.09	
38384	2005		2	28	72		13.74	58.26	13.74	10.50	0.00	58.26	1.19	57.08	
38412	2005		3	31	70		14.79	55.21	14.79	10.50	0.00	55.21	1.58	53.64	
38443	2005		4	30	19		13.77	5.23	13.77	10.50	0.00	5.23	17.08	0.00	
38473	2005		5	31	11		13.19	-2.19	13.19	8.31	-2.19	0.00	0.00	0.00	
38504	2005		6	30	8		11.54	-2.54	11.54	5.76	-2.54	0.00	0.00	0.00	
38534	2005		7	31	5		11.68	-6.68	10.76	0.00	-5.76	0.00	0.00	0.00	
38565	2005		8	31	2		12.83	-10.83	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
38596	2005		9	30	19		9.41	9.59	9.41	9.59	9.59	0.00	0.00	0.00	
38626	2005		10	31	45		14.93	30.09	14.93	10.50	0.91	29.18	7.28	21.88	
38657	2005		11	30	35		15.66	20.34	15.66	10.50	0.00	20.34	10.33	10.00	
38687	2005		12	31	110	462	15.85	94.15	15.85	10.50	0.00	94.15	6.52	80.63	282.32

ANEXO 3: ESTIMACIÓN DE RECARGA POR TIPO DE GEOLOGÍA APLICANDO EL MÉTODO CURVA NÚMERO

DEPÓSITOSCOLUVIALES

Textura		Porosidad	Capacidaddel campo	Punto de marchitez	Permeabilidad Saturada	Permeabilidad Saturada	Tipodesuelo
USDA1	USCS2	f	qf	qw	(m/s)	(m/d)	
CoS	SP	0.417	0.045	0.018	0.01	864	Arenagruesa
S	SW	0.437	0.062	0.024	0.0058	501.12	Arenas
FS	SW	0.457	0.083	0.033	0.0031	267.84	Arenafina
LS	SM	0.437	0.105	0.047	0.0017	146.88	Arenamezclaconlimos
LFS	SM	0.457	0.131	0.058	0.001	86.4	Arenafinalimosa
SL	SM	0.453	0.19	0.085	0.00072	62.208	Arenalimo-arcillosa
FSL	SM	0.473	0.222	0.104	0.00052	44.928	Limoarenoso
L	ML	0.463	0.232	0.116	0.00037	31.968	Suelofranco(arenaslimosasconarcillas)
SiL	ML	0.501	0.284	0.135	0.00019	16.416	Limoconarenasyarcillas
SCL	SC	0.398	0.244	0.136	0.00012	10.368	Suelofranco(mezclaarena, limosyarcillas)
CL	CL	0.464	0.31	0.187	0.000064	5.5296	Arcilla limo-arenosa
SiCL	CL	0.471	0.342	0.21	0.000042	3.6288	Limo arcillo-arenoso
SC	SC	0.43	0.321	0.221	0.000033	2.8512	Arenaarcillosa
SiC	CH	0.479	0.371	0.251	0.000025	2.16	Limoarcilloso
C	CH	0.475	0.378	0.251	0.000025	2.16	Arcilla limo-arenosa
G	GP	0.397	0.032	0.013	0.3	25920	Grava
L	ML	0.419	0.307	0.18	0.000019	1.6416	Suelofranco(mezclaarena, limos yarcillas) bajaplasticidad
SiL	ML	0.461	0.36	0.203	0.000009	0.7776	Limobajaplasticidad
SCL	SC	0.365	0.305	0.202	0.0000027	0.23328	Arena arcillo-limosa
CL	CL	0.437	0.373	0.266	0.0000036	0.31104	Arcilla limosa
SiCL	CL	0.445	0.393	0.277	0.0000019	0.16416	Limo arcillo-arenoso
SC	SC	0.4	0.366	0.288	0.00000078	0.067392	Arenaarcillosa
SiC	CH	0.452	0.411	0.311	0.0000012	0.10368	Limo arcilloso alta plasticidad
C	CH	0.451	0.419	0.332	0.00000068	0.058752	Arcilla alta plasticidad

Aguaenel suelo:

θi (mm)	0	Reservaincial del suelo
θCC(%)	0.19	Capacidad de campo
θPM(%)	0.085	Punto de marchitez
Z(mm)	100	Zonaradicular
θmax(mm)	10.5	Maximaretenciónoreservadelsuelo

Escorrentía (Número Curva):

NI	39	ón de humedad antecedente media
		0.28

Uso consuntivo (Kc):

