

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE**  
**INGENIERÍA MECÁNICA**



**SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS  
DE ESCOMBROS MEDIANTE EL MÉTODO DE VOLÚMENES  
FINITOS DE UN MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA  
CUASIREAL**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**AUTOR : Bach. FIGUEROA LEÓN, Ruben Adrián**

**ASESOR : Dr. QUILLOS RUIZ, Serapio Agapito**

**COASESOR: Dr. KUROIWA ZEVALLOS, Julio Martin**

**NUEVO CHIMBOTE - PERÚ**

**2019**

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



**UNS**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DEL SANTA

**TÍTULO DE TESIS:**

**SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS DE  
ESCOMBROS MEDIANTE EL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS  
DE UN MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA CUASIREAL**

**PRESENTADO POR:**

- **TESISTA:**

Bach. Ruben Adrián Figueroa León

- **ASESOR:**

Dr. Serapio Agapito Quillos Ruiz  
(Universidad Nacional del Santa)

- **COASESOR:**

Dr. Julio Martín Kuroiwa Zevallos  
(Universidad Nacional de Ingeniería)



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

HOJA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

El presente Informe de Tesis titulado "SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS DE ESCOMBROS MEDIANTE EL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS DE UN MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA CUASIREAL" elaborado por el bachiller RUBEN ADRIÁN FIGUEROA LEÓN para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico. Ha contado con el asesoramiento de quien deja constancia de su aprobación. Por tal motivo, firmo el presente trabajo en calidad de asesor.

DR. SERAPIO A. QUILLOS RUIZ  
ASESOR

DR. JULIO M. KUROIWA ZEVALLOS  
COASESOR

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**HOJA DE CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR**

El presente Informe de Tesis titulado **"SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS DE ESCOMBROS MEDIANTE EL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS DE UN MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA CUASIREAL"** elaborado por el bachiller **RUBEN ADRIÁN FIGUEROA LEÓN** para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico.

Fue Revisado y Aprobado por el siguiente Jurado Evaluador



---

ING. NELVER J. ESCALANTE ESPINOZA  
PRESIDENTE



---

MS. LUIS C. CALDERÓN RODRÍGUEZ  
SECRETARIO



---

DR. SERAPIO A. QUILLOS RUIZ  
INTEGRANTE



**UNS**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DEL SANTA

**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**E.P. Ingeniería Mecánica**



## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

A los tres días del mes de enero del año dos mil diecinueve, siendo las 11:00 a.m., se instaló en el Aula A-09 del Pool de Aulas, el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N° 623-2018-UNS-CFI del 30.11.2018; se nombra el jurado evaluador integrado por:

- Ing. Nélver Javier Escalante Espinoza                      Presidente
- Ms. Luis Carlos Calderón Rodríguez                      Secretario
- Dr. Serapio Agapito Quillos Ruiz                      Integrante
- M.Sc. Arquímedes Iparraguirre Lozano                      Accesitario

Para la sustentación y evaluación de la Tesis titulada: **“SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS DE ESCOMBROS MEDIANTE EL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS DE UN MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA CUASIREAL”**; elaborado por el bachiller en Ingeniería Mecánica: **FIGUEROA LEÓN RUBEN ADRIÁN**, con código de matrícula N° 0201116030; teniendo como asesor al docente **DR. SERAPIO AGAPITO QUILLOS RUIZ**, designado con R.D. N° 671-2017-UNS-FI.

El tesista tiene como máximo 30 minutos para realizar la defensa de su tesis.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con los artículos 39° y 40° del Reglamento General para Obtener el Grado Académico de Bachiller y Título Profesional de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
FIGUEROA LEÓN RUBEN ADRIÁN	18	BUENO

Siendo las 12:00 pm. del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.

  
.....  
Ing. Nélver Escalante Espinoza  
Presidente

  
.....  
Ms. Luis C. Calderón Rodríguez  
Secretario

  
.....  
Dr. Serapio Quillos Ruiz  
Integrante

## DEDICATORIA

*Este trabajo lo dedico en primer lugar a Dios, quien día a día me cuida, protege y guía por el buen camino, por darme la fortaleza, paciencia, sabiduría y temple necesaria para seguir adelante a pesar de las trabas y dificultades que se presentaron en el camino, pues nunca faltaron en mi esas ganas y el entusiasmo por querer hacer las cosas bien.*

*Así también va dedicado a mis padres: Ruben Figueroa Dávila y Marleny León Villa por hacerme un hombre de bien y por brindarme su amor incondicional en todo momento, a mi hermano Jair Figueroa León por su apoyo y su carisma siempre, y al resto de mis familiares y amigos quienes aun estando lejos me brindaron palabras de aliento.*

*Todos mis logros son para ellos.*

## AGRADECIMIENTO

*La tesis se desarrolló mediante convenio entre la Universidad Nacional de Ingeniería y la Universidad Nacional del Santa y su ejecución forma parte del Convenio N° 257-INNOVATEPERU-EC-2016, firmado entre la Universidad Nacional de Ingeniería y el Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad del Ministerio de la Producción, INNOVATE-PERÚ, a ellos, un especial agradecimiento.*

*Agradecer también a la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica por haber confiado en mi persona para hacerme partícipe de este proyecto y por haberme acogido durante cinco largos años de estudios, cuyas aulas quedan en memoria de sacrificio, esfuerzo y dedicación, donde los docentes e ingenieros me orientaron durante mi formación académica a través de sus enseñanzas y consejos, los cuales fortalecieron y reafirmaron mi vocación de ingeniero mecánico, permitiéndome cumplir con mis objetivos trazados y por abrirme las puertas hacia un mejor futuro como profesional y como ser humano.*

*A mis padres, mi hermano y el resto de mi familia, porque confiaron en mi y me motivaron a dar lo mejor siempre.*

*Un especial agradecimiento a mi asesor, el Dr. Serapio Quillos Ruiz, por sus aportes valiosos y el apoyo en todo momento, el cual fue crucial durante el inicio, desarrollo y culminación del presente proyecto de investigación.*

*Al Laboratorio Nacional de Hidráulica (UNI), al Dr. Julio Kuroiwa y al Ing. Luis Castro, por permitirme pertenecer a dicho grupo humano y por nutrirme de sus conocimientos.*

*Al IMEFEN, al Ing. Roger Hidalgo por acogerme y permitirme trabajar con ellos durante el desarrollo del proyecto de investigación experimental de huaicos.*

*A mis mejores amigos y a todas las personas que en forma indirecta y desinteresada me apoyaron en la elaboración del presente proyecto de investigación.*

*A todos. Muchas Gracias.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	i
ABSTRACT .....	ii
I INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 ANTECEDENTES .....	2
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.4 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	5
1.5 JUSTIFICACIÓN .....	5
1.5.1 TÉCNICA .....	5
1.5.2 ECONÓMICA.....	6
1.5.3 INSTITUCIONAL.....	6
1.6 LIMITACIONES DEL TRABAJO .....	7
II MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 FUNDAMENTOS DE MECÁNICA DE SUELOS .....	8
2.2 FUNDAMENTOS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL .....	10
2.2.1 INTRODUCCIÓN.....	10
2.2.2 PROCESOS DE DISCRETIZACIÓN.....	12
2.3 HIDRÁULICA DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS .....	14
2.3.1 TIPOS DE FLUIDOS .....	14
2.3.2 CONCEPTO DE FLUJOS DE ESCOMBROS.....	15
2.3.3 COMPOSICIÓN DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS .....	16
2.3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS .....	17
2.3.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS.....	17
2.3.6 PROPIEDADES DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS.....	18
2.3.7 CONCEPTOS DEL MECANISMO DE SOPORTE DE PARTÍCULA ..	18
2.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO .....	20
2.4.1 ECUACIONES DE GOBIERNO.....	20
2.4.2 MODELOS REOLÓGICOS .....	25
2.4.3 LA TURBULENCIA.....	29
2.5 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO HIDRÁULICO .....	30

2.5.1	ESTRUCTURA DEL SOLVER.....	31
2.5.2	ESTRUCTURA DEL MODELO .....	35
2.5.3	MODELOS DE TURBULENCIA .....	37
2.5.4	PARÁMETROS DE AJUSTE .....	38
2.5.5	FLUJO MULTIFÁSICO.....	49
III	MATERIALES Y MÉTODOS.....	51
3.1	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	51
3.1.1	CARACTERIZACIÓN TOPOGRÁFICA.....	51
3.1.2	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA - GEOTÉCNICA.....	58
3.2	MATERIALES Y EQUIPOS.....	61
3.2.1	MODELO FÍSICO - EXPERIMENTAL.....	61
3.2.2	MODELO MATEMÁTICO - NUMÉRICO.....	63
3.3	MÉTODOS.....	64
3.3.1	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL - TRABAJO DE CAMPO.....	65
3.3.2	METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA - TRABAJO DE GABINETE.....	72
IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	104
4.1	ESCENARIO DE RESULTADOS Y CALIBRACIÓN.....	104
4.2	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	121
4.3	COMPARACIÓN CON MODELOS BIDIMENSIONALES DE FLUJOS DE ESCOMBROS .....	124
4.4	DISCUSIÓN.....	127
V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	129
5.1	CONCLUSIONES.....	129
5.2	RECOMENDACIONES .....	130
VI	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131
VII	ANEXOS.....	134

## ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 2.1: Propiedades índice de los suelos.....	9
Cuadro 2.2: Clasificación de los suelos según su tamaño .....	9
Cuadro 2.3: Propiedades características de los flujos de escombros .....	18
Cuadro 3.1: Rutas de acceso al área de estudio .....	53
Cuadro 3.2: Resultados de granulometría por tamizado (ASTM-D422) .....	59
Cuadro 3.3: Resultados de granulometría por sedimentación .....	59
Cuadro 3.4: Contenido de humedad (ASTM-D2216).....	59
Cuadro 3.5: Gravedad específica de sólidos ( $G_s$ ). .....	59
Cuadro 3.6: Clasificación AASHTO (ASTM-D3282) y SUCS (ASTM-D2487) .....	60
Cuadro 3.7: Resultados del análisis mineralógico por DRX. ....	60
Cuadro 3.8: Programa experimental .....	68
Cuadro 3.9: Propiedades físicas del aire a presión atmosférica .....	93
Cuadro 3.10: Parámetros de modelo reológico Herschel Bulkley .....	93
Cuadro 3.11: Parámetros de modelo reológico Viscoplastico de Coulomb .....	94
Cuadro 3.12: Parámetros adicionales .....	94
Cuadro 4.1: Resumen de resultados para el análisis estadístico de los ensayos de flujos de escombros.....	107
Cuadro 4.2: Secciones de control.....	109
Cuadro 4.3: Viabilidad de uso, ventajas y limitaciones de modelos numéricos para simular flujos de escombros.....	124

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de una muestra de suelo en estado natural y modelo de fases. Adaptado de Duque & Escobar (2016).....	8
Figura 2.2: Discretización de variables. Adaptado de Sánchez & Gonzáles (2004).....	10
Figura 2.3: Nodos en los vértices y en los centros de los volúmenes de control de una malla. Adaptado de Sánchez & Gonzáles (2004).....	13
Figura 2.4: Características y clasificación de los fluidos .....	14
Figura 2.5: Clasificación de fluidos según la relación $\tau = f(\gamma)$ . Adaptado de Chhabra (2010) .....	15
Figura 2.6: Sección longitudinal típica a través de un flujo de escombros con disminución de la concentración de sólidos desde el frente de onda hacia la parte trasera. Adaptado de Rickenmann (2016).....	16
Figura 2.7: Principales componentes de flujo de escombros en un diagrama de tres fases, en comparación con otros rápidos movimientos de masa. Adaptado de Rickenmann (2016).....	17
Figura 2.8: Imágenes de la concentración en un chorro turbulento, (a) $Re = 5000$ y (b) $Re = 20000$ . Pope (2000).....	29
Figura 2.9: Histograma de la componente axial de velocidad $U_1(t)$ en la línea central de un chorro turbulento. De un experimento de Tong & Warhaft (1995), citado por Pope (2000)..	29
Figura 2.10: Esquema del software OpenFOAM.....	30
Figura 2.11: Estructura del solver <i>debrisInterMixingFoam</i> .....	31
Figura 2.12: Estructura de los modelos de viscosidad. ....	32
Figura 2.13: Estructura del modelo numérico de flujos de escombros .....	36
Figura 2.14: Estructura de los modelos de turbulencia .....	37
Figura 2.15: Algoritmo PIMPLE. Adaptado de Greenshields (2016).....	48
Figura 3.1: Mapa de la provincia de Canta.....	51
Figura 3.2: Mapa de rutas hacia el área de estudio. Adaptado de UNI-UNALM-SQ&ICC (2018) .....	52
Figura 3.3: Área de investigación experimental - Quebrada (Google Earth).....	53
Figura 3.4: Quebrada experimental. La flecha señala el curso de agua .....	55
Figura 3.5: Vista en planta del área de estudio con curvas de nivel de 0.2 m - 1 m a escala 1:400. Fuente: UNI-UNALM-SQ&ICC. (2018) .....	56
Figura 3.6: Vista de perfil de la quebrada experimental a escala 1:400. Fuente: UNI-UNALM-SQ&ICC. (2018).....	57
Figura 3.7: Propagación del flujo de escombros aguas abajo .....	65
Figura 3.8: Identificación de la microquebrada seca.....	66
Figura 3.9: Ejecución de los caminos de acceso en el área de investigación experimental ....	66
Figura 3.10: Realización de estudios de topografía dentro del área de investigación experimental .....	67
Figura 3.11: Sistema mecánico de retención del material agua-sólido .....	67
Figura 3.12: Procesamiento de nube de puntos de la topografía de la quebrada .....	72
Figura 3.13: Refinamiento y suavizado de la superficie de la quebrada .....	72

Figura 3.14: Extracción de la superficie de la quebrada en formato .stl .....	73
Figura 3.15: Superficie de la quebrada en formato .stl .....	73
Figura 3.16: Superficie del material de flujo de escombros en formato .stl.....	74
Figura 3.17: Intersección, refinamiento y eliminación de celdas, según los parámetros de castellatedMeshControls .....	77
Figura 3.18: Suavizado de los bordes, según los parámetros de snapControls .....	79
Figura 3.19: Adición de capas, según los parámetros de addLayers.....	80
Figura 3.20: Malla final de la quebrada.....	83
Figura 3.21: Vista de un tramo interior de la malla final .....	84
Figura 4.1: Posición del frente de onda del flujo de escombros vs tiempo para H:1.00 m y distintos niveles de concentración de sedimentos.....	104
Figura 4.2: Posición del frente de onda del flujo de escombros vs tiempo para H:1.25 m y distintos niveles de concentración de sedimentos.....	105
Figura 4.3: Posición del frente de onda del flujo de escombros vs tiempo para H:1.50 m y distintos niveles de concentración de sedimentos.....	105
Figura 4.4: Posición del frente de onda del flujo de escombros para H:1.00 m y Cv: 40%.	106
Figura 4.5: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 01. .....	109
Figura 4.6: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 02. .....	110
Figura 4.7: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 03. .....	110
Figura 4.8: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 04. .....	111
Figura 4.9: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 05. .....	111
Figura 4.10: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 06. .....	112
Figura 4.11: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 07. .....	112
Figura 4.12: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico de flujos de escombros para un tiempo $t = 100s$ .....	113
Figura 4.13: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+002. .....	114
Figura 4.14: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+008. .....	114
Figura 4.15: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+020. .....	115
Figura 4.16: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+027. .....	115
Figura 4.17: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+035. .....	116

Figura 4.18: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+043. .....	116
Figura 4.19: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+052. .....	117
Figura 4.20: Hidrograma del tirante del flujo de escombros vs tiempo en la progresiva 0+002. .....	118
Figura 4.21: Hidrograma del tirante del flujo de escombros vs tiempo en la progresiva 0+008. .....	118
Figura 4.22: Hidrograma del tirante del flujo de escombros vs tiempo en la progresiva 0+020. .....	119
Figura 4.23: Hidrograma del tirante del flujo de escombros vs tiempo en la progresiva 0+035. .....	119
Figura 4.24: Hidrograma del tirante del flujo de escombros vs tiempo en la progresiva 0+052. .....	120
Figura 4.25: Avance del frente de onda del flujo de escombros con un tirante inicial H:1.00 m y Cv:40% en la quebrada experimental para un tiempo $t = 20$ s .....	121
Figura 4.26: Simulación del evento de flujos de escombros como flujo laminar para $t = 20$ s. .....	122
Figura 4.27: Simulación del evento de flujos de escombros, con el modelo de turbulencia RAS: KEpsilon para $t = 20$ s .....	122
Figura 4.28: Simulación del evento de flujos de escombros, con el modelo de turbulencia LES: oneEqEddy para $t = 20$ s.....	123

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Check List diario de equipos y materiales.....	134
Anexo 2: Informe de análisis granulométrico y de caracterizaciones físicas del material experimental .....	136
Anexo 3: Informe de ensayo de análisis por Difracción de Rayos X del material experimental (DRX).....	139
Anexo 4: Cálculo de volúmenes de agua y material sólido experimental.....	143
Anexo 5: Ficha de control de ensayo experimental .....	145
Anexo 6: Archivo fotográfico.....	147

## RESUMEN

La presente tesis resume el desarrollo, calibración y validación de un modelo numérico de flujos de escombros en OpenFOAM, un software libre de código abierto que usa la dinámica de fluidos computacional mediante el método de volúmenes finitos. Para ello se adaptó el solver interMixingFoam, el cual considera tres fases; aire, lodo y grava, siendo los dos últimos miscibles, y usando el método de volumen de fluido para capturar la interfase.

El modelo numérico desarrollado se ha calibrado mediante la simulación de eventos de flujos de escombros en un modelo físico a escala cuasireal en una microquebrada instrumentada ubicada en el distrito de Huamantanga.

Los resultados de las simulaciones numéricas de la posición y velocidad del frente de la onda se han comparado con las del modelo experimental y se pudo observar que es posible modelar flujos de escombros en terrenos complejos con buena precisión de malla, y que el modelo de turbulencia de Simulación de Grandes Remolinos: oneEqEddy es el adecuado para caracterizar a los flujos de escombros típicos.

El modelo presentado hace distinción de las principales componentes de los flujos de escombros con respecto a la literatura actual, dada la carencia de datos consistentes que los caractericen, pudiendo ser aplicable para simular distintos tipos de eventos.

**Palabras clave:** dinámica de fluidos computacional, flujo de escombros, flujo granular, flujo de lodo, deslizamiento de tierra.

## ABSTRACT

The present thesis summarizes the development, calibration and validation of a numerical model of debris flow using OpenFOAM, an open source free software which uses computational fluid dynamics using the finite volume method. For this, the interMixingFoam solver was adapted, which considers three phases; air, mud and gravel, the last two miscibles and using the volume of fluid method to capture the interface.

The numerical model developed has been validated through the simulation of debris flow events in a prototype-scale experiment conducted in an instrumented small gully located in the Huamantanga district, Canta province, near Lima.

The results of the numerical simulations of position and velocities of the front wave of the debris flow have been compared with those of the experimental model and it could be observed that is possible to model complex terrains with good mesh accuracy, and that the turbulence model Large Eddy Simulation: oneEqEddy is adequate to characterize the typical debris flows.

The presented model distinguishes the main components of debris flows respect to the current literature, given the lack of consistent data that characterize them, and may be applicable to simulate different kinds of events.

**Keywords:** computational fluid dynamics, debris flow, granular flow, mudflow, landslide.

# I INTRODUCCIÓN

En nuestro país se emplea el término huaico para referirnos a todo tipo de evento de flujos de lodo y escombros, desplazamientos en masa de compuestos formados por agua y partículas sólidas con tamaños que varían desde sedimentos finos hasta piedras grandes. Éstos fluyen rápidamente por taludes escarpados y se presentan comúnmente en áreas con relieves topográficos pronunciados de escasa cobertura vegetal o deforestados y cuando ocurre una precipitación pluvial relativamente alta.

Las medidas de mitigación y prevención de los peligros causados por los flujos de escombros es un fenómeno recurrente en nuestro país y requiere de una evaluación detallada de las características geológicas, geotécnicas e hidrológicas de las áreas amenazadas, pues la severidad es variable dependiendo de su magnitud, afectando la economía, la parte social y ambiental de la zona afectada.

Uno de los principales aportes para el estudio de este fenómeno han sido los experimentos que se realizaron en modelos físicos a escala, un método sólido para analizar este problema. Sin embargo, la calibración y validación de los modelos numéricos son aún incipientes por falta de datos experimentales consistentes. A partir de ello en este estudio se buscó validar un modelo basado en las ecuaciones de Navier-Stokes, mediante simulaciones numéricas en un software libre, OpenFOAM, prediciendo la trayectoria, fuerzas de impacto y posibles áreas afectadas y comparar estos resultados con datos derivados de pruebas experimentales de un modelo físico a escala cuasireal en una microquebrada instrumentada, donde la relación de las proporciones de las fuerzas actuantes es casi idéntica, de tal manera que se deja establecida una metodología de simulación computacional válida para el análisis de este problema en ríos y quebradas activas en el Perú al evitarse las distorsiones que ocurren por el cambio de escala.

## 1.1 ANTECEDENTES

A lo largo de los años a nivel mundial se han realizado investigaciones importantes relacionadas al modelamiento de flujos de escombros. Intentos iniciales fueron realizados por Jeppson (1974) en un programa con FORTRAN-77 para entradas de agua estables e inestables en canales y para flujos de escombros con Reynolds menores a quinientos. Posteriormente, DeLeon & Jeppson (1982) hicieron modificaciones para convertir las ecuaciones de Manning a las ecuaciones de Chezy para modelar flujos de escombros laminares con incrementos de factores de fricción. Takahashi & Tsujimoto (1985) propusieron un modelo de diferencias finitas bidimensional para flujos de escombros basados en el modelo de fluido dilatante derivado de la teoría de los esfuerzos dispersivos de Bagnold (1954) que describe los esfuerzos resultantes de la colisión de partículas de sedimento, acoplado con la resistencia del flujo de Coulomb, seguidamente Schamber & MacArthur (1985), MacArthur & Schamber (1986) desarrollaron modelos de elementos finitos de dos y tres dimensiones para flujos de lodo aplicado a topografías superficiales simplificadas, usando el modelo reológico de Bingham cuyo esfuerzo al corte es una función de la viscosidad y el esfuerzo de cedencia del fluido.

Más tarde, Takahashi & Nakagawa (1989) modificaron tales modelos de flujos de escombros para incluir turbulencia. Años después, O' Brien et al. (1993) presentaron un modelo 3D para inundaciones, flujos de lodo y flujos de escombros usando una reología cuadrática generalizada para varias combinaciones de resistencia plástica/friccional, viscosa y turbulenta/dispersiva; años más tarde, Martínez, Miralles & García (2010) realizaron un modelo cuasitridimensional de flujos de escombros, considerando la fase no-newtoniana de agua con sedimentos finos mediante el método

de Elementos Finitos en 2D y transporte de partículas con el método de Elementos Discretos en 3D, mostrando que el modelo es capaz de simular el movimiento de grandes partículas que se mueven con la mezcla agua-finos, manejando densos flujos de partículas que evitan la superposición entre éstas, incluyendo el efecto de colisión partícula-partícula y pared-partícula. Recientemente Chen & Zhang (2015) realizaron simulaciones integradas que permitía evaluar los cambios de las propiedades de los flujos de escombros debido a la erosión y deposición. Finalmente, Boetticher et al. (2016) adaptaron un solver en OpenFOAM que permite modelar flujos de escombros en tres dimensiones y su impacto contra objetos, pudiendo simular diferentes escenarios cuyos parámetros pueden ser estimados según la composición del material.

En el Perú, Castillo (2007) empleó el programa FLO-2D para simular flujos de escombros y concluyó que es muy bueno, pero para modelar flujos de lodos, cuyo material característico es un material fino, ya que, para simular flujo granular con una gran cantidad de material grueso, es conveniente introducir los datos de cada tipo de material, lo cual el modelo no puede realizar.

Escusa (2016) usando el modelo numérico Kanako 2D concluyó que éste puede representar de manera adecuada los flujos de escombros, cuantificando la erosión y deposición de sedimentos, pero resulta complicado validar dichos resultados al considerar homogeneidad geotécnica, así también los caudales de flujos de escombros no son sensibles en magnitud a las variables geotécnicas, pues estos presentan la misma variabilidad que los hidrogramas líquidos, haciendo a la hidrología una variable vital para el tratamiento de flujos de escombros. Del mismo modo usar TITAN 2D no es recomendable en un contexto donde la información básica es limitada.

## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Diversos modelos bidimensionales han sido utilizados para simular flujos homogéneos de concentración variable ( $C_v$ ), sin embargo, presentan limitaciones al no poder trabajar con flujo multifásico, así surge la siguiente interrogante:

¿Cuán beneficioso resulta realizar una Simulación Numérica Tridimensional de Flujos de Escombros mediante el método de Volúmenes Finitos en la evaluación del comportamiento y la dinámica del flujo de un modelo experimental a escala cuasireal en una microquebrada dentro de la industria?

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar una Simulación Numérica Tridimensional de Flujos de Escombros mediante el método de Volúmenes Finitos para evaluar el comportamiento y la dinámica del flujo de un modelo experimental a escala cuasireal en una microquebrada instrumentada.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Adaptar un solver CFD de volúmenes finitos para simular flujos de escombros en 3D usando OpenFOAM.
2. Calibrar el modelo de flujos de escombros con datos experimentales, a fin de validarlo y hacerlo aplicable a distintos ámbitos y contextos de ríos y quebradas en el Perú.
3. Comparar el modelo tridimensional con modelos bidimensionales de flujos de escombros evaluando su viabilidad de uso, ventajas y limitaciones.

## **1.4 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS**

La Simulación Numérica Tridimensional de Flujo de Escombros mediante el método de Volúmenes Finitos de un modelo experimental a escala cuasireal en una microquebrada, permite establecer parámetros válidos y adecuados, permitiendo el uso de tal metodología para simular distintos flujos de escombros reales.

## **1.5 JUSTIFICACIÓN**

### **1.5.1 TÉCNICA**

El Perú es un país muy expuesto a desastres originados por flujos de escombros conocidos comúnmente como huaicos, tanto en la costa, sierra y selva. De acuerdo al Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, el 80% del territorio peruano es altamente susceptible a los diferentes tipos de movimientos en masa, como deslizamientos, huaicos, avalanchas, caída de roca, entre otros eventos en los que parte de una pendiente se desplazan ladera abajo por efecto de la gravedad.

La importancia de dicha investigación radica en que las simulaciones realizadas muestren un comportamiento similar a los flujos de escombros reales, basado en un modelo físico a escala cuasireal en una microquebrada, desde su tránsito hasta su proceso de deposición o formación del cono de deyección, considerando que actualmente no se dispone de una base de datos experimental consistente para la validación de modelos numéricos, más aún se espera que tal modelo de base hidráulica presente un mejor desempeño, dados los parámetros reales de la zona de estudio.

### **1.5.2 ECONÓMICA**

El estudio sobre flujo de escombros tridimensional está motivado por la necesidad de trabajar con flujo multifásico, lo cual no es posible realizar con un modelo bidimensional. Esto representa una ventaja económica debido a que se puede predecir la trayectoria, el régimen de deposición, cargas dinámicas e interacciones con obstáculos. Del mismo modo se puede evaluar niveles de agua, velocidades, volumen de escombros y otras variables de importancia, ya que la información relacionada al estudio de huaicos en el Perú es aún incipiente, a partir de ello se puede evitar las grandes pérdidas económicas que acarrearán estos desastres.

### **1.5.3 INSTITUCIONAL**

De confirmarse la hipótesis planteada, podría emplearse esta metodología para simular flujos de escombros de forma acertada en zonas similares en el Perú, de modo que permitan formular alternativas de solución para la mitigación y prevención de tales desastres, fomentando de este modo a los jóvenes estudiantes a realizar investigación y a interesarse en el estudio de dicha problemática, y contribuir así a un mejor desarrollo de la industria de la región y del país.

## 1.6 LIMITACIONES DEL TRABAJO

Las principales limitaciones de esta investigación fueron:

1. La inexistencia o poca información de registros históricos de flujos de escombros, ya que los estudios relacionados a este tema en nuestro país son escasos. Además, resulta peligroso cuantificar adecuadamente un flujo de escombros, determinar cuándo se producirá y más aún el cómo estimar parámetros tales como volumen de escombros, niveles de agua, velocidad del flujo, entre otros. En la medida que el gobierno no invierta o apoye adecuadamente en la investigación de este rubro, este problema seguirá siendo difícil de resolver de manera práctica y siempre habrá grandes incertidumbres sobre el comportamiento de los flujos de escombros.
2. La dificultad para desplazarse a la zona de trabajo, debido a la sinuosidad de la carretera camino hacia la quebrada, siendo desgastante para el grupo de trabajo.
3. El tiempo que demanda el proceso de escaneo del terreno pre y post ensayo del evento de flujo de escombros (aproximadamente dos horas y media por escaneo), nos limitó a realizar un máximo de dos ensayos diarios.
4. Los costos elevados de combustible, viáticos, abastecimiento del agua, alquiler del generador eléctrico, etc., y el factor tiempo impiden continuar con la investigación de manera prolongada.

## II MARCO TEÓRICO

### 2.1 FUNDAMENTOS DE MECÁNICA DE SUELOS

En un suelo se distinguen tres fases constituyentes: la sólida, la líquida y la gaseosa.

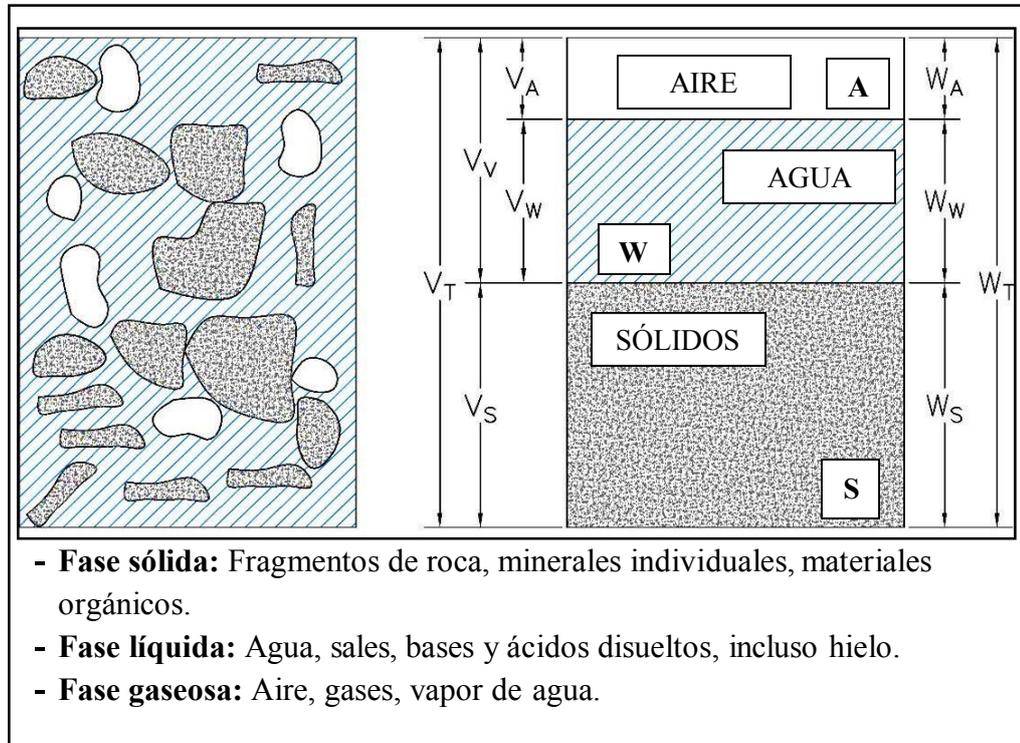


Figura 2.1: Esquema de una muestra de suelo en estado natural y modelo de fases.  
Adaptado de Duque & Escobar (2016)

En el modelo de fases, se separan volúmenes ( $V$ ) y pesos ( $W$ ) así: Volumen total ( $V_T$ ), volumen de vacíos ( $V_V$ ), que corresponde al espacio no ocupado por los sólidos; volumen de sólidos ( $V_S$ ), volumen de aire ( $V_A$ ) y volumen de agua ( $V_W$ ).

En los pesos (que son diferentes a las masas), el peso del aire se desprecia, por lo que  $W_A = 0$ .

Evidentemente la concentración de cada uno de estos materiales no será constante a lo largo del desarrollo de los flujos de escombros ni igual a los que tienen los suelos en estado natural.

Cuadro 2.1: Propiedades índice de los suelos.

Propiedad	Fórmula
Porosidad ( $\eta$ )	$\eta = \frac{V_V}{V_T} \times 100$ (%)
Relación de vacíos (e)	$e = \frac{V_V}{V_S}$
Grado de saturación (S)	$S = \frac{V_W}{V_V} \times 100$ (%)
Contenido de humedad ( $\omega$ )	$\omega = \frac{W_S}{W_S} \times 100$ (%)
Peso unitario del suelo ( $\gamma_d$ , estado seco) ( $\gamma_w$ , estado saturado)	$\gamma_d = \frac{W_S}{V_{W_S}}, \gamma_{sat} = \frac{W_{Sat}}{V_T}$ $\gamma_w = \frac{W_W}{V_{W_W}}, \gamma_T = \frac{W_T}{V_T}$
Gravedad específica	$G_T = \frac{G_T}{G_T}$ $G_S = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}, G_W = \frac{\gamma_T}{\gamma_w}$

FUENTE: (Duque &amp; Escobar, 2016)

Estas propiedades son válidas para el suelo en su estado natural y en un flujo de escombros, la única constante resulta ser el valor de  $G_S$  ya que esta depende sólo de la matriz sólida. Así también se puede realizar una clasificación para los distintos tamaños del material que conforman el suelo, los cuales se muestran a continuación:

Cuadro 2.2: Clasificación de los suelos según su tamaño.

Clase	Tipo	Rango (mm)
Suelos muy gruesos	Fragmento de Roca	> 630
	Bolón	200 - 630
	Piedra	63 - 200
Suelos gruesos	Gruesa	20 - 63
	Media	6.3 - 20
	Fina	2 - 6.3
Suelos finos	Gruesa	0.63 - 2
	Media	0.2 - 0.63
	Fina	0.063 - 0.2
Suelos finos	Grueso	0.02 - 0.063
	Medio	0.0063 - 0.02
	Fino	0.002 - 0.0063
	Arcilla	< 0.002

FUENTE: (ISO, 2002)

## 2.2 FUNDAMENTOS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

### 2.2.1 INTRODUCCIÓN

#### a EL PROCESO DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

La aproximación de una variable continua en un número finito de puntos se llama discretización. La Figura 2.2 muestra la diferencia entre una variable continua y una variable discreta.

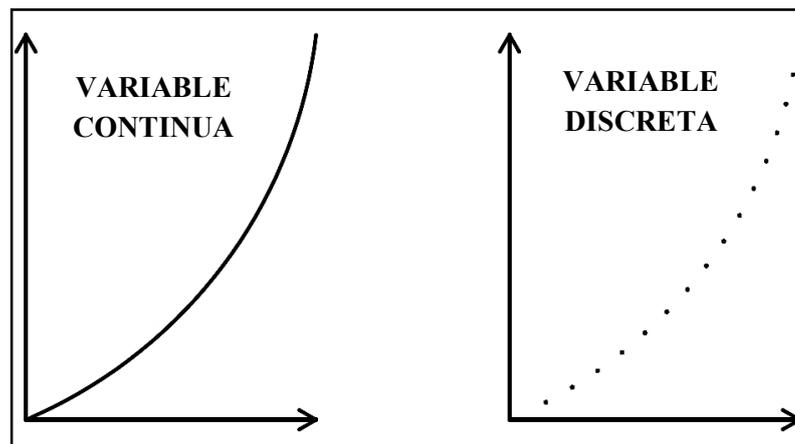


Figura 2.2: Discretización de variables. Adaptado de Sánchez & Gonzáles (2004)

#### b ETAPAS EN UN ANÁLISIS DE CFD

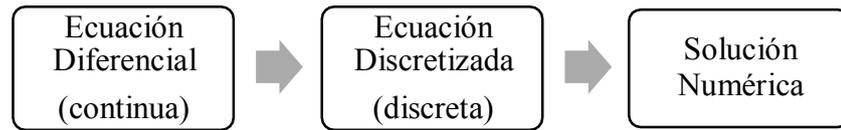
##### b.1 CÁLCULOS PREVIOS

- Formular el problema y plantear las ecuaciones que lo gobiernan.
- Establecer las condiciones de contorno.
- Generar la malla.

Todo esto depende del análisis que se vaya a realizar y de la capacidad computacional.

##### b.2 SOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES

Esta es la etapa principal del CFD. En ella tiene lugar la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el problema.



Es necesario definir con cuidado los requisitos que debe verificar un esquema numérico, como la consistencia, la cual hace referencia a la relación entre la ecuación diferencial y su formulación discreta, la estabilidad que determina la relación entre la solución numérica y la solución exacta de la ecuación discretizada, y la convergencia, la cual establece la relación entre la solución numérica y la solución exacta de la ecuación diferencial.

### **b.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

Los resultados obtenidos corresponden al valor de las variables de campo ( $\rho$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $p$ , ...) en cada punto de la malla. Una parte importante de esta etapa es la representación gráfica de las variables que gobiernan el flujo, así como la comparación de los resultados con otros ya obtenidos con anterioridad tales como resultados experimentales existentes en tesis previas, artículos científicos, etc.

## **c APLICACIONES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

La dinámica de fluidos computacional es empleada en muchos campos de la ingeniería, entre los que se pueden destacar la aerodinámica, hidrodinámica, motores, turbomáquinas, transferencia de calor, combustión, ingeniería de procesos, cargas de viento, hidráulica, ingeniería biomédica, entre otros.

## **2.2.2 PROCESOS DE DISCRETIZACIÓN**

### **a DISCRETIZACIÓN ESPACIAL**

El primer paso en la aplicación de la dinámica de fluidos computacional es la discretización espacial del dominio, es decir el proceso de mallado.

La malla debe cubrir completamente el dominio y tener la suficiente cantidad de celdas a fin de garantizar una buena calidad de los resultados, pero, a su vez, no debe ser demasiado fina para que las simulaciones no demanden un tiempo excesivo (Análisis de convergencia de malla).

Básicamente, existen dos tipos de mallado:

#### **a.1 MALLAS ESTRUCTURADAS**

Su principal ventaja está en la ordenación de los elementos en memoria, así mismo, pueden representarse en un sistema cartesiano o curvilíneo, en el primer caso, las líneas que configuran las celdas son siempre paralelas al sistema de ejes coordenados; por el contrario, en los sistemas curvilíneos, el sistema de coordenadas es deformado para adaptarse a la geometría del objeto de estudio. Así también, pueden clasificarse en mallas ortogonales y no ortogonales. Las mallas ortogonales son aquellas en las que todas las líneas que la configuran se cortan entre sí con un ángulo de  $90^\circ$ . (Sánchez & Gonzáles, 2004)

#### **a.2 MALLAS NO ESTRUCTURADAS**

Ofrecen gran flexibilidad en el tratamiento de geometrías complejas. Su principal ventaja reside en que se pueden generar automáticamente, independientemente de la complejidad del dominio, así mismo, el tiempo requerido es mucho menor que el de un mallado estructurado.

Una desventaja de este tipo de mallado es que requiere más espacio de memoria que los mallados estructurados. (Sánchez & Gonzáles, 2004)

## b DISCRETIZACIÓN DE LAS ECUACIONES DE GOBIERNO

### b.1 MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS

Emplea directamente las ecuaciones de conservación en su forma integral, para posterior obtención de soluciones “débiles”. La integral de superficie de la ecuación de Navier-Stokes es aproximada por la suma de los flujos que atraviesan cada una de las caras de la celda. (Sánchez & Gonzáles, 2004). Es necesario definir puntos de control en cada volumen generado. Los nodos, donde se guardan las variables a resolver se ubican en los vértices o en los centros de las celdas (Figura 2.3).

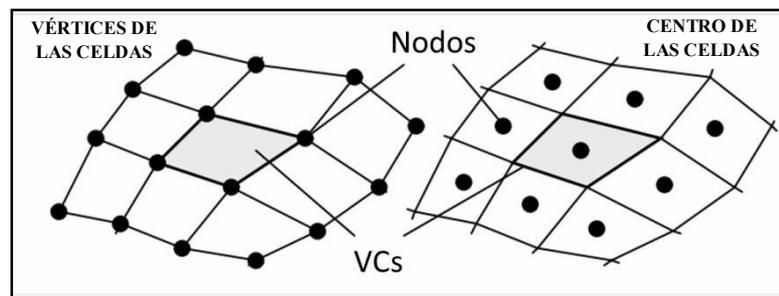


Figura 2.3: Nodos en los vértices y en los centros de los volúmenes de control de una malla. Adaptado de Sánchez & Gonzáles (2004)

La principal ventaja de este método radica en que la discretización se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema, por lo tanto, no hay problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas, pudiendo implementarse en mallas estructuradas y no estructuradas. Es interesante resaltar que, bajo unas ciertas condiciones, este método es equivalente al de diferencias finitas. Por todo esto, hoy en día, es el más popular.

## 2.3 HIDRÁULICA DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS

### 2.3.1 TIPOS DE FLUIDOS

En la Figura 2.4. se muestran los distintos tipos de fluido y las ecuaciones correspondientes a cada uno de ellos.