	PMA(mm)	R(mm)	R%
Promedio	603.3809524	406.9092773	0.67438204
		414	

DEPÓSITOSDELUVIALES

Textura		Porosidad	Capacidaddel campo	Punto de marchitez	Permeabilidad Saturada	Permeabilidad Saturada	Tipodesuelo
USDA1	USCS2	f	qf	qw	(m/s)	(m/d)	
CoS	SP	0.417	0.045	0.018	0.01	864	Arena gruesa
S	SW	0.437	0.062	0.024	0.0058	501.12	Arenas
FS	SW	0.457	0.083	0.033	0.0031	267.84	Arenafina
LS	SM	0.437	0.105	0.047	0.0017	146.88	Arenamezclaconlimos
LFS	SM	0.457	0.131	0.058	0.001	86.4	Arenafina limosa
SL	SM	0.453	0.19	0.085	0.00072	62.208	Arena limo-arcillosa
FSL	SM	0.473	0.222	0.104	0.00052	44.928	Limo arenoso
L	ML	0.463	0.232	0.116	0.00037	31.968	Suelo franco (arenas limosas con arcillas)
SiL	ML	0.501	0.284	0.135	0.00019	16.416	Limo con arenas yarcillas
SCL	SC	0.398	0.244	0.136	0.00012	10.368	Suelofranco (mezcla arena, limos yarcillas)
CL	CL	0.464	0.31	0.187	0.000064	5.5296	Arcillalimo-arenosa
SiCL	CL	0.471	0.342	0.21	0.000042	3.6288	Limo arcillo-arenoso
SC	SC	0.43	0.321	0.221	0.000033	2.8512	Arena arcillosa
SiC	CH	0.479	0.371	0.251	0.000025	2.16	Limo arcilloso
C	CH	0.475	0.378	0.251	0.000025	2.16	Arcillalimo-arenosa
G	GP	0.397	0.032	0.013	0.3	25920	Grava
L	ML	0.419	0.307	0.18	0.000019	1.6416	Suelo franco (mezcla arena, limos yarcillas) baja plasticidad
SiL	ML	0.461	0.36	0.203	0.000009	0.7776	Limobajaplasticidad
SCL	SC	0.365	0.305	0.202	0.0000027	0.23328	Arena arcillo-limosa
CL	CL	0.437	0.373	0.266	0.0000036	0.31104	Arcillalimosa
SiCL	CL	0.445	0.393	0.277	0.0000019	0.16416	Limo arcillo-arenoso
SC	SC	0.4	0.366	0.288	0.00000078	0.067392	Arena arcillosa
SiC	CH	0.452	0.411	0.311	0.0000012	0.10368	Limo arcilloso alta plasticidad
C	CH	0.451	0.419	0.332	0.00000068	0.058752	Arcillaaltaplasticidad

Aguaenel suelo:

θi (mm)	0	Reservaincial del suelo
θCC(%)	0.36	Capacidad de campo
θPM(%)	0.203	Punto de marchitez
Z(mm)	100	Zonaradicular
θmax(mm)	15.7	Maximaretenciónoreservadel suelo

Escorrentía (Número Curva):

NII	39	Condición de humedad antecedentemedia
Usoconsuntivo(Kc):		0.5

	PMA(mm)	R(mm)	R%
Promedio	603.3809524	319.1697975	0.528968964
		414	

GRUPOAMBO

Textura		Porosidad	Capacidaddelcampo	Puntode marchitez	Permeabilidad Saturada	Permeabilidad Saturada	Tipo de suelo
USDA1	USCS2	f	qf	qw	(m/s)	(m/d)	
CoS	SP	0.417	0.045	0.018	1.00E-02	864	Arena gruesa
S	SW	0.437	0.062	0.024	5.80E-03	501.12	Arenas
FS	SW	0.457	0.083	0.033	3.10E-03	267.84	Arena fina
LS	SM	0.437	0.105	0.047	1.70E-03	146.88	Arenamezcla conlimos
LFS	SM	0.457	0.131	0.058	1.00E-03	86.4	Arenafinalimosa
SL	SM	0.453	0.19	0.085	7.20E-04	62.208	Arena limo-arcillosa
FSL	SM	0.473	0.222	0.104	5.20E-04	44.928	Limoarenoso
L	ML	0.463	0.232	0.116	3.70E-04	31.968	Suelofranco(arenaslimosasconarcillas)
SiL	ML	0.501	0.284	0.135	1.90E-04	16.416	Limocon arenasyarcillas
SCL	SC	0.398	0.244	0.136	1.20E-04	10.368	Suelofranco(mezclaarena, limosyarcillas)
CL	CL	0.464	0.31	0.187	6.40E-05	5.5296	Arcilla limo-arenosa
SiCL	CL	0.471	0.342	0.21	4.20E-05	3.6288	Limo arcillo-arenoso
SC	SC	0.43	0.321	0.221	3.30E-05	2.8512	Arena arcillosa
SiC	CH	0.479	0.371	0.251	2.50E-05	2.16	Limoarcilloso
C	CH	0.475	0.378	0.251	2.50E-05	2.16	Arcilla limo-arenosa
G	GP	0.397	0.032	0.013	3.00E-01	25920	Grava
L	ML	0.419	0.307	0.18	1.90E-05	1.6416	Suelo franco (mezcla arena, limos yarcillas) baja plasticidad
SiL	ML	0.461	0.36	0.203	9.00E-06	0.7776	Limobajaplasticidad
SCL	SC	0.365	0.305	0.202	2.70E-06	0.23328	Arena arcillo-limosa
CL	CL	0.437	0.373	0.266	3.60E-06	0.31104	Arcilla limosa
SiCL	CL	0.445	0.393	0.277	1.90E-06	0.16416	Limo arcillo-arenoso
SC	SC	0.4	0.366	0.288	7.80E-07	0.067392	Arena arcillosa
SiC	CH	0.452	0.411	0.311	1.20E-06	0.10368	Limo arcilloso alta plasticidad
C	CH	0.451	0.419	0.332	6.80E-07	0.058752	Arcillaaltaplasticidad