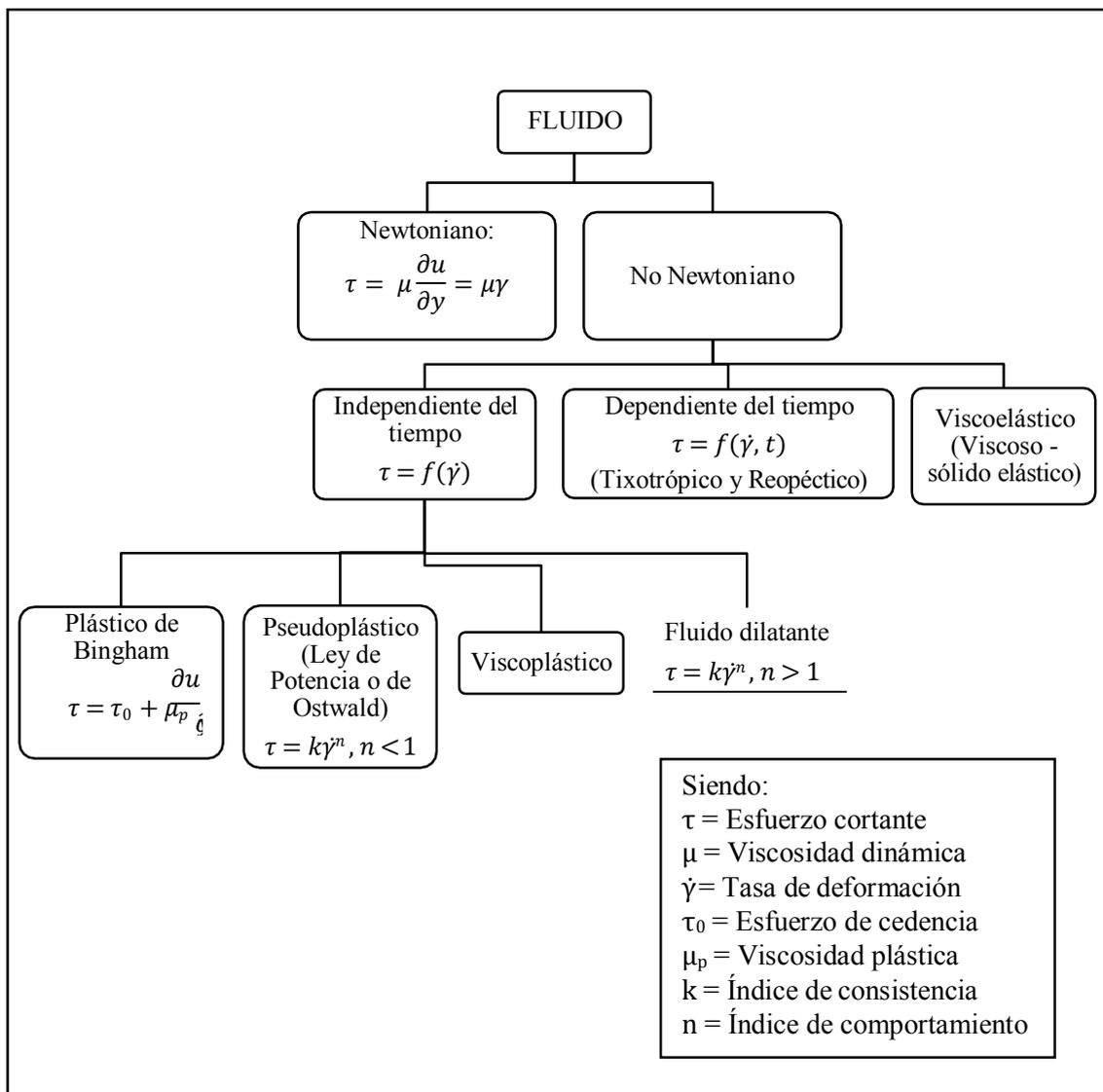


Figura 2.4: Características y clasificación de los fluidos.

A continuación, en la Figura 2.5. se muestra el comportamiento de cada tipo de fluido No Newtoniano independiente del tiempo, según la relación  $\tau = f(\dot{\gamma})$ , (Esfuerzo cortante ( $\tau$ ) vs Tasa de deformación ( $\dot{\gamma}$ )), comparado con el flujo Newtoniano.

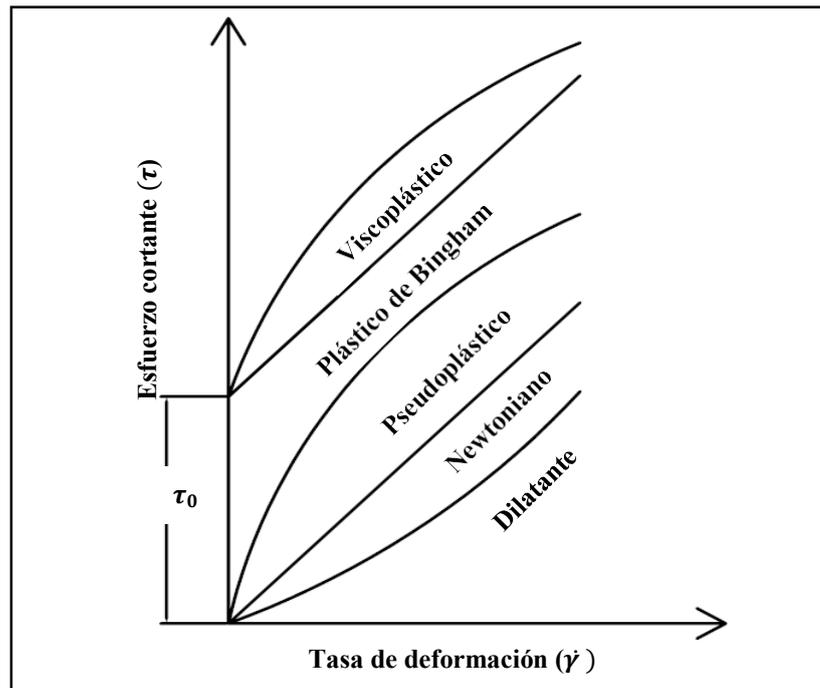


Figura 2.5: Clasificación de fluidos según la relación  $\tau = f(\dot{\gamma})$ .  
Adaptado de Chhabra (2010)

### 2.3.2 CONCEPTO DE FLUJOS DE ESCOMBROS

La RAE define al huaico como: “Masa enorme de lodo y peñas que las lluvias torrenciales desprenden de las alturas de los Andes y que, al caer en los ríos, ocasionan su desbordamiento”.

Takahashi (1980) afirma: “El flujo de escombros es una mezcla de sedimentos de todos los tamaños, donde cantos rodados se acumulan y caen en el frente de onda en forma de lóbulo, seguido de una mezcla fluida con granos más finos detrás”.

A continuación, en la Figura 2.6. se muestra la distribución del material por tamaños durante un flujo de escombros.

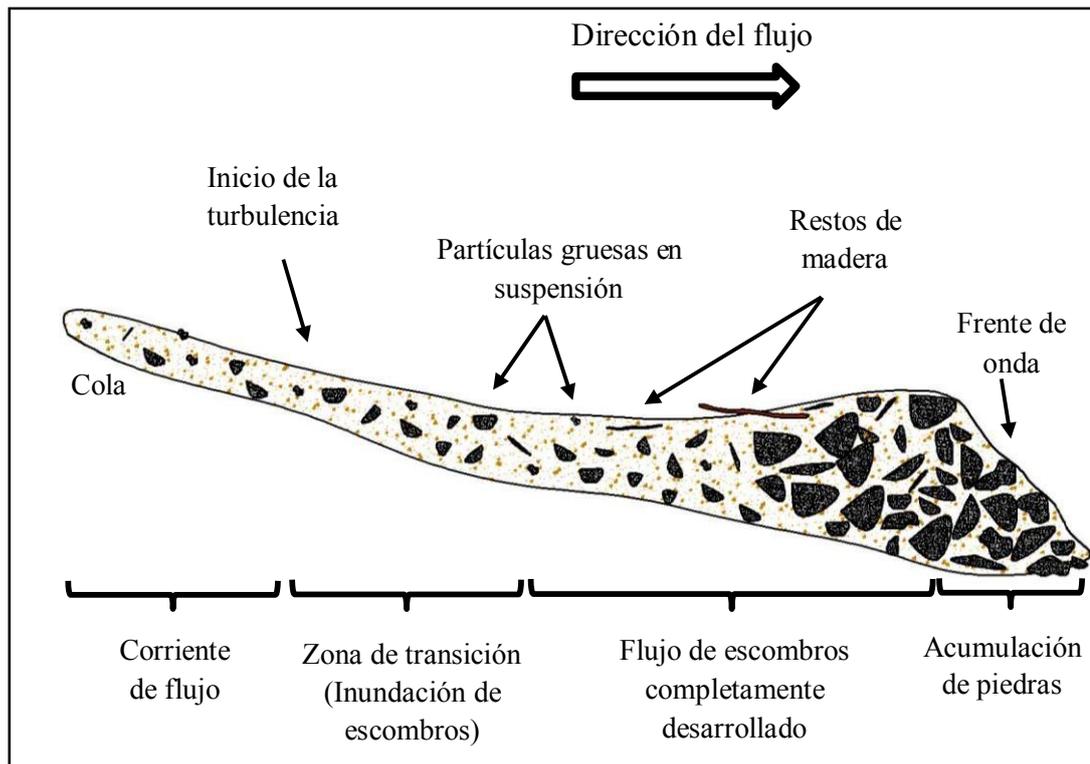


Figura 2.6: Sección longitudinal típica a través de un flujo de escombros con disminución de la concentración de sólidos desde el frente de onda hacia la parte trasera. Adaptado de Rickenmann (2016)

### 2.3.3 COMPOSICIÓN DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS

Los flujos de escombros típicos pueden ser considerados como una mezcla de tres componentes principales: agua, material fino y material granular (Rickenmann, 2016).

#### a AGUA

Es el principal agente de transporte para los flujos de escombros debido a su propiedad de contener a las partículas gruesas y finas, así como envolver a todo el material que se presente en su camino.

#### b MATERIAL FINO

Se originan de la desintegración física o mecánica de las rocas seguida por una transformación química.

Existen varios tipos de arcilla como: caolinitas, illitas, montmorillonitas, etc., asociadas con diferentes combinaciones. A diferencia de los limos, la principal propiedad de la arcilla es la cohesión.

### c MATERIAL GRANULAR

El grupo de granos incluye varios tipos de partículas que consisten de mineral inerte y fragmentos de rocas de diferentes tamaños.

#### 2.3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS

Basado en la composición y comportamiento del flujo, se muestra en la Figura 2.7., la clasificación de los flujos de escombros y sus principales componentes:

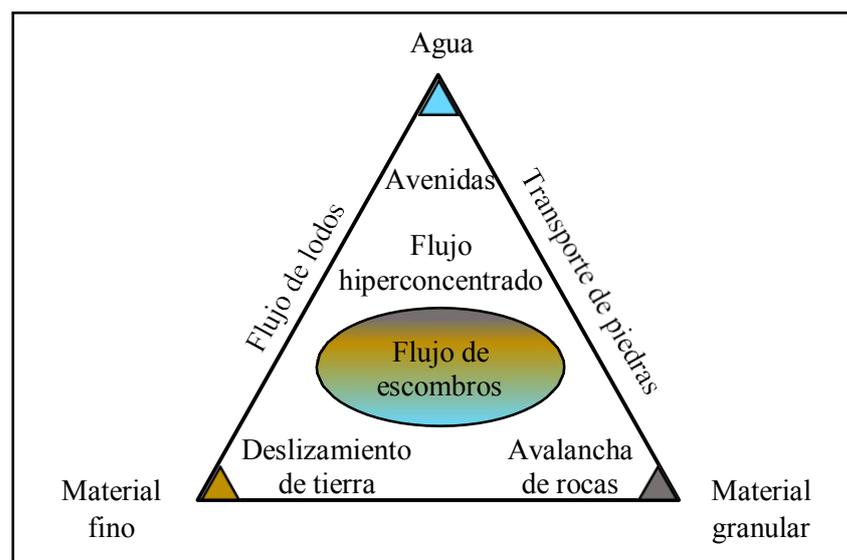


Figura 2.7: Principales componentes de flujo de escombros en un diagrama de tres fases, en comparación con otros rápidos movimientos de masa. Adaptado de Rickenmann (2016)

#### 2.3.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS

Son flujos inestables que no obedecen a una relación lineal entre el esfuerzo y la tasa de deformación del flujo, por lo que son considerados flujos no newtonianos.

Sus características dependen del grado de concentración de sedimentos, donde su comportamiento y su relación constitutiva varía según el tipo de material, por lo que se aplica un modelo reológico diferente.

En regiones semiáridas, las lluvias aumentan la humedad de las partículas y por acción de la gravedad se induce al movimiento del flujo con alta concentración de sedimentos a través de una quebrada (Iverson, 1997); y en las regiones de cordillera, son causados por el deshielo de los glaciares debido al cambio climático o factores externos que puede ser generalmente un sismo, donde parte del terreno al llegar al río, se desborda, originando un flujo de escombros.

### **2.3.6 PROPIEDADES DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS**

Cuadro 2.3: Propiedades características de los flujos de escombros.

---

**Composición del material y comportamiento del flujo:**

- Amplio rango de tamaños de grano distribuidos dentro del flujo.
- Las más altas concentraciones se desplazan en el frente de onda seguido más atrás generalmente de una mezcla más fluida.
- La velocidad del flujo de escombros varía de 0.5 m/s a 20 m/s, debido a la geometría del canal, sinuosidad, pendiente, concentración y tamaño de sedimentos.
- Aunque los flujos de escombros ocurren en pendientes pronunciadas, es importante notar que dicho flujo tiene la habilidad de fluir en pendientes muy suaves. Algunas pendientes observadas varían de 2% a 32%.
- Alta densidad aparente de la mezcla agua-sólido. (1600 a 2400 kg/m<sup>3</sup> en el frente de onda).
- Altas viscosidades (fluido No Newtoniano).
- Deposición especialmente en ubicaciones con ensanchamiento del lecho del río, disminución repentina de la pendiente del canal o presencia de obstáculos que aumenten la resistencia al flujo. Se considera un ángulo significativo de 10° para el comienzo de la deposición.

---

FUENTE: Adaptado de Rickenmann (2016)

### **2.3.7 CONCEPTOS DEL MECANISMO DE SOPORTE DE PARTÍCULA**

Cuando ocurre un flujo de escombros, algunas de las partículas sólidas quedan en suspensión debido a las fuerzas de flotación, colisión entre partículas sólidas y fuerzas del fluido turbulento. Las partículas más pequeñas son más propensas a quedar suspendidas.

### **a Esfuerzo Dispersivo**

Bagnold (1954), basado en experimentos con partículas interactuando en un cilindro giratorio, observó que los esfuerzos de soporte de la partícula eran generados por el resultado de las colisiones entre las mismas. Los esfuerzos generados en este proceso fueron un esfuerzo normal llamado esfuerzo dispersivo y un esfuerzo al corte. Definiendo así que el esfuerzo dispersivo era proporcional al cuadrado de la tasa de esfuerzo al corte y al diámetro de la partícula.

### **b Fuerza Matricial**

Johnson (1970), basándose en el análisis de una partícula suspendida en un flujo de lodo estacionario, y al observar que, si ésta es empujada hacia abajo, tiende a hundirse un poco y quedarse en esa posición, sin retornar a la superficie o hundirse hasta el fondo, dedujo que existe otra fuerza o mecanismo de soporte aparte de la fuerza dispersiva a la cual llamó fuerza matricial.

Se especula que las partículas de arcilla floculadas a lo largo del fluido son las responsables de esta fuerza.

### **c Gradación Inversa**

En el frente de onda de un flujo de escombros se observa que las partículas mayores tienden a moverse lateral y verticalmente, denominándose a este fenómeno, gradación inversa de las partículas. La migración de piedras hacia márgenes es algunas veces llamada segregación, considerando a la fuerza dispersiva de Bagnold, uno de los mecanismos principales para su desarrollo.

## 2.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

### 2.4.1 ECUACIONES DE GOBIERNO

Asumiendo fases incompresibles sin transferencia de masa, se separa el espacio modelado en una región que indica aire y una región con 2 componentes mezclados que constituyen el lodo y la grava.

El método VOF usado, determina la fracción de volumen de todos los componentes en un volumen de control arbitrario, usando una función característica ( $\alpha$ ), dicha fracción representa la probabilidad de que un componente esté presente en un cierto punto en espacio y tiempo, así se tiene:

$\alpha = 0$ , cuando la celda está vacía sin fluido dentro.

$0 < \alpha < 1$ , cuando hay una interfase de fluido en la celda (función discontinua).

$\alpha = 1$ , cuando la celda está llena.

La fracción de aire puede ser definida en relación a la fracción de la mezcla de fluido  $\alpha_m$  como:

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_m \quad (2.1)$$

La mezcla de fluido  $\alpha_m$  puede ser definido como la suma de las fracciones constantes de fases de mezcla  $\alpha_2$  (lodo) y  $\alpha_3$  (grava).

$$\alpha_m = \alpha_2 + \alpha_3 \quad (2.2)$$

El movimiento de la masa de escombros está definido por la ecuación de continuidad junto con las ecuaciones de transporte y momento:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \alpha_m}{\partial t} + \nabla \cdot (U \alpha_m) = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot T + \rho f \quad (2.5)$$

donde  $t$  es el tiempo,  $U$  representa el campo de velocidad de la mezcla de escombros,  $T$  es la desviación del tensor de esfuerzo viscoso para la mezcla,  $\rho$  es la densidad de la fase promedio de la mezcla,  $p$  es la presión,  $f$  representa las fuerzas de cuerpo por unidad de masa. Todas las fracciones se ajustan a la velocidad de la mezcla, por lo tanto, diferencias en las velocidades de las fases, así como las fuerzas de interacción, tal como el arrastre entre los granos y el fluido son despreciados.

El esquema de advección no puede generar una interfase nítida, conservativa y acotada, por ello se añade un término extra a la ecuación de transporte, definida como velocidad artificial  $U_c$  en la interfase, para que el flujo local haga mayor el gradiente de alfa y la interfase tenga una mejor definición (sea más nítida). (Greenshields, 2016)

$$\frac{\partial \alpha_m}{\partial t} + \nabla \cdot (U \alpha_m) + \nabla \cdot U_c \underbrace{\alpha_1}_{c_\alpha} = 0 \quad (2.6)$$

↓ No es cero solamente en la interfase.  
Sólo afecta la solución en la interfase.

$c_\alpha |U|$  normal a la interfase entre la región del aire y las fases del líquido mezclado. No afecta el flujo a lo largo de la interfase.

$c_\alpha = 1$  mantiene una interfase nítida, siendo un ajuste recomendado, además

MULES asegura la acotación. (Greenshields, 2016)

Sin embargo, para permitir la difusión entre los componentes de la mezcla de lodo y grava en caso de distribuciones de concentración inicial desigual, se incluye difusión por separado para cada componente de la mezcla:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \nabla \cdot (U \alpha_i) - D_{diff} \nabla^2 \alpha_i + \nabla \cdot (\alpha_1 U_c) = 0 \quad (2.7)$$

$i = 2,3$  denotan los componentes del lodo y la grava respectivamente y  $D_{diff}$  es la constante de difusión.

Las fases advectivas de los flujos  $\phi_{1...3}$  son obtenidas interpolando los valores de las celdas de  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , y  $\alpha_3$  a las superficies de la celda multiplicándolas por el flujo  $\phi$  a través de la superficie conocida de la velocidad de campo actual.

Para mantener la fase de aire inmisible, es necesario determinar el flujo  $\phi_r$  a través de la interfase entre el aire y la mezcla de flujo de escombros y sustraerla de las fases de flujo calculadas  $\phi_{1...3}$ . Los limitadores son aplicados durante este paso para unir los flujos y mantener la concentración de las fases entre 0 y 1. (Boetticher et al., 2016)

Con los flujos  $\phi_{1...3}$  conocidos, la ecuación de transporte escalar para cada fase toma la forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_i + \nabla(\phi_i) - D_{diff} \nabla^2 \alpha_i = 0 \quad (2.8)$$

Después de resolver las ecuaciones de transporte escalar, el flujo de masa completo  $\phi_\rho$  es obtenido de las fracciones de concentración volumétricas.

$$\phi_\rho = \phi_1 \rho_1 + \phi_2 \rho_2 + \phi_3 \rho_3 \quad (2.9)$$

donde  $\rho_{1...3}$  son las densidades constantes de las fases correspondientes y  $\phi_{1...3}$ , los flujos correspondientes. El flujo completo de masa  $\phi_p$  es usado para describir el segundo término de la ecuación de momento Ec. (2.5).

La conservación de la masa y momento es promediada con respecto a la fracción de fase  $\alpha$  de cada fase. La densidad de campo es definida como:

$$\rho = \sum_i \rho_i \alpha_i \quad (2.10)$$

donde  $\rho_i$  indica la densidad de cada fase  $i$ , asumida constante.

La desviación del esfuerzo tensor viscoso  $T$ , está definido basado en el tensor de la velocidad de deformación media  $D$  que denota la parte simétrica del tensor de la gradiente de velocidad derivada de la fase promedio del campo de flujo:

$$D = \frac{1}{2} [\nabla U + (\nabla U)^T] \quad (2.11)$$

y

$$T = 2\mu D \quad (2.12)$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica de la fase promedio, definida como la concentración promedio de las correspondientes viscosidades de cada fase:

$$\mu = \sum_i \mu_i \alpha_i \quad (2.13)$$

Usando la Ec. (2.3), el término  $\nabla \cdot T$  es escrito como  $\nabla \cdot (\mu \nabla U) + (\nabla U) \cdot \nabla \mu$ , para facilitar la discretización.

Las fuerzas de cuerpo  $f$  en la ecuación de momento cuenta para la gravedad y los efectos de la tensión superficial en la interfase entre la mezcla de flujo de escombros y el aire, el cual es modelado como una fuerza por unidad de volumen aplicando un coeficiente de tensión superficial  $\sigma$ . Este parámetro tiene una mínima influencia en el comportamiento de los flujos de escombros, sin embargo, permite una adecuada reproducción de los patrones de la superficie del flujo. La conservación de momento incluyendo aceleración de la gravedad  $g$  y tensión superficial es definido en el modelo como:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p_d + \underbrace{\nabla \cdot (\mu \nabla U)}_{\text{términos Laplacianos}} + (\nabla U) \cdot \nabla \mu - g \cdot x \nabla \rho + \sigma k \nabla \alpha_1 \quad (2.14)$$

donde  $k$  representa la curvatura local en la interfase y  $x$  la posición. La presión modificada  $p_d$  es empleada en el solver para superar algunas dificultades con las condiciones de contorno en las simulaciones del flujo con gradientes de densidad. En caso que la superficie libre se encuentre dentro de una pared inclinada formando una condición de no-deslizamiento, la componente normal de la gradiente de presión debe ser diferente para la fase del aire y para la mezcla, debido a la componente hidrostática  $\rho g$ .

$$p_d = p - \rho g \cdot x \quad (2.15)$$

La gradiente de la presión modificada incluye la gradiente de la presión estática y las contribuciones que surgen de la gradiente de densidad tanto como las fuerzas de cuerpo debido a la gravedad. Berberovic et al. (citado por Boetticher et al., 2016)

## 2.4.2 MODELOS REOLÓGICOS

Definen a la viscosidad de cada uno de los componentes para la Ec. (2.13).

### MODELO REOLÓGICO DE HERSCHEL - BULKLEY PARA SEDIMENTOS FINOS EN SUSPENSIÓN

Siendo la viscosidad del aire  $\mu_1$  considerada constante, la introducción de dos fases de mezcla es necesaria para distinguir entre la presión que depende del comportamiento del flujo de grava y el adelgazamiento por corte de la suspensión de partículas finas con agua. La reología de mezclas de agua con arcilla y arena puede ser descrita por la ley reológica de Herschel - Bulkley (Coussot et al., 1998), que define el esfuerzo cortante en el fluido como:

$$\tau = \tau_y + k\dot{\gamma}^n \quad (2.16)$$

donde  $\tau_y$  es un esfuerzo de cedencia por debajo del cual el fluido actúa aún como un fluido Newtoniano,  $k$  es el índice de consistencia para la viscosidad del material,  $\dot{\gamma}$  es la tasa de corte, y  $n$  define el comportamiento de adelgazamiento por corte ( $n < 1$ ) o espesamiento por corte ( $n > 1$ ). En OpenFOAM, la tasa de corte es derivada en del tensor de velocidad de deformación media  $D$ :

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2D:D} \quad (2.17)$$

La tasa de corte está basada en el tensor de tasa de deformación que excluye el tensor de la velocidad de rotación ya que no contribuye a la deformación del cuerpo del fluido. El modelo puede ser reescrito como un modelo generalizado para fluido Newtoniano que define la tasa de corte dependiente de la viscosidad cinemática efectiva de la fase del lodo como:

$$\mu_2 = k|\dot{\gamma}|^{n-1} + \tau_y|\dot{\gamma}|^{-1} \quad (2.18)$$

Si la viscosidad está por debajo de un límite superior  $\mu_0$ .

Sino,

$$\mu_2 = \mu_0 \quad (2.19)$$

Si la viscosidad es más grande, para asegurar estabilidad numérica.

### **Determinación de parámetros del modelo reológico basado en las propiedades del material**

Si la fracción de grano más grande es asumida dentro de la fase de la grava, los parámetros de Herschel-Bulkley para el material más fino pueden ser vinculados a las propiedades del material, medidos usando simples pruebas estándar geotécnicas.

Según Coussot et al. (1998), el exponente  $n$  puede ser asumido constante e igual a  $1/3$ ,  $k$  puede ser calculado aproximadamente como  $b\tau_y$ , con la constante  $b = 0.3 \text{ s}^{-n}$ . Un enfoque para estimar el esfuerzo de cedencia  $\tau_y$  basado en el contenido de agua, fracción de arcilla y su composición, y la concentración sólida de todo el material del flujo de escombros fue propuesto por Yu et al. (2013) como:

$$\tau_y = \frac{\tau_0}{\rho_{mezcla}} C^2 e^{22(CP_1)} \quad (2.20)$$

donde  $C$  es la concentración volumétrica de sólidos,  $P_0$  es el porcentaje volumétrico de arcilla en la mezcla.  $P_1 = 0.7P_0$  cuando  $P_0 > 0.27$  y  $P_1 = P_0$  si  $P_0 \leq 0.27$ .

$$P_0 = C_c P \quad (2.21)$$

Donde  $C_c$  es un coeficiente característico para un determinado tipo de arcilla y  $P$  es el porcentaje actual de arcilla.

Para  $C < 0.47$ ,  $\tau_0$  es igual a  $\tau_{00}$  y de otra manera  $\tau_0$  puede ser calculado por:

$$\tau_0 = \tau_{00}e^{5(C-0.47)} \quad (2.22)$$

donde  $\tau_{00}$  tiene un valor de 30 Pa, según pruebas experimentales de laboratorio (Yu et al., 2013).

### **MODELO REOLÓGICO VISCOPLÁSTICO DE COULOMB PARA REPRESENTACIÓN DE LA GRAVA**

Domnik & Pudasaini (2012) mostraron que introduciendo una ley de deslizamiento viscoplastico de Coulomb para reemplazar una simple condición de borde cambia completamente la dinámica del flujo y las variaciones de profundidad en la velocidad y la presión dinámica. Ellos muestran que con una ley de deslizamiento viscoplastico de Coulomb, el cizallamiento ocurre principalmente cerca de la superficie de deslizamiento, según las observaciones, pero en contraste con la condición de no-deslizamiento. En este modelo, durante la aceleración y flujo con grandes velocidades, el comportamiento del adelgazamiento por corte tanto del fluido como de la fase granular determina la viscosidad. Sin embargo, la representación de la grava mediante la reología viscoplastica de Coulomb dependiente de la presión y la tasa de deformación, se vuelve importante tan pronto como el material experimenta grandes presiones. Esto puede ser causado por reducciones en el canal aguas abajo, flujos convergentes y divergentes e interacciones con obstáculos.

Flujos de material granular puede ser modelado como fluidos viscoplásticos. Ancy, 2007; Forterre & Pouliquen, 2008; Balmforth & Frigaard, 2007; Jop et al., 2006. (citado por Dominik & Pudasaini, 2012).

El tensor de esfuerzo granular de Cauchy  $T_s$  puede ser escrito como:

$$T_s = -pI + 2\mu_s D \quad (2.23)$$

Donde  $pI$  es la presión veces la matriz identidad y  $\mu_s$  es la correspondiente viscosidad dinámica, que es modelada por Domnik & Pudasaini (2012) como:

$$\mu_s = \mu_{min} + \frac{\tau_{0s}}{\|D\|} [1 - e^{-m_y \|D\|}] \quad (2.24)$$

donde  $\mu_{min}$  es una viscosidad dinámica mínima,  $\tau_{0s}$  es el esfuerzo de cedencia y  $\|D\|$  es la norma del tensor de velocidad de deformación media definida como:

$$\|D\| = \sqrt{2tr(D^2)} \quad (2.25)$$

En la Ec. (2.24),  $m_y$  es un parámetro numérico con unidades en segundos que se mantendrá constante. Domnik et al. (2013) definieron el esfuerzo de cedencia como la presión que depende de la fricción de Coulomb,  $p \cdot \sin(\delta)$ , donde  $\delta$  es el ángulo de fricción interno.

$$\mu_3 = \min(\mu_0, \mu_{min} + \frac{p \cdot \sin(\delta)}{\frac{p_{mezcla}}{1}} [1 - e^{-m_y \|D\|}]) \quad (2.26)$$

Si la viscosidad es más grande, para asegurar estabilidad numérica,  $\mu_3 = \mu_0$ .

La viscosidad dependiente de la presión y la tasa de deformación, es calculada en cada celda con la correspondiente presión local  $p$  y el tensor de velocidad de deformación media  $D$ , derivado del campo de flujo de fase promedio.

### 2.4.3 LA TURBULENCIA

Una característica muy importante de los flujos turbulentos es que la velocidad del fluido varía significativamente e irregularmente tanto en posición como en tiempo. Expresado como  $U(x, t)$ , donde  $x$  es la posición y  $t$  el tiempo.



Figura 2.8: Imágenes de la concentración en un chorro turbulento, (a)  $Re = 5000$  y (b)  $Re = 20000$ . Pope (2000)

A continuación, la Figura 2.9 muestra el histograma  $U_1(t)$  de la componente axial de la velocidad medida en la línea central de un chorro turbulento, dicha línea horizontal muestra la velocidad media expresada como  $U_1$ . Se puede observar también que la velocidad  $U_1(t)$  muestra fluctuaciones significantes (Alrededor de 25% de  $U_1$ ), y que lejos de ser periódica, se aprecian variaciones en un amplio rango de escalas de tiempo. Muy importante, se observa que  $U_1(t)$  y su media  $U_1$  son de cierto modo estables, ya que no se observan enormes variaciones en  $U_1(t)$ .

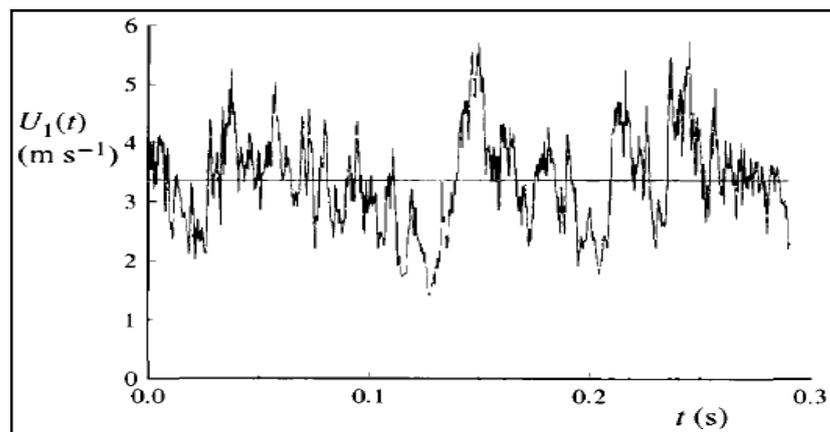


Figura 2.9: Histograma de la componente axial de velocidad  $U_1(t)$  en la línea central de un chorro turbulento. De un experimento de Tong & Warhaft (1995), citado por Pope (2000).

## 2.5 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO HIDRÁULICO

OpenFOAM, es un software libre de código abierto para la simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) desarrollado por OpenFOAM Foundation y distribuida bajo licencia de público general GNU. Dicha biblioteca C++ es usada principalmente para crear ejecutables, conocidos como aplicaciones, a su vez cuenta con una serie extensa de herramientas para la simulación de fluidos que son muy empleadas tanto en las áreas de ingeniería como de la investigación científica, este software puede resolver una serie de casos desde flujos de fluidos complejos que involucran reacciones químicas, pasando por flujos de calor y turbulentos, hasta dinámica de sólidos y electromagnetismo. OpenFOAM también incluye herramientas para el mallado en hexahedros, así como herramientas para el pre y posprocesamiento.

```

/*-----* C++ -*-----*/
|=====|
|  \ \   /  F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
|  \ \   /  O p e r a t i o n | Version: 2.3.0
|  \ \   /  A n d           | Web:      www.OpenFOAM.org
|  \ \   /  M a n i p u l a t i o n |
/*-----*/
  
```

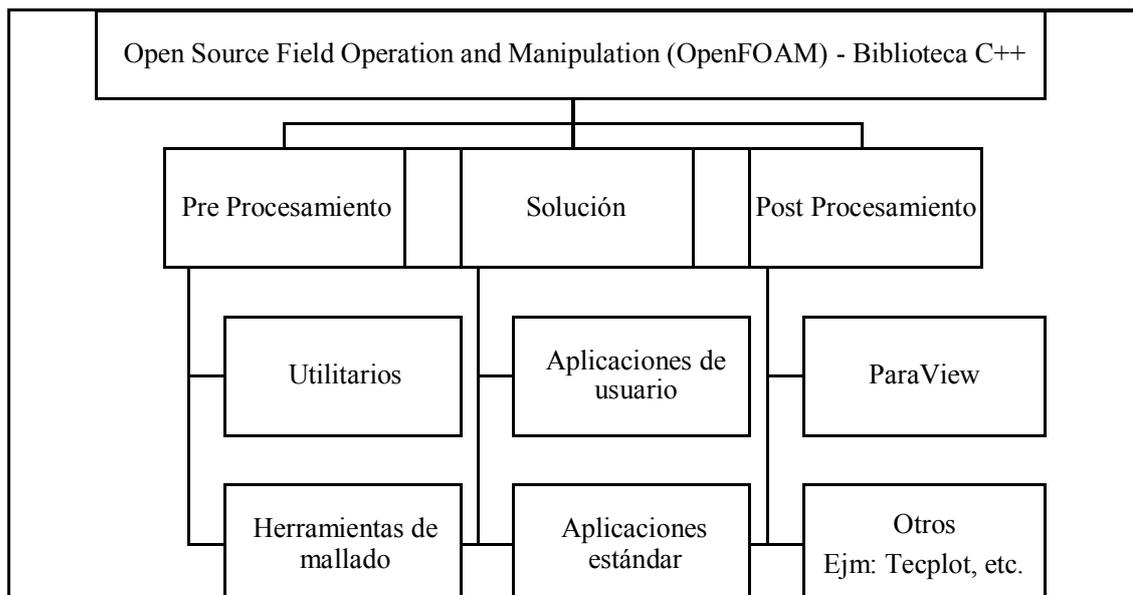


Figura 2.10: Esquema del software OpenFOAM.

Así pues, modelar el comportamiento de un flujo tan complejo como el flujo de escombros requiere de un solucionador capaz de identificar y diferenciar entre los distintos componentes que involucran la mezcla con tales características (flujo multifásico). A este nuevo solucionador se le llamará *debrisInterMixingFoam*, una adaptación de *interMixingFoam* el cual se encuentra dentro de los solucionadores propios de OpenFOAM, el mismo, hace uso de la técnica numérica VOF (Volume of fluid) para trabajar la interfase entre la mezcla de flujo de escombros y la fase no inmiscible del aire, teniendo como datos de entrada, la topografía de la zona, las características geológicas-geotécnicas del suelo, volumen de escombros a deslizarse aguas abajo, entre otros.

### 2.5.1 ESTRUCTURA DEL SOLVER

Sigue la siguiente secuencia:



El solver *debrisInterMixingFoam*, se encuentra dentro de la carpeta *interFoam* y presenta la siguiente estructura:

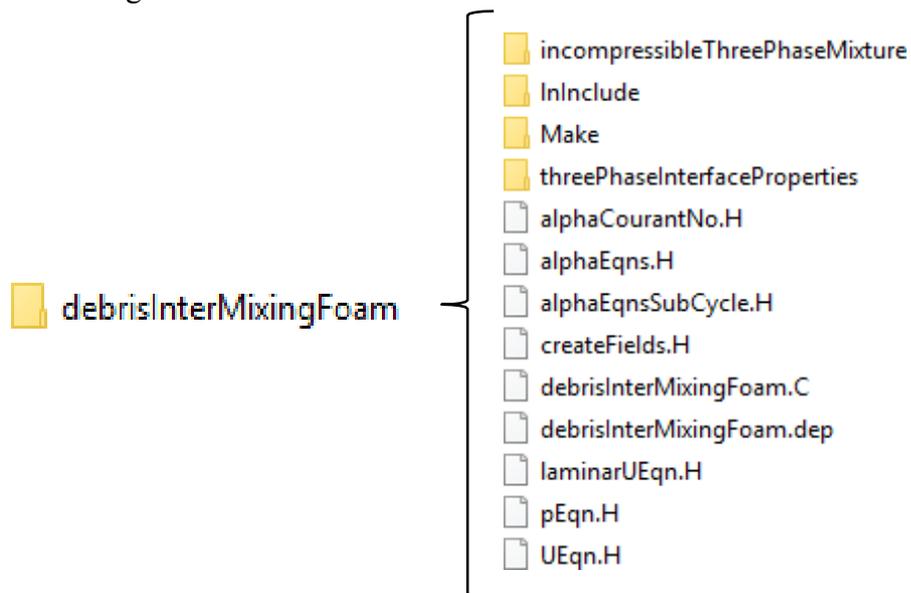


Figura 2.11: Estructura del solver *debrisInterMixingFoam*.

Según se puede observar en la estructura del solver *debrisInterMixingFoam* hay dos archivos para resolver la ecuación de velocidad, el primero *laminarUEqn.H* servirá si se quiere realizar la simulación usando flujo laminar, y *UEqn.H* si se quiere usar un modelo de turbulencia (RAS, LES, URANS).

Los archivos de viscosidad describen el comportamiento No Newtoniano del fluido ya que el solucionador está escrito para lodos con alta concentración de sólidos, dentro del OpenFOAM éstos siguen una secuencia específica (Figura 2.12).

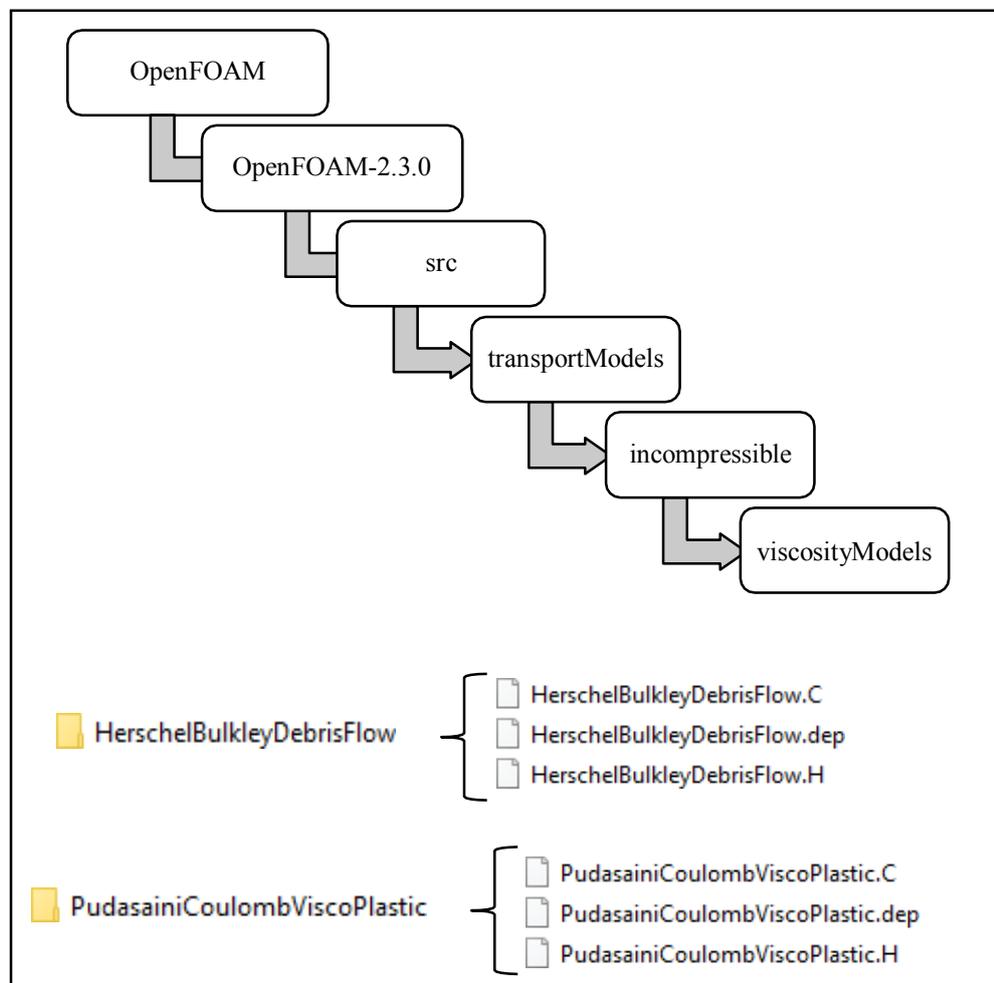


Figura 2.12: Estructura de los modelos de viscosidad.



```

volScalarField initialP(p);
volScalarField initialP_rgh(p_rgh);
volVectorField initialVel(U);
/* Si la presión y la velocidad no retroceden al inicio del paso
de tiempo, el material "se derrite" o se "congela" debido al
acoplamiento auto amplificador de viscosidad, velocidad y presión.
*/

while (pimple.loop())
{
/* La velocidad y la presión promedio sobre la longitud del paso
del tiempo para calcular una viscosidad promedio. */
    U = 0.5*(U + initialVel);
    p = 0.5*(initialP + p);
    p_rgh = 0.5*(initialP_rgh + p_rgh);

/* Actualiza la viscosidad con el promedio entre la velocidad
inicial y la real. */

    threePhaseProperties.correct();
    Info<< "average initVisc0 = " <<
average(threePhaseProperties.nu()) << nl << endl;

/* Restablece la velocidad y la presión al comienzo del paso del
tiempo y realiza el ciclo PISO con la viscosidad de acuerdo con
la velocidad y presión promedio a la hora de salida. */

    U = initialVel;
    p_rgh = initialP_rgh;
    p = initialP;
#include "UEqn.H"

// --- Circuito corrector de presión
while (pimple.correct())
{
#include "pEqn.H"
}
if (pimple.turbCorr())
{
    turbulence->correct();
}
}

#include "continuityErrs.H"

runTime.write();

Info<< "ExecutionTime = " << runTime.elapsedCpuTime() << " s"
<< " ClockTime = " << runTime.elapsedClockTime() << " s"
<< nl << endl;
}

Info<< "\n end \n";

return(0);
}

// * * * * *

```

FUENTE: OpenFOAM/OpenFOAM-2.3.0/applications/solvers/multiphase/interFoam/debrisInterMixingFoam/debrisInterMixingFoam.C

## 2.5.2 ESTRUCTURA DEL MODELO

### a Carpeta *0*:

Incluye las condiciones de contorno iniciales para iniciar la simulación, donde en cada archivo se establecen tales condiciones para una determinada propiedad.

### b Carpeta *Constant*:

Contiene la descripción completa de la malla en una subcarpeta denominada *polyMesh*, así como otros archivos que almacenan información fundamental para su definición como *triSurface*, donde se encuentra la superficie de la quebrada. Esta carpeta también contiene propiedades para la simulación.

### c Carpeta *System*:

Establece parámetros asociados a los procedimientos de solución de las ecuaciones. Contiene al menos los siguientes 3 archivos principales, donde *controlDict* incluye los parámetros para controlar el tiempo y la escritura de datos, *fvSchemes* incluye los esquemas de discretización de las ecuaciones de gobierno y *fvSolution* incluye los métodos de solución de las ecuaciones discretizadas (matrices), tolerancias y otros algoritmos.

### d Directorios de tiempo:

Contiene archivos individuales de información para los campos particulares, tanto valores iniciales como condiciones de contorno especificados para definir el problema, así como resultados escritos en un archivo. El nombre de cada directorio de tiempo está basado en los resultados obtenidos por el propio OpenFOAM, según las condiciones establecidas en *controlDict* de la carpeta *system*.