Aguaen el Roca

θi (mm)	0	Reservaincialdelsuelo
θCC(%)	0.419	Capacidaddecampo
θPM(%)	0.332	Puntode marchitez
Z(mm)	100	Zonaradicular
θmax(mm)	8.7	Maximaretenciónoreservadel suelo

Escorrentía(NúmeroCurva):

NII 74 Condición de humedadantecedentemedia

Usoconsuntivo(Kc): 0.3

	PMA(mm)	R(mm)	R%
Promedio	603.3809524	297.5624399	0.493158491
		414	

GRUPOEXCELSIOR

Textura		Porosidad	Capacidad del campo	Punto de marchitez	Permeabilidad Saturada	Permeabilidad Saturada	Tipo de suelo
USDA1	USCS2	f	qf	qw	(m/s)	(m/d)	
CoS	SP	0.417	0.045	0.018	1.00E-02	864	Arena gruesa
S	SW	0.437	0.062	0.024	5.80E-03	501.12	Arenas
FS	SW	0.457	0.083	0.033	3.10E-03	267.84	Arena fina
LS	SM	0.437	0.105	0.047	1.70E-03	146.88	Arenamezcla con limos
LFS	SM	0.457	0.131	0.058	1.00E-03	86.4	Arena fina limosa
SL	SM	0.453	0.19	0.085	7.20E-04	62.208	Arena limo-arcillosa
FSL	SM	0.473	0.222	0.104	5.20E-04	44.928	Limo arenoso
L	ML	0.463	0.232	0.116	3.70E-04	31.968	Suelo franco (arenas limosas con arcillas)
SiL	ML	0.501	0.284	0.135	1.90E-04	16.416	Limo con arenas yarcillas
SCL	SC	0.398	0.244	0.136	1.20E-04	10.368	Suelo franco (mezcla arena, limos yarcillas)
CL	CL	0.464	0.31	0.187	6.40E-05	5.5296	Arcilla limo-arenosa
SiCL	CL	0.471	0.342	0.21	4.20E-05	3.6288	Limo arcillo-arenoso
SC	SC	0.43	0.321	0.221	3.30E-05	2.8512	Arena arcillosa
SiC	CH	0.479	0.371	0.251	2.50E-05	2.16	Limo arcilloso
C	CH	0.475	0.378	0.251	2.50E-05	2.16	Arcilla limo-arenosa
G	GP	0.397	0.032	0.013	3.00E-01	25920	Grava
L	ML	0.419	0.307	0.18	1.90E-05	1.6416	Suelo franco (mezcla arena, limos yarcillas) baja plasticidad
SiL	ML	0.461	0.36	0.203	9.00E-06	0.7776	Limo baja plasticidad
SCL	SC	0.365	0.305	0.202	2.70E-06	0.23328	Arena arcillo-limosa
CL	CL	0.437	0.373	0.266	3.60E-06	0.31104	Arcilla limosa
SiCL	CL	0.445	0.393	0.277	1.90E-06	0.16416	Limo arcillo-arenoso
SC	SC	0.4	0.366	0.288	7.80E-07	0.067392	Arena arcillosa
SiC	CH	0.452	0.411	0.311	1.20E-06	0.10368	Limo arcilloso alta plasticidad
C	CH	0.451	0.419	0.332	6.80E-07	0.058752	Arcilla alta plasticidad

Agua en el Roca

θi (mm)	0	Reserva incial del suelo
θCC(%)	0.419	Capacidad de campo
θPM(%)	0.332	Punto de marchitez
Z(mm)	100	Zonaradicular
θmax(mm)	8.7	Maxima retención o reserva del suelo