A continuación, en la Figura 2.13 se muestra la estructura del modelo numérico, donde se indican los directorios y archivos que lo constituyen, tanto de mallado, como de preprocesamiento.

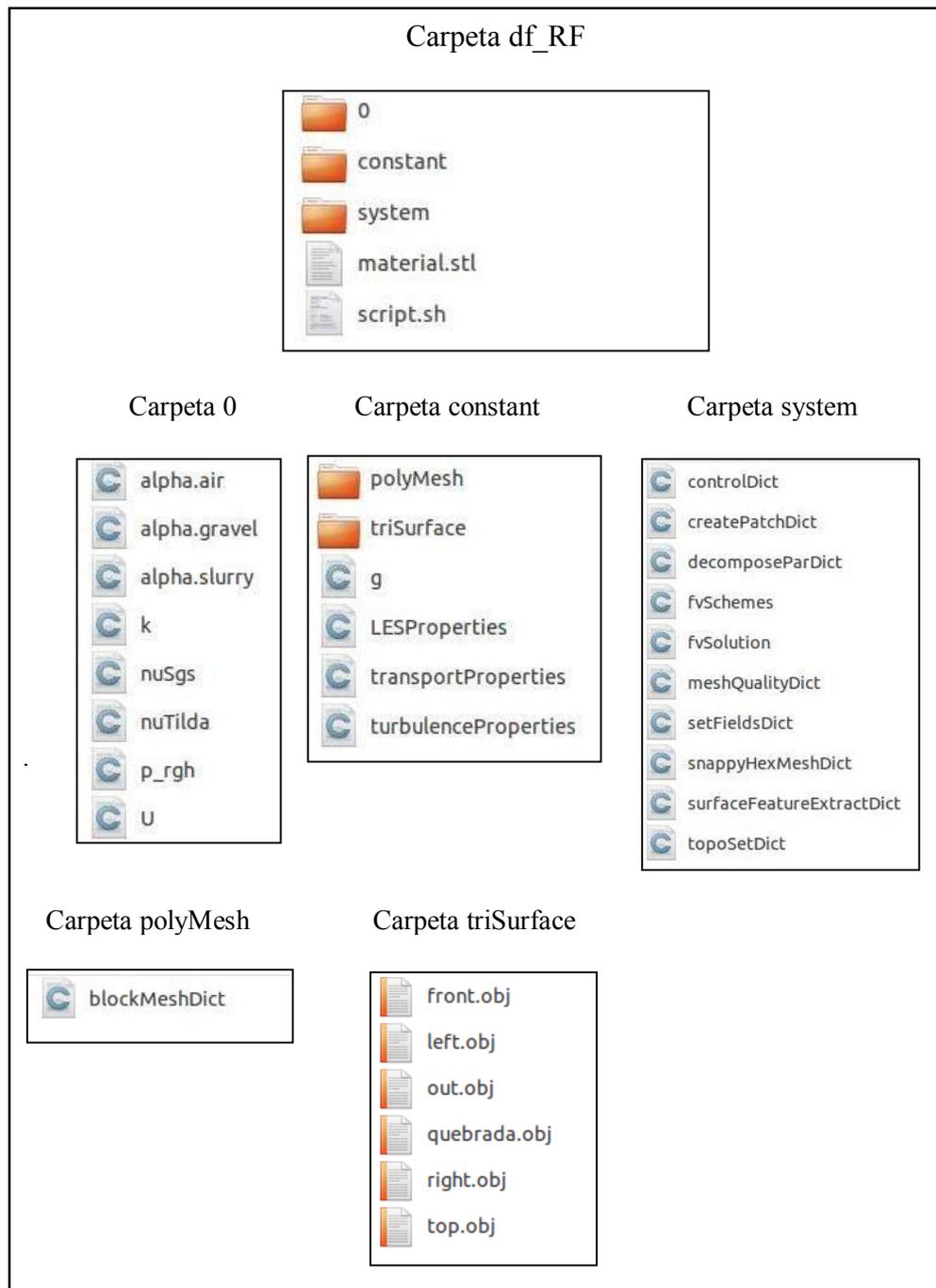


Figura 2.13: Estructura del modelo numérico de flujos de escombros.

### 2.5.3 MODELOS DE TURBULENCIA

Los modelos de turbulencia siguen la siguiente secuencia (Figura 2.14).

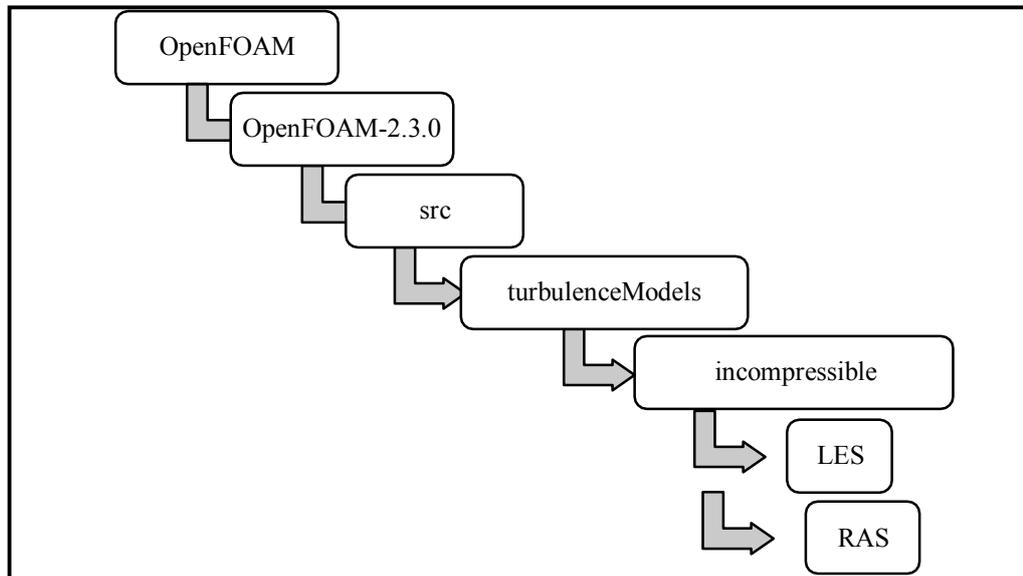


Figura 2.14: Estructura de los modelos de turbulencia.

#### MODELO DE TURBULENCIA LES: OneEqEddy

El modelo de turbulencia “One Equation Eddy Viscosity” es un modelo para flujos incompresibles. Así, el modelo SGS de viscosidad de Onda utiliza una ecuación de equilibrio modelada para simular el comportamiento de  $k$ , por lo tanto:

```
d/dt(k) + div(U*k) - div(nuEff*grad(k))
=
-B*L - ce*k^3/2/delta

and

B = 2/3*k*I - 2*nuSgs*dev(D)
Beff = 2/3*k*I - 2*nuEff*dev(D)

where

D = symm(grad(U));
nuSgs = ck*sqrt(k)*delta
nuEff = nuSgs + nu
```

FUENTE: OpenFOAM/OpenFOAM-2.3.0/src/turbulenceModels/incompressible/LES/oneEqEddy/oneEqEddy.H

## 2.5.4 PARÁMETROS DE AJUSTE

### a CONDICIONES DE CONTORNO

#### a.1 Condiciones de contorno base (“patch”)

- `patch`: Patch genérico.
- `wall`: Patch usado para paredes.

#### a.2 Condiciones de contorno primitivas

- `fixedValue`: Especifica un solo valor inicial, según la condición de contorno de Dirichlet. ( $U_t = 0$ )
- `zeroGradient`: El gradiente normal al dominio es cero, según la condición de contorno de Neumann.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n}(x) = 0 \quad (2.27)$$

#### a.3 Condiciones de contorno derivadas

- `inletOutlet`: Derivada de “mixed”. Usa `fixedValue` cuando el fluido ingresa al dominio y `zeroGradient` cuando sale del mismo.
- `totalPressure`: Es usado junto con la condición de contorno `pressureInletOutletVelocity` en un patch donde hay flujo, pero no se conoce la velocidad.
- `pressureInletOutletVelocity`: Usa `zeroGradient` excepto en la componente tangencial que es `fixedValue` y por defecto 0.

### b CONTROL DEL PASO DE TIEMPO Y E/S DE DATOS

#### b.1 CONTROL DE TIEMPO

- `startFrom`**: Controla el tiempo de inicio de la simulación.

- `startTime`: Tiempo especificado por la entrada de `startTime`.
- `startTime`**: Tiempo de inicio para la simulación con `startFrom`.
- `stopAt`**: Controla el tiempo final de la simulación.
- `endTime`: Tiempo final de la simulación, cuando `stopAt` especifica el `endTime`.
- `deltaT`**: Paso de tiempo de la simulación.

## b.2 ESCRITURA DE DATOS

- `writeControl`**: Controla el tiempo de escritura de salida en archivo.
- `adjustableRunTime`: Escribe datos cada `writeInterval` segundos de tiempo simulado, ajustando los pasos de tiempo para que coincidan con `writeInterval`.
- `writeInterval`**: Valor utilizado junto con `writeControl`.
- `purgeWrite`**: Representa un límite en el número de directorios de tiempo que se almacenan, sobrescribiendo directorios de tiempo de forma cíclica. Para desactivarlo, se especifica `purgeWrite 0`.
- `writeFormat`**: Especifica el formato de los archivos de datos.
- `ascii` (predeterminado): Formato ASCII, escrito para figuras significativas con `writePrecision`.
- `writePrecision`**: Entero usado junto con `writeFormat`.
- `writeCompression`**: Especifica si los archivos están comprimidos con `gzip` cuando está escrito: `on/off` (`yes/no`, `true/false`).

**timeFormat:** Elección del formato de los directorios de tiempo.

- `general` (predeterminado): Especifica el formato científico ( $\pm$  mdddddde  $\pm$  xx ), si el exponente es menor que -4 o mayor o igual que el especificado por `timePrecision`.

**timePrecision:** Entero usado en conjunto con `timeFormat` descrito anteriormente.

### b.3 OTROS AJUSTES

**adjustTimeStep:** Interruptor utilizado para ajustar el paso de tiempo durante la simulación, generalmente de acuerdo con `maxCo`.

**maxCo:** Máximo número de Courant.

**maxAlphaCo:** Máximo alpha Courant.

**maxDeltaT:** Máximo paso de tiempo.

**runTimeModificable:** Se puede cambiar si los diccionarios, ejm. `controlDict`, se vuelve a leer durante una simulación al comienzo de cada paso de tiempo, lo que permite modificar los parámetros durante una simulación.

**Courant Number (Co):** Es el cociente entre el intervalo de tiempo y el tiempo de residencia en un volumen finito (Propiedad de cada celda).

$$Co = \frac{\Delta t}{\frac{\Delta x}{U_r}} = \frac{U_x \Delta t}{\Delta x} \quad (2.28)$$

Donde:

- $Co$  es el número de Courant.
- $\Delta t$  es el intervalo de tiempo.
- $\Delta x$  es la longitud de la celda en la dirección (x) del flujo a una velocidad  $U_x$ .

La condición de Courant-Friedrichs-Lewy es una condición de convergencia de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales solucionadas mediante ciertos algoritmos. Como consecuencia, el paso de tiempo debe ser inferior a un cierto valor sino la simulación producirá resultados incorrectos.

## c ESQUEMAS NUMÉRICOS DE DISCRETIZACIÓN

### c.1 ESQUEMAS TEMPORALES (`ddtSchemes`)

`backward`: Flujo transitorio, segundo orden implícito, potencialmente no acotado.

### c.2 ESQUEMAS DE GRADIENTES - $\nabla$ (`gradSchemes`)

La entrada `Gauss` especifica la discretización de volumen finito mediante la interpolación de valores de los centros de las celdas a los centros de las caras. Y seguido de la palabra `linear` indica interpolación lineal.

### c.3 ESQUEMAS DIVERGENTES - $\nabla \cdot$ (`divSchemes`)

Incluye tanto los términos advectivos  $\nabla \cdot (U \dots)$ , donde la velocidad  $U$  proporciona el flujo advectivo y otros términos que son a menudo de naturaleza difusiva  $\nabla \cdot u(\nabla U)^T$ . A su vez excluye los términos Laplacianos de la forma  $\nabla \cdot (\Gamma \nabla \dots)$ .

La entrada para los términos advectivos es usualmente de la forma  $\text{div}(\phi_i, \dots)$ , donde  $\phi_i$  generalmente denota el flujo de velocidad (volumétrico) en las caras de las celdas, para flujos de densidad constante.

Nota: Todos los esquemas de divergencia (convección) están basados en el teorema de Gauss (porque usamos volúmenes finitos). Lo que cambia es el método de interpolación.

Gauss linear: Interpolación de segundo orden, no acotado.

Gauss upwind: Interpolación de primer orden, acotado, pero demasiado impreciso.

Gauss vanLeer: Esquema numérico de segundo orden. Moderadamente acotado. Este esquema es usado ampliamente para una cantidad de fracción de fluido, propicio para flujo multifásico.

#### **c.4 ESQUEMAS DE ORTOGONALIDAD DE GRADIENTE (snGradSchemes)**

Por tratarse de una geometría compleja, de malla irregular, no ocurre la ortogonalidad, así que para que el gradiente sea calculado adecuadamente es necesario realizar una corrección explícita no ortogonal, conocida como el esquema `corrected`.

La solución puede es estabilizada aplicando el esquema `limited`, éste requiere de un coeficiente  $\psi$ , donde  $0 \leq \psi \leq 1$ , escogiendo un valor de  $\psi = 0.33$ , el cual ofrece mayor estabilidad, pero menos precisión.

### **c.5 ESQUEMAS DE LAPLACE - $\nabla^2$ (`laplacianSchemes`)**

Discretización de términos difusivos de la forma  $\nabla \cdot (v\nabla U)$  en la ecuación de momento con la entrada `laplacian(nu,U)`.

El esquema de `Gauss` es la única elección de discretización y requiere la elección tanto de un esquema de interpolación para el coeficiente difusión y un esquema de gradiente normal de superficie.

En todos los casos `linear` es el esquema de interpolación usado para la interpolación de la difusividad, los casos usan la misma matriz de `snGradSchemes` basado en el nivel de no ortogonalidad.

### **c.6 ESQUEMAS DE INTERPOLACIÓN (`interpolationSchemes`)**

Contiene los términos que indican la interpolación de valores típicamente de los centros de las celdas a los centros de las caras, usado principalmente para la interpolación de la velocidad a los centros de las caras para el cálculo del flujo `phi`.

El esquema usado por defecto en la mayoría de los casos es la interpolación `linear`.

**NOTA:** Al colocar la palabra `default` para definir cualquier esquema, indica que se asignará tal condición a todos los términos cuyo esquema se refiera.

## **d SOLUCIÓN Y CONTROL DE ALGORITMOS**

### **d.1 SOLVERS**

Indica el tipo de solucionador usado para resolver las matrices (matrices simétricas, asimétricas diagonales, etc.).

PCG: Precondicionado (bi-)gradiente conjugado, para matrices simétricas.

`smoothSolver`: Solver que usa un suavizador.

GAMG: Malla múltiple geométrica-algebraica generalizada.

La simetría de la matriz depende de los términos de la ecuación que se están resolviendo, los derivados del tiempo y los términos Laplacianos forman coeficientes de una matriz simétrica, mientras que los términos advectivos forman asimetría.

## **d.2 TOLERANCIAS DE SOLUCIÓN**

`tolerance`: Tolerancia absoluta de la solución. Es básicamente el residual final reportado en el output.

`relTol`: En flujo transitorio se usa `relTol=0` para forzar la simulación a usar la tolerancia absoluta en cada time step. La simulación se detiene si el residual final es menor que el porcentaje del residual inicial indicado por `relTol`.

## **d.3 SOLUCIONADORES DE GRADIENTE CONJUGADO PRECONDICIONADOS**

Se encargan del pre acondicionamiento de matrices en los solucionadores de gradientes conjugados y están representados por la palabra `preconditioner` en el diccionario del solver.

GAMG: Malla múltiple geométrica-algebraica.

#### **d.4 SOLVERS SUAVIZADOS**

Los solvers que usan un suavizador, requieren que el mismo sea especificado.

`GaussSeidel`: Gauss-Seidel.

`symGaussSeidel`: Gauss-Seidel simétrico.

Se puede especificar opcionalmente el número de barridos en la entrada `nSweeps`, antes que residual sea recalculado, valor por defecto de 1.

#### **d.5 SOLUCIONADORES DE GRADIENTE MULTI-MALLA GEOMÉTRICO-ALGEBRAICO**

El método generalizado de multi malla geométrico-algebraico (GAMG), busca generar una solución rápida con un número pequeño de celdas y mapear esta solución en una malla más fina.

La aglomeración de celdas es realizada por este método, siendo `faceAreaPair` el método por defecto, así mismo puede ser controlada siguiente los siguientes parámetros:

`cacheAgglomeration`: Interruptor que especifica el almacenamiento en caché de la estrategia de aglomeración (`on/off`).

`nCellsInCoarsestLevel`: Indica el tamaño de malla aproximado en el nivel más grueso en términos del número de celdas, por defecto 10.

`mergeLevels`: Controla la velocidad a la cual el engrosamiento o refinamiento es realizado. El valor predeterminado de 1 es el más seguro para mallas simples, un valor de 2 aumenta la velocidad.

Así también, se especifica el número de barridos usados por el suavizador en diferentes niveles de la densidad de la malla.

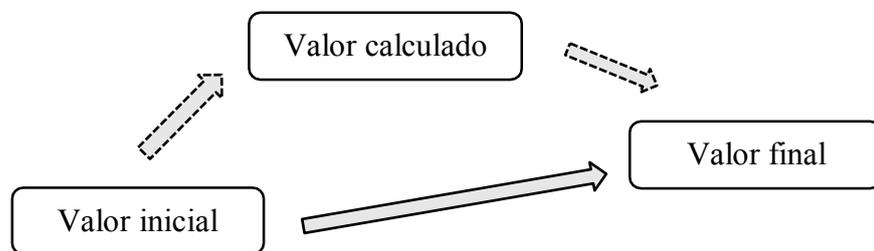
nPreSweeps: N° de barridos a medida que el algoritmo está engrosando (valor predeterminado 0).

nPostSweeps: N° de barridos a medida que el algoritmo está refinando (valor predeterminado 2).

nFinestSweeps: N° de barridos al nivel más fino (por defecto 2).

#### d.6 FACTORES DE RELAJACIÓN

Controla la *under-relaxation*. Mejora la estabilidad ya que limita la cantidad de cambio de una variable entre un intervalo de tiempo (timestep) y el siguiente:



$$\boxed{Valor\ final = Valor\ inicial + Coef.\ Rel.* (Valor\ calc. - Valor\ inicial)}$$

Se usará *under-relaxation* con un valor de 1 a fin de garantizar igual matriz diagonal, típica de las simulaciones transitorias.

## d.7 ALGORITMO PIMPLE

Es una combinación del algoritmo PISO, usado para casos transitorios y SIMPLE usado para casos de estado estacionario. La mejor manera de pensar sobre el algoritmo PIMPLE es imaginarlo como un algoritmo SIMPLE para cada paso de tiempo, donde los correctores externos son las iteraciones, y una vez que converge, pasará al siguiente paso hasta que se complete la solución. Se obtiene una mejor estabilidad de PIMPLE sobre PISO por este motivo, especialmente cuando se trata de grandes intervalos de tiempo en los que el número máximo de Courant puede estar constantemente por encima de 1 o cuando la naturaleza de la solución es inherentemente inestable. (SIMSCALE, 2018)

El bucle se controla mediante los parámetros de entrada citados a continuación, establecidos en un diccionario que lleva el mismo nombre.

`momentumPredictor`: Activa o desactiva el predictor de momento. Típicamente se desactiva para números de Reynolds bajos y multifase.

`nOuterCorrectors`: Permite recorrer todo el sistema de ecuaciones dentro del intervalo de tiempo, lo que representa el número total de veces que se resuelve el sistema.

`nCorrectors`: Número de veces que el algoritmo resuelve la ecuación de presión y corrige el momento en cada paso. (2 o 3 normalmente).

`nNonOrthogonalCorrectors`: Especifica soluciones repetidas de la ecuación de presión, utilizada para actualizar la corrección explícita de la no-ortogonalidad.

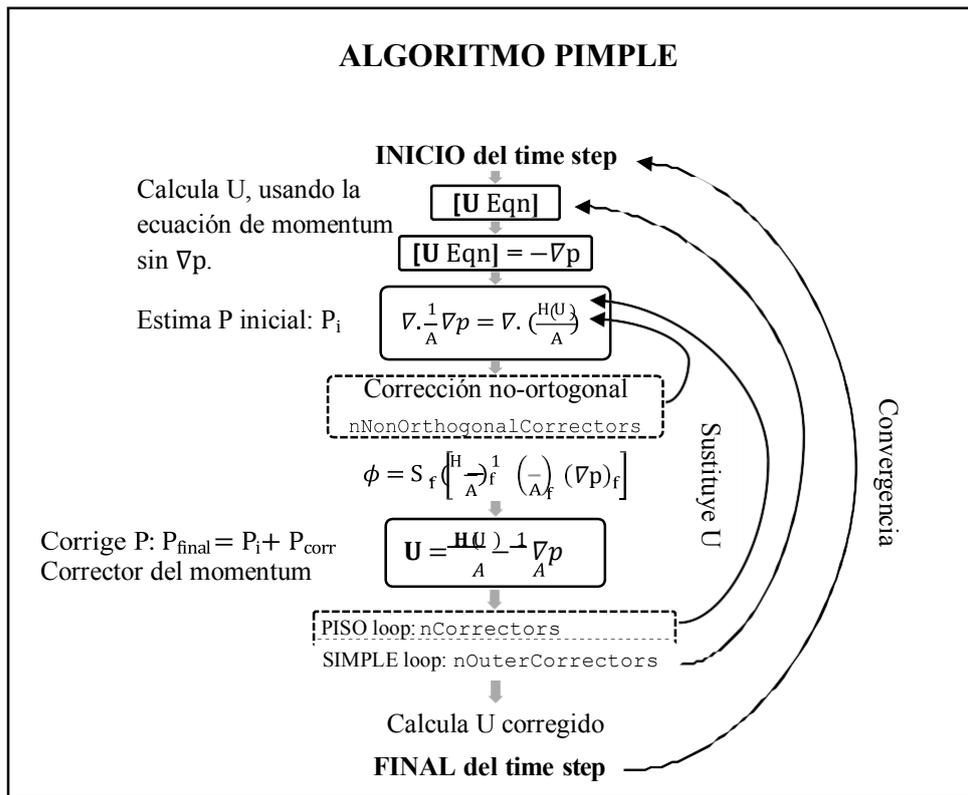


Figura 2.15: Algoritmo PIMPLE. Adaptado de Greenshields (2016)

### PARÁMETROS “semi-implicit MULES”

MULESCorr: Encendido para “semi-implicit” MULES.

nAlphaSubCycles: Un valor de 1 para “semi-implicit” MULES.

nAlphaCorr: Número de correcciones (2-3 para flujos que varían lentamente).

nLimiterIter: Número de iteraciones para calcular el limiter: (3-5 para  $Co < 5$ ).

La entrada cAlpha es un factor que controla la compresión de la interfase, donde:

0: Corresponde a no compresión.

1: Corresponde a una compresión conservativa.

> 1: Corresponde a una compresión mejorada de la interfase.

#### d.8 REFERENCIA DE PRESIÓN

En un sistema cerrado incompresible, la presión es relativa, importando el rango de presión, no los valores absolutos. En estos casos se establece un nivel de referencia `pRefValue` en la celda `pRefCell`, las cuales serán usadas cuando el solver lo requiere o el caso lo demande. The OpenFOAM Foundation. (2011-2018).

### 2.5.5 FLUJO MULTIFÁSICO

#### a Boundedness (Acotación)

En transporte de un flujo, se busca establecer valores límite en un campo determinado, el no hacerlo origina un comportamiento no físico, así los sistemas multifásicos pueden ser simulados usando la ecuación de advección:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (U\alpha) = 0 \quad (2.29)$$

Para la fracción de fase  $\alpha$ ,  $0 \leq \alpha \leq 1$ , Boundedness es crítico. `Upwind` es el único esquema implícito para garantizar boundedness, pero es demasiado impreciso, pues la interfase se pierde para flujos multifásicos, por ello primero es necesario evaluar el `Upwind` con solución implícita, luego corregirla con solución explícita. (Greenshields, 2016)

## b “Explicit” MULES

MULES: Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (U\alpha) = 0 \quad \rightarrow \quad (\alpha - \alpha^o) \frac{V}{\Delta t} + \sum_f \phi_f \alpha_f = 0 \quad (2.30)$$

Diagram illustrating the expansion of equation (2.30) into equation (2.31) with annotations:

- Limitador en  $\alpha_{\min}(= 0)$** : Points to the  $\lambda^+$  term in equation (2.31).
- Flujos fuera de las celdas**: Points to the  $\phi^+$  term in equation (2.31).
- Limitador en  $\alpha_{\max}(= 1)$** : Points to the  $\lambda^-$  term in equation (2.31).
- Flujos dentro de las celdas**: Points to the  $\phi^-$  term in equation (2.31).

$$(\alpha - \alpha^o) \frac{V}{\Delta t} + \sum_f \phi_f^+ \alpha_f^+ + \sum_f \lambda^+ \phi_f^+ (\alpha_f^+ - \alpha_f^o) + \sum_f \lambda^- \phi_f^- (\alpha_f^o - \alpha_f^-) = 0 \quad (2.31)$$

Below equation (2.31), arrows indicate the following components:

- $\frac{V}{\Delta t}$  is associated with **Esquema upwind**.
- $\lambda^+ \phi_f^+$  is associated with **Esquema de mayor orden**.

Estos dos limitadores  $\lambda^+$  y  $\lambda^-$  proporcionan una solución avanzada de  $\alpha$ , por lo que boundedness queda garantizado, pero al ser la solución explícita, limita que el  $Co < 0.25$ . (Greenshields, 2016)

## c “Semi-implicit” MULES

Este algoritmo evita la restricción del  $Co$ .

- Solución implícita de la ecuación de  $\alpha$ , Euler para tiempo, upwind para convección (Limitado, pero con baja precisión).
- Corrección explícita de alto orden, usando MULES (Limitado y una mejor precisión).

### III MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

##### 3.1.1 CARACTERIZACIÓN TOPOGRÁFICA

###### a UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y RUTAS DE ACCESO

La quebrada Quilca se encuentra al noreste de la Región Lima Metropolitana en la Región Lima Provincias, provincia de Canta, distrito de Huamantanga. Está ubicada geográficamente en la zona 18S, en las coordenadas  $76^{\circ}57'56''$  y  $76^{\circ}57'59''$  de longitud Oeste;  $11^{\circ}37'04''$  y  $11^{\circ}37'06''$  de latitud Sur. La zona del estudio se encuentra dentro de los linderos de la comunidad Quipán.

Hidrológicamente esta quebrada pertenece a la Cuenca del Río Chillón.

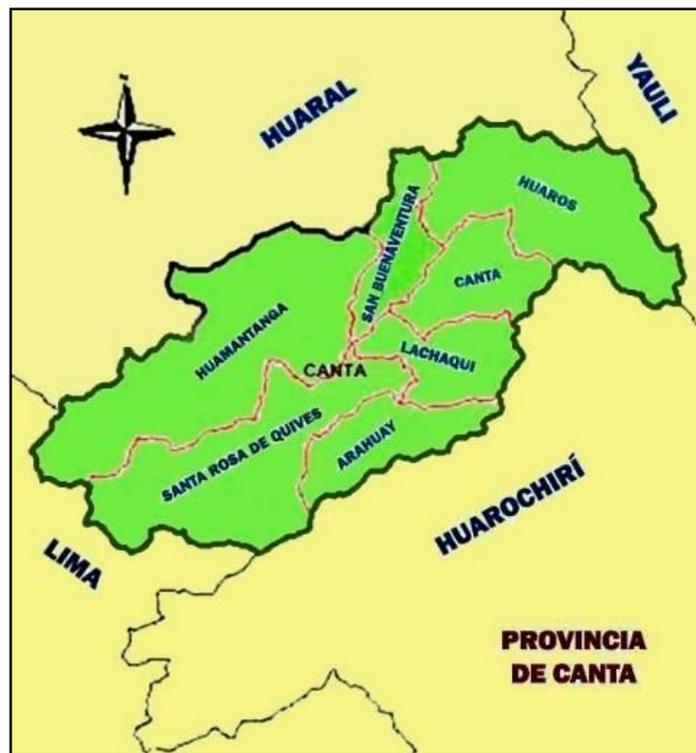


Figura 3.1: Mapa de la provincia de Canta.

En la Figura 3.2. mostrada a continuación, se indica las rutas hacia el área de investigación experimental.

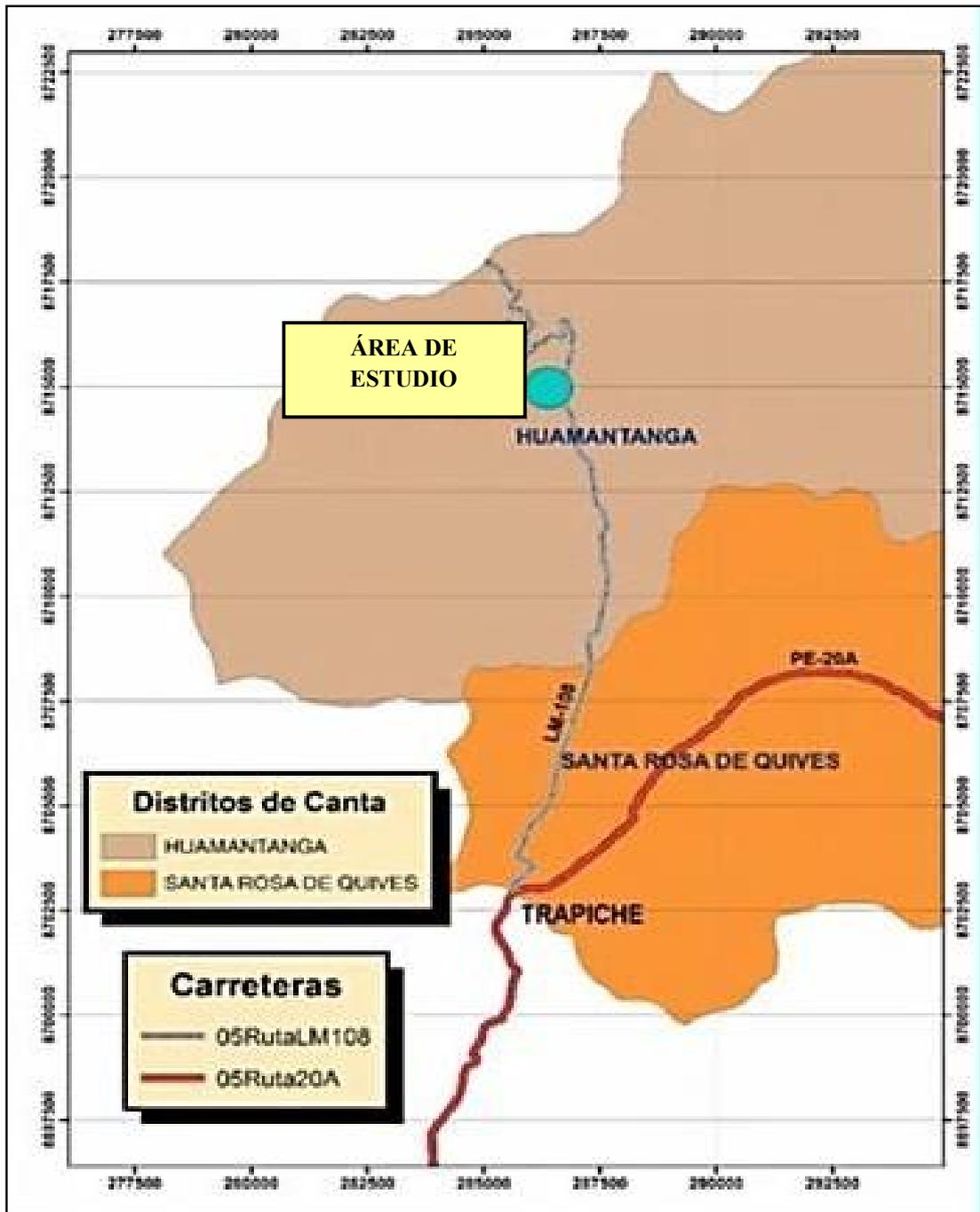


Figura 3.2: Mapa de rutas hacia el área de estudio. Adaptado de UNI-UNALM-SQ&ICC (2018).

Se tiene como referencia el Km 13+000. Para llegar desde el IMEFEN, ubicado dentro del CISMID en el campus norte de la Universidad Nacional de Ingeniería, la distancia total es de aproximadamente 50 km y el recorrido hasta la zona de estudio toma un tiempo aproximado de 2 horas. El recorrido se realizó en 2 tramos, el primero siguiendo por la Av. Túpac Amaru y luego por la carretera 20A hasta Trapiche. En esta zona se contó con un local donde se almacenaban los equipos, los mismos que se verificaban mediante un Check List (ANEXO 1). Por motivos de seguridad se recogía al personal de la zona, posteriormente todo el equipo de investigación se dirigía al área de estudio recorriendo un camino de trocha de aproximadamente media hora, siguiendo la ruta LM108.

Cuadro 3.1: Rutas de acceso al área de estudio.

Tramo	Acceso	Medio	Ruta	Distancia/Tiempo
IMEFEN - Trapiche	Terrestre	Camioneta Doble Tracción <b>Mitsubishi L200</b>	Túpac Amaru y Carretera 20A  (Asfaltado)	38 km / 1 hora y 30 minutos
Trapiche - Zona de trabajo	Terrestre	Camioneta Doble Tracción <b>Mitsubishi L200</b>	LM 108 (Trocha carrozable)	12 km / 30 minutos



Figura 3.3: Área de investigación experimental - Quebrada (Google Earth).

## **b CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS**

El relieve general de la cuenca del río Chillón es el que caracteriza prácticamente a la mayoría de las cuencas de la vertiente occidental, es decir, el de una hoya hidrográfica alargada de fondo profundo y quebrado de pendiente fuerte, con una fisiografía escarpada en partes abruptas, cortadas por quebradas de fuerte pendiente y estrechas gargantas.

Estratigráficamente el área estudiada incluye rocas sedimentarias, volcánicas y metamórficas, cuyas edades quedan comprendidas entre el Jurásico Medio y el Cuaternario Reciente. Las rocas intrusivas plutónicas comprenden unidades petrográficas con una composición que varía desde gabro hasta granito, emplazados entre el Cretáceo superior y el Terciario inferior; los intrusivos sub-volcánicos son de ocurrencia limitada. (INGEMMET, 1979)

El distrito de Huamantanga a su vez pertenece a la Región Quechua ubicada a 3 398 m.s.n.m., sin embargo, la zona de estudio está ubicada mucho más abajo. El clima es templado seco, un sol radiante y cielo azul durante los meses de abril a diciembre, con períodos de heladas y escarchas entre mayo y agosto, así mismo su territorio cuenta con un gran potencial de bosques y tierras para plantaciones forestales y reforestaciones entre las que destacan extensos bosques de eucaliptos y pinos, la zona está llena de suelo fértil permitiendo el buen desarrollo de la agricultura.

### **c DESCRIPCIÓN DE LA QUEBRADA**

A continuación, en la Figura 3.4, se muestra la zona de la quebrada experimental, la cual se adaptó y posteriormente se instrumentó para la realización y medición de parámetros durante los ensayos de flujos de escombros.

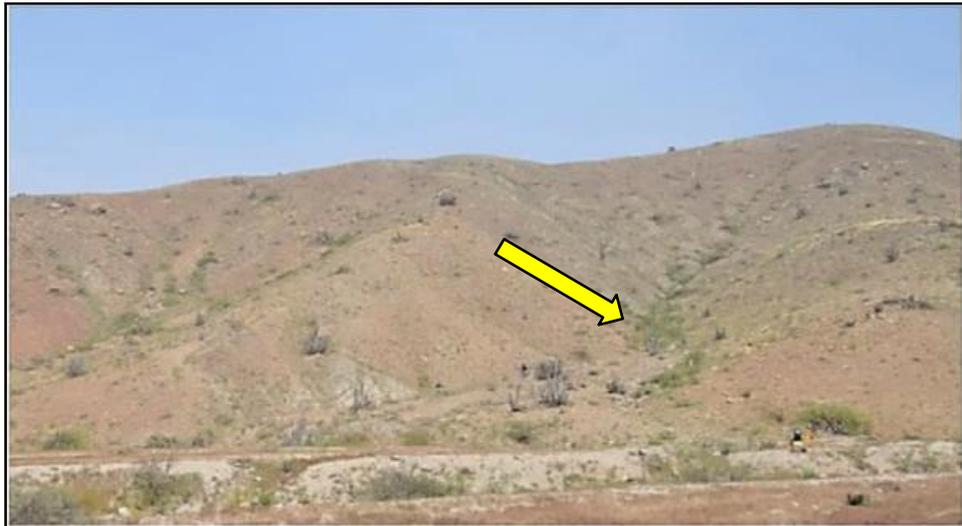


Figura 3.4: Quebrada experimental. La flecha señala el curso de agua.

#### **c.1 SECCIÓN SUPERIOR**

En la parte superior se encuentra el reservorio de material agua-sólido y un sistema de retención a través de una compuerta de apertura manual. La longitud del tramo, desde el inicio del muro en la parte posterior hasta la salida de la compuerta (progresiva 0+000), es de 4.2630 metros.

#### **c.2 SECCIÓN MEDIA**

A la salida de la compuerta existe un tramo de 60 metros de longitud y de aproximadamente 2 metros de ancho, el cual constituye la zona de tránsito del flujo de escombros, en dicho tramo se puede apreciar la presencia de cierta vegetación en algunas partes del talud.

### c.3 SECCIÓN INFERIOR

En la parte inferior, luego de la zona del tránsito del flujo, se encuentra el cono de deyección de aproximadamente 20 metros de largo por 20 metros de ancho, el cual constituye la zona de deposición del material del flujo de escombros.

A continuación, en la Figura 3.6. se muestra una vista en planta del área de estudio con curvas de nivel de 0.2 m - 1 m a escala 1:400, mayores detalles en el PLANO P1.

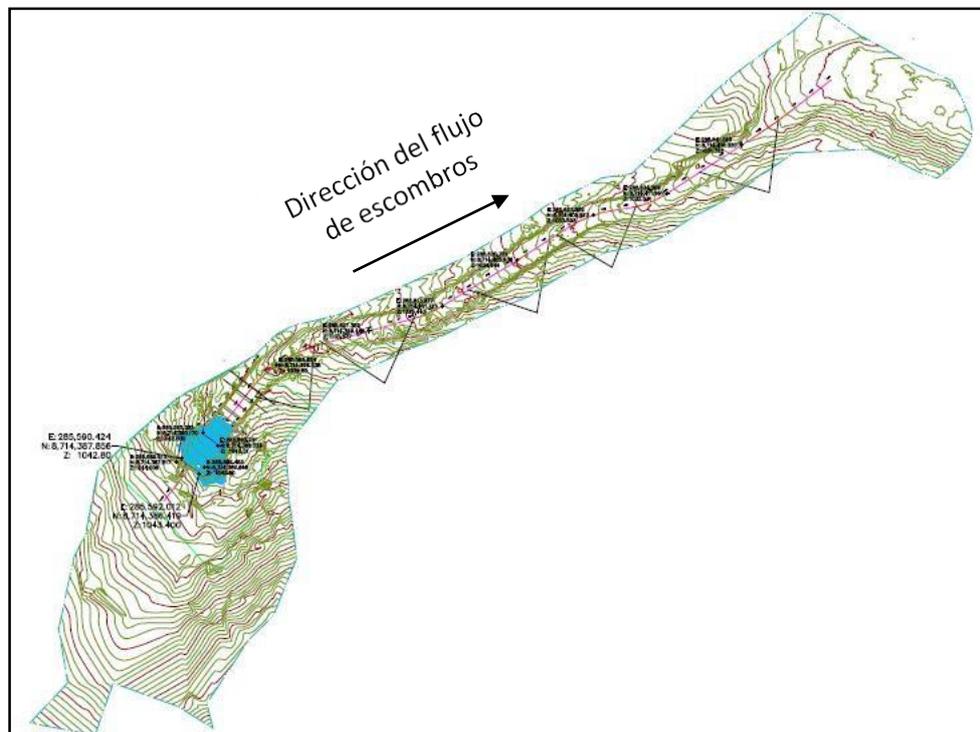


Figura 3.5: Vista en planta del área de estudio con curvas de nivel de 0.2 m - 1 m a escala 1:400. Fuente: UNI-UNALM-SQ&ICC. (2018).

Así también, en la Figura 3.7. se muestra una vista de perfil de la quebrada experimental, donde se incluye la longitud del cauce, la cota máxima, cota mínima y la pendiente por tramo, mayores detalles en el PLANO P2.

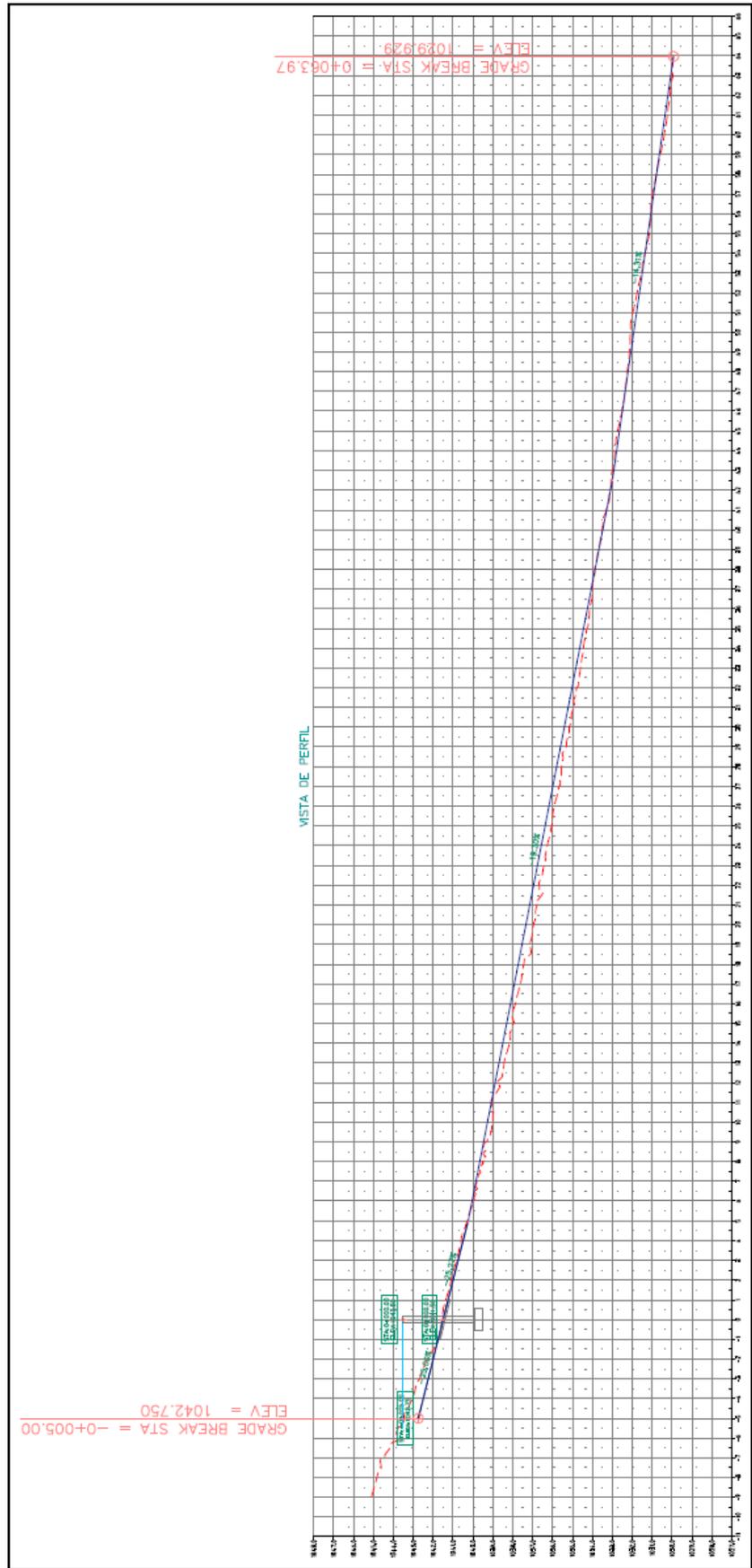


Figura 3.6: Vista de perfil de la quebrada experimental a escala 1:400. Fuente: UNI-UNALM-SQ&ICC. (2018).

### **3.1.2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA - GEOTÉCNICA**

#### **a MECÁNICA DE SUELOS Y MEDICIONES DE CAMPO**

##### **a1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA-ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

El material sólido que se consideró para realizar la conformación del volumen de escombros inicial fue tomado de una zona aledaña y transportado a la zona de trabajo, ya que se requerían ciertas características del mismo, a grosso modo, que cuente con una cantidad aproximada de 30 % de limos, que el diámetro máximo del grano no sea mayor a 5 pulgadas y que el mismo se encuentre uniformemente distribuido.

Posteriormente se consideró una muestra de tal material sólido acumulado en estado suelto, siguiendo el método del cuarteo, para su posterior análisis, estas pruebas fueron realizadas en el Laboratorio Geotécnico del CISMID-FIC-UNI.

Ensayos realizados:

##### 1. Caracterización física:

Granulometría por Tamizado (ASTM-D422), Contenido de Humedad (ASTM-D2216), Clasificación AASHTO (ASTM-D3282) y SUCS (ASTM-D2487).

##### 2. Análisis Granulométrico por Sedimentación (Hidrómetro) (ASTM-D422) - Incluye $G_s$ .

A continuación, se muestran los resultados de la muestra:

Cuadro 3.2: Resultados de granulometría por tamizado (ASTM-D422).

Muestra	Diámetro (mm)		
	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)
	[4.75 < Ø < 76.2]	[4.75 < Ø < 76.2]	Ø < 0.075
Quebrada Quilca	23.7	63.3	12.9

FUENTE: Informe de Análisis granulométrico y ensayos de caracterizaciones físicas. (LG17-206, 2018)

Cuadro 3.3: Resultados de granulometría por sedimentación (ASTM-D422).

Muestra	Diámetro (mm)	
	Limo (%)	Arcilla (%)
	[0.005 < Ø < 0.075]	[Ø < 0.005]
Quebrada Quilca	6.8	6.1

FUENTE: Informe de Análisis granulométrico y ensayos de caracterizaciones físicas. (LG17-206, 2018)

Cuadro 3.4: Contenido de humedad (ASTM-D2216).

Muestra	Resultado (%)
Quebrada Quilca	1.6

FUENTE: Informe de Análisis granulométrico y ensayos de caracterizaciones físicas. (LG17-206, 2018)

Cuadro 3.5: Gravedad específica de sólidos (G<sub>s</sub>).

Muestra	Resultado
Quebrada Quilca	2.89

FUENTE: Informe de Análisis granulométrico y ensayos de caracterizaciones físicas. (LG17-206, 2018)

Cuadro 3.6: Clasificación AASHTO (ASTM-D3282) y SUCS (ASTM-D2487).

CLASIFICACIÓN	
AASHTO	SUCS
A-1b (0)	SM Arena limosa con grava

FUENTE: Informe de Análisis granulométrico y ensayos de caracterizaciones físicas. (LG17-206, 2018)

En el ANEXO 2 se presenta la información geotécnica con mayor detalle.

## a2 ANÁLISIS MINERALÓGICO

Con la finalidad de determinar la composición mineralógica del material, se realizó el ensayo de Difracción de Rayos X (DRX) en el “Laboratorio de investigación y servicios para la actividad minera e industrial”, BIZALAB SAC.

El resultado fue el siguiente:

Cuadro 3.7: Resultados del análisis mineralógico por DRX.

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado aproximado (%)
Plagioclasa (Andesina)	$(Ca,Na)(Al,Si)_4O_8$	50
Cuarzo	$SiO_2$	16
Feldespato - K (Ortoclasa)	$KAlSi_3O_8$	11
Anfibol (Actinolita)	$Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	8
Mineral laminar	-----	5
Mica (Muscovita)	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$	4
Clorita (Clinocloro)	$(Mg,Fe)_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	3

FUENTE: Análisis por Difracción de Rayos X. (OTID-032, 2018)

Mayores detalles se presentan en el ANEXO 3.

### 3.2 MATERIALES Y EQUIPOS

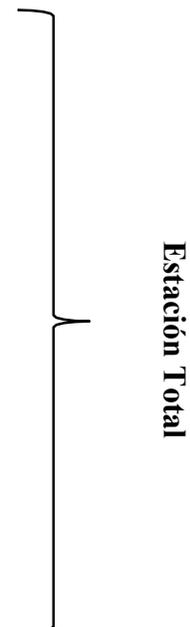
Los resultados del modelo numérico elaborado, al ser comparado con los resultados producto de las simulaciones de eventos de flujos de escombros en la microquebrada instrumentada, reflejan cómo se comportan y varían los parámetros en evaluación. Sin embargo, si no hubiera habido certeza de los datos iniciales, tampoco lo hubiera habido del resultado final. La validez del modelo dependió mucho de contar con equipos tecnológicos adecuados y calibrados a la medida de las necesidades y posibilidades, pues éstos permitieron obtener la topografía del área de investigación experimental con una buena precisión, registros adecuados de los sensores y videos en alta resolución; así también se usaron equipos adecuados para el procesamiento de los mismos, sin éstas herramientas necesarias para poder obtener información consistente durante el desarrollo del evento, no se hubiera podido lograr una calibración ni validación certera del modelo numérico.

#### 3.2.1 MODELO FÍSICO - EXPERIMENTAL

##### a EQUIPOS DE TOPOGRAFÍA

###### Controlador TRIMBLE CU

- Marca: TRIMBLE S7
- Modelo: Docking Station 58252019
- N° de Serie: 95832925
  
- 01 Unidad Escáner
- 01 Trípode
- 01 Jalón
- 01 Prisma
- 01 Cargador de batería
- 03 Baterías
- 01 Wincha de 5 m



**Estación Total**

## **b EQUIPOS DE MONITOREO Y REGISTRO DE INFORMACIÓN**

- 01 Monitor
    - Marca: ViewSonic - VA2407H
    - Modelo: VS16218
    - N° de Serie: UEP163200262
  - 01 Network Video Recorder (NVR)
    - Marca: Dahua technology
    - Modelo: DHI-NVR5216-4KS2
    - N° de Serie:
  - 08 Cámaras de video
    - 3MP HD Network Mini IR Bullet Camera
    - Marca: Dahua technology
    - Modelo: DH-IPC-HFW1320S
  - 01 Cámara digital panorámica
    - 4K Ultra HD Network Small IR-Bullet Camera
    - Marca: Dahua technology
    - Modelo: DH-IPC-HFW4800E
  - 02 Switch PoE
  - 01 Cargador de 12V
  - 02 Laptops
  - 02 Receptores
  - 08 Sensores ultrasónicos
  - 08 Paneles solares
  - 01 Supresor de picos
  - 01 Estabilizador
  - 02 Radios Motorola
  - 01 Cámara fotográfica digital
- CCTV**  
**(Circuito Cerrado de Televisión)**
- Sensores y**  
**Otros**

## **c EQUIPOS Y/O HERRAMIENTAS ADICIONALES**

- 01 Piscina de 20 m<sup>3</sup>
- 01 Generador Eléctrico TOYO A.C. GENERATOR
- 01 Bomba MODEL 186F AIR-COOLED DIESEL ENGINE (6.3-6.8 kW)

- 01 Manguera BAS-020000 STRONGHOSE LAY FLAT HOSE 2” W.P. 60 PSI.
- 01 Taladro Percutor + set de herramientas
- 01 Moladora
- 02 Gal. De Combustible
- 01 Cinta métrica de 20 m.
- 02 Carretillas de 0.08 m<sup>3</sup> c/u
- 03 Palas cuchara
- 01 Tortol
- 02 Barretas
- 16 Pesas de 20 Kg c/u
- 01 Cincel
- 01 Martillo
- 01 Comba

### 3.2.2 MODELO MATEMÁTICO - NUMÉRICO

- 01 CLUSTER DE ALTO RENDIMIENTO COMPUTACIONAL (CHPC)  
CLUSTER S/N: SRS-42UHPC-IBFR-01-SL019

COMPONENTES	MARCA	MODELO	CANTIDAD	S/N
Nodo Líder	Supermicro	SSG-6048R-E1CR36H	1	S174959X7C15503
Nodos de cómputo	Supermicro	SYS-6028TP-HTFR	8 chasis de 4 nodos c/u para un total de 32 nodos de cómputo	S16073027400324 S16073027400315 S16073027400326 S16073027400327 S16073027400319 S16073027400320 S16073027400316 S16073027400322
Switch de administración	Supermicro	SSE-G24-TG4	2	SSQ247406C00010 SSQ247406C00001
Switch Infiniband	Mellanox	MSX6036F-1BRS	1	MT1752K03761
Rack	Supermicro	N/A	1	

- 02 Workstation de 24 cores c/u (32 y 64 Gb de RAM)
  - Marca: Dell Precision T7610
  - Modelo: D02X
  - N° de Serie: 55K37A00

- 01 Laptop
  - Marca: LENOVO V310 - 15ISK
  - Modelo: 80SY
  - N° de Serie: LR06M61Y
- 01 Calculadora CASIO fx-82 ES
- 01 USB 3.0 Hard Drive TOSHIBA (1 TB)
- 01 Memoria USB Kingston (4 GB)
- 01 Memoria USB Kingston DataTraveler DT101 G2 (16 GB)
- 1/2 Millar papel bond A4
- 01 Millar papel bulky A4
- 02 Correctores
- 08 Lapiceros
- 01 Lápiz
- 01 Borrador
- 01 Regla

### **3.3 MÉTODOS**

La metodología para la recolección de datos fue adoptada en función a numerosos estudios e investigaciones realizadas a nivel internacional para cuantificar las características de los flujos de escombros y calibrar los modelos reológicos asumidos.

En primera instancia fue importante conocer la zona de estudio. El criterio para la selección de la zona experimental se basó en localizar numerosas microquebradas que tengan forma de cuenca formadas por las lluvias “atípicas” ocurridas durante la presencia del fenómeno “El Niño”. Para ello se identificó una microquebrada seca (extensión de 4 ha) que cumplía con los criterios de similitud geológica - geotécnica para la experimentación del tránsito y deposición de huaicos, dicha quebrada de nombre Quilca, pertenece a la Cuenca del Río Chillón, ubicada en la Región Lima Provincias, Provincia de Canta, Distrito de Huamantanga, donde se realizó la adecuación y la instrumentación necesaria para tales fines experimentales.

Así también, conocer las características del material sólido (granulometría, gravedad específica, etc.) y la concentración volumétrica del material experimental (agua + sólidos), se requirió también realizar un levantamiento topográfico antes y después del evento de flujos de escombros en coordenadas (xyz), filmar el tránsito del evento y registrar la variación del tirante con el tiempo a través de sensores ultrasónicos.

La información recabada fue procesada y analizada para posteriormente ser incorporada al modelo numérico. Una vez realizadas las simulaciones en el software, se procedió a verificar los resultados obtenidos en el mismo con los del modelo experimental, donde las variables evaluadas fueron el tirante del flujo de escombros, las velocidades, el volumen de escombros depositado y el cambio que se generó en el lecho.

### **3.3.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL - TRABAJO DE CAMPO**

El proceso de ocurrencia, tránsito y deposición del flujo de escombros se conceptualiza como la liberación súbita de un volumen finito de agua conteniendo un porcentaje en volumen de material sólido (ANEXO 4).

La onda de huaico producida se propaga aguas abajo, según se muestra en la Figura 3.7.



Figura 3.7: Propagación del flujo de escombros aguas abajo.

### **a IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LA QUEBRADA**

Se identificó 01 microquebrada seca (extensión de 4 ha), con pendiente del cauce principal entre 15% y 25%, cuyo estado inicial se puede apreciar en la Figura 3.8, donde se definió un tramo de aproximadamente 80 m, para el tránsito de huaicos y la zona de formación del cono de deyección.



Figura 3.8: Identificación de la microquebrada seca.

Se ejecutaron los caminos de acceso y obras temporales como áreas de campamento temporal, zona de almacenamiento de sólidos para los ensayos (Figura 3.9).



Figura 3.9: Ejecución de los caminos de acceso en el área de investigación experimental.

Se realizaron también estudios básicos de topografía, geología-geotecnia de la microquebrada y la zona de estudio, haciendo uso de una Estación Total (Figura 3.10).



Figura 3.10: Realización de estudios de topografía dentro del área de investigación experimental.

## b ACONDICIONAMIENTO E INSTRUMENTACIÓN

Se procedió a construir el reservorio de almacenamiento del material (agua - sólido) en la parte superior de la quebrada. Posteriormente se colocó un sistema de retención (Figura. 3.11), para retener dicha mezcla. Mayores detalles sobre el sistema de retención en los PLANOS P3, P4 y P5.

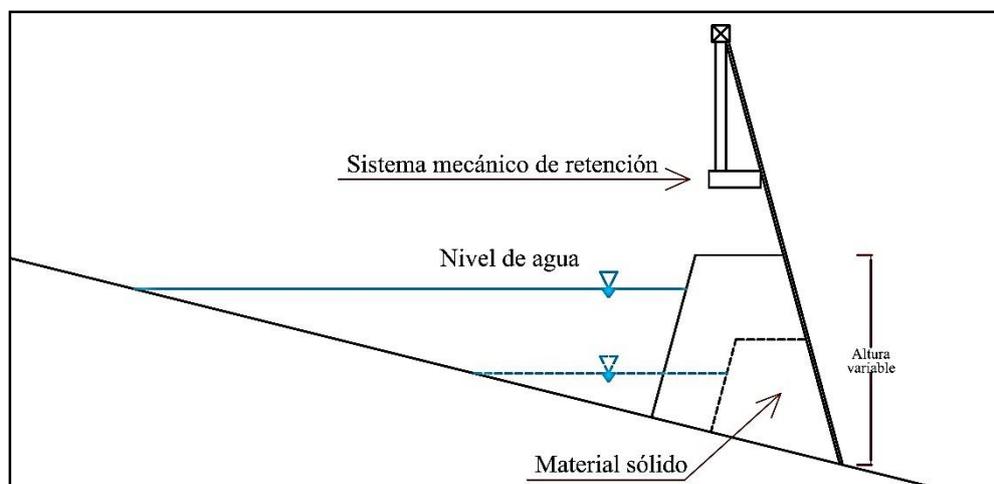


Figura 3.11: Sistema mecánico de retención del material agua-sólido.

Así también se usó una piscina de 20 m<sup>3</sup> para el almacenamiento de agua, la que fue impulsada a través de una bomba hacia el reservorio de almacenamiento. En la cuenca experimental se instalaron un sistema de hitos de control topográfico (progresivas cada 5 m y puntos de referencia). Un sistema de circuito cerrado de video - CCTV de alta resolución permitió filmar el avance en el tiempo del frente de onda del huaico en el cauce de la quebrada y en la zona del cono de deyección, (PLANO P6). Se instalaron, además, sensores ultrasónicos colocados en 07 secciones de control a lo largo de la quebrada.

Dicha instrumentación ayudó a registrar las variables de velocidad del frente de onda, la variación de los tirantes de agua con el tiempo, según los registros de sensores ultrasónicos, y la evolución temporal del cono de deyección.

### c **DESARROLLO DEL PROGRAMA Y BASE DE DATOS EXPERIMENTALES**

El programa experimental se desarrolló en una microquebrada instrumentada con pendiente media de entre 15% - 25%. En dicha quebrada se realizaron un total de 15 ensayos, variando la concentración volumétrica de material sólido y los tirantes iniciales de agua.

Cuadro 3.8: Programa experimental.

<b>Pendiente Media de la Quebrada</b>	<b>Concentración Volumétrica</b>	<b>Altura del Dique</b>
15% - 25%	Cv = 05 %	
	Cv = 10 %	H = 1.00 m
	Cv = 20 %	H = 1.25 m
	Cv = 30 %	H = 1.50 m
	Cv = 40 %	

Antes de iniciar con el ensayo experimental, se procedió a llenar una ficha de control (ANEXO 5), indicando el procedimiento pre y post ensayo.

El evento se inicia con la apertura del sistema de retención, el material sólido se mezcla con el agua y forma una onda de flujo de escombros. El flujo discurre a través del cauce de la quebrada y se deposita en el cono de deyección. Después de cada simulación se procedió a realizar un nuevo levantamiento topográfico utilizando un Equipo Topográfico Láser Escáner 3D para conocer la variación de la superficie, a fin de identificar las zonas de erosión y deposición de material de flujo de escombros (ANEXO 6).

### **c.1 PROCEDIMIENTO DE ESCANEO TOPOGRÁFICO**

La topografía sirvió para elaborar el modelo digital de elevación del terreno, con una precisión de curvas de nivel cada 0.50 m en las laderas, y cada 0.10 m en el cauce y la zona del cono de deyección.

Consideraciones generales:

- El modelo experimental constó de 5 puntos de control topográfico, numerados y distribuidos en el área de trabajo, los cuales cubrían la totalidad de la zona de transición y de deposición (PLANO P7).
- La precisión con la que se trabajó el escaneado fue la siguiente: a una distancia de 10 metros el equipo visaba un punto cada 0.10 m. en dirección vertical y 0.15 m en dirección horizontal.
- El área de levantamiento en cada punto de control estuvo definida de la siguiente manera:

#### **En A2:**

Seleccionar el polígono desde las progresivas 0+050 hasta 0+025 en la margen frontal al equipo y luego descender por el cauce tomando la mayor área posible.

**En A1:**

Seleccionar el polígono tomando las progresivas 0+055 de ambas márgenes y luego ir descendiendo por los capuchones ubicados en el borde de la zona de deyección. Se puede tomar algunos puntos más en la parte más cercana al equipo para abarcar una mayor área.

**En A6:**

Seleccionar el polígono tomando las progresivas desde 0+025 hasta 0+055 en la margen frontal al equipo tomando las progresivas 0+055 y 0+050 en la margen en la que está ubicado el equipo, luego descender por el cauce completando las áreas que se deban rellenar.

**En A5:**

Seleccionar el polígono desde la progresiva 0+025 hasta el inicio del cauce de la margen frontal al equipo. Luego descender hasta el cauce y abarcar la mayor área posible. Para esta condición, cuando se delimite el polígono, tomar solamente el cauce. Es decir, tomar el terreno que está justo debajo de la traba, luego delimitar la línea de intersección entre el muro y el cauce y luego subir por la línea frontera entre la pirca y el muro, ya que se debe evitar levantar el muro y la compuerta.

**En A3:**

Seleccionar el polígono desde la progresiva 0+025 hasta el inicio del cauce de la margen frontal al equipo. Luego descender hacia el cauce abarcando la mayor área posible que complemente el levantamiento del resto de puntos, sin seleccionar el muro ni la compuerta para este caso.

Recomendaciones:

- El orden del escaneado topográfico recomendado es el siguiente: A2-A1-A6-A5-A3. También puede ser: A3-A2-A1-A6-A5.
- Al visar un tramo por primera vez, tratar de que el área de levantamiento abarque la mayor parte del cauce para reducir espacios vacíos en el escaneado.
- Si al configurar el equipo de topografía y en el proceso de referenciamiento, el equipo muestre mucha variación en planimetría, se debe cambiar el punto de referencia.

## c.2 MEDICIÓN DE VARIABLES

- **Tirantes:** En cada sección de control se acondicionó un sensor ultrasónico de alta frecuencia, que permitió conocer la variación del tirante del flujo en el tiempo y durante cada ensayo experimental. Los registros filmicos también registraron el tiempo de llegada del frente de onda a cada estación de control, permitiendo a su vez conocer la velocidad de llegada de la misma. Esta información fue la que finalmente pudo usarse para calibrar el modelo numérico.
- **Velocidad:** Se determinó la velocidad del frente de onda mediante un mallado reticular equidistante (cada 1.0 m), tomando como referencia la línea central del cauce de la quebrada sobre la cual se desplazó el flujo de escombros en cada ensayo experimental. Los registros filmicos permitieron cuantificar el tiempo que toma el flujo en transitar dichas líneas equidistantes; a partir de estos datos se calculó la velocidad del flujo.

### 3.3.2 METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA - TRABAJO DE GABINETE

Luego del control de calidad de la base de datos experimentales, se procedió a ingresarlos en el modelo numérico OpenFOAM. Para ello fue necesario en primer lugar definir el dominio, es decir, la malla base para el cálculo, según la geometría de la quebrada, para ello, se realizó el procesamiento de la nube de puntos de la topografía en el software Trimble RealWorks (Figura 3.12).

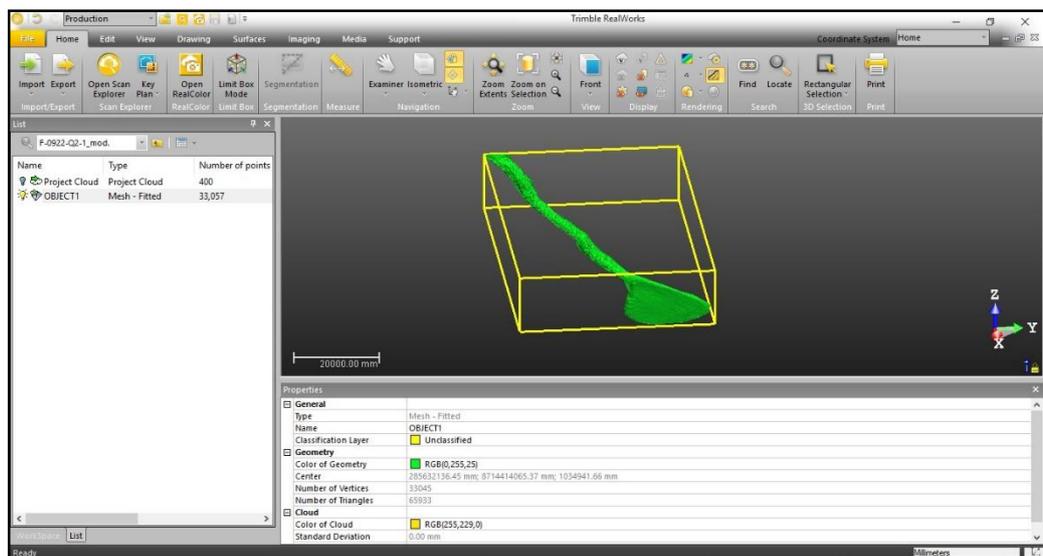


Figura 3.12: Procesamiento de nube de puntos de la topografía de la quebrada.

Se realizó luego el refinamiento y suavizado de la superficie obtenida, como se muestra en la Figura 3.13.

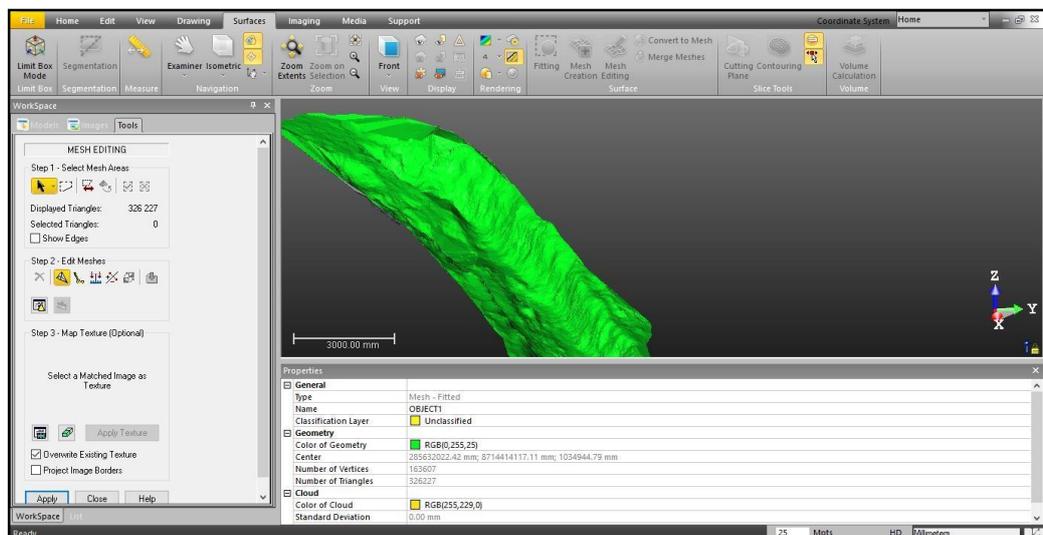


Figura 3.13: Refinamiento y suavizado de la superficie de la quebrada.

Ya creada la superficie, ésta fue importada en el Civil 3D para hacer algunas correcciones a la triangulación. Un dato importante fue el traslado de la superficie al origen, a fin de facilitar el manejo de las coordenadas, posterior a ello se extrajo la superficie como se muestra en la Figura 3.14.

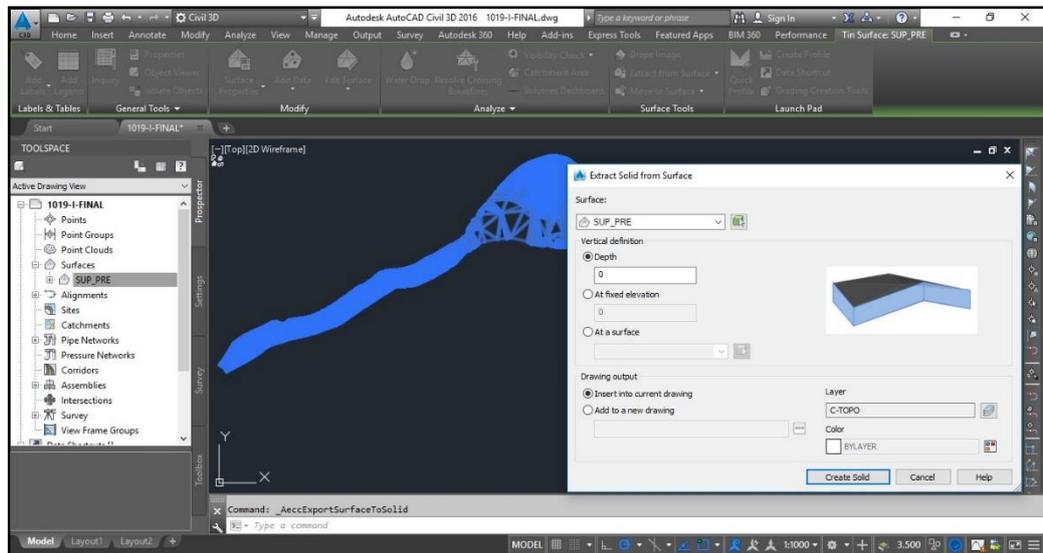


Figura 3.14: Extracción de la superficie de la quebrada en formato .stl

Una vez extraída la superficie en formato .stl, ésta fue incluida dentro del modelo OpenFOAM, a continuación, en la Figura 3.15, se puede visualizar dicha superficie usando la extensión ParaView.

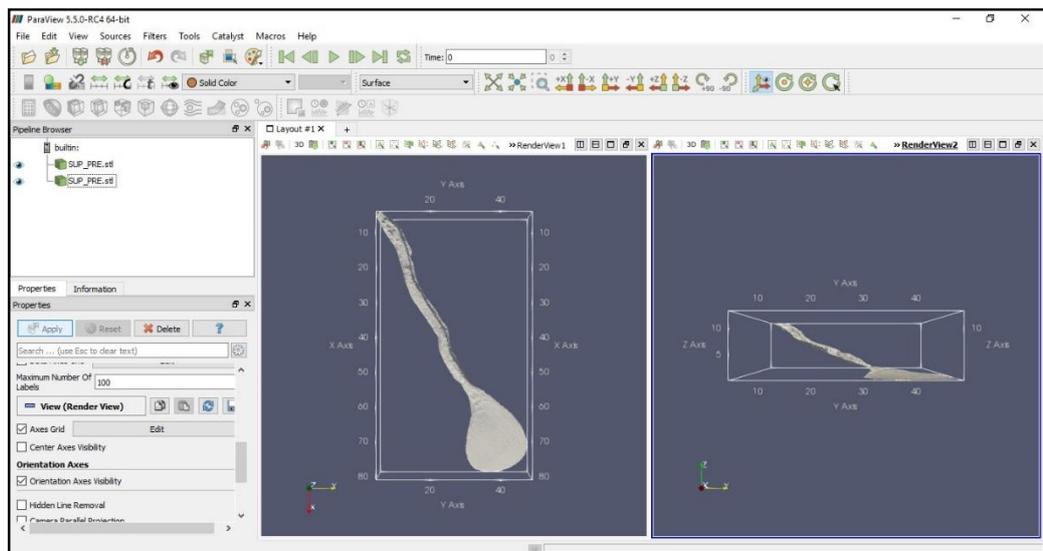


Figura 3.15: Superficie de la quebrada en formato .stl.

Asimismo, fue necesario crear una superficie (Figura 3.16) que represente el volumen del material del flujo de escombros (lodo + grava) dentro del reservorio según el nivel del tirante de prueba (1.0 m).

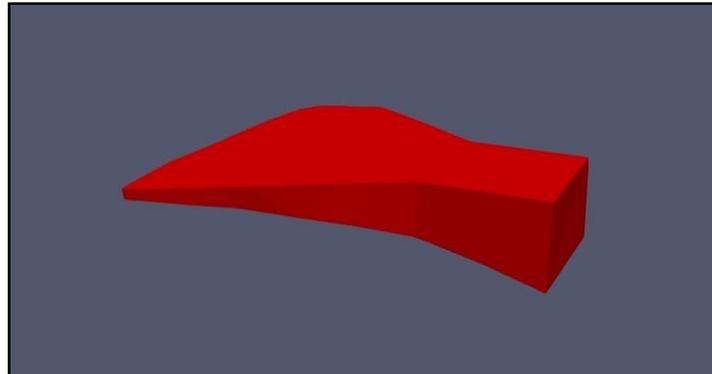


Figura 3.16: Superficie del material de flujo de escombros en formato .stl.

#### a GENERACIÓN DE LA MALLA

El primer paso fue crear una malla de fondo estructurada usando la utilidad *blockMesh*, que cubra la superficie total de la quebrada.

Primero se definieron los vértices, orientados en sentido anti horario, luego, se definió el bloque de hexaedros, indicando el número de celdas en cada dirección y la relación de expansión de las mismas.

Archivo OpenFOAM - (*blockMeshDict*).

```

/*----- C++ -----*/
|=====|
| \ \ / \ / F i e l d           | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ / \ / O peration        | Version: 2.3.0
| \ \ / \ / A nd              | Web:      www.OpenFOAM.org
| \ \ / \ / M anipulation     |
|-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       blockMeshDict;
}

// *****

convertToMeters 1;

```



Inicialmente se indica la superficie general. Se le dio el nombre de quebrada, igual al archivo .obj, sin embargo, podía nombrarse distinto.

También se indicaron los parches de contorno, en formato .obj, así como una caja (box) para refinar la zona del material en el reservorio.

```
geometry
{
  quebrada.obj
  {
    type triSurfaceMesh;
    name quebrada;
  }

  top.obj
  {
    type triSurfaceMesh;
    name atmosphere;
  }

  front.obj
  {
    type triSurfaceMesh;
    name front;
  }

  right.obj
  {
    type triSurfaceMesh;
    name right_side;
  }

  left.obj
  {
    type triSurfaceMesh;
    name left_side;
  }

  out.obj
  {
    type triSurfaceMesh;
    name outlet;
  }

  box // Región definida dentro de la malla (caja)
  {
    type searchableBox;
    min (0 0 13);
    max (5.5 6 14.5);
  }
};
```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/system/snappyHexMeshDict -  
Modelo Numérico Hidráulico.

1. `castellatedMesh`: Intersecta, remueve celdas y refina.

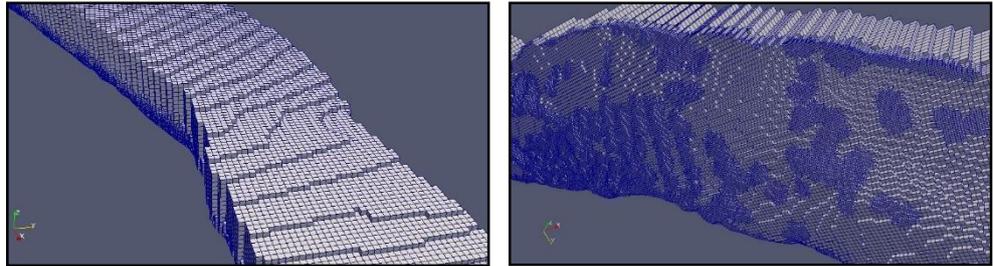


Figura 3.17: Intersección, refinamiento y eliminación de celdas, según los parámetros de `castellatedMeshControls`.

`castellatedMeshControls`

```
// Parámetros de refinamiento
//Número máximo de celdas por procesador durante el
refinamiento (cuando se ejecuta en paralelo).
    maxLocalCells 1500000;

//Número máximo de celdas totales durante el refinamiento,
antes de la eliminación de celdas.
    maxGlobalCells 18000000;

//Número mínimo de celdas a refinar para que se ejecute el
proceso de refinamiento. Si minRefinementCells ≥ número de
celdas para refinar, el refinamiento de la superficie se
detiene.
    minRefinementCells 0;

//Número de celdas de refinamiento entre niveles. A mayor
número, el refinamiento es más lento.
    nCellsBetweenLevels 3;
```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/system/snappyHexMeshDict -  
Modelo Numérico Hidráulico.

```
// Características explícitas de refinamiento de borde

//Especifica un nivel para cada celda intersectada por sus
bordes.
    features
    (
        {
            file "quebrada.eMesh";
            level 2;
        }
    );
```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/system/snappyHexMeshDict -  
Modelo Numérico Hidráulico.

El archivo “`quebrada.eMesh`”, se crea automáticamente al usar la utilidad `surfaceFeatureExtract` y se localiza en la carpeta `constant/triSurface`, donde se indican los bordes usados para el refinamiento.

```

// Refinamiento basado en la superficie

//Se especifican 02 niveles de refinamiento para celdas en
relación a superficies definidas anteriormente, distintas a la
superficie principal.
//El primero es el nivel mínimo, cada celda que interseca a la
superficie se refina hasta este nivel.
El segundo es el nivel máximo, las celdas donde las
intersecciones forman un ángulo > resolveFeatureAngle, se
refinan hasta este nivel máximo.
//NOTA: Cada nivel de refinamiento divide una celda en 8.
refinementSurfaces
{
  //Parches
  quebrada
  {
    level (1 2);
    patchInfo { type wall; }
  }

  "(atmosphere|front|outlet)"
  {
    level (0 0);
    patchInfo { type patch; }
  }

  "(right_side|left_side)"
  {
    level (0 0);
    patchInfo { type wall; }
  }
}

resolveFeatureAngle 30;

```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/system/snappyHexMeshDict -  
Modelo Numérico Hidráulico.

```

// Refinamiento de regiones

//Se especifica el nivel de refinamiento para celdas en relación
a regiones definidas anteriormente, dentro del dominio.
refinementRegions
{
  box
  {
    mode inside;
    levels ((1.0 2));
  }
}

```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/system/snappyHexMeshDict -  
Modelo Numérico Hidráulico.

```
// Selección de la malla

//Después de agregados los parámetros de refinamiento de la
superficie y se han intersectado las celdas, se define punto un
dentro de la malla de fondo para indicar la región las celdas de
que van a ser conservadas (dentro o fuera de superficie). la
//NOTA: Este punto nunca debe estar en una cara, siempre una
celda, incluso luego del refinamiento. en

    locationInMesh (27.983 17.121 7.536);

// Si cualquier faceZones (especificado en
refinementSurfaces), están solo en los límites de las
correspondientes cellZones o también permiten caras de zonas
independientes, no se usa si no hay faceZones.

    allowFreeStandingZoneFaces true;
```

FUENTE: OpenFOAM/figuroa-2.3.0/run/df-RF/system/snappyHexMeshDict -  
Modelo Numérico Hidráulico.

## 2. snap: Suaviza los bordes.

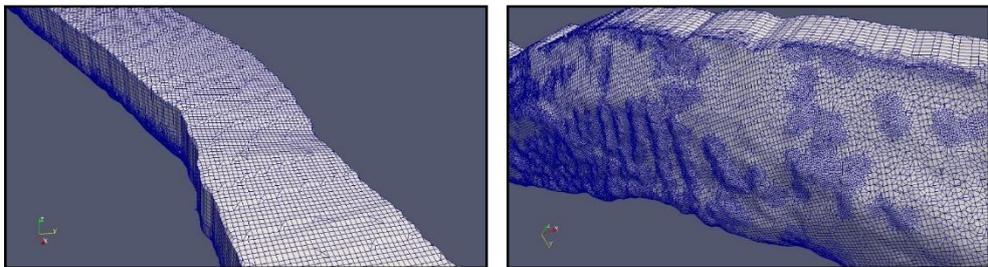


Figura 3.18: Suavizado de los bordes, según los parámetros de snapControls.

snapControls

Por lo general se toman estos valores por defecto.

```
//Número de iteraciones de suavizado de parche antes de
encontrar correspondencia a la superficie.
    nSmoothPatch 3;

//Relación de distancia para que los puntos sean atraídos por
el punto superficie o borde característico, hasta la longitud
de borde máxima local.
    tolerance 2.0;

//Número de iteraciones de relajación de desplazamiento de
malla.
    nSolveIter 30;

//Número máximo de iteraciones de relajación de suavizado.
    nRelaxIter 5;
// Características de suavizado:
//Número de iteraciones de suavizado de borde característico.
    nFeatureSnapIter 10;
```

```

//Detecta características (geométricas), muestreando la
superficie.
    implicitFeatureSnap false;

//Usa castellatedMeshControls::features
    explicitFeatureSnap true;

//Detecta características entre múltiples superficies.
// (Solamente para explicitFeatureSnap, default = false).
    multiRegionFeatureSnap false;

```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/system/snappyHexMeshDict -  
Modelo Numérico Hidráulico.

### 3. addLayers: Crea capas.

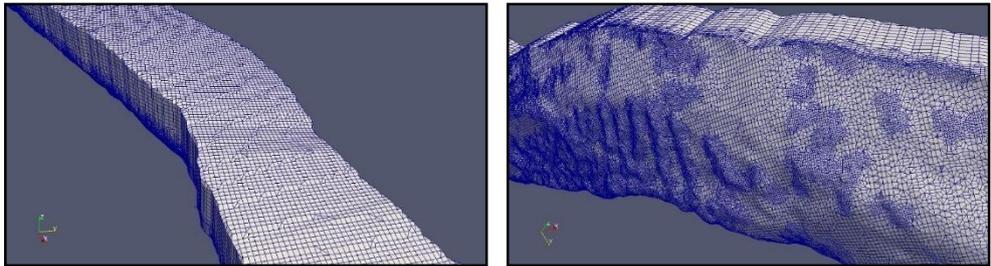


Figura 3.19: Adición de capas, según los parámetros de addLayers.

addLayersControls

```

//Interruptor que establece si los espesores de capa
especificados son relativos al tamaño de celda no distorsionada
fuera de capa o absoluto.
    relativeSizes true;

// Por parche final (;No geometría!). La información de la
capa.
    layers
    {
        "capas.*"
        {
            nSurfaceLayers 3;
        }
    }

// Factor de expansión para la malla de capa, aumenta de
tamaño de una capa a la otra.
    expansionRatio 1.3;

//Espesor de la capa más alejada de la pared, por lo general
en combinación con tamaños relativos, según la entrada en
relativeSizes.
    finalLayerThickness 0.4;

//Grosor mínimo de la capa de celda, si por alguna razón no
puede estar por encima de minThickness, no agrega capa.
    minThickness 0.1;

```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/system/snappyHexMeshDict -  
Modelo Numérico Hidráulico.

Características avanzadas: Por lo general se toman estos valores por defecto.

```
//Número de capas de caras conectadas que no crecen si los
puntos no se extruyen; ayuda a la convergencia de adición de
capa cerca a las características.
nGrow 0;

//Ángulo por encima del cual la superficie no se extruye.
featureAngle 60;

//Número máximo de iteraciones de relajación de suavizado.
nRelaxIter 3;

//Número de iteraciones suavizadas de las normales de
superficie.
nSmoothSurfaceNormals 1;

//Número de iteraciones de suavizado de la dirección de
movimiento de la malla interior.
nSmoothNormals 3;

//Suaviza el grosor de la capa sobre parches de superficie.
nSmoothThickness 10;

//Detiene el crecimiento de la capa en celdas altamente
deformadas.
maxFaceThicknessRatio 0.5;
//Reduce el crecimiento de la capa donde el grosor de la relación
a la distancia media es grande.
maxThicknessToMedialRatio 0.3;

//Ángulo usado para recoger los puntos del eje medial.
minMedianAxisAngle 90;

//Crea una región de almacenamiento intermedio para nuevas
terminaciones de capa.
nBufferCellsNoExtrude 0;

//Número máximo total de iteraciones de adición de capa.
nLayerIter 50;

//Número máximo de iteraciones después de las cuales se utilizan
los controles en el sub-diccionario meshQuality.
nRelaxedIter 20
```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/system/snappyHexMeshDict -  
Modelo Numérico Hidráulico.

La calidad de la malla se controla según los siguientes parámetros, la mayoría son valores tomados por defecto, excepto minVol, minTetQuality, minArea, dentro del diccionario meshQualityDict.

```
//Configuración de calidad genérica de malla.
meshQualityControls
{
    #include "meshQualityDict"

    {
        //Máxima No-ortogonalidad permitida.
        maxNonOrtho 75;
    }

    //Avanzado

    //Número de iteraciones de distribución de error.
    nSmoothScale 4;

    //Cantidad para reducir el desplazamiento en los puntos de
    error.
    errorReduction 0.75;
}
```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/system/snappyHexMeshDict - Modelo Numérico Hidráulico.