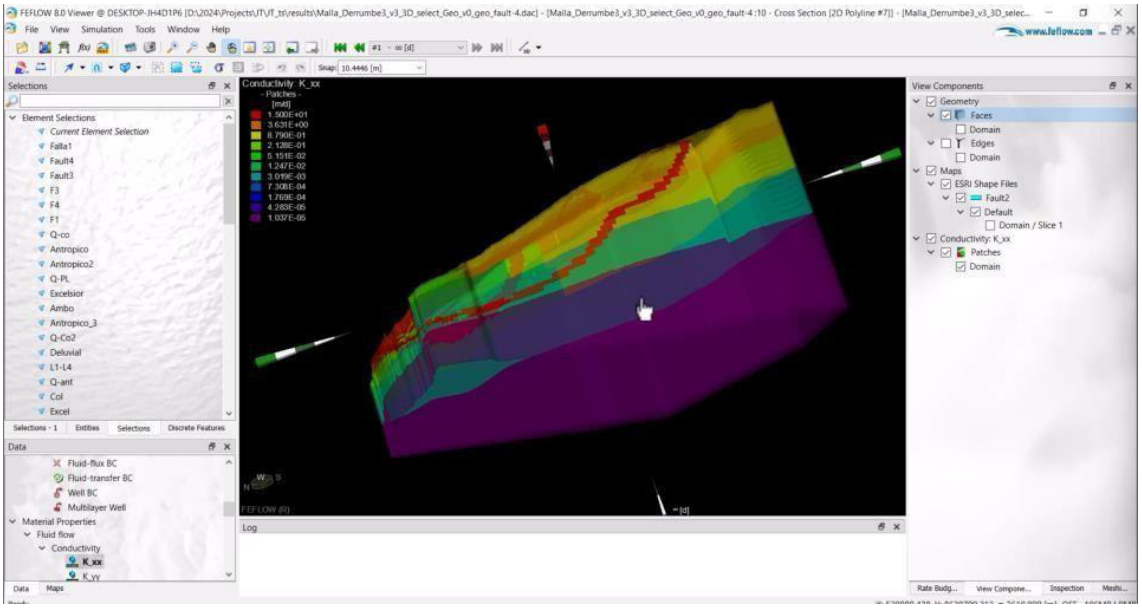
rrentía (Número Curva):

NII 39 Condición de humedadantecedentemedia

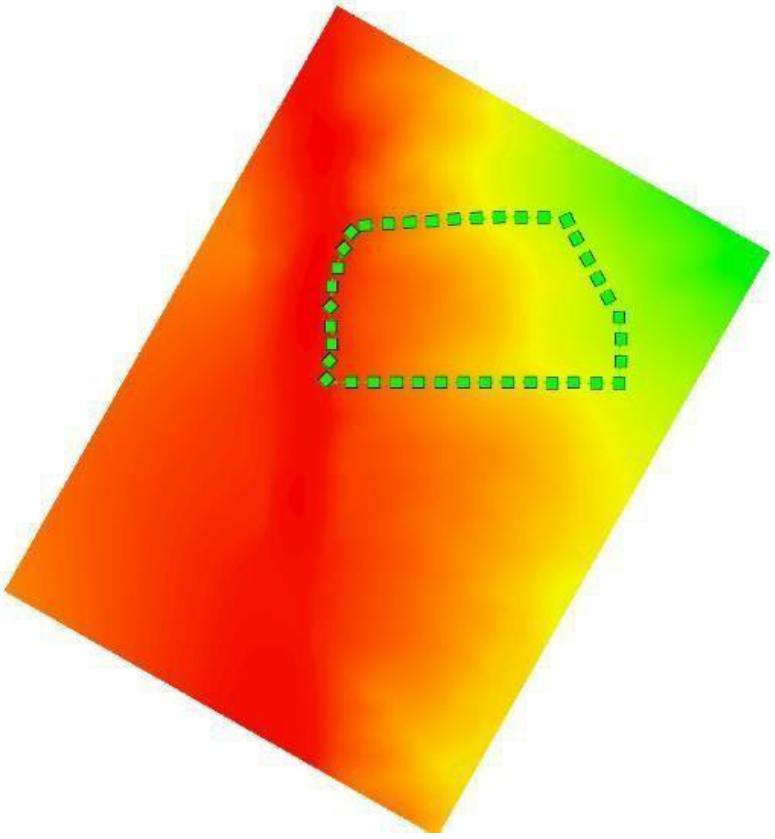
	PMA(mm)	R(mm)	R%
Promedio	603.3809524	324.3607357	0.53757205