#### Archivo OpenFOAM - (*meshQualityDict*).

```
//Máxima No-ortogonalidad permitida en grados °.
maxNonOrtho 75;

//Máxima asimetría permitida de las caras de los bordes.
maxBoundarySkewness 25;
//Máxima asimetría permitida de las caras internas.
maxInternalSkewness 8;

//Máxima concavidad permitida.
maxConcave 80;

//Volumen de pirámide mínimo.
minVol -1e-02;

//Calidad mínima de las celdas tetrahédricas formadas por el
centro de las caras y triángulos de descomposición mínima del
punto base variable y el centro de la celda.
minTetQuality -1e14;

//Área mínima de la cara.
minArea 1e-07;

//Giro mínimo de la cara. Producto punto de la cara normal y
los centros de las caras normales a los triángulos.
minTwist 0.02;
```

```

//Es una medida de cuanto fuera del área de la celda es a
otras celdas.
minDeterminant 0.001;

//Posición relativa de la cara en relación a los centros de
las celdas. De 0->0.5, (0.5 para malla ortogonal).
minFaceWeight 0.05;

//Relación de volumen de celdas vecinas (0 -> 1).
minVolRatio 0.01;

//Como giro de cara, pero ahora por triángulo.
minTriangleTwist -1;

```

FUENTE: OpenFOAM/figuroa-2.3.0/run/df-RF/system/meshQualityDict - Modelo Numérico Hidráulico.

```

//Avanzado
writeFlags //Escritura de flags
(
    scalarLevels //Escribe volScalarField con cellLevel para
posprocesamiento.
    layerSets //Escribe cellSets, faceSets o caras en
capas.
    LayerFields //Escribe volScalarField para cobertura de
capa.
);
//La tolerancia de escritura debe ser mayor que este valor.
mergeTolerance 1e-6;

```

FUENTE: OpenFOAM/figuroa-2.3.0/run/df-RF/system/snappyHexMeshDict - Modelo Numérico Hidráulico.

Finalmente, la malla terminada fue la siguiente:

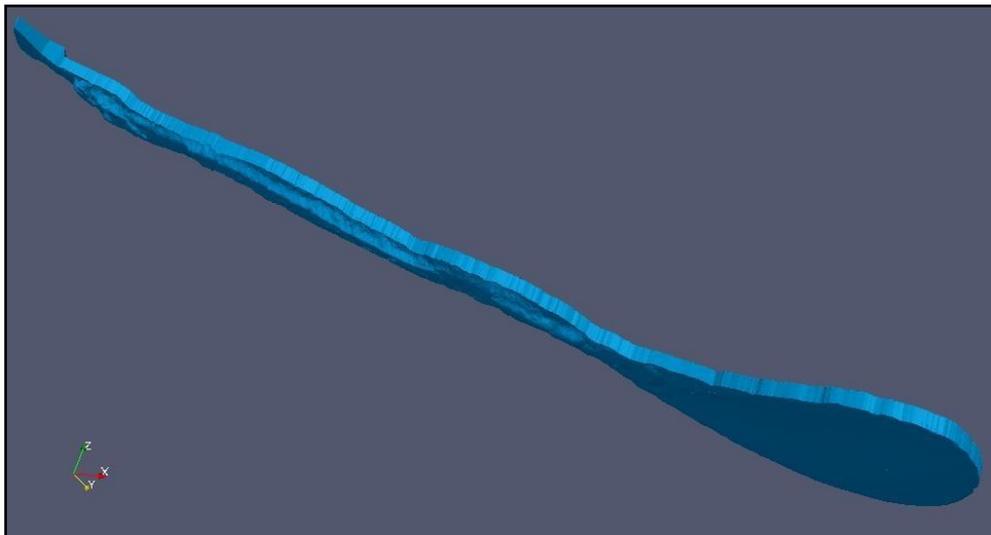


Figura 3.20: Malla final de la quebrada.

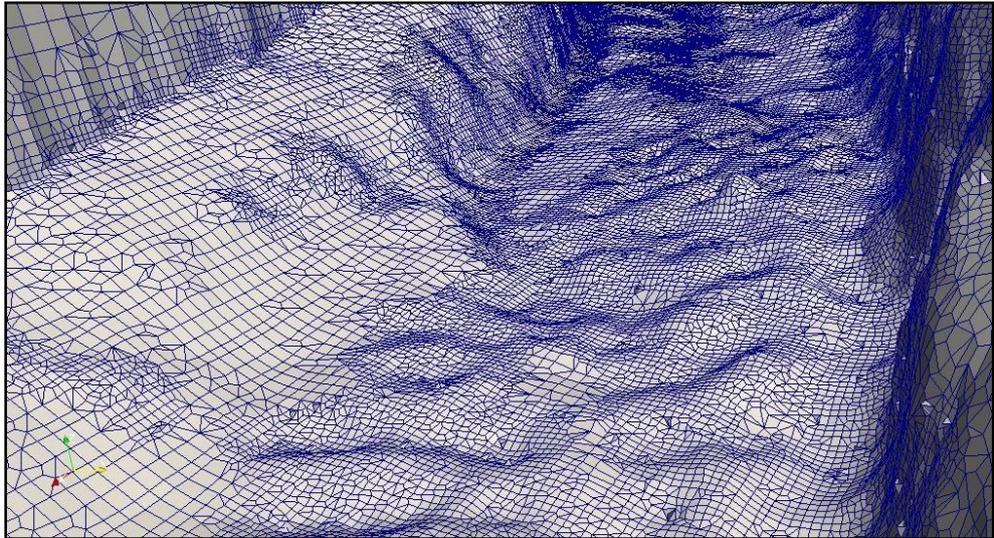


Figura 3.21: Vista de un tramo interior de la malla final.

## b CONDICIONES DE CONTORNO

Al construir la malla, la superficie exterior del dominio se dividió en una serie de caras o parches a los cuales se asignó condiciones para cada variable:

Archivo OpenFOAM

Condiciones de contorno para la fase de aire (*alpha1*)

```

/*----- C++ -----*/
|=====|
| \ \ \ / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ \ / | O p e r a t i o n | Version: 2.3.0
| \ \ \ / | A n d | Web: www.OpenFOAM.org
| \ \ \ / | M a n i p u l a t i o n |
|-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       alpha1;
}
// *****

dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

internalField   uniform 1;

boundaryField
{
    "(atmosphere|front)"
    {
        type      inletOutlet;
        inletValue  uniform 1;
        value      uniform 1;
    }
}

```

```

    "(right_side|left_side|quebrada|capas)"
    {
        type                zeroGradient;
    }

    outlet
    {
        type                zeroGradient;
    }
}
// * * * * *

```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/0/alpha.air - Modelo Numérico Hidráulico.

## Archivo OpenFOAM

Condiciones de contorno para la fase de lodo (*alpha2*)

```

/*----- C++ -----*/
|=====|
| \\      /  F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      /  O peration     | Version: 2.3.0                      |
| \\      /  A nd           | Web: www.OpenFOAM.org             |
| \\      /  M anipulation  |                                  |
|=====|
/*----- C++ -----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       alpha2;
}
// * * * * *

dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    "(atmosphere|front)"
    {
        type                inletOutlet;
        inletValue          uniform 0;
        value                uniform 0;
    }

    "(right_side|left_side|quebrada|capas)"
    {
        type                zeroGradient;
    }

    outlet
    {
        type                zeroGradient;
    }
}
// * * * * *

```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/0/alpha.slurry - Modelo Numérico Hidráulico.

## Archivo OpenFOAM

### Condiciones de contorno para la fase de grava (*alpha3*)

```
/*----- C++ -----*\
| ===== |
| \ \ / / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / / O p e r a t i o n | Version: 2.3.0 |
| \ \ / / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ / / M a n i p u l a t i o n |
|-----*\

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       alpha3;
}
// ***** //

dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    "(atmosphere|front)"
    {
        type          inletOutlet;
        inletValue     uniform 0;
        value          uniform 0;
    }

    "(right_side|left_side|quebrada|capas)"
    {
        type          zeroGradient;
    }

    outlet
    {
        type          zeroGradient;
    }
}
// ***** //
```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/0/alpha.gravel - Modelo Numérico Hidráulico.

## Archivo OpenFOAM

### Condiciones de contorno para la presión (*p\_rgh*)

```

/*----- C++ -----*/
|=====|
| \ \ / / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / / O p e r a t i o n | Version: 2.3.0 |
| \ \ / / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ / / M a n i p u l a t i o n |
|-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       p_rgh; //Presión dinámica
}
// ***** //

dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 422.97;
//Densidad de la mezcla*gravedad*diámetro mayor de grano para
//garantizar la fricción granular según la superficie.

boundaryField
{
    "(atmosphere|front)"
    {
        type          totalPressure;
        rho           rho;
        psi           none; //Compresibilidad
        gamma         1.4; //Relación de calores específicos
        (cp/cv) a la temperatura ambiente.
        p0            uniform 422.97; //[Pa]
        value         uniform 422.97;
    }

    "(right_side|left_side|quebrada|capas)"
    {
        type          zeroGradient;
    }

    outlet
    {
        type          zeroGradient;
    }
}
// ***** //

```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/0/p\_rgh - Modelo Numérico Hidráulico.

## Archivo OpenFOAM

### Condiciones de contorno para la velocidad ( $U$ )

```

/*----- C++ -----*/
|=====|
| \ \ / / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / / O p e r a t i o n | Version: 2.3.0 |
| \ \ / / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ / / M a n i p u l a t i o n | |
|-----|

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    location     "0";
    object       U;
}
// *****

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    "(atmosphere|front)"
    {
        type          pressureInletOutletVelocity;
        value          uniform (0 0 0);
    }

    "(right_side|left_side|quebrada|capas)"
    {
        type          fixedValue;
        value          uniform (0 0 0);
    }

    outlet
    {
        type          inletOutlet;
        inletValue     uniform (0 0 0);
        value          uniform (0 0 0);
    }
}
// *****

```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/0/U - Modelo Numérico Hidráulico.

## Archivo OpenFOAM

### Condiciones de contorno para la viscosidad SubGridScale (*nuSgs*)

```
/*----- C++ -----*/
|=====|
| \ \ / / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / / O p e r a t i o n | Version: 2.3.0 |
| \ \ / / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ / / M a n i p u l a t i o n |
|-----|

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       nuSgs;
}
// *****

dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    "(atmosphere|front)"
    {
        type      zeroGradient;
    }

    "(right_side|left_side|quebrada|capas)"
    {
        type      zeroGradient;
    }

    outlet
    {
        type      zeroGradient;
    }
}
// *****
```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/0/nuSgs - Modelo Numérico Hidráulico.

## Archivo OpenFOAM

### Condiciones de contorno para la viscosidad cinemática turbulenta (*nuTilda*)

```
/*----- C++ -----*\
|=====|
| \ \ / / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / / O p e r a t i o n | Version: 2.3.0 |
| \ \ / / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ / / M a n i p u l a t i o n |
|-----*\

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       nuTilda;
}
// ***** //

dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    "(atmosphere|front)"
    {
        type          inletOutlet;
        inletValue    uniform 0;
        value         uniform 0;
    }

    "(right_side|left_side|quebrada|capas)"
    {
        type          fixedValue;
        value         uniform 0;
    }

    outlet
    {
        type          fixedValue;
        value         uniform 0;
    }
}
// ***** //
```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/0/nuTilda - Modelo Numérico Hidráulico.

## Archivo OpenFOAM

### Condiciones de contorno para la energía cinética turbulenta ( $k$ )

```
/*----- C++ -----*/
|=====|
| \ \ / / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / / | O peration | Version: 2.3.0 |
| \ \ / / | A nd | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ / / | M anipulation |
|-----|

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       k;
}
// *****
dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 1e-10;

boundaryField
{
    "(atmosphere|front)"
    {
        type          inletOutlet;
        inletValue    uniform 1e-10;
        value         uniform 1e-10;
    }

    "(right_side|left_side|quebrada|capas)"
    {
        type          fixedValue;
        value         uniform 1e-10;
    }

    outlet
    {
        type          fixedValue;
        value         uniform 1e-10;
    }
}
// *****
```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/0/k - Modelo Numérico Hidráulico.

### c CONFIGURACIÓN DEL CAMPO INICIAL

Se buscó especificar una condición inicial “No Uniforme”, basado en el método VOF, para ello fue necesario ejecutar previamente la utilidad *topoSet*, ajustando los parámetros del archivo *topoSetDict*, dentro de la carpeta *system*, a fin de establecer la zona de material.

### Archivo OpenFOAM - (*topoSetDict*)

```
// Lista de acciones, donde cada acción es un diccionario que
// contiene: nombre del conjunto, tipo y acción a realizar.
// La entrada de fuente varía según el tipo de conjunto, en
// este caso basado en la superficie.
actions
(
  {
    name      material;
    type      cellSet;
    action    new; //Crea nuevos conjuntos o zonas.
    source    surfaceToCell;
    sourceInfo
    {
      file          "material.stl"; //archivo .stl
      outsidePoints ((27.983 17.121 7.536)); //punto fuera
de la sup.
      includeCut    false; //celdas cortadas por la sup.
      includeInside true; //celdas dentro de la sup.
      includeOutside false; //celdas fuera de la sup.
      nearDistance  -1; //celdas con centro cerca a la
sup. (Desactivado)
      curvature     -100; //celdas dentro de nearDistance
y cerca a la curvatura de la sup. (Desactivado)
    }
  }
);
```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/system/topoSetDict - Modelo Numérico Hidráulico.

Posteriormente se ejecutó la utilidad *setFields* para definir dicho volumen según el porcentaje correspondiente a cada fase. Para ello se requirió de un archivo llamado *setFieldsDict*, ubicado dentro de la misma carpeta.

### Archivo OpenFOAM - (*setFieldsDict*)

```
regions
(
  surfaceToCell
  {
    file          "material.stl";
    outsidePoints ( (27.983 17.121 7.536) );
    includeCut    false;
    includeInside true;
    includeOutside false;
    nearDistance  -1;
    curvature     -100;
    fieldValues
    (
      volScalarFieldValue alpha.air 0
      volScalarFieldValue alpha.slurry 0.9288
      volScalarFieldValue alpha.gravel 0.0712
    );
  }
);
```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/system/setFieldsDict - Modelo Numérico Hidráulico.

#### d PROPIEDADES DEL FLUIDO

Siendo la temperatura promedio de la zona de estudio de 22° C, según tabla de propiedades termodinámicas, se tiene para el aire:

Cuadro 3.9: Propiedades físicas del aire a presión atmosférica.

Temperatura	Densidad	Viscosidad cinemática (nu)	Calor específico a P cte.	Calor específico a V cte.
	$\rho$	$\nu$	Cp	Cv
°C	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> /s (10 <sup>-5</sup> )	KJ/kg. K	KJ/kg. K
22	1.196	1.5344	1.0048	0.7178

FUENTE: Cengel, Y & Cimbala, J (2006). *Mecánica de fluidos*. Tablas y Gráficas de Propiedades (Unidades SI). Tabla A-9.

Para el lodo (mezcla de agua + sedimentos finos), siguiendo el modelo reológico de Herschel Bulkley, los parámetros requeridos son los siguientes:

Cuadro 3.10: Parámetros de modelo reológico Herschel Bulkley.

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
Contenido de agua	-	0.6	-
C <sub>v</sub>	Concentración volumétrica de sólidos	0.18796	-
P <sub>0v</sub>	Porcentaje volumétrico de arcilla	0.06576	-
$\tau_{00}$	Parámetro libre calibrado según ensayos de laboratorio.	30	Pa
$\rho_F$	Densidad aparente de la mezcla	1358	kg/m <sup>3</sup>
$\nu_0$	Viscosidad cinemática máxima	2	m <sup>2</sup> /s
$\tau_0$	Esfuerzo modificado según la concentración volumétrica de sólidos.	0.02209	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
k	Índice de consistencia	0.00031	m <sup>2</sup> /s
n	Índice de comportamiento (calibrado según modelo experimental)	0.34	-

FUENTE: UNI-UNALM-SQ&ICC. (2018).

Así mismo para la grava o granos más grandes según el modelo reológico Viscoplastico de Coulomb, los parámetros requeridos fueron:

**Cuadro 3.11: Parámetros de modelo reológico Viscoplastico de Coulomb.**

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$\delta$	Ángulo de fricción interna de la grava	37° (0.645772)	rad
$\rho_s$	Densidad de la mezcla	1358	kg/m <sup>3</sup>
$\nu_{\min}$	Viscosidad cinemática mínima	1x10 <sup>-6</sup>	m <sup>2</sup> /s
$\nu_0$	Viscosidad cinemática máxima	2	m <sup>2</sup> /s
$m_y$	Parámetro numérico calibrado según modelo experimental	0.2	s

FUENTE: UNI-UNALM-SQ&ICC. (2018).

Otros parámetros también fueron añadidos dentro del modelo tales como:

**Cuadro 3.12: Parámetros adicionales.**

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$\sigma_{12}$	Tensión superficial (aire - lodo)	0.0762	kg/s <sup>2</sup>
$\sigma_{13}$	Tensión superficial (aire - grava)	0.0762	kg/s <sup>2</sup>
$D_{23}$	Difusividad entre el lodo y la grava	0	m <sup>2</sup> /s
$\rho_s$	Densidad de la grava	2700	kg/m <sup>3</sup>
$\phi_s$	Diámetro de la grava	0.019085	m

FUENTE: Datos recopilados del modelo experimental.

Todos estos datos fueron acoplados dentro del archivo *transportProperties*, según se muestra a continuación:

## Archivo OpenFOAM - (transportProperties)

```

phases (air slurry gravel);
air
{
    transportModel Newtonian;
    nu nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1.5344e-5;
    rho rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1.196;
}

slurry
{
    transportModel HerschelBulkleyDebrisFlow;
    nu nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 0.05;//dummy
    HerschelBulkleyDebrisFlowCoeffs
    {
        waterContent waterContent [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 0.6;
        Cv Cv [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 0.18796; //Basado en la densidad de la
mezcla 1358 kg/m^3
        P0v P0v [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 0.06576; //Basado en la densidad de
la arcilla seca 1700 kg/m^3
        tau00 tau00 [ 1 -1 -2 0 0 0 0 ] 30; //Valor calibrado
        rhoF rhoF [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1358;
        nu0 nu0 [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 2;
        //dummies sobrescritos, necesarios para la consistencia.
        tau0 tau0 [ 0 2 -2 0 0 0 0 ] 0.02209;// tao00 basado en 30Pa,
según ensayos experimentales.
        k k [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 0.00031;
        n n [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 0.34;
    }
    rho rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1358;
}

gravel
{
    transportModel PudasainiCoulombViscoPlastic;
    nu nu [0 2 -1 0 0 0 0] 0.05;// dummy, innecesario
    rho rho [1 -3 0 0 0 0 0] 1358;
    PudasainiCoulombViscoPlasticCoeffs
    {
        delta delta [0 0 0 0 0 0 0] 0.645772; // 37° en
radianes (ángulo de reposo de la grava).
        rhoS rhoS [1 -3 0 0 0 0 0] 1358;
        nuMin nuMin [0 2 -1 0 0 0 0] 1.e-6;
        nu0 nu0 [0 2 -1 0 0 0 0] 2;
        my my [0 0 1 0 0 0 0] 0.2;
    }
}

//Coeficientes de tensión superficial
sigma12 sigma12 [1 0 -2 0 0 0 0] 0.0762;
sigma13 sigma13 [1 0 -2 0 0 0 0] 0.0762;
// Difusividad entre fases miscibles.
D23 D23 [0 2 -1 0 0 0 0] 0;
//Densidad de la grava
rhoS rhoS [1 -3 0 0 0 0 0] 2890;
//Diámetro de grano (Innecesario)
dS dS [0 1 0 0 0 0 0] 0.019085;

```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/constant/transportProperties  
Modelo Numérico Hidráulico.

Así también se especifica para la aceleración de la gravedad:

#### Archivo OpenFOAM - (*g*)

```
FoamFile
{
  version      2.3.0;
  format       ascii;
  class        uniformDimensionedVectorField;
  location     "constant";
  object       g;
}
// * * * * *

dimensions     [0 1 -2 0 0 0 0];
value          (0 0 -9.81);

// * * * * *
```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/constant/g - Modelo Numérico Hidráulico.

### e MODELO DE TURBULENCIA

#### Archivo OpenFOAM - (*turbulenceProperties*)

```
// * * * * *

simulationType  LESModel;

// * * * * *
```

FUENTE: OpenFOAM/figueroa-2.3.0/run/df-RF/constant/turbulenceProperties - Modelo Numérico Hidráulico.

#### Archivo OpenFOAM - (*LESProperties*)

```
// * * * * *

LESModel          oneEqEddy;
delta              smooth;
printCoeffs       on;

oneEqEddyCoeffs
{
  ck               0.07;
  ce               1.05;
}

cubeRootVolCoeffs
{
  deltaCoeff       1;
}

PrandtlCoeffs
{
  delta            cubeRootVol;
  cubeRootVolCoeffs
  {
    deltaCoeff     1;
  }
}
```









```

alpha3
{
  nAlphaCorr      2;
  nAlphaSubCycles 1;
  alphaOuterCorrectors yes;
  cAlpha          1;

  MULESCorr      yes;
  nLimiterIter   3;

  solver          smoothSolver;
  smoother        symGaussSeidel;
  tolerance       1e-8;
  relTol          0;
}
pcorr
{
  solver          PCG;
  preconditioner
  {
    preconditioner GAMG;
    tolerance       1e-05;
    relTol          0;
    smoother        GaussSeidel;
    nPreSweeps      0;
    nPostSweeps     2;
    nFinestSweeps   2;
    cacheAgglomeration off;
    nCellsInCoarsestLevel 10;
    agglomerator    faceAreaPair;
    mergeLevels     2;
  }
  tolerance       1e-08;
  relTol          0;
  maxIter         500;
}

p_rgh
{
  solver          GAMG;
  tolerance       1e-08;
  relTol          0;
  smoother        GaussSeidel;
  nPreSweeps      0;
  nPostSweeps     2;
  nFinestSweeps   2;
  cacheAgglomeration on;
  nCellsInCoarsestLevel 3;
  agglomerator    faceAreaPair;
  mergeLevels     2;
}

p_rghFinal
{
  solver          PCG;
  preconditioner
  {
    preconditioner GAMG;
    tolerance       1e-07;
    relTol          0;
    nVcycles        2;
  }
}

```



## **i PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN**

Para realizar la simulación se hizo uso de un servidor HPC de 512 núcleos (cores). Para lograr este propósito fue necesario copiar la carpeta del modelo hacia la plataforma del servidor mediante el software FileZilla. Luego de haber ingresado a la cuenta de usuario correspondiente, fue necesario usar un script localizado dentro de la carpeta del modelo, conformado por las siguientes líneas de código:

```
#PBS -N debris-rf
#PBS -l nodes=10:ppn=16

cd $PBS_O_WORKDIR

NP=`cat $PBS_NODEFILE | wc -l`

mpirun      -np      $NP      --machinefile      $PBS_NODEFILE
debrisInterMixingFoam -parallel > log.out 2>&1
```

Finalmente, la secuencia de ejecución de la simulación fue la siguiente:

1. surfaceFeatureExtract
2. blockMesh
3. createPatch -overwrite
5. snappyHexMesh -overwrite
6. checkMesh -allGeometry
6. topoSet
7. setFields
8. decomposePar
9. qsub script.sh
10. reconstructPar

## **j POSPROCESAMIENTO**

Finalizada la simulación y habiendo extraídos los archivos de resultados del servidor, se procedió al posprocesamiento, ejecutando el comando paraFoam dentro del terminal; al ejecutar dicho comando se muestra en pantalla el software ParaView 2.4.0, donde se usaron distintas utilidades para tales fines.

## IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 ESCENARIO DE RESULTADOS Y CALIBRACIÓN

A continuación, se muestran los ensayos experimentales realizados en una gráfica que describe la posición del frente de onda vs tiempo, para distintos niveles de concentración de sedimentos y tirante inicial.

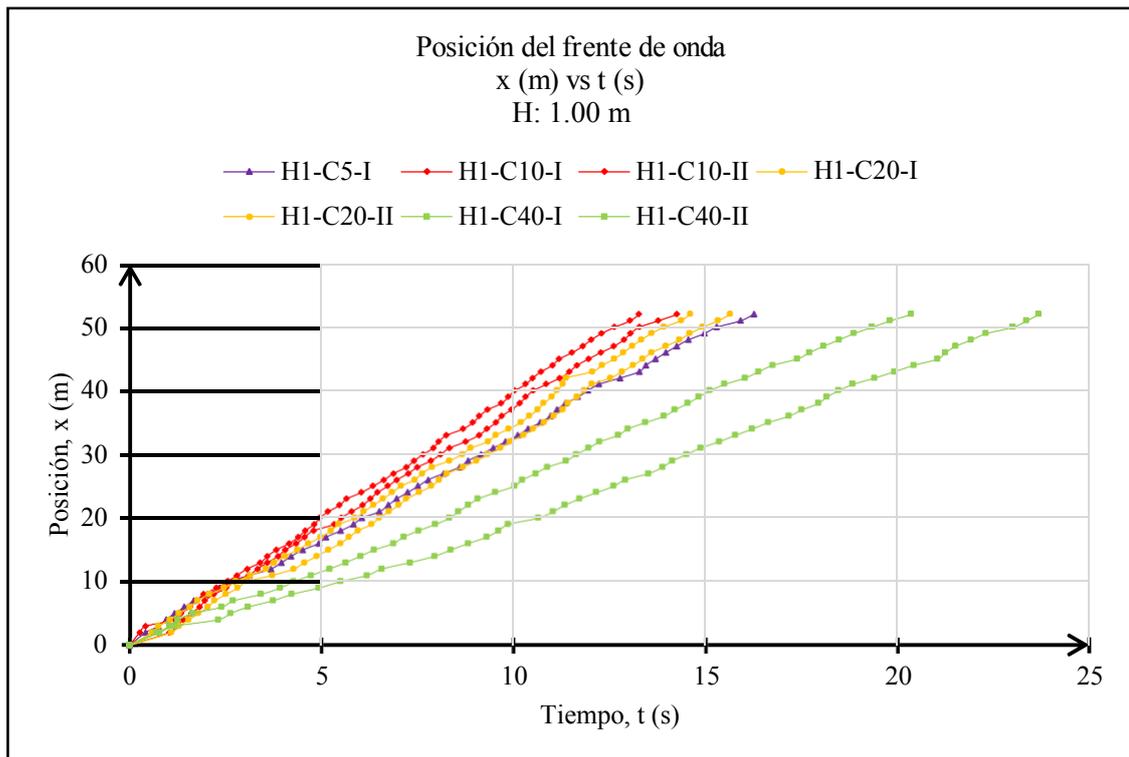


Figura 4.1: Posición del frente de onda del flujo de escombros vs tiempo para H:1.00 m y distintos niveles de concentración de sedimentos.

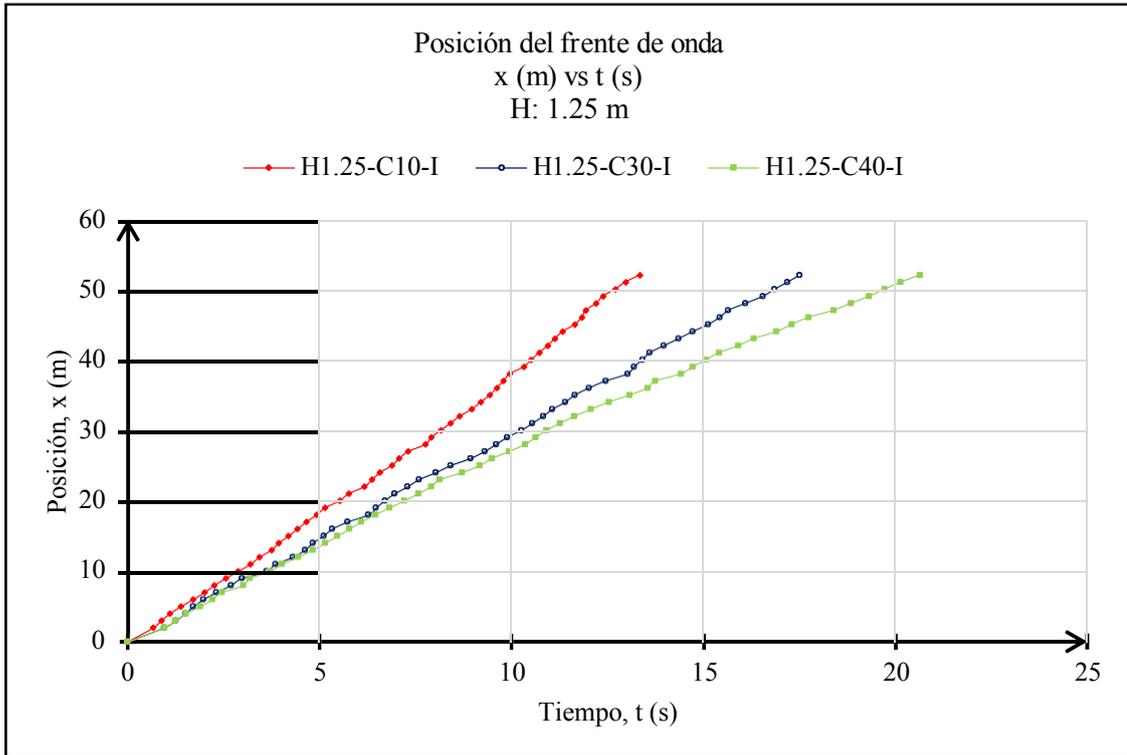


Figura 4.2: Posición del frente de onda del flujo de escombros vs tiempo para H:1.25 m y distintos niveles de concentración de sedimentos.

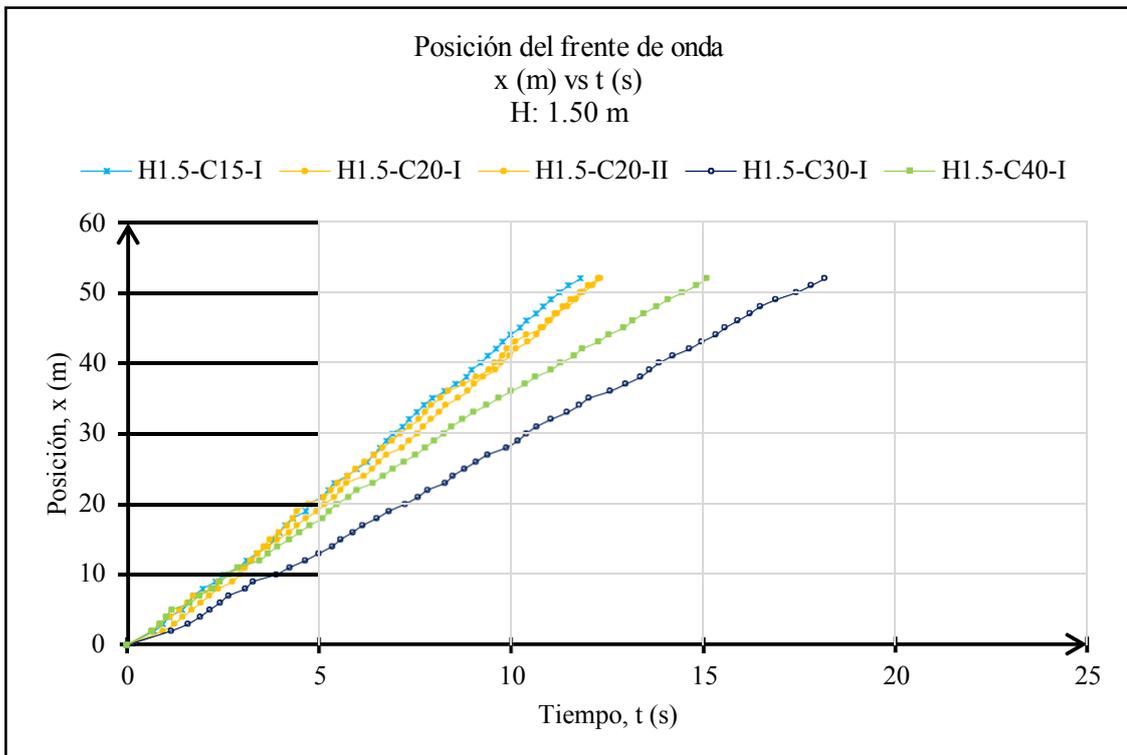


Figura 4.3: Posición del frente de onda del flujo de escombros vs tiempo para H:1.50 m y distintos niveles de concentración de sedimentos.

Se puede concluir que, a mayor concentración de sedimentos,  $C_v$ , la velocidad del flujo disminuye. Se debe considerar también que la densidad aparente de la mezcla, así como la viscosidad, afectan al tránsito del flujo de escombros.

Posteriormente, se consideraron los parámetros de los ensayos Q-H1-C40, es decir, con un tirante inicial de 1 m y concentración de sedimentos de 40%, por ser los más críticos. A continuación, se muestran los resultados del modelo numérico en comparación con los resultados experimentales del modelo físico.

### POSICIÓN DEL FRENTE DE ONDA VS TIEMPO

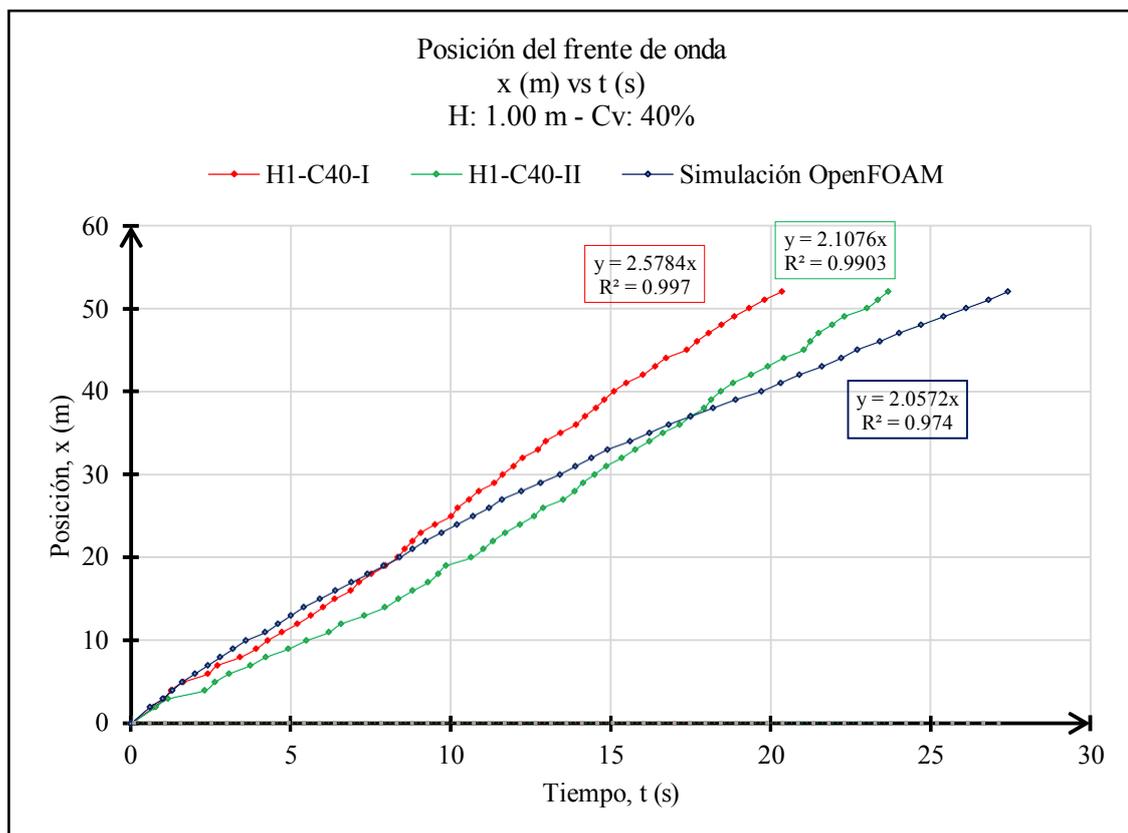


Figura 4.4: Posición del frente de onda del flujo de escombros para H:1.00 m y  $C_v$ : 40%.

## ANÁLISIS:

Según la figura 4.4, se observa que el avance del frente de onda del flujo de escombros realizado en el modelo experimental tiene una tendencia lineal, donde para el primer ensayo se tiene una velocidad media de 2.5784 m/s y para el segundo una velocidad media de 2.1076 m/s. Así también se considera tal metodología como válida ya que para el primer ensayo se tiene un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.997$  y para el segundo ensayo un  $R^2 = 0.9903$ , es decir que el modelo numérico tiene un buen ajuste con las variables reales de posición y velocidad.

Del mismo modo para el modelo simulado en OpenFOAM, se tiene una velocidad media de 2.0572 m/s y un  $R^2 = 0.974$ , equivalente a 97.4%, considerando que la metodología utilizada en el modelo es adecuada.

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA DEDUCIR LA HOMOGENEIDAD DE LAS VARIANZAS

La varianza se calcula usando la siguiente relación:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (4.1)$$

Cuadro 4.1: Resumen de resultados para el análisis estadístico de los ensayos de flujos de escombros.

ENSAYO	PENDIENTE	VARIANZA
H1-C40-I	2.5784	32.33
H1-C40-II	2.1076	44.74
Simulación OpenFOAM	2.0572	65.33

Posteriormente se calculó el estadístico  $F_{cal}$ :

$$F_{cal 1} = \frac{65.33}{32.33} = 2.02$$

$$F_{cal 2} = \frac{65.33}{44.74} = 1.46$$

Luego se buscó el valor de F tabulado para un 95% de probabilidad y con grados de libertad  $u_1$  que representa el numerador y  $u_2$ , el denominador; como para todos los ensayos se tomaron 52 datos, entonces:

$$u_1 = u_2 = u_3 = n - 2 = 50$$

Según la tabla de distribución acumulativa F, se tiene:

$$F_{tab 95\%,50,50} = 1.61$$

Comparando este valor con los F calculados:

$F_{cal 1} > F_{tab}$ , entonces las varianzas no son homogéneas.

$F_{cal 2} < F_{tab}$ , entonces las varianzas son homogéneas.

## **ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA DEDUCIR LA SIMILITUD DE LAS PENDIENTES**

Primero se calculó el estadístico  $t_{cal}$ :

$$t_{cal 1} = \frac{|m_1 - m_3|}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2}} = 0.00715$$

$$t_{cal 2} = \frac{|m_2 - m_3|}{\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_3^2}} = 0.00064$$

Luego se buscó el valor de t tabulado para un 95% de probabilidad y con grado de libertad  $(u_1, u_2) + u_3 - 2$ :

Según la tabla de distribución acumulativa t, se tiene:

$$t_{tab 95\%,102} = 1.66084$$

De esto se concluye que debido a que ambas t calculadas son menores que el t tabulado, las pendientes son estadísticamente similares.

Así también, se muestra la comparación del evento real con el evento simulado según el tránsito del flujo de escombros en cada sección de control.

Cuadro 4.2: Secciones de control.

SECCIÓN DE CONTROL	PROGRESIVA
01	0+002
02	0+008
03	0+020
04	0+027
05	0+035
06	0+043
07	0+052

FUENTE: UNI-UNALM-SQ&ICC. (2018).

En las siguientes figuras se muestran una serie de secciones donde se pudo controlar el paso del frente del flujo de escombros mostrando coincidencia entre los resultados del modelo numérico y las mediciones realizadas en el módulo experimental.

### SECCIÓN 01:



Figura 4.5: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 01.

## SECCIÓN 02:

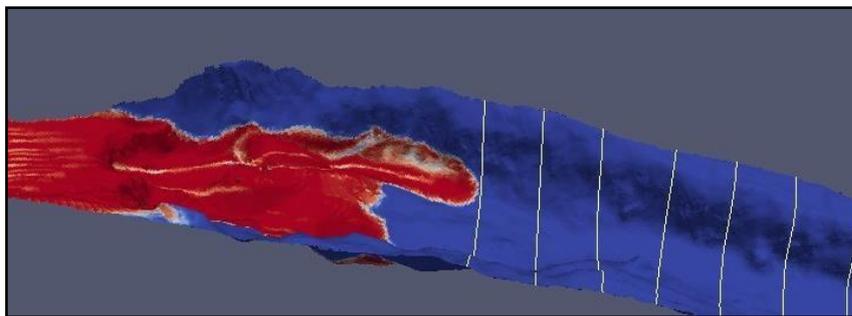


Figura 4.6: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 02.

## SECCIÓN 03:

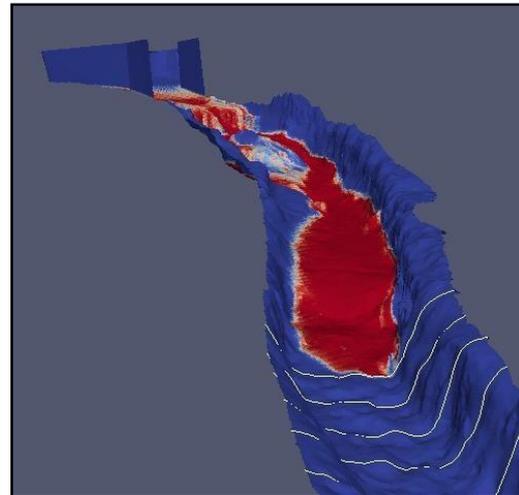


Figura 4.7: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 03.

#### SECCIÓN 04:

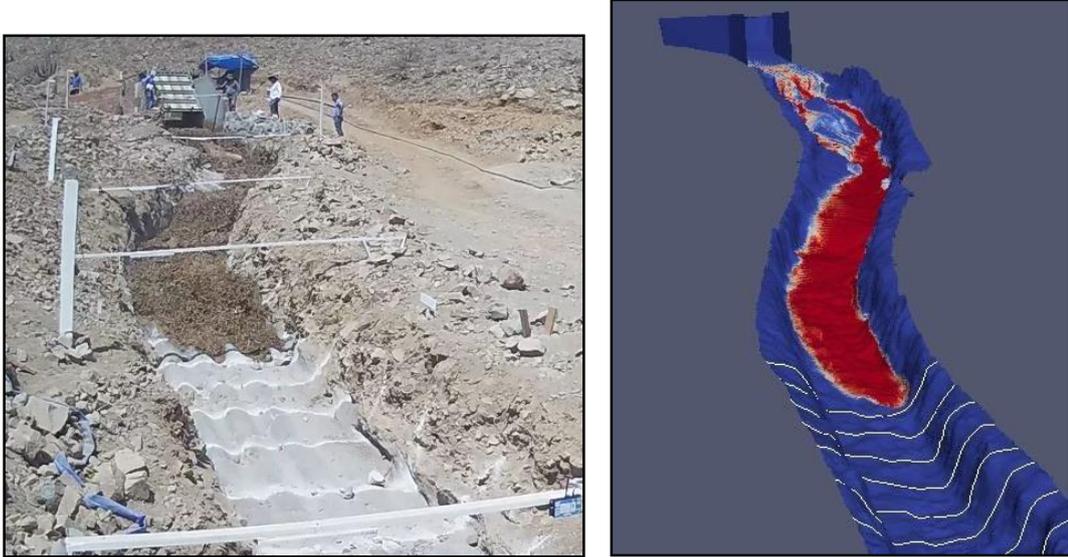


Figura 4.8: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 04.