ANEXO 4: SALIDA DEL MODELO FEFLOW

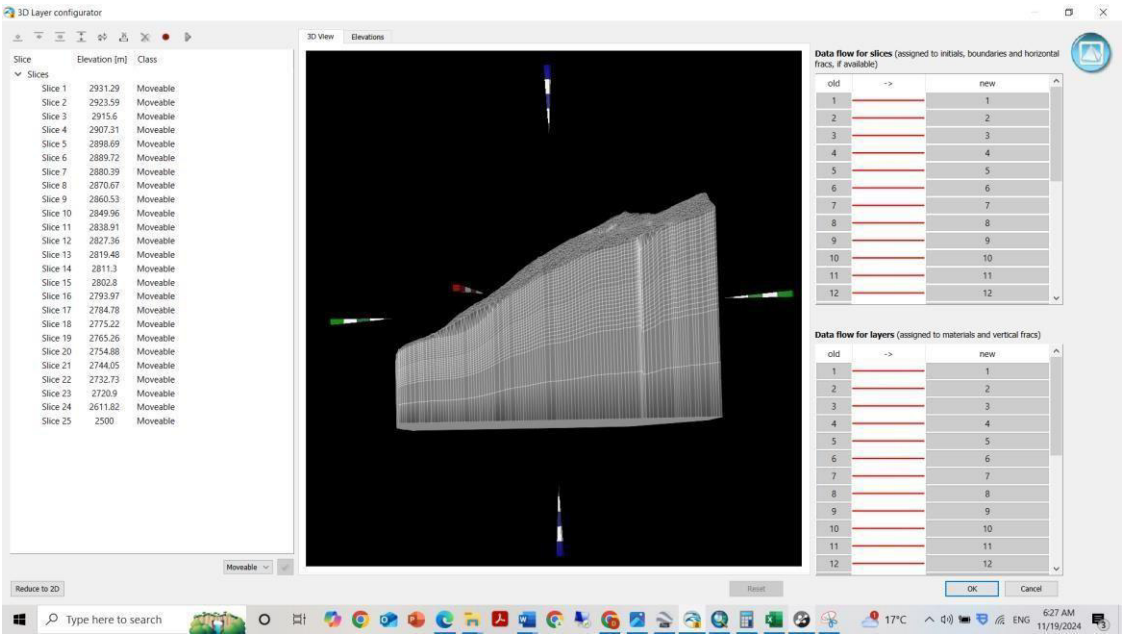
Modelo conceptual



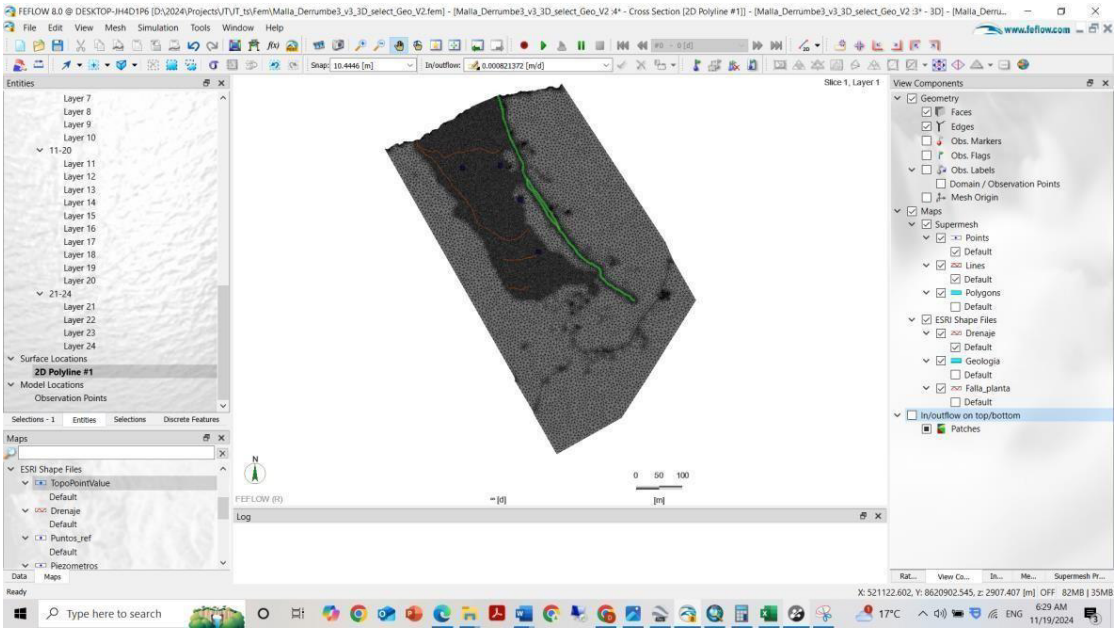
Dominio del modelo



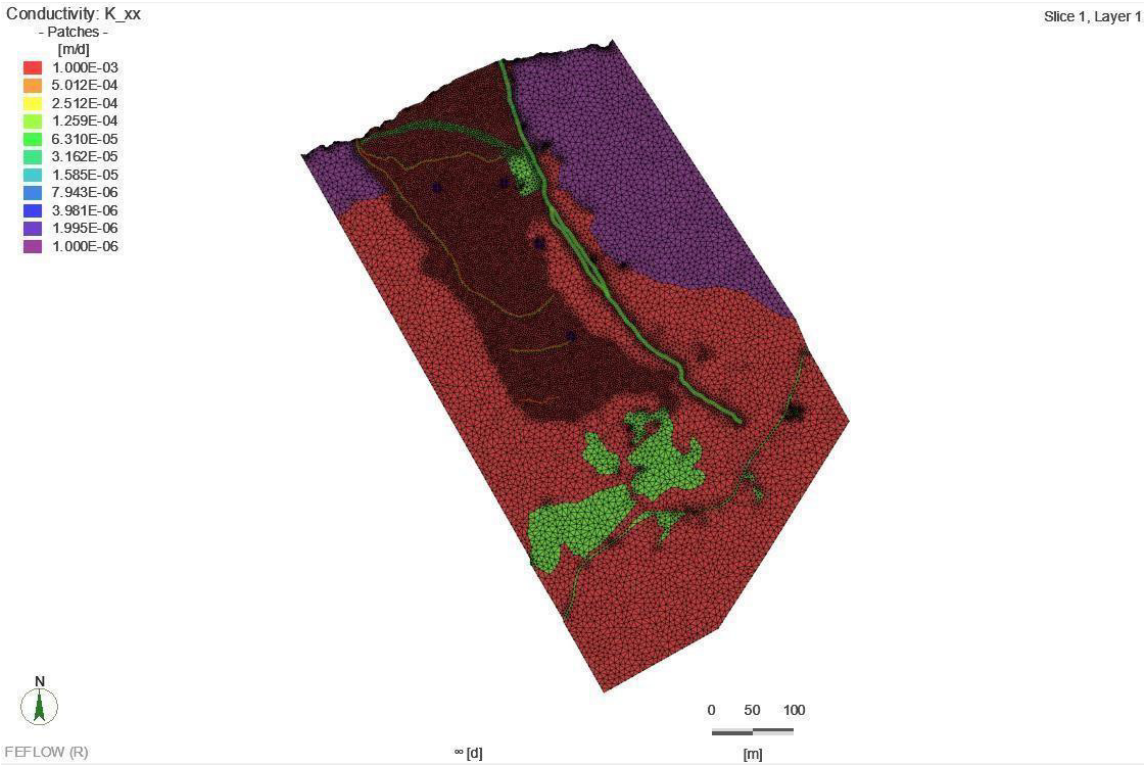
Discretización del modelo vertical



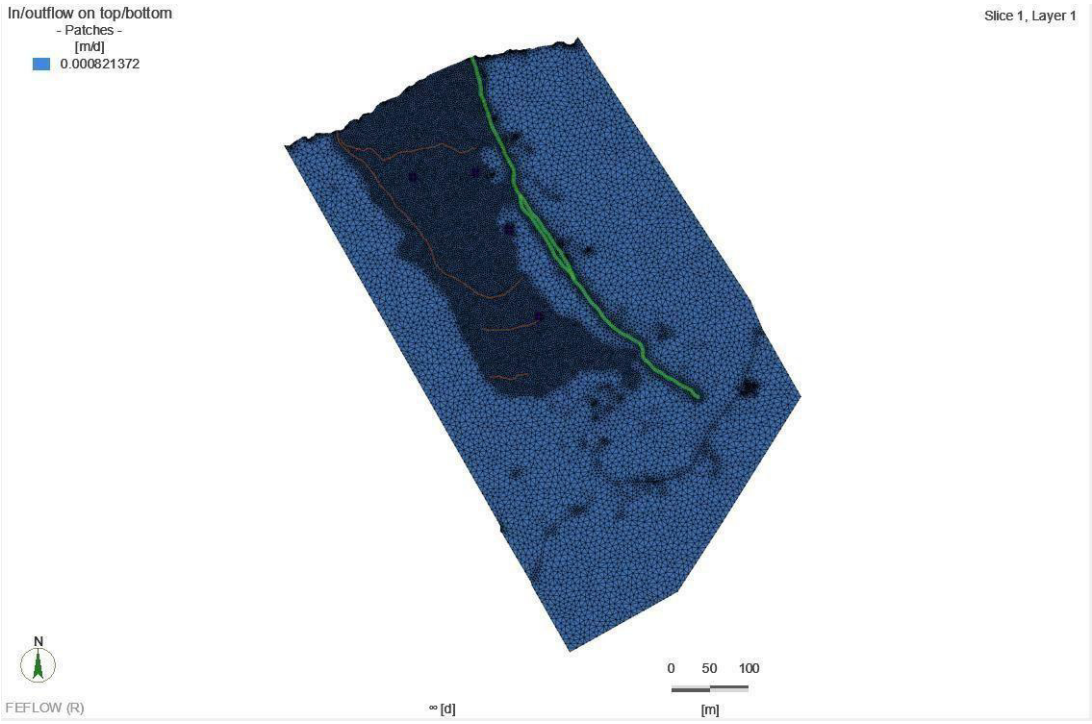
Discretización del modelo horizontal