#### SECCIÓN 05:

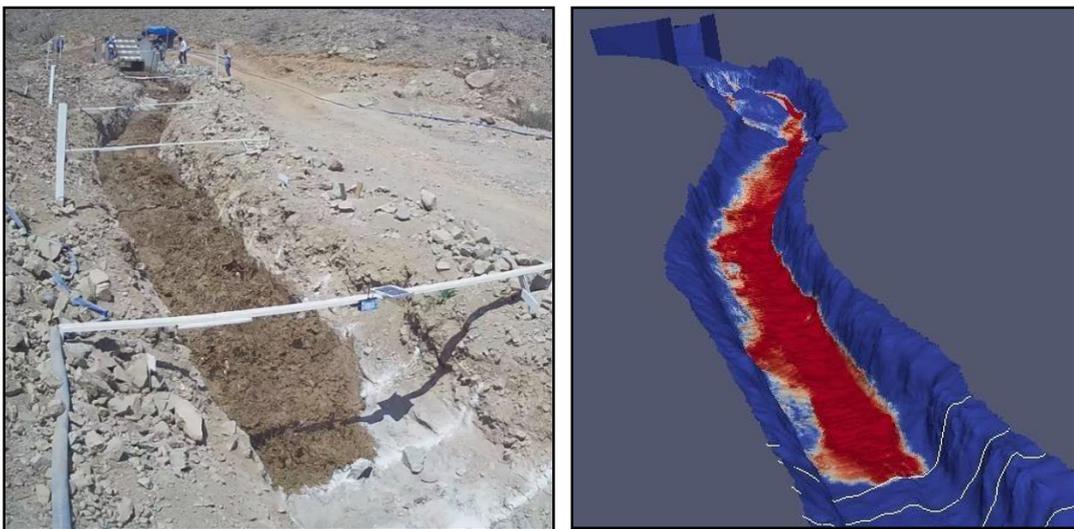


Figura 4.9: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 05.

## SECCIÓN 06:

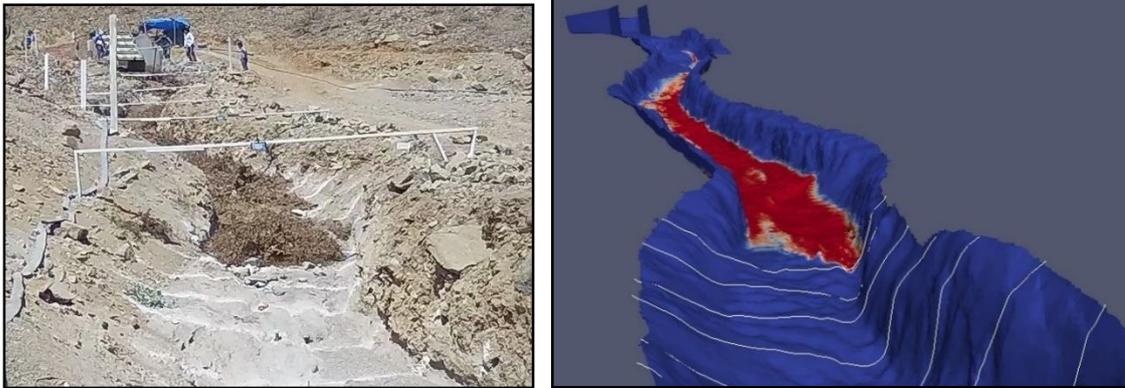


Figura 4.10: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 06.

## SECCIÓN 07:

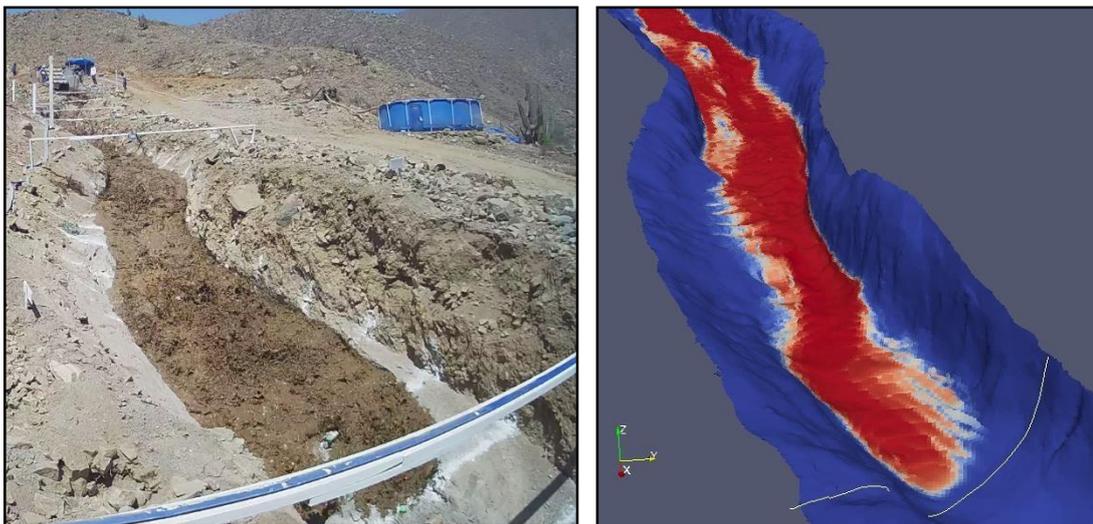


Figura 4.11: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico en la sección 07.

Según las imágenes puede apreciarse que el frente de onda del evento experimental en su mayoría tiene las mismas características que el modelo simulado en OpenFOAM, al pasar por la misma distancia según el mallado reticular realizado al cauce de la quebrada, siendo la distancia entre línea y línea marcada de color blanco, de un metro.

Así también, queda en evidencia que la mayor concentración de sedimentos gruesos se concentra en el frente de onda, seguido de los sedimentos finos.

## EVENTO FINALIZADO DE FLUJOS DE ESCOMBROS

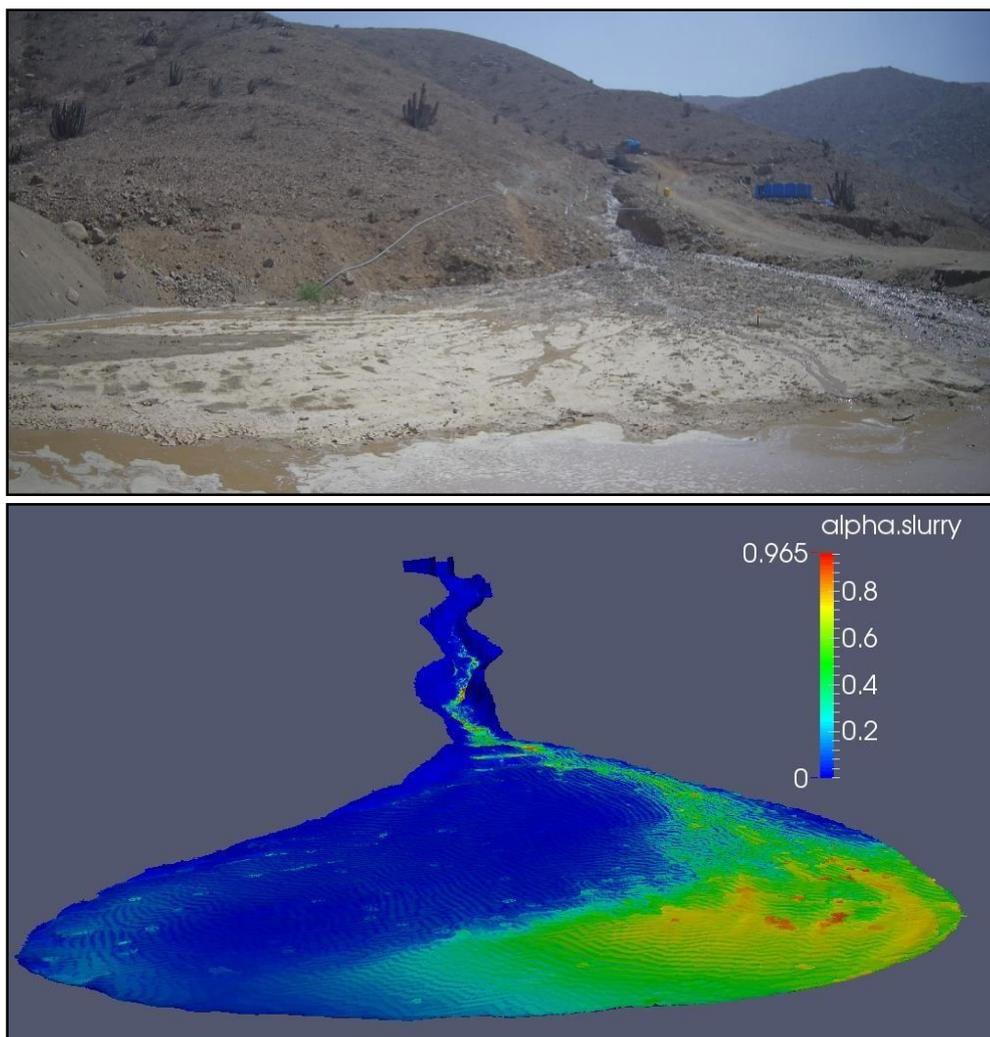


Figura 4.12: Comparación del modelo experimental con el modelo numérico de flujos de escombros para un tiempo  $t = 100s$ .

Se analizó también la variación del cauce, tomando 7 secciones transversales en las secciones de control citadas previamente:

### ANÁLISIS DE EROSIÓN - SEDIMENTACIÓN

Según los cálculos, el volumen de material sólido sedimentado es igual a  $1.34 \text{ m}^3$ . Haciendo un análisis de los ensayos de análisis granulométrico, el 12.9% se trata de material fino, mientras que el 87.1% fue material grueso, de esto, si se asume que todo el material fino fue arrastrado hacia el cono de deyección, mientras que el material grueso depositado a lo largo del cauce de la quebrada, se tiene finalmente un volumen de  $1.167 \text{ m}^3$  sedimentado a lo largo del cauce.

### SECCIÓN 01:

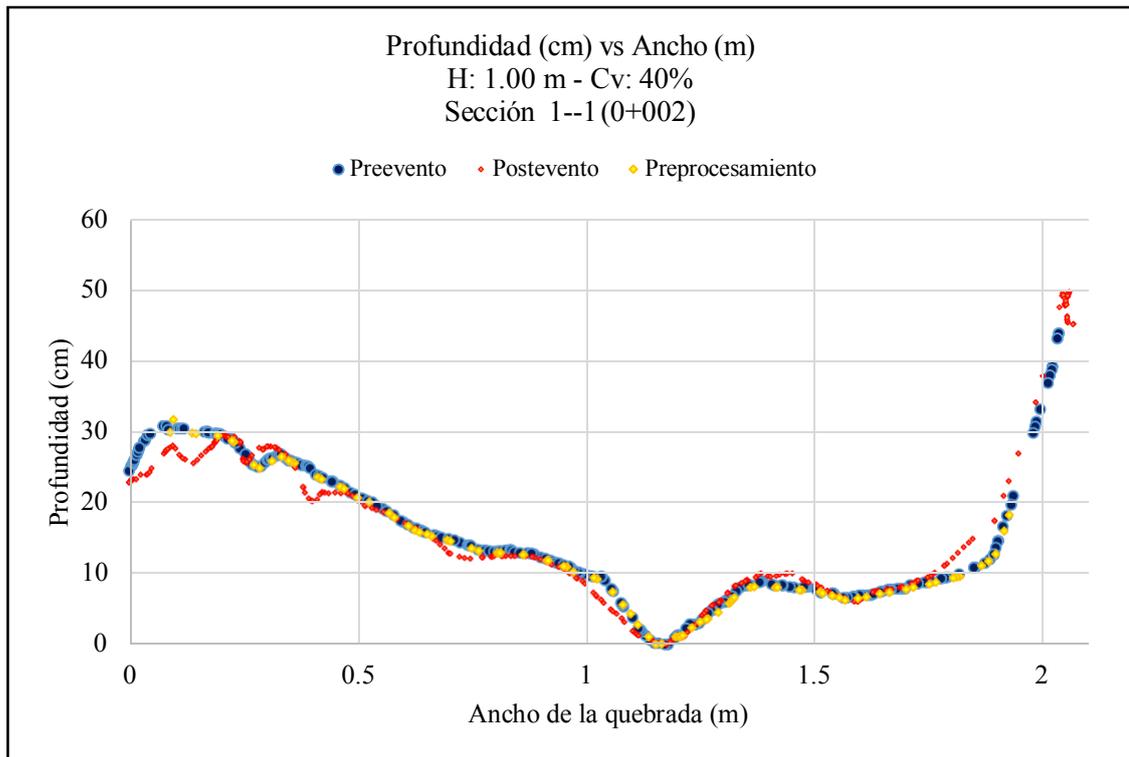


Figura 4.13: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+002.

### SECCIÓN 02:

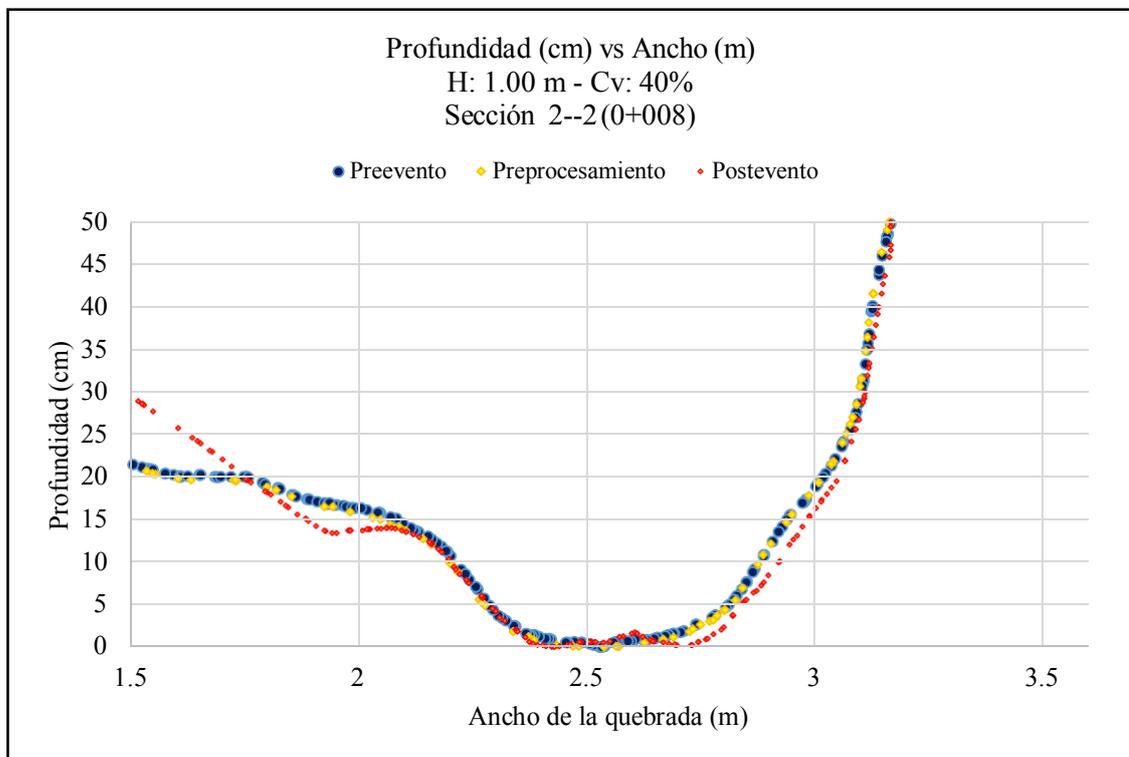


Figura 4.14: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+008.

### SECCIÓN 03:

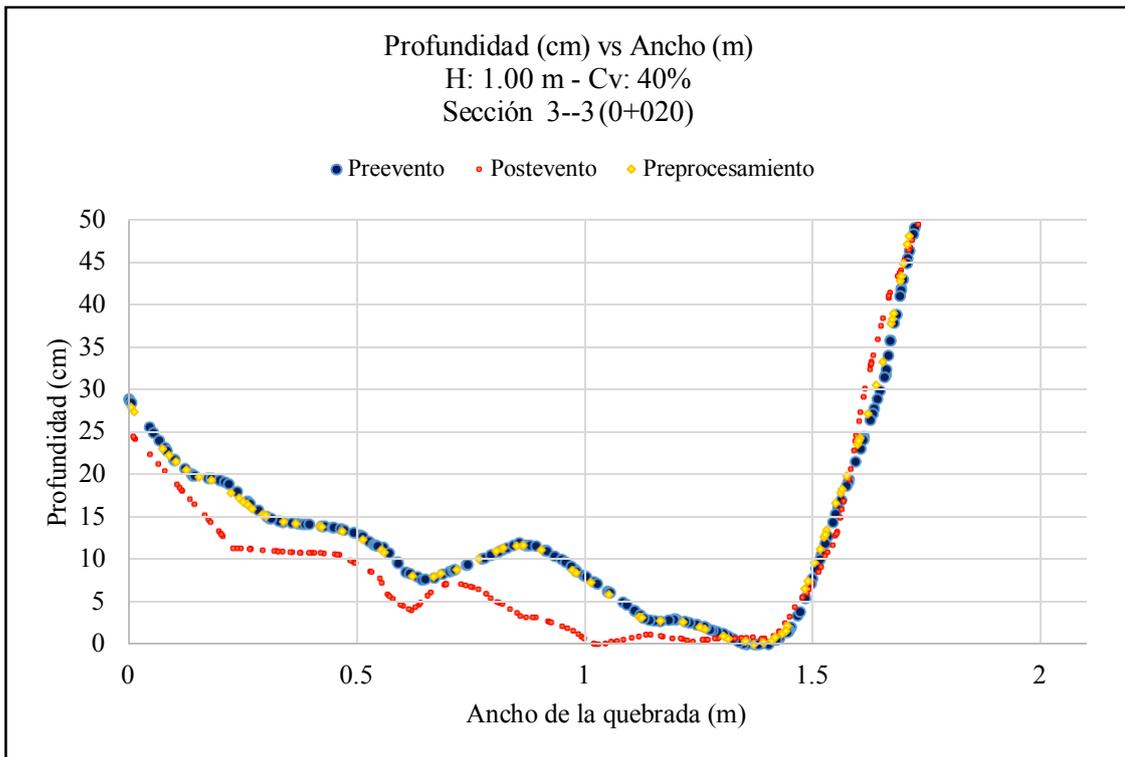


Figura 4.15: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+020.

### SECCIÓN 04:

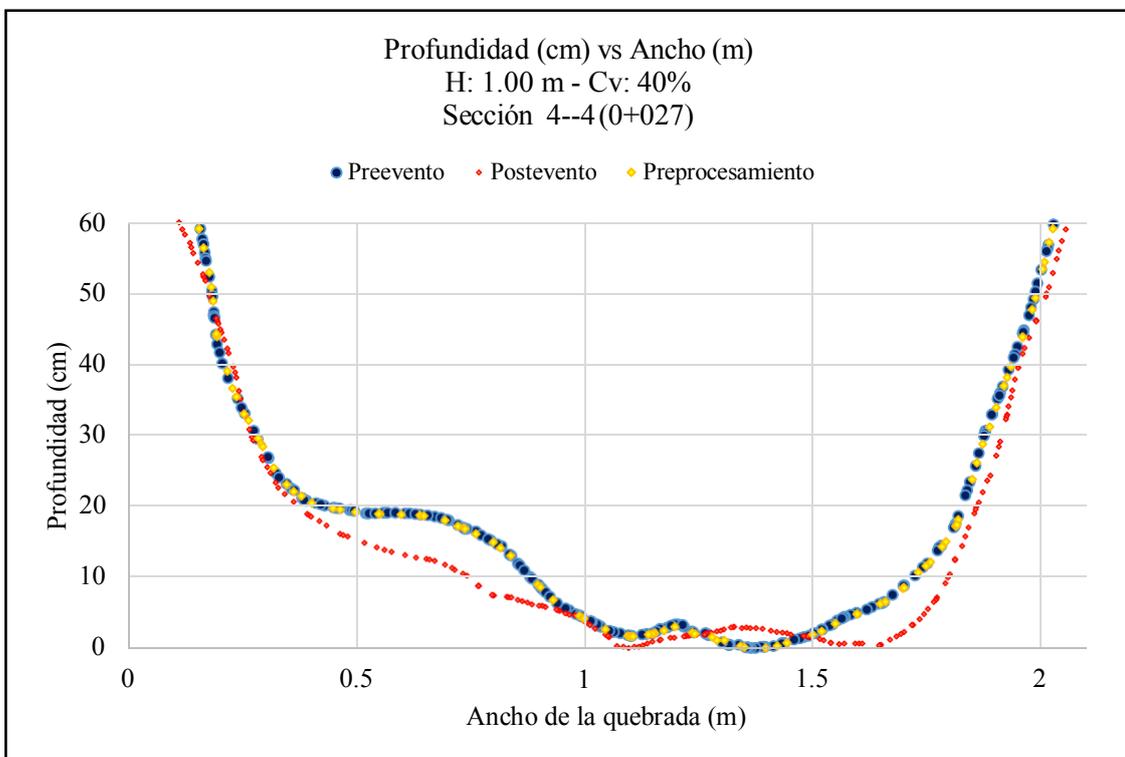


Figura 4.16: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+027.

### SECCIÓN 05:

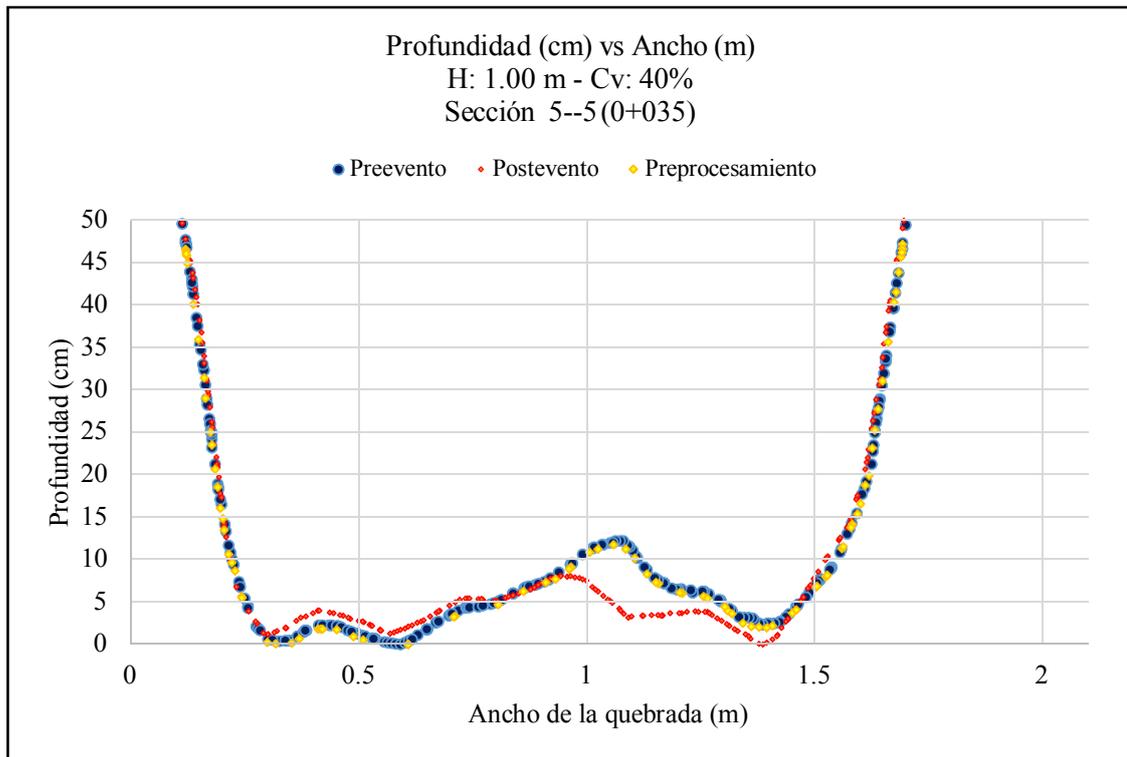


Figura 4.17: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+035.

### SECCIÓN 06:

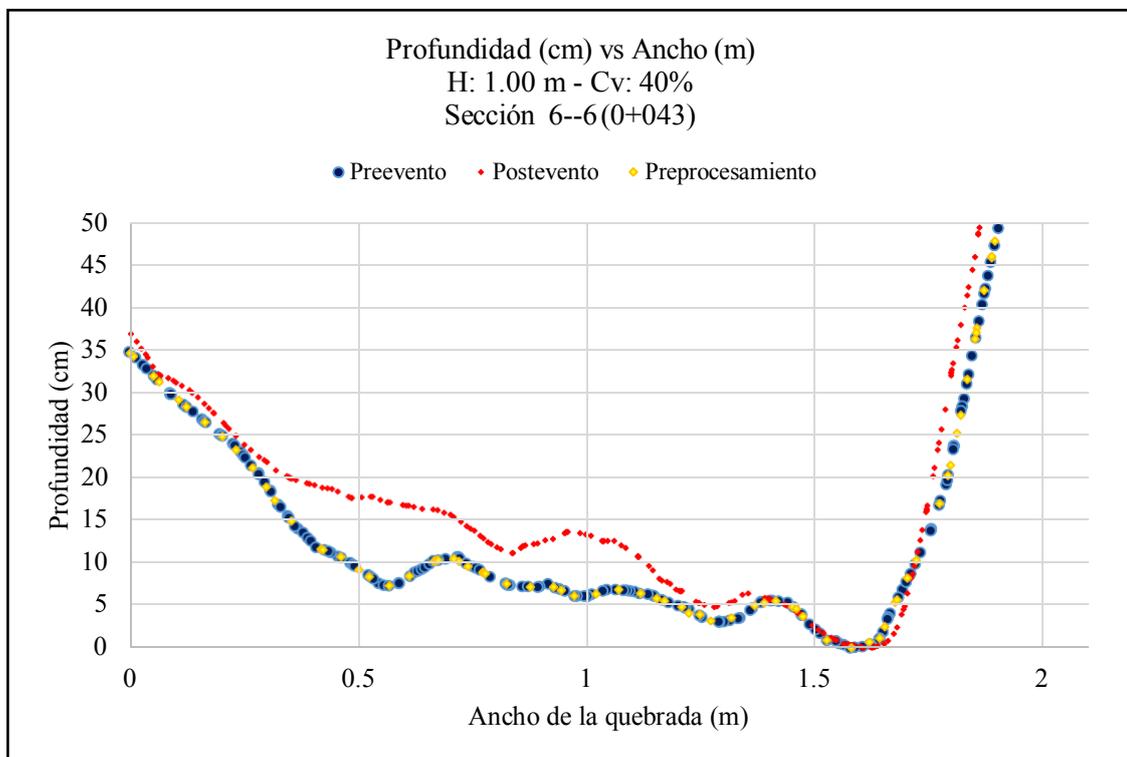


Figura 4.18: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+043.

## SECCIÓN 07:

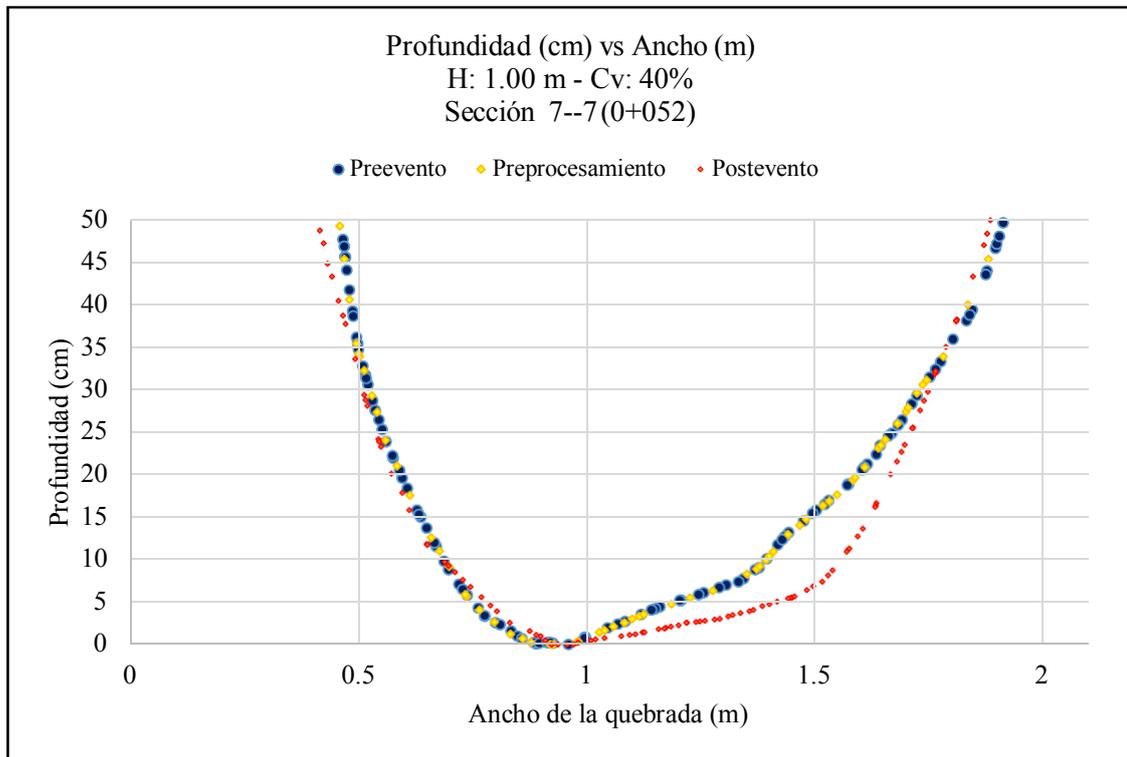


Figura 4.19: Área de sección transversal de la quebrada experimental en la progresiva 0+052.

## ANÁLISIS:

Según el análisis de las figuras citadas anteriormente, puede apreciarse que la sección del cauce coincide tal cual con la sección de la quebrada preprocesamiento, considerando que se realizó un buen mallado de la superficie en OpenFOAM, en un 98%, del mismo modo las líneas de color rojo indican las zonas de erosión y/o deposición finalizado el ensayo experimental, pudiendo ver que el flujo de escombros tiende a sedimentar por la margen derecha del cauce, mientras que se produce mayor erosión por la margen izquierda de la misma.

Otro parámetro de evaluación fue el tirante de flujo, para ello se evaluó en 5 secciones de control, la calibración consistió en tratar de coincidir los tirantes de la media experimental medidos con el modelo físico a través de los sensores ultrasónicos con los tirantes del modelo numérico.

## TIRANTE VS TIEMPO

### SECCIÓN 01:

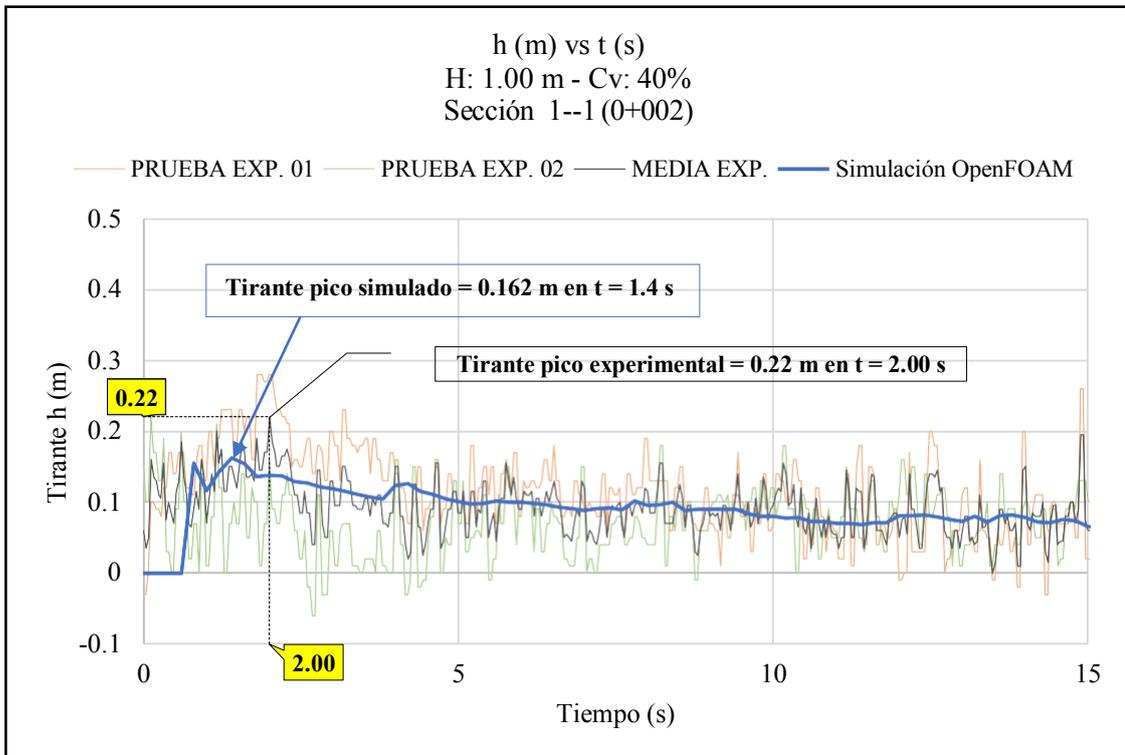


Figura 4.20: Hidrograma del tirante del flujo de escombros vs tiempo en la progresiva 0+002.

### SECCIÓN 02:

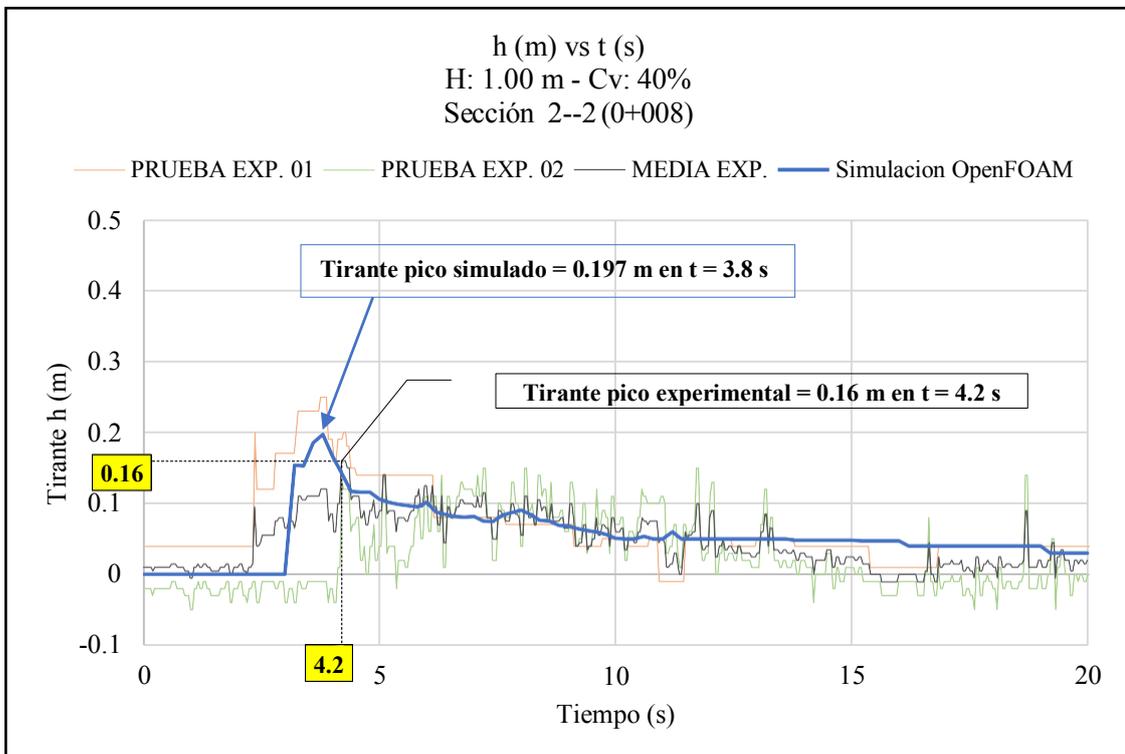


Figura 4.21: Hidrograma del tirante del flujo de escombros vs tiempo en la progresiva 0+008.

### SECCIÓN 03:

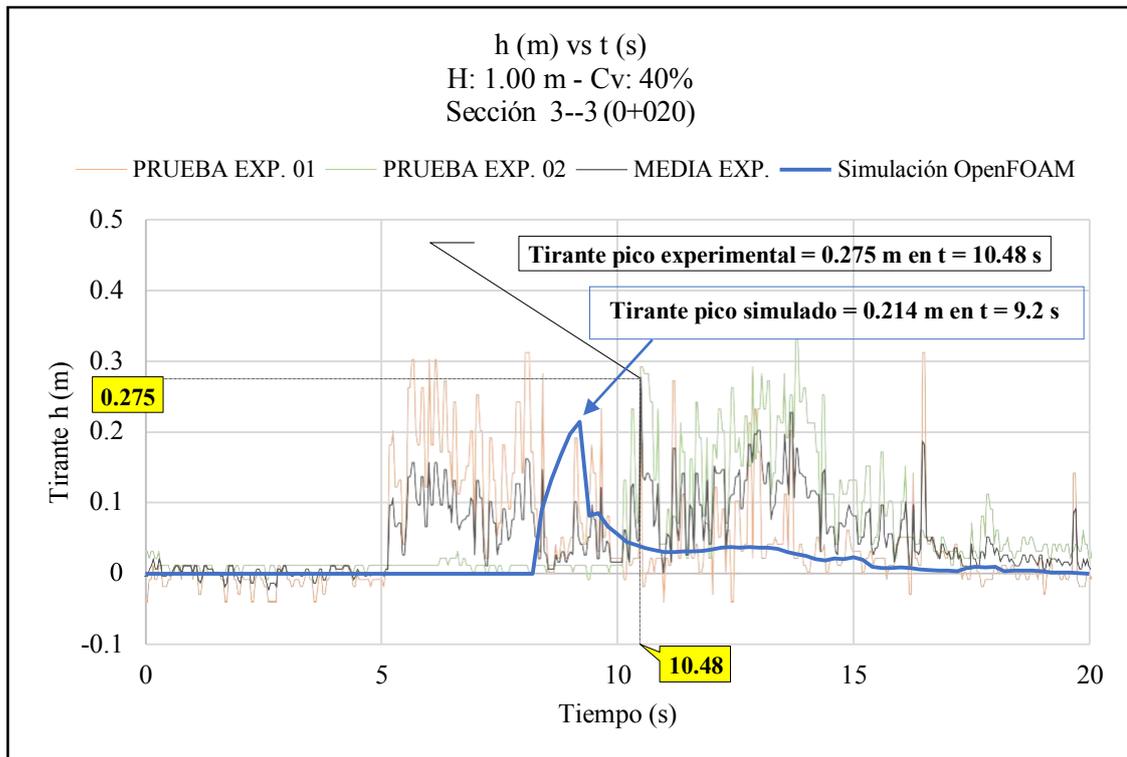


Figura 4.22: Hidrograma del tirante del flujo de escombros vs tiempo en la progresiva 0+020.

### SECCIÓN 05:

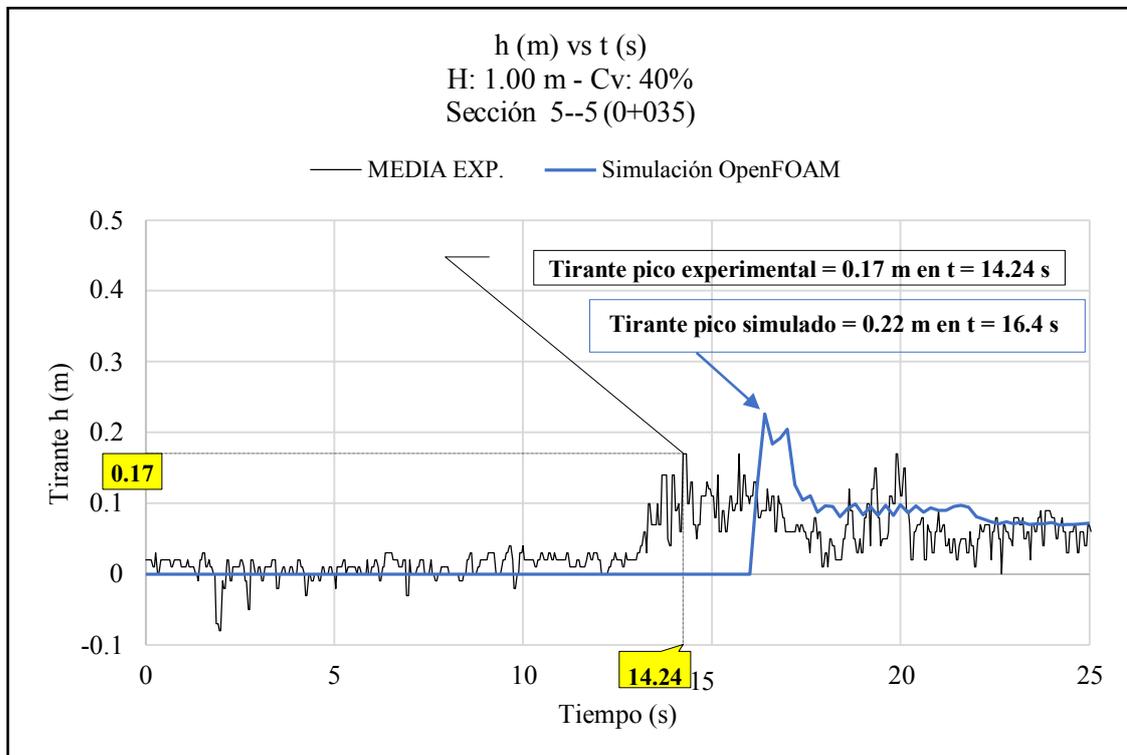


Figura 4.23: Hidrograma del tirante del flujo de escombros vs tiempo en la progresiva 0+035.

## SECCIÓN 07:

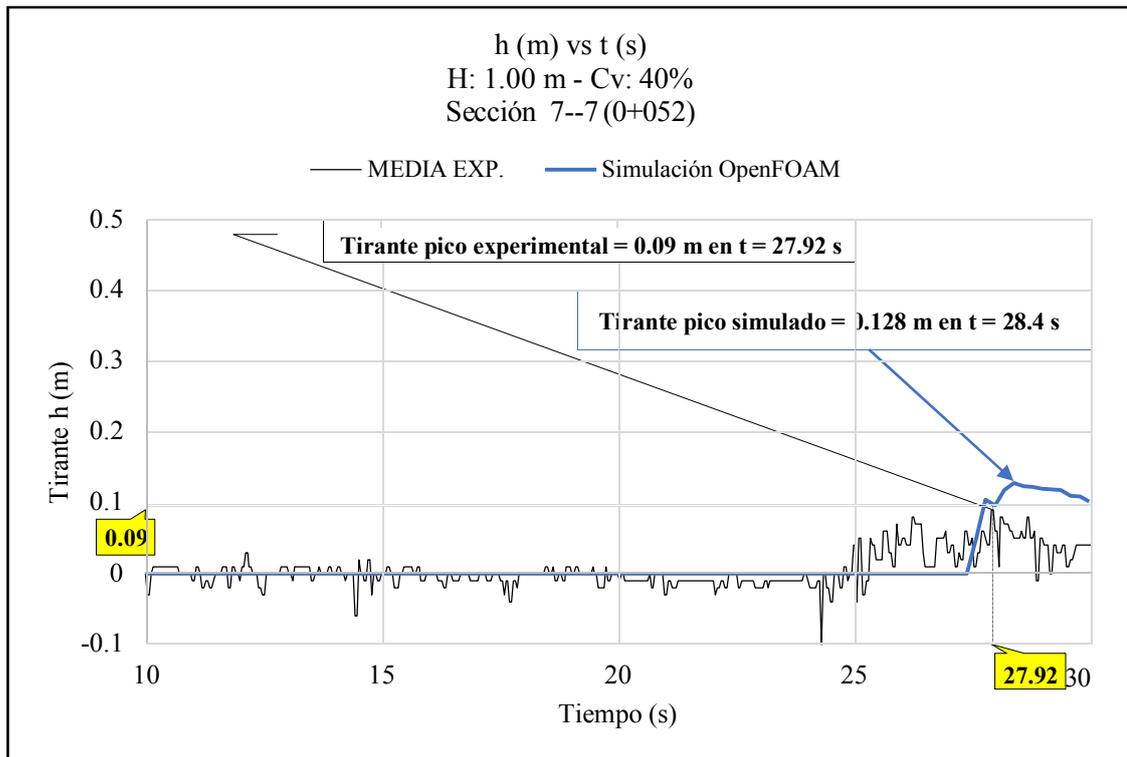


Figura 4.24: Hidrograma del tirante del flujo de escombros vs tiempo en la progresiva 0+052.

El tener conocimiento de los tirantes pico críticos de los eventos de flujos de escombros, contribuirá al diseño de estructuras y obras hidráulicas que permitan mitigar sus efectos, así como establecer medidas de prevención ante tales fenómenos.

Debido a que se asumen condiciones iniciales a un nivel macroscópico, la dispersión obtenida de la data en las gráficas de tirante vs tiempo revela los efectos de detalles incontrolables, tales como posibles errores de alineación, errores aleatorios de medición, errores debido a las condiciones ambientales, tolerancias propias del sensor, entre otros. Sin embargo, permiten reproducir las características principales de los flujos de escombros, pudiendo ser usados sin ningún problema para tales fines.

## 4.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Siendo necesario conocer la sensibilidad del modelo OpenFOAM al efectuar cambios en los parámetros de entrada, se realizó dicha evaluación tomando la misma topografía, cuyo análisis de convergencia de malla se realizó previamente con celdas de  $0.1 \times 0.1 \times 0.1$  m para la malla de fondo, un nivel de refinamiento de 2 para las celdas donde las intersecciones con la superficie de la quebrada forman un ángulo  $> 30^\circ$ , y un nivel de refinamiento de 2 para la zona del material en el reservorio.

Teniendo como tirante inicial 1.00 m., sin modificar la superficie de la quebrada, se analizaron las siguientes variaciones:



Figura 4.25: Avance del frente de onda del flujo de escombros con un tirante inicial  $H:1.00$  m y  $C_v:40\%$  en la quebrada experimental para un tiempo  $t = 20$  s.

- Prueba con flujo laminar: Sólo se tomaron como parámetros iniciales a la velocidad, presión y las concentraciones alpha, dentro de la carpeta 0.

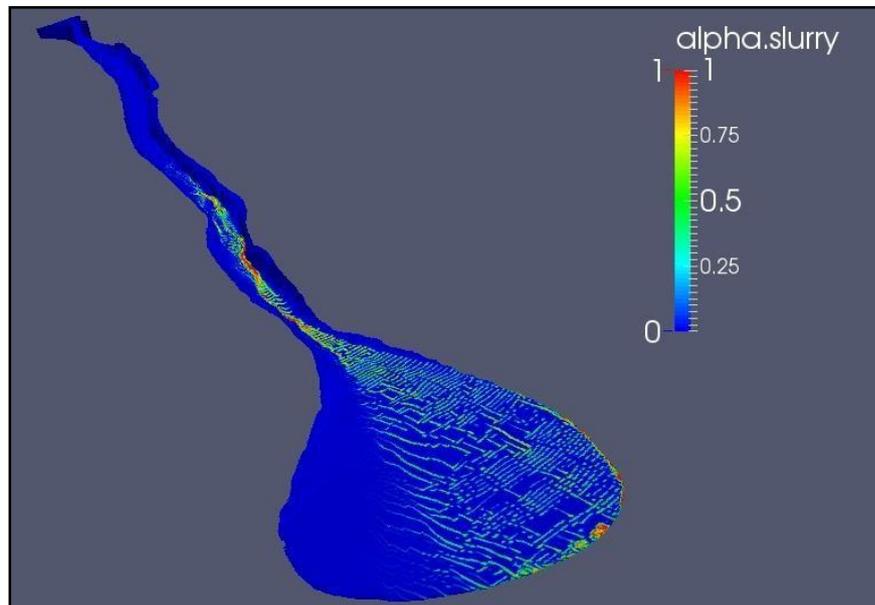


Figura 4.26: Simulación del evento de flujos de escombros como flujo laminar para  $t = 20$  s.

- Prueba con modelo de turbulencia RAS: KEpsilon, donde se añadieron los parámetros iniciales para k (energía cinética turbulenta) y epsilon (tasa de disipación de la turbulencia), con la solución respectiva para tales ecuaciones dentro de fvSchemes y fvSolution.

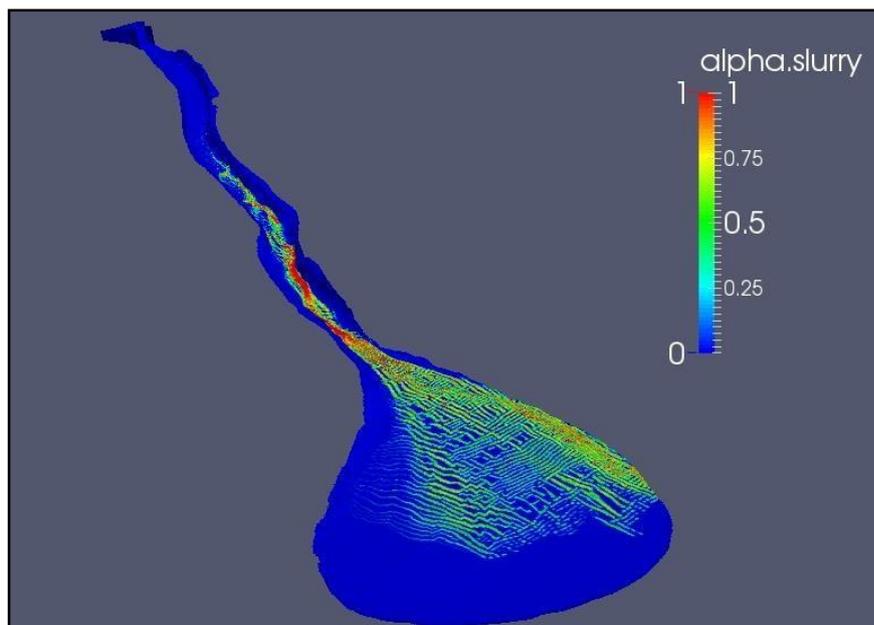


Figura 4.27: Simulación del evento de flujos de escombros, con el modelo de turbulencia RAS: KEpsilon para  $t = 20$  s.

- Prueba con modelo de turbulencia LES: oneEqEddy

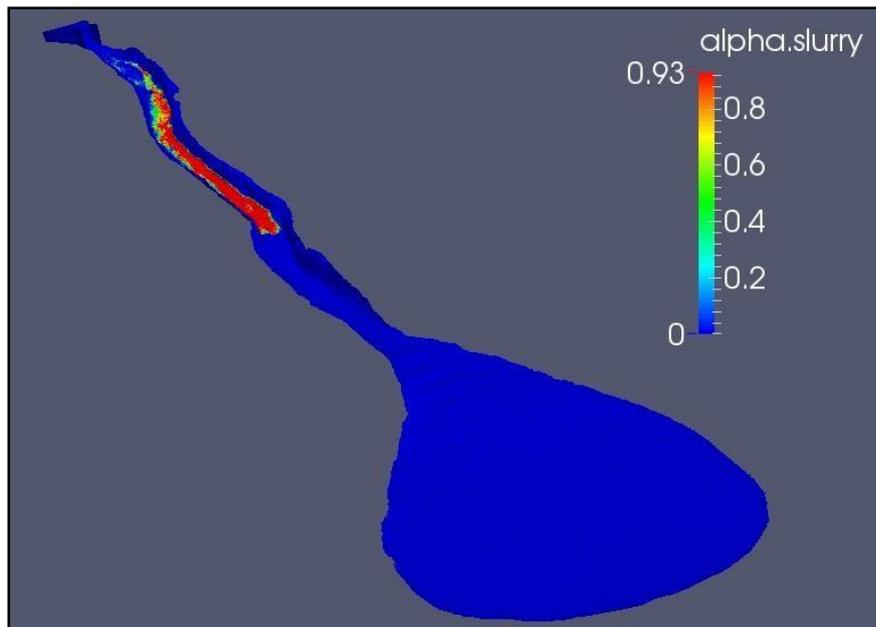


Figura 4.28: Simulación del evento de flujos de escombros, con el modelo de turbulencia LES: oneEqEddy para  $t = 20$  s.

- De esto se puede deducir que el modelo numérico que más se ajusta al modelo experimental de flujos de escombros es el modelo de turbulencia LES: oneEqEddy.
- Hay que considerar también, que según la concentración de sedimentos y/o parámetros del evento experimental, el modelo de turbulencia puede variar debido a las distintas condiciones propias de un evento de flujo de escombros.

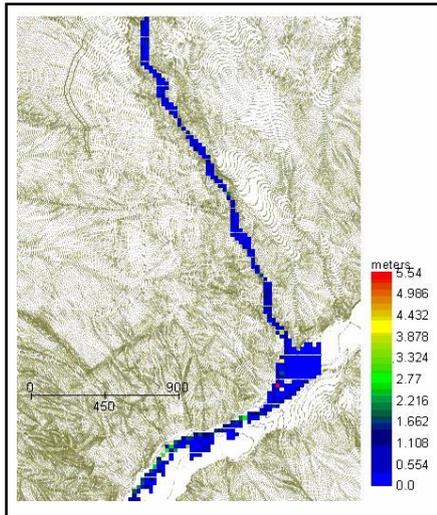
### **OTROS SOFTWARES PARA MODELAR FLUJOS DE ESCOMBROS**

Según la literatura actual, se puede modelar flujos de escombros en otros softwares tanto bidimensionales como tridimensionales tales como FLO-2D, Kanako 2D, Titan 2D, FLOW-3D, Telemac 2D y 3D, RAMMS, ANSYS Fluent, sin embargo, su adaptabilidad respecto a cómo representar las características de un flujo de escombros típico de manera correcta es lo que los diferencian respecto al software OpenFOAM.

### 4.3 COMPARACIÓN CON MODELOS BIDIMENSIONALES DE FLUJOS DE ESCOMBROS

Cuadro 4.3: Viabilidad de uso, ventajas y limitaciones de modelos numéricos para simular flujos de escombros.

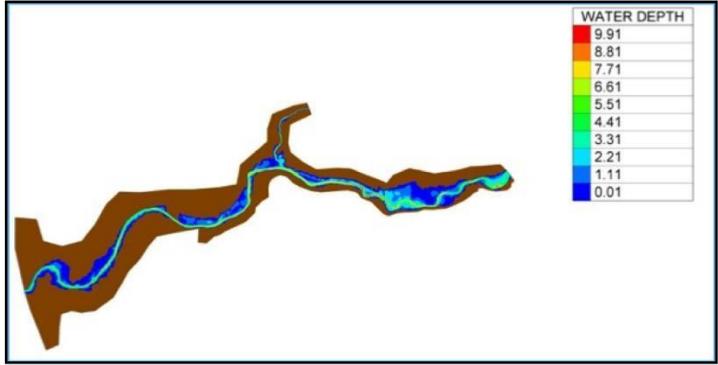
MODELO NUMÉRICO	VIABILIDAD DE USO	VENTAJAS	LIMITACIONES
<p><b>FLO-2D</b></p> <p>Es un modelo de diferencias finitas que integra la ecuación de momento en forma completa utilizando un esquema geométrico con celdas de dimensión constante y finalizado en el cálculo celda por celda y en 8 direcciones de las variables hidráulicas (profundidad, velocidad y caudal).</p>	<p>El modelo FLO-2D se conceptualizó para predecir la hidráulica del flujo de lodo. Durante los últimos 30 años, se ha convertido en el modelo de inundación más utilizado en el mercado. Lo que diferencia a FLO-2D de otros es su capacidad para simular inundaciones urbanas en alta resolución y detalles ilimitados, incluido el sistema de drenaje pluvial.</p>	<p>La conveniencia de utilizar el modelo FLO-2D para análisis de flujos hiperconcentrados es que simula hidráulicamente el flujo no confinado, con fluido compuesto de una mezcla de agua y sedimentos, además se pueden incluir prácticamente todos los factores y parámetros involucrados en los fenómenos de inundación y flujo de lodos.</p>	<p>Trata los flujos de escombros como un problema de enrutamiento de sedimentos de flujo y no como un flujo de escombros real con gran material granular en su interior, siendo ideal para modelar flujos de lodos.</p> <p>Utiliza los hidrogramas de descarga de flujo de escombros definidos por el usuario y al tratar el flujo como una ruta de inundación, el volumen total relacionado con el hidrograma determinado artificialmente puede no ser el mismo que el sedimento real de campo.</p>



Fuente: Castillo, L. (2006).

**TELEMAC-2D**

Resuelve las ecuaciones de Saint-Venant utilizando el método de elementos finitos o de volúmenes finitos y una malla de cálculo de elementos triangulares.



Fuente: Telemac-Mascaret Consortium (2016).

Tiene numerosas aplicaciones tanto en hidráulica fluvial como marítima.

Ahora está disponible como código abierto, y está desarrollado por Open Telemac-Mascaret Consortium.

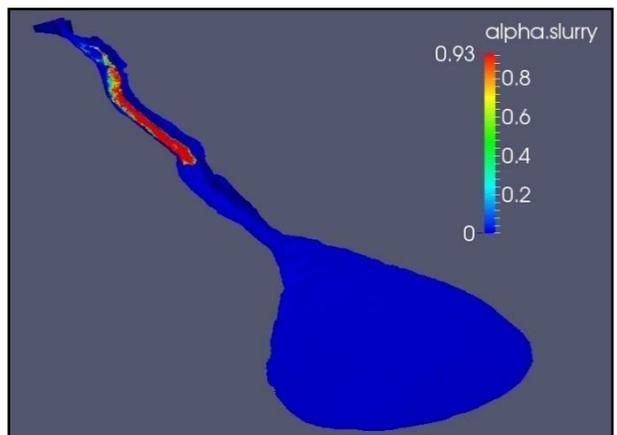
Ofrece al usuario un conjunto de subrutinas FORTRAN que pueden modificarse para cumplir con los requisitos específicos de cada modelo: especificación de condiciones iniciales o condiciones de contorno complejas, enlaces con otros sistemas de modelado, introducción de nuevas funciones.

Permite acoplar la función SISYPHE: 2D para el transporte de sedimentos.

Actualmente no cuenta con un solver que permita simular flujos de escombros o que se aproxime a este tipo de flujo. Para ello se debe integrar una nueva viscosidad no newtoniana que se agregará a la parte de difusión. Además, también necesita introducir una nueva ley de fricción (u otro término fuente) que tenga en cuenta este comportamiento no newtoniano.

**OpenFOAM**

Resuelve las ecuaciones de Navier Stokes utilizando el método de volúmenes finitos y una malla de cálculo adaptable a la geometría.



Fuente: Presente investigación.

	<p>OpenFOAM por ser un software libre de código abierto, es fácil de descargar e instalar. Teniendo acceso al código fuente es posible implementar nuevas funciones, nuevos solvers y/o utilidades según la necesidad, sin más que tener conocimientos de programación en C++ y cómo implementar los mismos. Así mismo, para casos mucho más complejos, podría hacerse uso de un clúster HPC para disminuir el tiempo de cálculo, esto es posible debido a que OpenFOAM permite ejecutar simulaciones en paralelo, ante todo esto resulta muy favorable su uso, dada su amplia gama de aplicaciones.</p>	<p>Usando la utilidad snappyHexMesh para generación de la malla en OpenFOAM, es posible trabajar con superficies y zonas mucho más complejas, por lo que la metodología citada previamente en esta investigación, podría ser capaz de aplicarse a una amplia gama de eventos de flujos de escombros.</p> <p>La realización de un buen estudio topográfico de la zona con un buen nivel de precisión, habiendo realizado los ensayos necesarios del material antes y después de los eventos de flujos de escombros, permitirá vincular los parámetros del modelo a dichas propiedades, pudiendo evaluar el efecto de los mismos dentro del desarrollo del flujo de escombros, ya que el modelo OpenFOAM puede hacer distinción entre éstos, mediante los solucionadores para flujos multifásicos.</p>	<p>El aprendizaje del modelamiento en OpenFOAM requiere de conocimientos amplios de programación en C++ y mecánica de fluidos avanzada, por lo que al inicio requiere de mucha paciencia y dedicación para su correcto entendimiento.</p> <p>En la medida que se quieran obtener mejores resultados, el costo computacional que demanda realizar simulaciones de este tipo son mayores, dada su complejidad.</p>
--	--	--	--

#### 4.4 DISCUSIÓN

El objetivo general de la presente investigación fue realizar una simulación numérica para evaluar el comportamiento y la dinámica de los flujos de escombros. Muchas de las investigaciones realizadas atribuyen que éstos fluyen con una reología fija, no newtoniana. De León & Jeppson (1982) asumieron que los flujos de escombros son laminares. Por lo tanto, desarrollaron ensayos experimentales incrementando los factores de fricción. Sin embargo, en la presente investigación quedó en evidencia que, en la mayoría de los casos, los flujos de escombros típicos tienen un comportamiento turbulento y el mejor ajuste se produjo con la metodología Large Eddy Viscosity (LES).

1. El primer objetivo estuvo orientado a simular flujos de escombros adaptando un solver CFD. Chen & Zhang (2015) realizaron simulaciones integradas para evaluar los cambios de las propiedades de los flujos de escombros debido a la erosión y deposición. En el presente modelo numérico, no se evaluó la erosión del lecho, debido a que se requiere aplicar deformación de malla, lo cual está fuera del alcance de esta investigación, sin embargo, ésta fue realizada con un 98 % de precisión.
2. El segundo objetivo estuvo enfocado en la calibración y posterior aplicación del modelo, para ello, Boetticher et al. (2016) adaptaron un solver para modelar flujos de escombros en tres dimensiones y su impacto contra objetos en escenarios cuyos parámetros pueden estimarse según la composición del material, sin embargo, trabajaron con geometrías simples. Por el contrario, en la presente investigación se usaron superficies más complejas usando la utilidad snappyHexMesh y setFields, así como la inclusión de turbulencia, propia de los flujos de escombros típicos, pudiendo usar tal metodología para simular distintos tipos de eventos.

3. Respecto al tercer objetivo planteado, al comparar el modelo tridimensional con modelos bidimensionales, se pudo encontrar que se atribuye a los flujos de escombros, un comportamiento bifásico, según Castillo (2007) usando el modelo bidimensional FLO-2D, concluyó que es muy bueno, pero para modelar flujos de lodos, cuyo material característico es un material fino, ya que, para simular flujo granular con una gran cantidad de material grueso, es conveniente introducir los datos de cada tipo de material, lo cual el modelo no puede realizar, caso contrario sucede con el modelo OpenFOAM desarrollado en la presente investigación, el cual puede modelar flujos multifásicos, haciendo distinción entre los distintos componentes de un flujo de escombros típico.

## V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

El comportamiento del flujo, reflejado en la posición del frente de onda y otras variables, varía según el nivel de concentración de sedimentos, siendo conscientes que los modelos reológicos usados aún son limitados, considerando finalmente un cumplimiento del 80% en relación a la aplicación del software OpenFOAM.

1. Para adaptar el modelo de flujos de escombros, se realizaron pruebas correspondientes de refinamiento de malla, logrando un 98% de precisión, así mismo el algoritmo que predijo de manera más precisa el avance del flujo fue LES. Otros métodos generaron salidas que se alejaban del comportamiento real del flujo en la quebrada estudiada.
2. Para el modelo físico se obtuvieron velocidades medias de 2.5784 m/s y 2.1076 m/s, y coeficientes de determinación  $R^2$  de 0.997 y 0.9903 respectivamente, es decir que el modelo representa de manera adecuada, el comportamiento del flujo en la quebrada a escala natural. Para el modelo numérico, se obtuvo una velocidad media de 2.0572 m/s y un  $R^2$  de 0.974, siendo las pendientes estadísticamente similares, considerando así que la metodología usada tiene un alto nivel de confiabilidad y puede ser aplicable para simular distintos tipos de eventos.
3. El modelo tridimensional de flujos de escombros reprodujo las velocidades del frente de onda con un 85% de precisión, coincidiendo en forma y tiempo en cada sección de control del modelo físico; los tirantes con un 80% de precisión y el alcance y desplazamiento del flujo de escombros dentro del cono de deyección, siendo más completo que un modelo bidimensional.

## 5.2 RECOMENDACIONES

Ya que aún resulta complicado explicar o modelar de manera exacta el comportamiento real de un evento, es indispensable entender el fenómeno previamente, y eso sólo se logra abordando el problema desde el campo experimental mediante modelos físicos.

1. Capacitarse en dinámica de fluidos computacional, considerando que el entendimiento del software OpenFOAM en un inicio resulta complicado, sin embargo, esto es justificado dado que es una herramienta computacional de gran ayuda para el desarrollo y análisis de múltiples problemas físicos.
2. Continuar con la investigación en el modelamiento de flujo de escombros permitirá mejorar el modelo desarrollado, siendo conscientes de la complejidad de dicho fenómeno.
3. Algunas veces es necesario limitar el problema o hacer uso sólo de un modelo bidimensional que se ajuste a las necesidades, con el propósito de disminuir el costo computacional.

## VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bagnold R. (1954). Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A.*, 225: 49-63.
- Boetticher A., Turowski J., McArdell B., Rickenmann D., Hürlimann M., Scheidl C., & Kirchner J. (2016). DebrisInterMixing-2.3: a Finite Volume solver for three dimensional debris flow simulations based on a single calibration parameter. *Geosci. Model Dev.*, 9: 2909-2923.
- Castillo L. (2006). *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Cengel Y., & Cimbala J. (2006). *Mecánica de fluidos*. D.F, México: McGraw-Hill.
- Chhabra R. (2010). Non-Newtonian Fluids: An Introduction. *SERC School-cum-Symposium on Rheology of Complex Fluids*, 1-33.
- Chen H., & Zhang L. (2015). EDDA 1.0: integrated simulation of debris flow erosion, deposition and property changes. *Geosci. Model Dev.*, 8: 829-844.
- Coussot P., Laigle D., Aratano M., Deganuttill A., & Marchi L. (1998). Direct determination of rheological characteristics of debris flow. *J. Hydraul. Eng.-ASCE*, (124), 865-868.
- DeLeon A., & Jeppson R. (1982). Hydraulics and Numerical Solutions of Steady-State but Spatially Varied Debris Flow. *Reports. Paper 515*. Recuperado de [http://digitalcommons.usu.edu/water\\_rep/515](http://digitalcommons.usu.edu/water_rep/515)
- Domnik B., & Pudasaini S. (2012). Full two-dimensional rapid chute flows of simple viscoplastic granular materials with a pressure dependent dynamic slip-velocity and their numerical simulations. *J. Non-Newton. Fluid*, 173-174, 72-86.
- Domnik B., Pudasaini S., Katzenbach R., & Miller S. (2013). Coupling of full two-dimensional and depth-averaged models for granular flows, *J. Non-Newton. Fluid*, 201, 56-68.
- Duque G., & Escobar C. (2016). *Geomecánica*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, Manizales, Colombia.

- Escusa F. (2016). *Análisis y modelamiento de flujos de escombros en la zona de Maranura, La convención - Cusco* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Greenshields C. (2016). *CFD Direct Training Manual: Applied CFD*. UK: CFD Direct Ltd.
- INGEMMET. (1979). *Estudio Geodinámico de la Cuenca del Río Chillón* (Boletín N°04). Lima, Perú.
- ISO. (2002). *Geotechnical Investigation and Testing - Identification and Classification of Soil - Part 1: Identification and Description*. (14688-1). Ginebra, Suiza.
- Iverson R. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245-296.
- Jeppson R. (1974). Simulation of steady and unsteady flows in channels and rivers. *Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Logan, Utah*.
- Johnson A. (1970). Physical processes in geology. Freeman, Cooper & Company, 431-571.
- MacArthur R., & Schamber D. (1986). Numerical methods for simulating mudflows. *Proc. of the 3rd Intl. Symp. On River Sedimentation, Univ. of Mississippi*, 1615-1623.
- Martinez C., Miralles F., & García R. (2010). Debris flow modelling accounting for large boulder transport. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, (67), 29-40  
doi:10.2495/DEB100031
- O'Brien J., Julien P., & Fullerton W. (1993). Two dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 119(2), 224-261. Recuperado de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1993\)119:2\(244\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244))
- Pope S. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Rickenmann D. (2016). *Methods for the Quantitative Assessment of Channel Processes in Torrents (Steep Streams)*. London, UK: Taylor & Francis Group.
- Sánchez J., & Gonzáles J. (2004). Dinámica de Fluidos computacional (CFD). *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier – Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas*, Parte 1 (3), 65-72. Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718>

- Schamber D., & MacArthur R. (1985). One-dimensional model for mudflows. *Proc. of the ASCE Spec. Conf. On Hydraulics and Hydrology in the Small Computer Age* (2), 1334-1339.
- SIMSCALE. (2018). *Computational Fluid Dynamics*. Recuperado de: <https://www.simscale.com/forum/t/cfd-pimple-algorithm/81418>
- Takahashi T. (1980). Debris flow on a prismatic open channel. *Journal of Hydraulic Division. ASCE, Vol. 106 (HY3)*. USA, 381-396.
- Takahashi T., & Tsujimoto H. (1985). Delineation of the debris flow hazardous zone by a numerical simulation method. *Proc. of the Intl. Symp. on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention*. Tsukuba, Japan, 457-62.
- Takahashi T., & Nakagawa H. (1989). Debris flow hazard zone mapping. *Proc. of the Japan - China (Taipei) Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation*. Kyoto, Japan, 363-372.
- Telemac-Mascaret Consortium. (2016). *2D depth average hydrodynamic modeling of river and coastal areas*. Recuperado de: [http://www.appolutelydigital.com/ModelPrimer/chapter4\\_section7.html](http://www.appolutelydigital.com/ModelPrimer/chapter4_section7.html)
- The OpenFOAM Foundation. (2011-2018). *OpenFOAM v6 User Guide*. London, UK: CFD Direct Ltd. Recuperado de <https://cfd.direct/openfoam/user-guide>
- UNI-UNALM-SQ&ICC. (2018). “Estudio Experimental de la Dinámica de Flujos de Huaycos a Escala Cuasi-Real en Ríos y Quebradas de Alta Pendiente”, *Proyecto de Investigación C-359-PNICP-PIAP-2014*. Informe Técnico N° 3, IMEFEN-UNI, FIA- UNALM, SQ&ICC, Febrero 2018. Lima, Perú.
- Yu B., Ma Y., & Qi X. (2013). Experimental Study on the Influence of Clay Minerals on the Yield Stress of Debris Flows, *J. Hydraul. Eng.-ASCE*, 139, 364–373.

## VII ANEXOS

# Anexo 1

Check List diario de equipos y materiales



**SQ & INGS CC**  
SOCIETAT D'INGENIEROS CONSULTORS CONSTRUCTORS S.R.L.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN C-359-PNCP-PIAP-2014  
ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DINÁMICA DE FLUJOS DE HUAYCOS A ESCALA CUASI-REAL EN RÍOS Y QUEBRADAS DE ALTA PENDIENTE

**Innovate** Perú

## CHECK LIST DIARIO DE EQUIPOS Y MATERIALES

### DATOS DEL PROYECTO

LUGAR	FECHA	HORA

### RELACIÓN DE TRABAJADORES

NOMBRES Y APELLIDOS	FIRMA

EQUIPOS DE TOPOGRAFÍA	SI	NO	OBSERVACIONES
01 Trípode (TRIMBLE)			
01 Unidad Escáner (TRIMBLE)			
01 Jalón			
01 Prisma			
01 Cargador de batería (TRIMBLE)			
03 Baterías			
01 Wincha de 5m			

EQUIPOS DE MONITOREO Y REGISTRO DE INFORMACIÓN					
CCTV	SI	NO	SENSORES Y OTROS	SI	NO
01 Monitor HD			02 Laptops		
01 NVR			02 Receptores		
08 Cámaras de video			08 Sensores ultrasónicos		
01 Cámara digital panorámica			08 Paneles solares		
02 Switch PoE			01 Supresor de picos		
01 Cargador de 12V			01 Estabilizador		
			02 Radios Motorola		
			01 Cámara Fotográfica Digital		

EQUIPOS Y/O HERRAMIENTAS ADICIONALES	SI	NO	OBSERVACIONES
01 Taladro Percutor + Set Herramientas			
01 Moladora			
02 Gal. De Combustible			

### OBSERVACIONES GENERALES


Realizado por / Fecha

# Anexo 2

Informe de análisis granulométrico y de caracterizaciones físicas del material experimental



**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

(ASTM - D422)

Informe : LG17-206  
 Solicitante : BACH. DIEGO ALONSO CORNEJO TEJADA  
 Proyecto : Tesis: "Relación de Parámetros Dinámicos de Flujos Experimentales de Huaycos en Una Quebrada Natural"

Fecha : Enero, 2018

Ubicación : Comunidad de Quipán - Canta

Hoja : 1 de 1

Sondaje : ---  
 Muestra : Quebrada Quilca  
 Prof. (m) : ---  
 Equipo utilizado : Hidrómetro 151H  
 Agente dispersante : Hexametáfosfato de sodio  
 Gravedad de sólidos : 2.89

**Análisis granulométrico por tamizado**

Tamiz	Abertura (mm)	Acum. Q pasa (%)
3 "	76.20	100.0
2 "	50.80	100.0
1 1/2 "	38.10	100.0
1 "	25.40	95.3
3/4 "	19.05	86.0
3/8 "	9.525	82.2
Nº 004	4.750	76.3
Nº 010	2.000	60.4
Nº 020	0.850	41.6
Nº 040	0.425	30.0
Nº 060	0.250	21.2
Nº 140	0.106	13.6
Nº 200	0.075	12.9

**Análisis granulométrico por sedimentación**

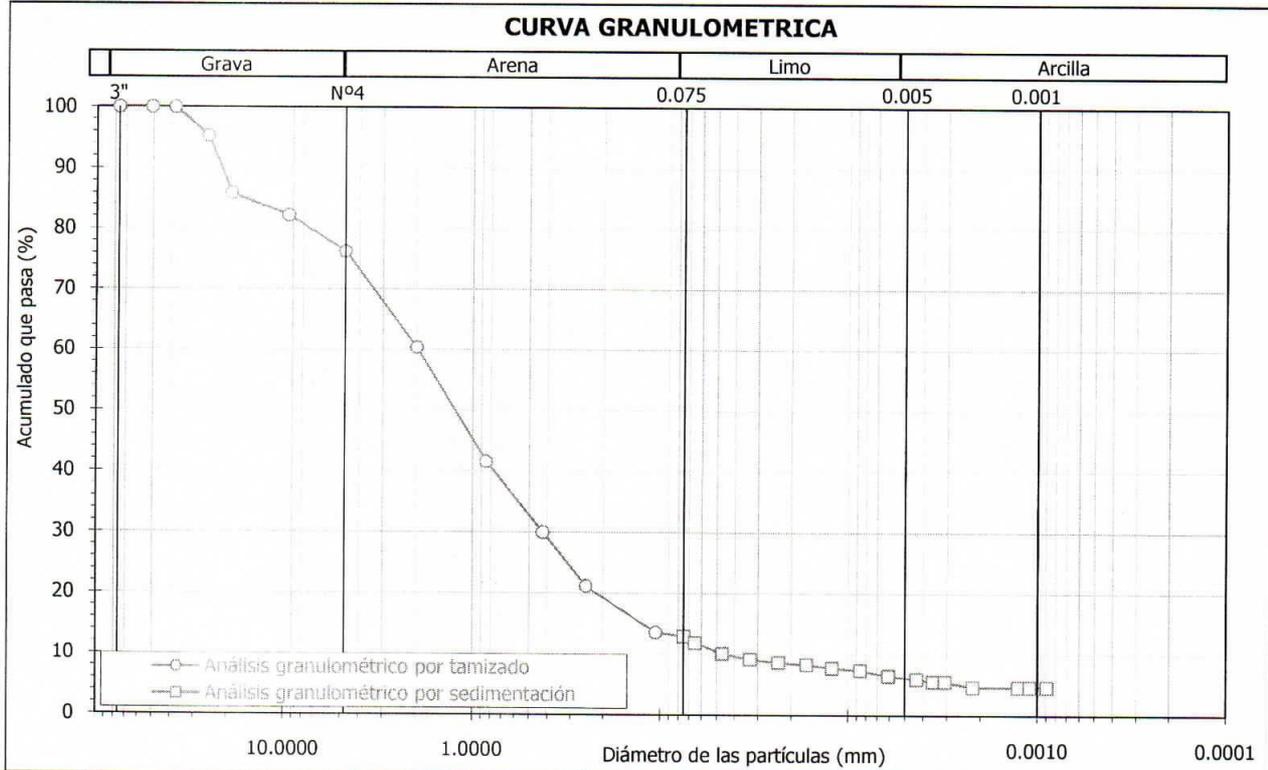
Diámetro (mm)	Acum. Q pasa (%)
0.0750	12.9
0.0653	11.9
0.0466	10.1
0.0331	9.1
0.0235	8.6
0.0166	8.2
0.0122	7.7
0.0086	7.3
0.0061	6.4
0.0043	5.9
0.0036	5.5
0.0031	5.5

Diámetro (mm)	Acum. Q pasa (%)
0.0022	4.6
0.0013	4.6
0.0011	4.6
0.0009	4.6

**0.075 mm = 12.9 %**

**0.005 mm = 6.1 %**

**0.001 mm = 4.6 %**



Observación : La muestra ha sido proporcionada e identificada por el solicitante

Av. Túpac Amaru 1150, Rímac, Lima 25, Código Postal 15333 – Perú  
 Teléfonos: (+51) 1 4820777 Anexo 401 / (+51) 1 481 1070 Anexo 421  
 (+51) 1 4820804 / Celular: 951694234.  
 Correo-e: [labgeoc@uni.edu.pe](mailto:labgeoc@uni.edu.pe) / URL: <http://www.cismid-uni.org>

*David Luna Durán*  
 DAVID LUNA DURÁN  
 INGENIERO CIVIL - CIP 43988  
 JEFE DEL LAB. GEOTÉCNICO





**ENSAYOS DE CARACTERIZACIONES FISICAS**

(ASTM - D2216; D422; D4318; D427; D2487; D-3282)

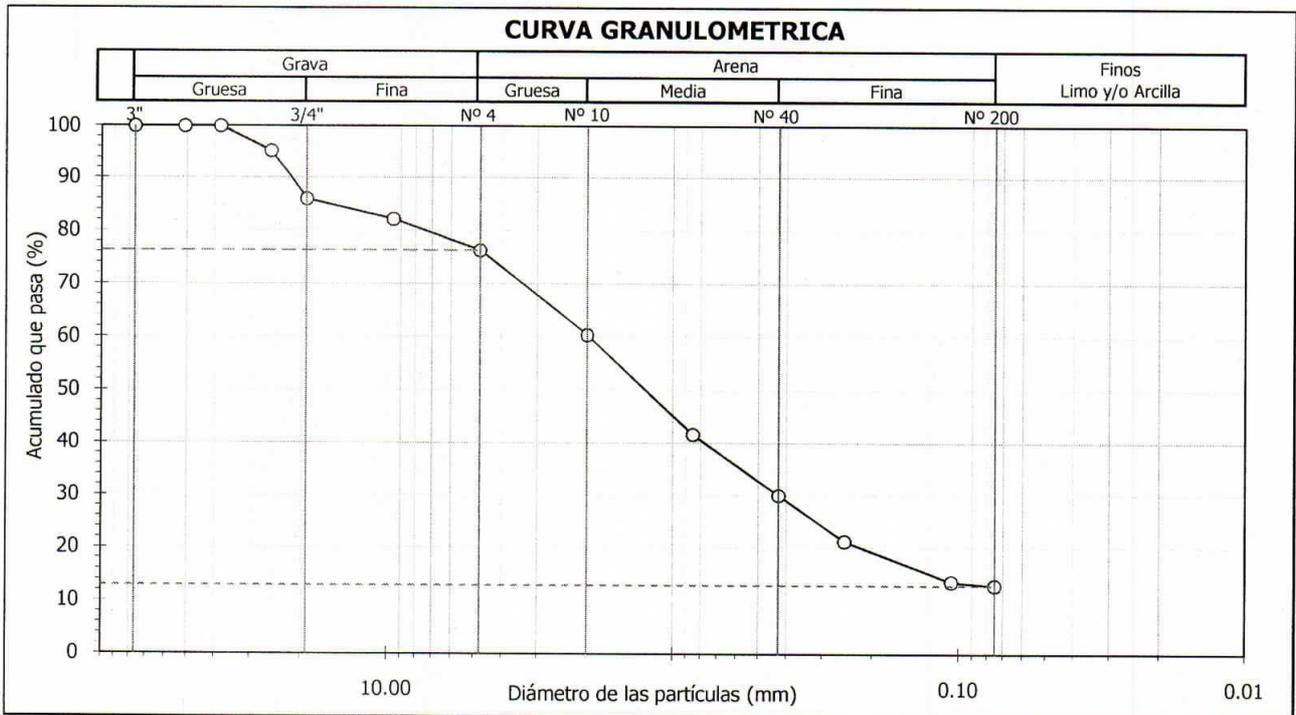
Informe : LG17-206 Fecha : Enero, 2018  
 Solicitante : BACH. DIEGO ALONSO CORNEJO TEJADA  
 Proyecto : Tesis: "Relación de Parámetros Dinámicos de Flujos Experimentales de Huaycos en Una Quebrada Natural"  
 Ubicación : Comunidad de Quipán - Canta

Sondaje : --- Hoja : 1 de 1  
 Muestra : Quebrada Quilca  
 Profundidad (m) : ---

Tamiz	Abertura (mm)	Acum. q' Pasa (%)
3"	76.200	100.0
2"	50.800	100.0
1½"	38.100	100.0
1"	25.400	95.3
¾"	19.050	86.0
3/8"	9.525	82.2
Nº 4	4.750	76.3
Nº 10	2.000	60.4
Nº 20	0.850	41.6
Nº 40	0.425	30.0
Nº 60	0.250	21.2
Nº 140	0.106	13.6
Nº 200	0.075	12.9

	(%)	1.6
Límites de consistencia	Límite Líquido	(%) NP
	Límite Plástico D4318	(%) NP
	Índice de Plasticidad	(%) NP
	Límite de Contracción - D427	(%) ---
Resultados de granulometría por tamizado	Coeficiente de Uniformidad (Cu)	---
	Coeficiente de Curvatura (Cc)	---
	Grava [ Nº 4 < φ < 3" ]	(%) 23.7
	Arena [ Nº 200 < φ < Nº 4 ]	(%) 63.3
	Finos [ φ < Nº 200 ]	(%) 12.9

AASHTO	SUCS
<b>A-1b (0)</b>	<b>SM Arena limosa con grava</b>



Observación : La muestra ha sido identificada y entregada por el solicitante.

Av. Túpac Amaru 1150, Rímac, Lima 25, Código Postal 15333 – Perú  
 Teléfonos: (+51) 1 4820777 Anexo 401 / (+51) 1 481 1070 Anexo 421  
 (+51) 1 4820804 / Celular: 951694234.  
 Correo-e: [labgeoc@uni.edu.pe](mailto:labgeoc@uni.edu.pe) / URL: <http://www.cismid-uni.org>

*David Luna Durán*  
 DAVID LUNA DURÁN  
 INGENIERO CIVIL - CIP 43988  
 JEFE DEL LAB. GEOTÉCNICO



# Anexo 3

Informe de ensayo de análisis por Difracción de Rayos X del material experimental (DRX)

## INFORME DE ENSAYO

A solicitud del Sr. Rubén Adrián Figueroa León, de la Universidad Nacional de Ingeniería- UNI, se ha realizado el análisis mineralógico por difracción de rayos X (DRX)

### ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

El difractograma presentado, corresponden a la muestra:

#### MUESTRA 1

El servicio pertenece a la orden de trabajo OTID-032 de BIZALAB

#### Observaciones:

1. En la muestra, se ha observado un compuesto con baja cristalinidad, el cual se ha denominado "mineral laminar". Dicho mineral, probablemente corresponda a minerales de arcilla, por lo cual se recomienda realizar un análisis específico de determinación de arcillas, como complemento a sus resultados. La cuantificación aproximada se ha realizado de acuerdo a las fases identificadas en las muestras.

2. Las fases encontradas se presentan en la siguiente tabla:

#### MUESTRA 1

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Plagioclasa (Andesina)	$(Ca,Na)(Al,Si)_4O_8$	50
Cuarzo	$SiO_2$	16
Feldespato - K (Ortoclasa)	$KAlSi_3O_8$	11
Anfibol (Actinolita)	$Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	8
Mineral laminar	-----	5
Mica (Muscovita)	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$	4
Clorita (Clinocloro)	$(Mg,Fe)_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	3

( ) Mineral de la familia que se encuentra con mayor grado de certeza.