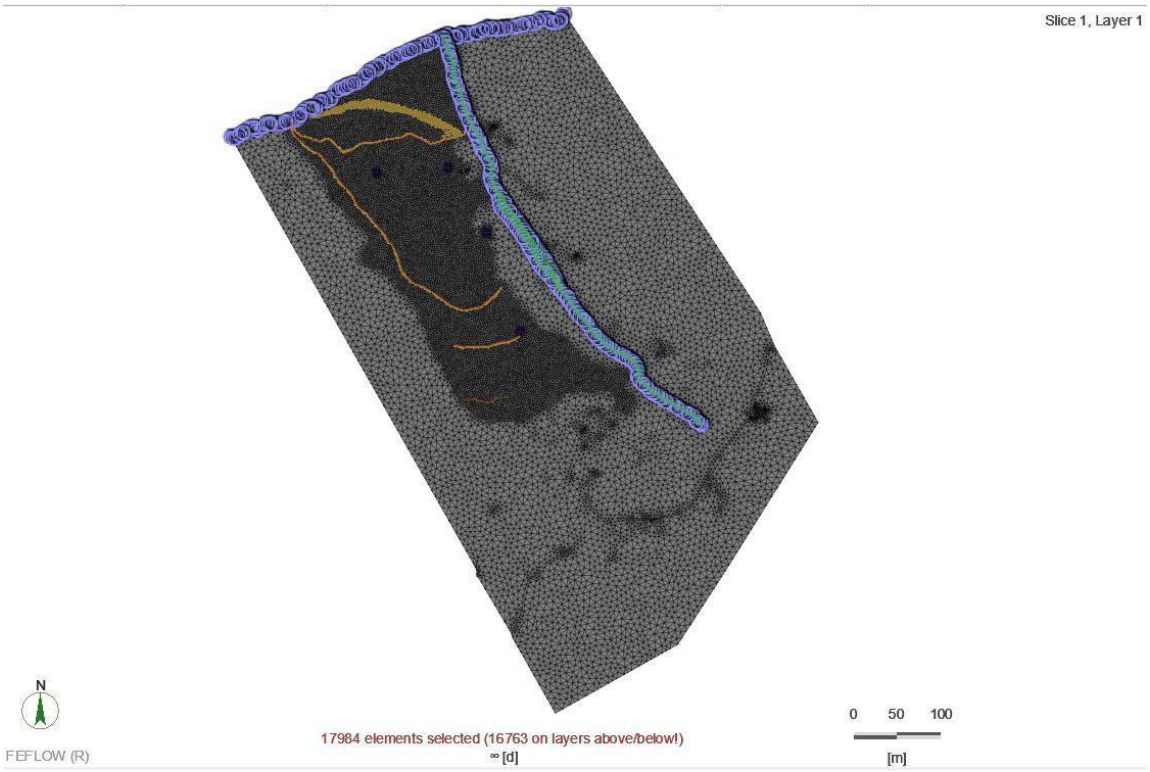
Asignación de conductividades

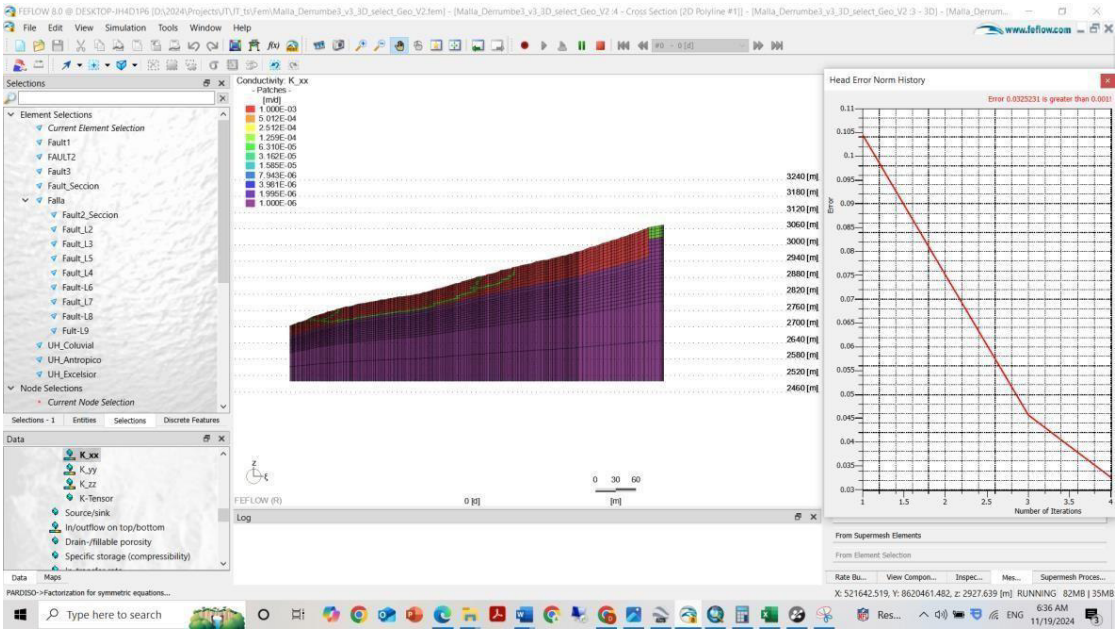


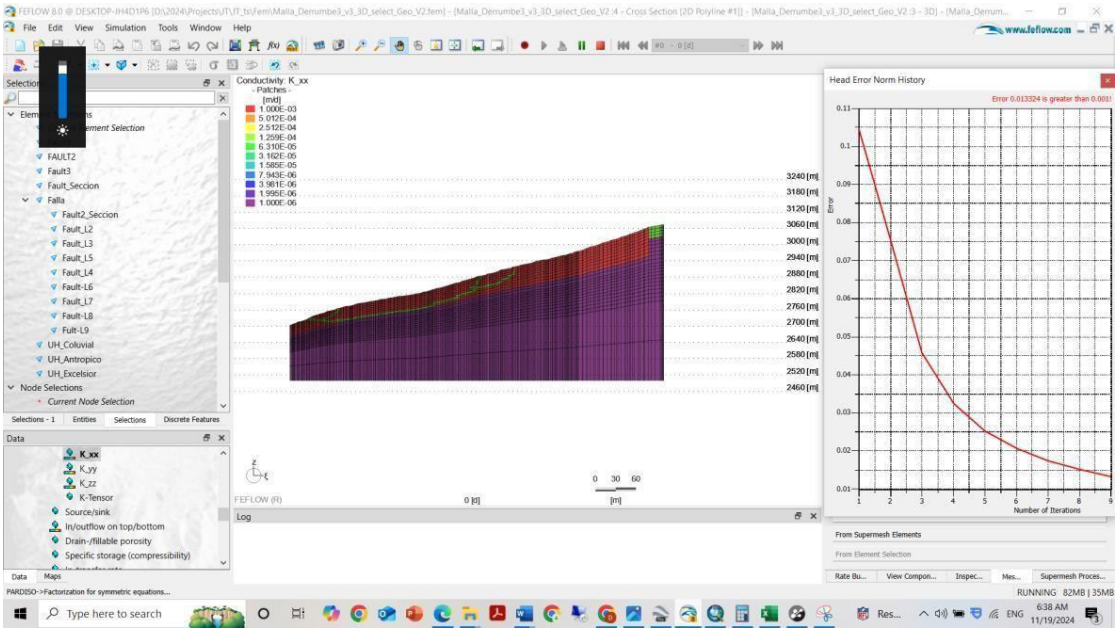
Asignación de recarga al modelo



Resultados del modelo de acuerdo con la distribución de la recarga en los materiales geológicos






File Edit View Simulation Tools Window Help
Conductivity: K_xx
Patches
[m/d]
1.000E-03
5.012E-04
2.512E-04
1.259E-04
6.310E-05
3.162E-05
1.585E-05
7.943E-06
3.981E-06
1.995E-06
1.000E-06
Head Error Norm History
Error 0.013324 is greater than 0.001
Number of Iterations
Fault2_Seccion
Fault_L2
Fault_L3
Fault_L5
Fault_L4
Fault-L6
Fault_L7
Fault-L8
Fult-L9
UH_Coluvial
UH_Antropico
UH_Excelsior
Node Selections
Current Node Selection
K_xx
K_yy
K_zz
K-Tensor
Source/sink
In/outflow on top/bottom
Drain-/fillable porosity
Specific storage (compressibility)
Log
From Supermesh Elements
From Element Selection
PARDISO->Factorization for symmetric equations...
RUNNING 82MB | 35MB
Type here to search
6:38 AM
11/19/2024