#### Condiciones de operación y análisis:

Equipo: Difractometro  
Tubo Cu (40kV, 40mA): KAlfa1: 1.54060 Å  
KAlfa2: 1.54439 Å  
Filtro: Kbeta: Ni  
Detector: LynxEye  
Rango de medida desde  $2\theta = 5^\circ$  hasta  $2\theta = 70^\circ$

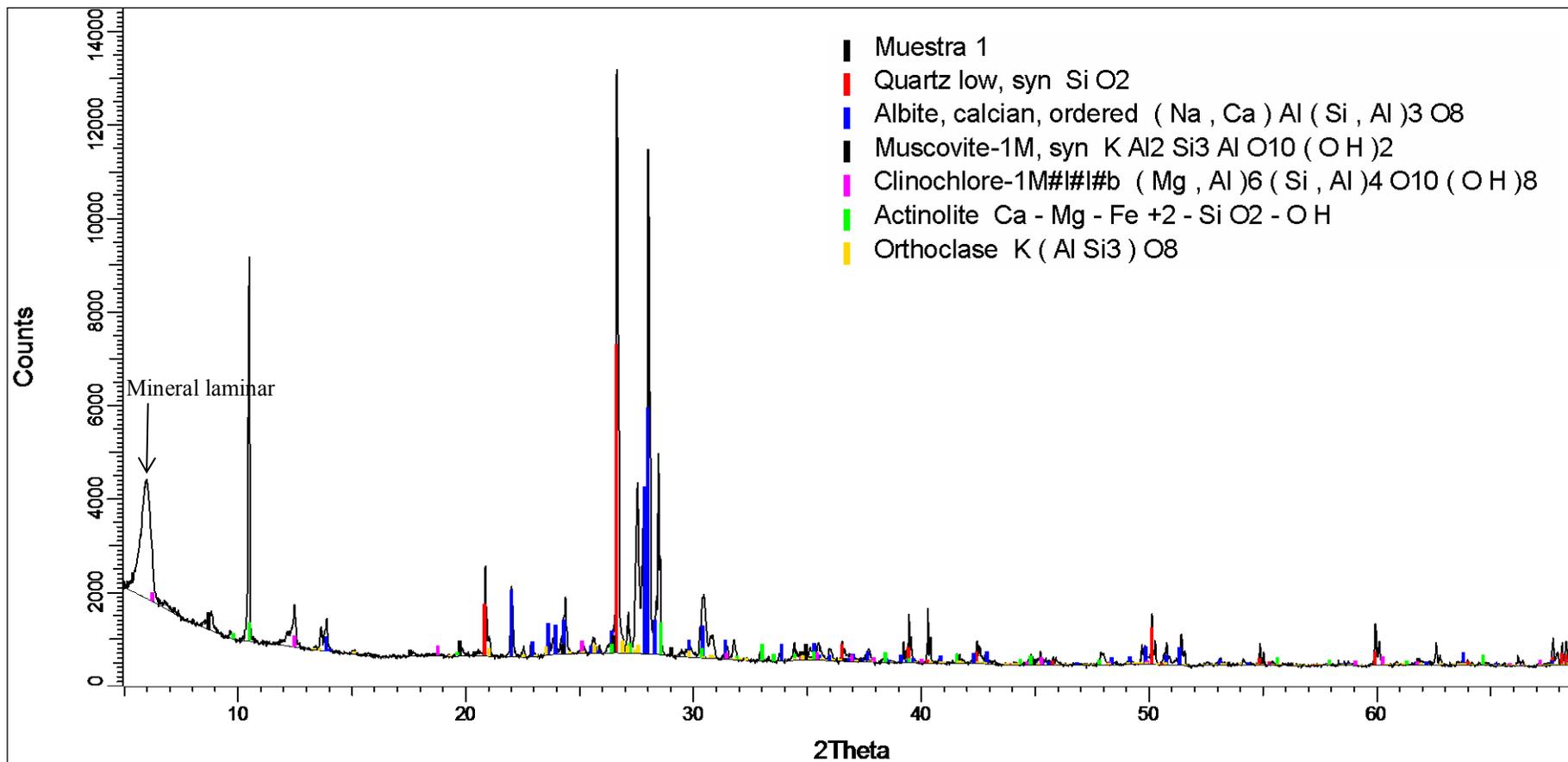


---

Identificación: Base de datos del Centro Internacional de Datos para Difracción (ICDD).

Cuantificación: Método Refinamiento Rietveld (TOPAS Structure Database y Fiz Karlsruhe ICSD).

Figura 1. Difractograma de la MUESTRA 1 con los respectivos minerales identificados.



# Anexo 4

Cálculo de volúmenes de agua y material sólido experimental



**SQ & INGS CC**  
SOCIETAT D'INGENIEROS CONSULTORS CONSTRUCTORS S.R.L.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN C-359-PNCP-PIAP-2014

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DINÁMICA DE  
FLUJOS DE HUAYCOS A ESCALA CUASI-REAL EN  
RÍOS Y QUEBRADAS DE ALTA PENDIENTE

**Innovate** Perú

## CÁLCULOS DE VOLÚMENES DE AGUA Y MATERIAL SÓLIDO

**Cuadro 01: Área, Volumen y Elevación del Vaso de Almacenamiento**

Elevación msnm	$\Delta H$ m	Altura m	Área m <sup>2</sup>	Volumen parcial m <sup>3</sup>	Volumen acumulado m <sup>3</sup>
1041.6	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000
1041.7	0.1	0.1	0.342	0.011	0.011
1041.8	0.1	0.2	1.029	0.065	0.077
1041.9	0.1	0.3	1.654	0.133	0.210
1042	0.1	0.4	2.351	0.199	0.409
1042.1	0.1	0.5	3.152	0.274	0.683
1042.2	0.1	0.6	4.095	0.361	1.045
1042.3	0.1	0.7	5.816	0.493	1.538
1042.4	0.1	0.8	7.848	0.681	2.218
1042.5	0.1	0.9	10.316	0.905	3.124
1042.6	0.1	1	12.055	1.117	4.241
1042.7	0.1	1.1	12.336	1.220	5.461
1042.8	0.1	1.2	12.509	1.242	6.703
1042.9	0.1	1.3	12.684	1.260	7.962
1043	0.1	1.4	12.861	1.277	9.240
1043.1	0.1	1.5	13.032	1.295	10.534
1043.2	0.1	1.6	13.201	1.312	11.846
1043.3	0.1	1.7	13.366	1.328	13.174
1043.4	0.1	1.8	13.532	1.345	14.519
1043.5	0.1	1.9	13.709	1.362	15.881
1043.6	0.1	2	13.749	1.373	17.254

**Cuadro 02: Volúmenes de Agua y Material Sólido por Ensayo**

Cv	V <sub>1</sub> (4.24 m <sup>3</sup> )		V <sub>2</sub> (7.33 m <sup>3</sup> )		V <sub>3</sub> (10.53 m <sup>3</sup> )	
	Agua	Mat. Sólido	Agua	Mat. Sólido	Agua	Mat. Sólido
5%	4.03	0.21	6.97	0.37	10.01	0.53
10%	3.82	0.42	6.60	0.73	9.48	1.05
20%	3.39	0.85	5.87	1.47	8.43	2.11
30%	2.97	1.27	5.13	2.20	7.37	3.16
40%	2.54	1.70	4.40	2.93	6.32	4.21

**Cuadro 03: Cantidad de Carretillas por Volumen de Material Sólido en Estado Suelto**

Cv	H = 1.0 m		H = 1.25 m		H = 1.5 m	
	m <sup>3</sup>	Carretillas	m <sup>3</sup>	Carretillas	m <sup>3</sup>	Carretillas
5%	0.31	3.90	0.54	6.75	0.78	9.69
10%	0.62	7.80	1.08	13.49	1.55	19.39
20%	1.25	15.61	2.16	26.99	3.10	38.77
30%	1.87	23.41	3.24	40.48	4.65	58.16
40%	2.50	31.22	4.32	53.98	6.20	77.54

# Anexo 5

Ficha de control de ensayo experimental



**SQ & INGS CC**  
SOCIETAD DE INGENIEROS CONSULTORES CONSTRUCTORES S.R.L.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN C-359-PNCP-PIAP-2014

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DINÁMICA DE  
FLUJOS DE HUAYCOS A ESCALA CUASI-REAL EN  
RÍOS Y QUEBRADAS DE ALTA PENDIENTE

**Innovate** Perú

## FICHA DE CONTROL DE ENSAYO EXPERIMENTAL

Código	Fecha - Turno

### DATOS DEL EXPERIMENTO

Pend. Quebrada (%)	Altura (m)	Cv (%)	Vol. de Agua (m <sup>3</sup> )	Vol. Material Sólido (m <sup>3</sup> )	Vol. Total (m <sup>3</sup> )

### CONTROL DE CALIDAD – PRE ENSAYO

Actividad	Observación	Check
-Topografía Pre Ensayo		
-Instalación de Sistema CCTV		
-Instalación de Sensores		
-Estacado en Cauce		
-Conformación de Dique (Mat. Sólido)		
-Llenado de Embalse (Agua)		

### CONTROL DE CALIDAD – POST ENSAYO

Actividad	Observación	Check
-Registro de Videos		
-Registro de Sensores		
-Topografía Post Ensayo		
-Volumen No Arrastrado		
-Muestreo de Material Depositado		

### OBSERVACIONES GENERALES


\_\_\_\_\_  
Encargado

# Anexo 6

Archivo fotográfico



FOTO 01: Topografía pre ensayo de flujos de escombros de la quebrada experimental.



FOTO 02: Instalación de circuito cerrado de video (CCTV) en la quebrada experimental.



FOTO 03: Instalación de sensores ultrasónicos en las secciones de control de la quebrada experimental.



FOTO 04: Mallado reticular equidistante (cada 1.0 m) en el cauce de la quebrada experimental.



FOTO 05: Encendido de la bomba de agua.



FOTO 06: Conformado del dique (material sólido) dentro del reservorio.



FOTO 07: Llenado de embalse (agua) dentro del reservorio.

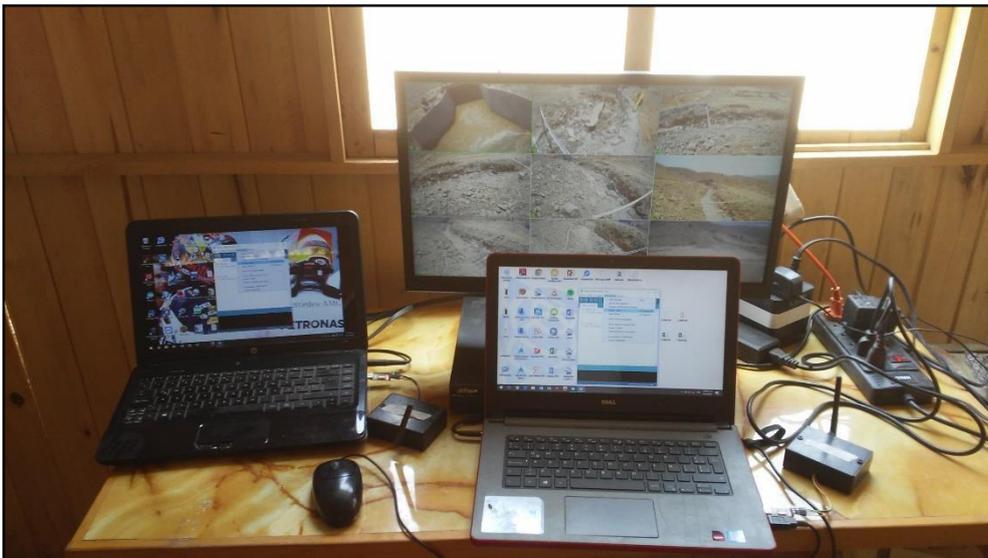


FOTO 08: Monitoreo de los registros de video y sensores.



FOTO 09: Inicio de apertura de la compuerta experimental.



FOTO 10: Avance del flujo de escombros aguas abajo a lo largo de la quebrada experimental.

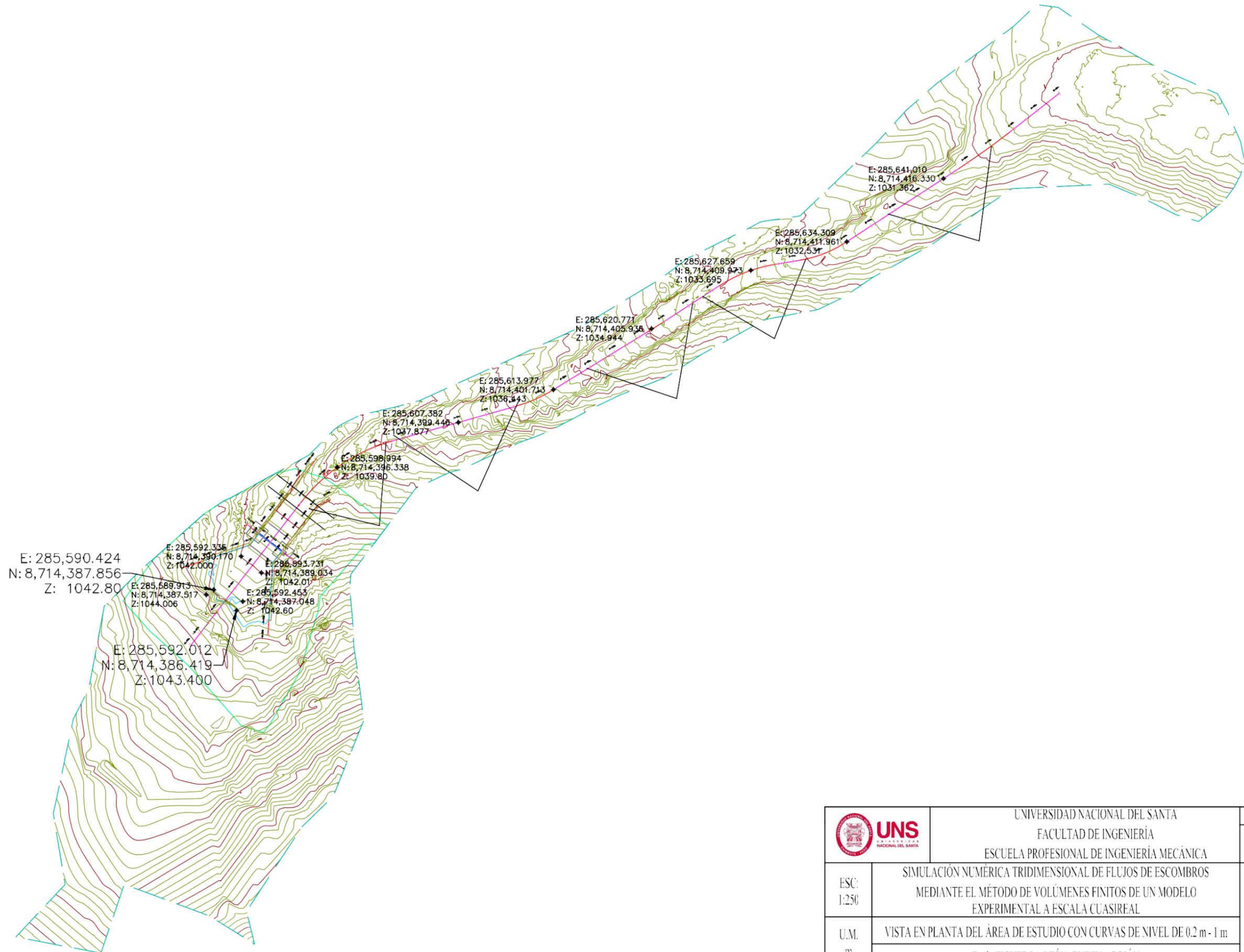


FOTO 11: Proceso de deposición del flujo de escombros dentro del cono de deyección.

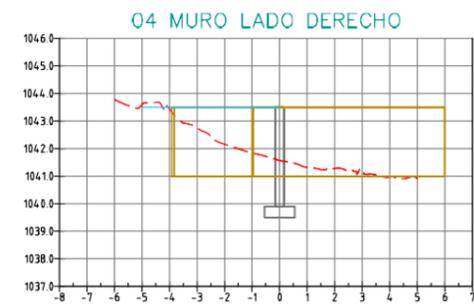
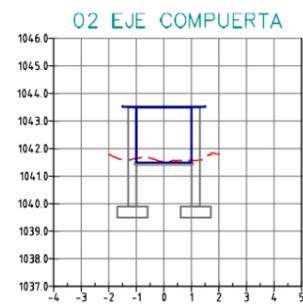
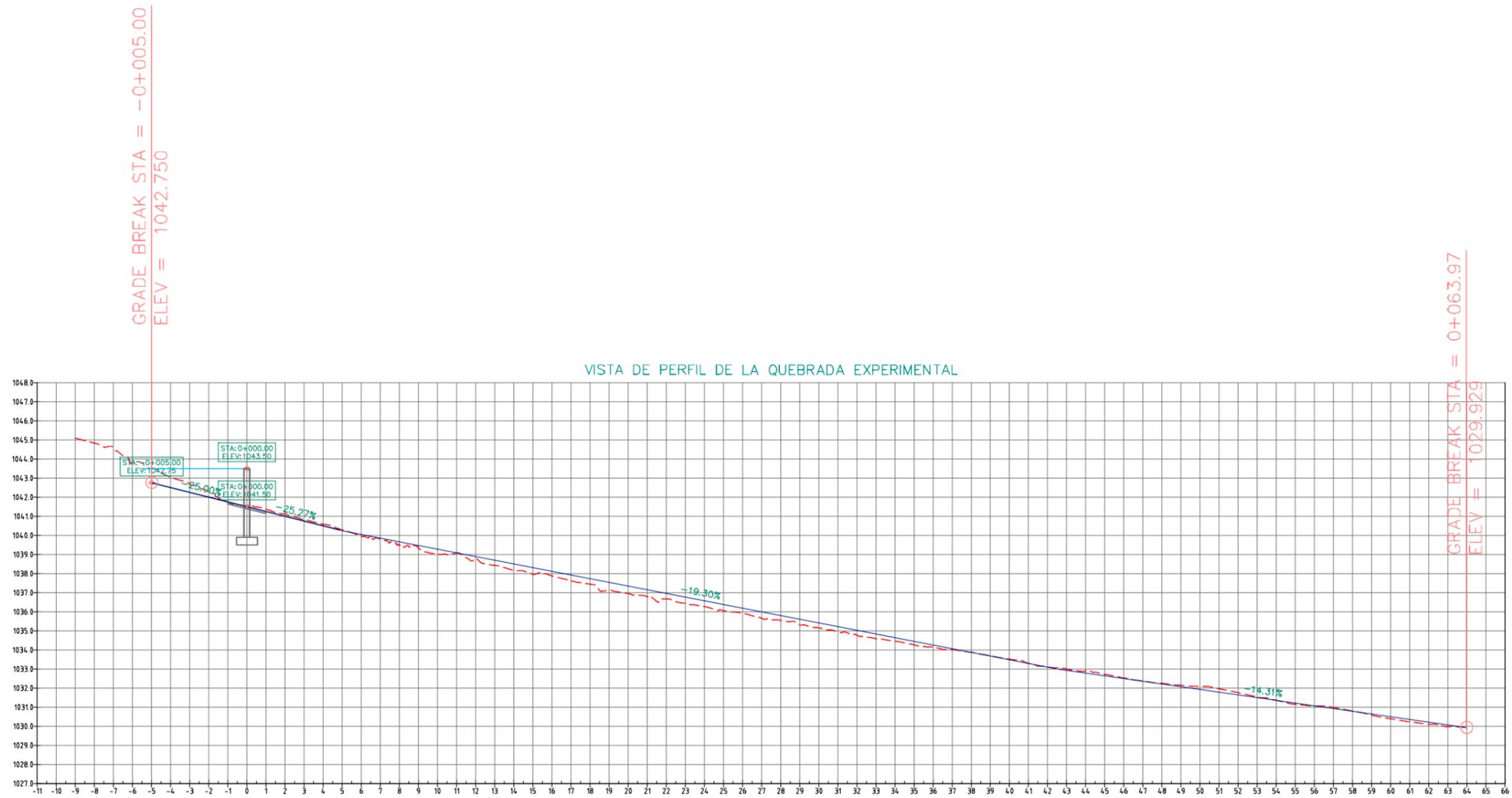


FOTO 12: Topografía post ensayo de flujos de escombros de la quebrada experimental.

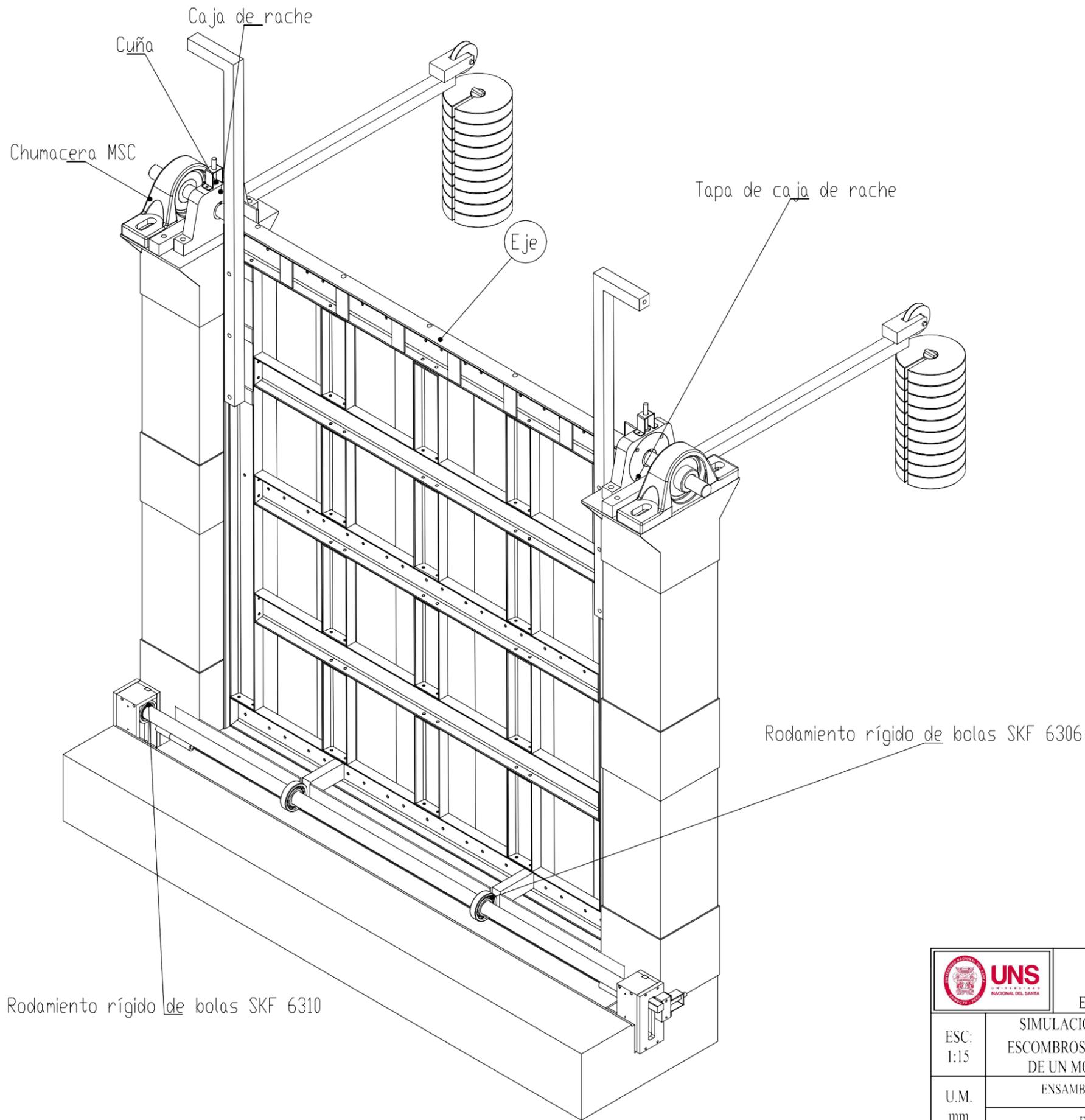
PLANOS



	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA	FECHA DICIEMBRE, 2018
	ESC: 1:250	SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS DE ESCOMBROS MEDIANTE EL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS DE UN MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA CUASIREAL
U.M. m	VISTA EN PLANTA DEL ÁREA DE ESTUDIO CON CURVAS DE NIVEL DE 0.2 m - 1 m Bach. FIGUEROA LEÓN, RUBEN ADRIÁN	



	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA	FECHA
		DICIEMBRE, 2018
ESC: 1:250	SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS DE ESCOMBROS MEDIANTE EL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS DE UN MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA CUASIREAL	 <b>P2</b>
U.M. m	VISTA DE PERFIL DEL ÁREA DE ESTUDIO Bach. FIGUEROA LEÓN, RUBEN ADRIÁN	



AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

Cuña

AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

Chumacera MSC

AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

Eje

AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

Rodamiento rígido de bolas SKF 6306

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA	FECHA
FACULTAD DE INGENIERÍA	DICIEMBRE, 2018
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA	

AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

Rodamiento rígido de bolas SKF 6310



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESC:  
1:15

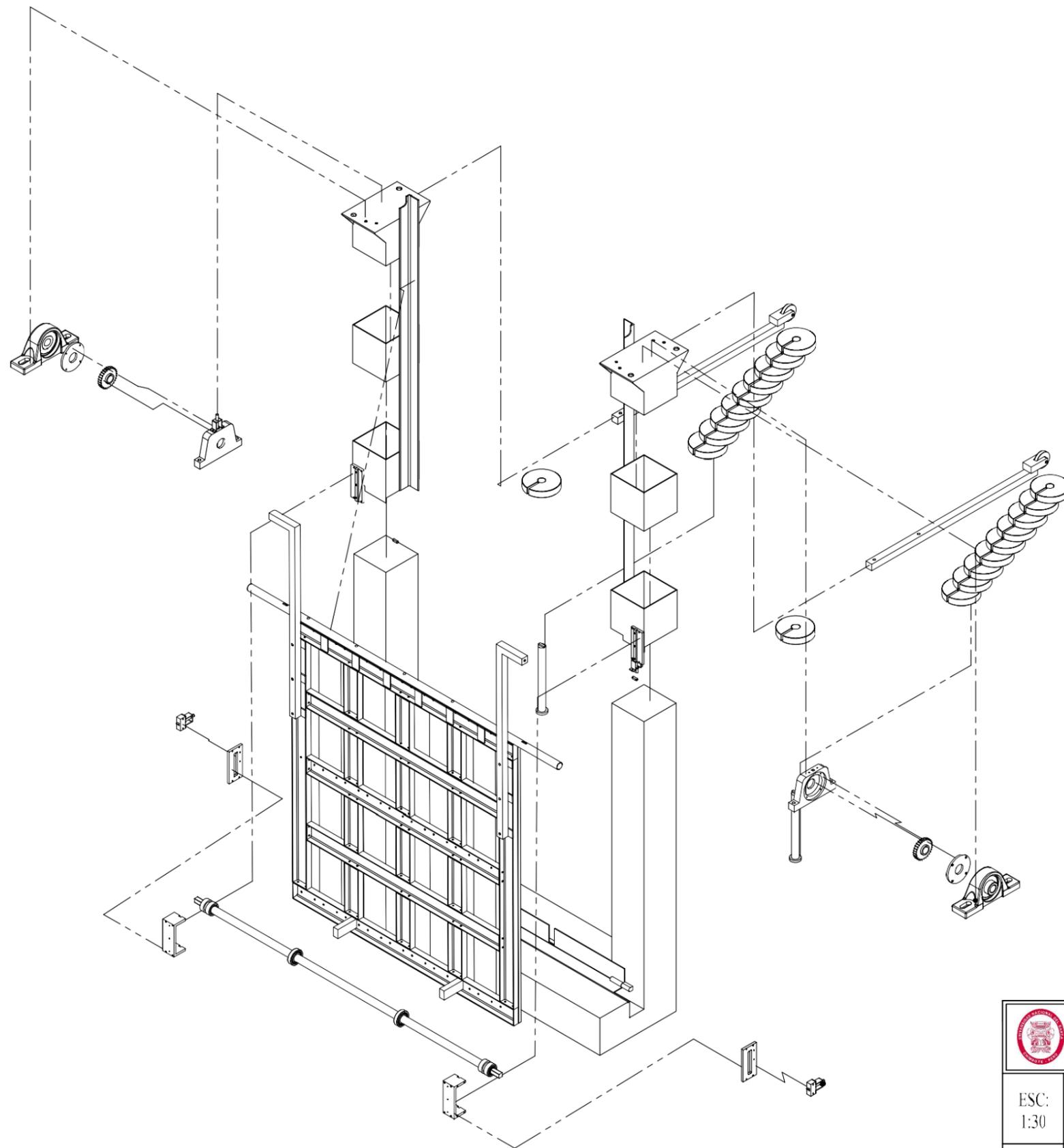
SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS DE ESCOMBROS MEDIANTE EL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS DE UN MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA CUASIREAL

U.M.  
mm

ENSAMBLAJE COMPLETO DE LA COMPUERTA EXPERIMENTAL

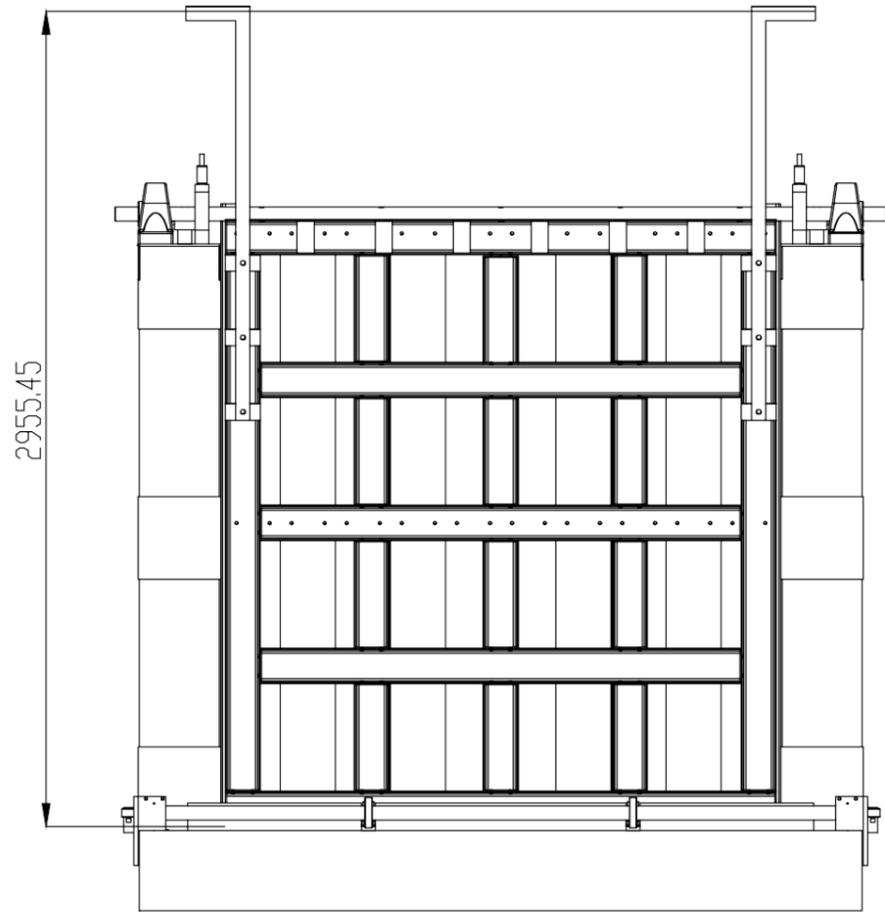
Bach. FIGUEROA LEÓN, RUBEN ADRIÁN



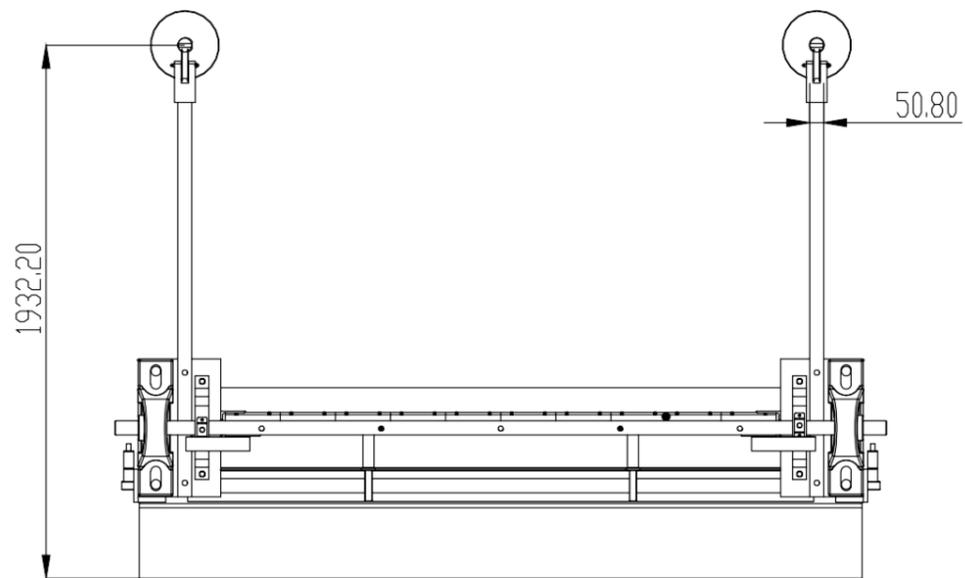


	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA	FECHA DICIEMBRE, 2018
	ESC: 1:30  U.M. mm	SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS DE ESCOMBROS MEDIANTE EL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS DE UN MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA CUASIREAL  ENSAMBLAJE COMPLETO DE LA COMPUERTA EXPERIMENTAL - EXPLOSIONADO  Bach. FIGUEROA LEÓN, RUBEN ADRIÁN

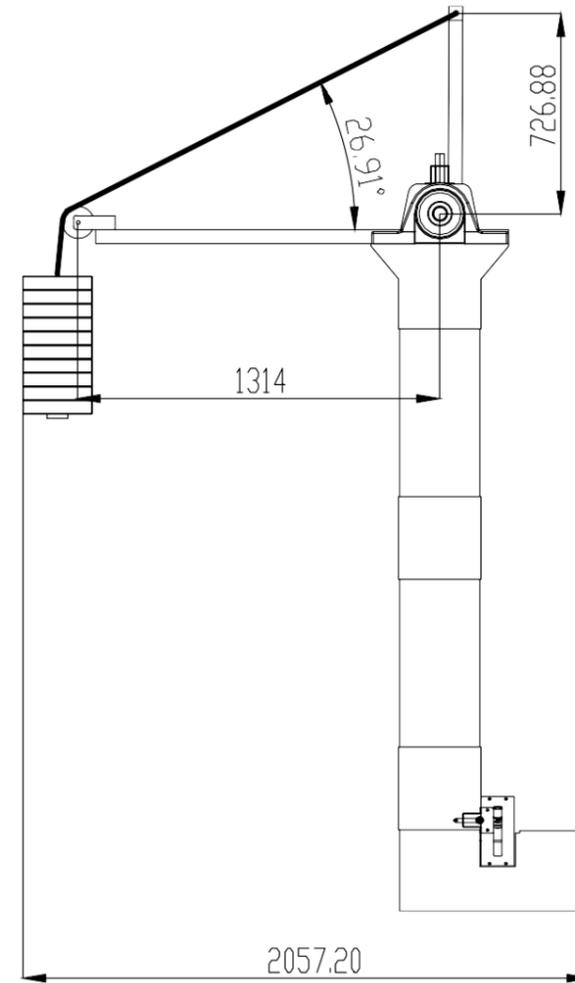
VISTA  
FRONTAL



VISTA  
SUPERIOR



VISTA  
LATERAL IZQUIERDA



Peso de compuerta abatible: 343 kg  
Peso total de contrapesos: 364 kg

AutoCAD SHX Text

AutoCAD SHX Text

2019-01-12 13:18:38

VISTA  
LATERAL IZQUIERDA

AutoCAD SHX Text

AutoCAD SHX Text

2019-01-12 13:18:38

VISTA  
SUPERIOR

AutoCAD SHX Text

AutoCAD SHX Text

2019-01-12 13:18:38

Peso total de contrapesos: 364 kg



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESC:  
1:25

SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS DE  
ESCOMBROS MEDIANTE EL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS DE UN  
MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA CUASIREAL

DISEÑADO POR:



P5

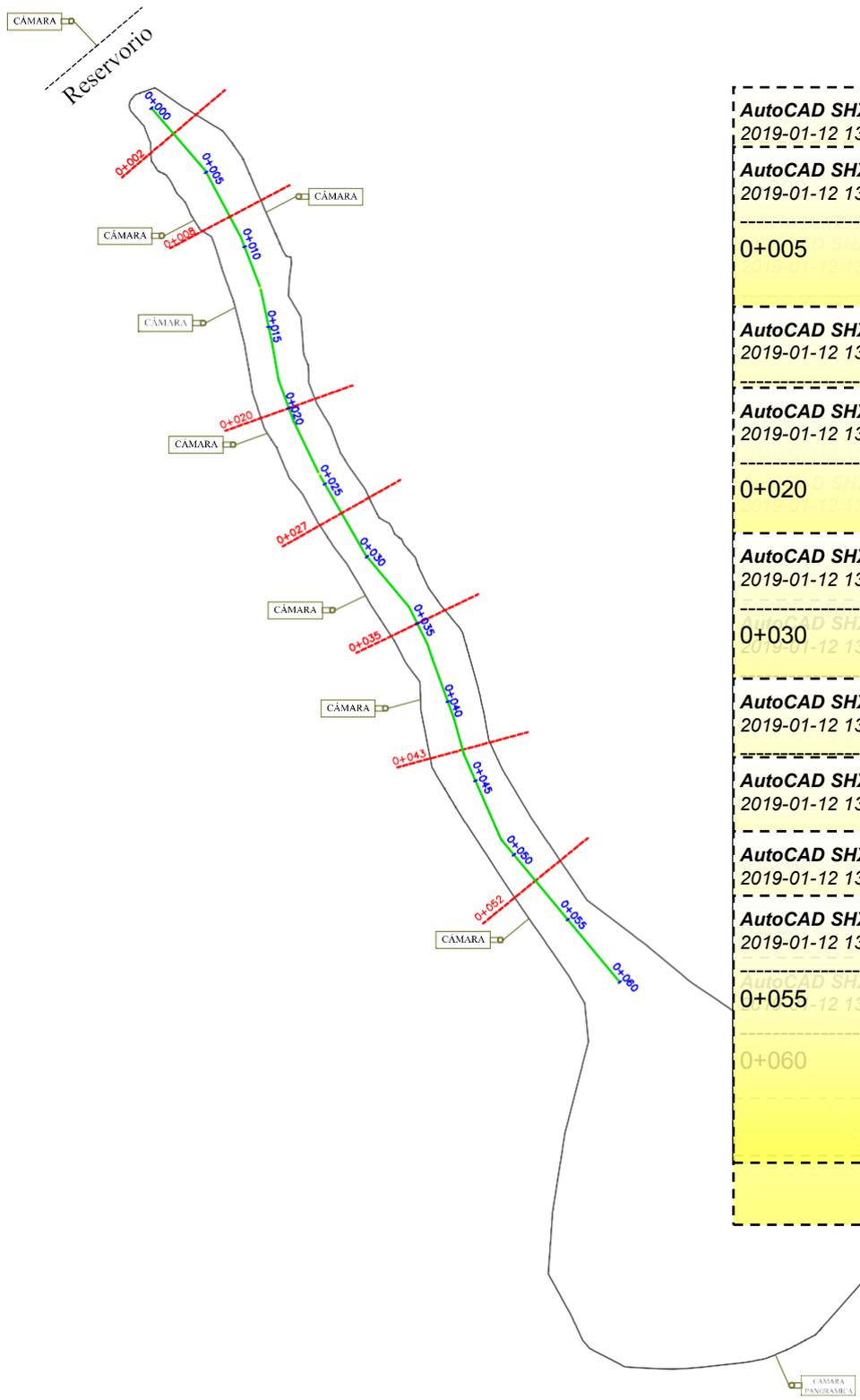
U.M.  
mm

ENSAMBLAJE COMPLETO DE LA COMPUERTA EXPERIMENTAL - VISTAS

Bach. FIGUEROA LEÓN, RUBEN ADRIÁN



FECHA  
DICIEMBRE, 2018



AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

0+005

AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

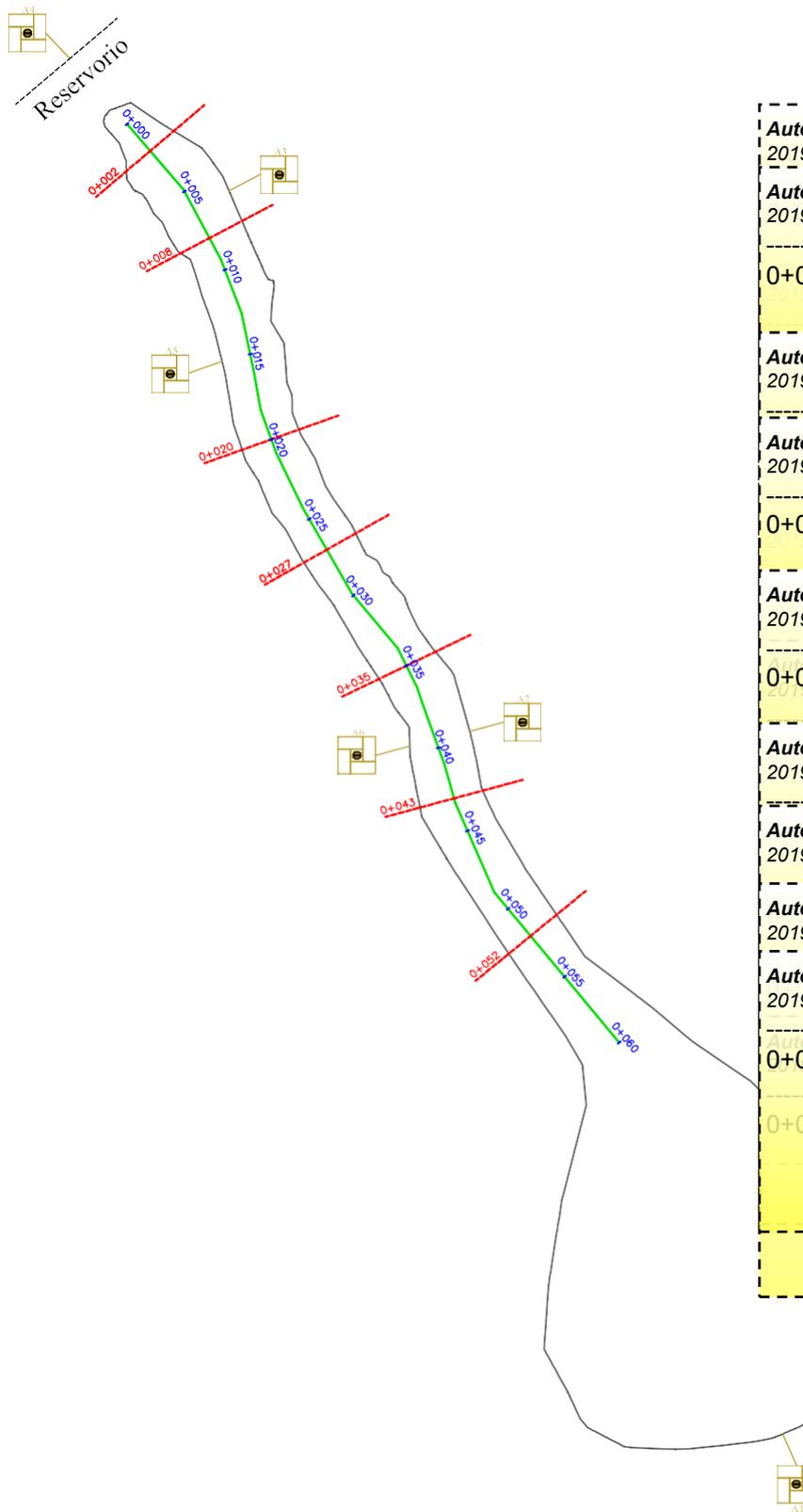
0+020

AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

0+055

0+060

	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA	FECHA DICIEMBRE, 2018
	ESC: 1:400	SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS DE ESCOMBROS MEDIANTE EL MÉTODO DE VOLUMENES FINITOS DE UN MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA CUASIREAL
U.M. m	CIRCUITO CERRADO DE VIDEO (CCTV) EN LA QUEBADA EXPERIMENTAL Bach. FIGUEROA LEÓN, RUBEN ADRIÁN	



AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

0+005

AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

0+020

AutoCAD SHX Text  
2019-01-12 13:18:38

0+060

	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA	FECHA
		DICIEMBRE, 2018
ESC: 1:400	SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS DE ESCOMBROS MEDIANTE EL MÉTODO DE VOLUMENES FINITOS DE UN MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA CUASIREAL	<h1>P7</h1>
U.M. m	PUNTOS DE CONTROL TOPOGRÁFICO EN LA QUEBADA EXPERIMENTAL	
	Bach. FIGUEROA LEÓN, RUBEN ADRIÁN	