

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA  
TRIDIMENSIONAL Y UNIDIMENSIONAL, DEL TRÁNSITO DE  
LAHARES PRIMARIOS EN EL SECTOR DE LA CALDERA DEL  
DRENAJE NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI.**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**DIANA LORENA VILAÑA BELTRAN**

**[diana.vilana@gmail.com](mailto:diana.vilana@gmail.com)**

**DIRECTOR: Ing. XIMENA DEL ROCÍO HIDALGO BUSTAMANTE, MSc.**

**[ximena.hidalgob@gmail.com](mailto:ximena.hidalgob@gmail.com)**

**CO-DIRECTOR: Dr. MARCO ANTONIO CASTRO DELGADO**

**[macd0706@gmail.com](mailto:macd0706@gmail.com)**

**Quito, junio 2017**

## DECLARACIÓN

Yo, Diana Lorena Vilaña Beltran, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Diana Lorena Vilaña Beltran

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diana Lorena Vilaña Beltran, bajo mi supervisión.

---

ING. XIMENA HIDALGO, MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por mostrarme su amor en la manera que ha guiado mi vida.

A mi madre Bilma Beltrán Barrionuevo quien venciendo cualquier obstáculo que se presentó, me dio los medios para poder estudiar, y a pesar de mis errores y fracasos siempre ha estado ahí apoyándome y creyendo en mí.

A mi esposo Andrés quien ha sido una fuente de inspiración y fortaleza en mi vida.

A mi abuelita Blanca Barrionuevo por con sus consejos, guía y apoyo incondicional. A mis hermanos Sandra y Daniel quienes de una u otra manera han hecho posible que yo haya podido llegar a culminar esta meta.

De manera especial agradezco a la Ing. Ximena Hidalgo, quien me dio la oportunidad de participar en los proyectos de investigación, los cuales han sido de gran aporte en mi conocimiento para desarrollar el presente proyecto de grado, al igual que su guía y apoyo incondicional en todo el desarrollo de mi tesis.

Agradezco también al Dr. Marco Castro y al Ing. Patricio Ortega, por brindarme su apoyo para el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Khaled Ahmad, por su gran apertura, apoyo y orientación en la elaboración del presente trabajo.

Finalmente agradezco al Ing. Eduardo Vásquez y a la Ing. Cristina Torres por las enseñanzas brindadas durante los proyectos que he podido compartir profesionalmente con ellos.

**D.L.V.B**

## **DEDICATORIA**

A Dios por su paciencia y guía incondicional y a la Virgen María por todo su amor.

A mi madre Bilma Beltrán, por toda su comprensión e incondicional amor de madre.

A mi esposo Andrés, por su paciencia, entrega y dedicación a nuestro hogar.

**D.L.V.B**

## TABLA DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
DEDICATORIA.....	V
TABLA DE CONTENIDOS .....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XV
ABREVIATURAS.....	XVII
RESUMEN .....	XVIII
ABSTRACT .....	XIX
CAPÍTULO I .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. ENFOQUE A LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. OBJETIVOS .....	2
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
CAPITULO II .....	4
RECOPIACIÓN TEÓRICA Y ESTUDIOS PREVIOS .....	4
2.1 BASE TEÓRICA.....	4
2.1.1 CONCEPTOS HIDRÁULICOS.....	4
2.1.1.1 Propiedades físicas de los fluidos. ....	4
Temperatura .....	4
Densidad ( $\rho$ ) .....	5
Peso específico ( $\gamma$ ) .....	5
Densidad relativa .....	6
Viscosidad .....	6
Viscosidad cinemática .....	7
Compresibilidad .....	7
2.1.1.2. Rugosidad de Manning .....	8
2.1.1.3. Clasificación de los fluidos: .....	11

a) Por esfuerzo tangencial: .....	11
b) Por el tipo de movimiento: .....	12
c) Por el espacio:.....	14
d) Por el tiempo .....	15
e) Según el tiempo y el espacio.....	15
f) Según el número de ejes considerados para el análisis.....	17
g) Según el régimen de flujo.....	17
h) Número de Froude .....	19
i) Número de Vedernikov .....	20
2.1.1.4. Ecuaciones Fundamentales de la Hidráulica .....	21
a) Ecuación de Continuidad.....	21
b) Ecuación de la Energía .....	23
c) Ecuaciones de Cantidad de Movimiento .....	30
d) Ecuación de Navier Stokes.....	39
e) Ecuación general de conservación.....	40
2.1.2 MODELACIÓN NUMÉRICA .....	41
2.1.2.1. CFD.....	41
2.1.2.2. Método de Diferencias Finitas.....	44
2.1.2.3. Método de Volúmenes finitos .....	44
2.1.2.5. Mallado.....	46
2.1.2.7. Ventajas e inconvenientes de un CFD .....	47
2.1.3 HISTORIA Y NATURALEZA ERUPTIVA DEL VOLCÁN COTOPAXI.....	47
2.1.3.1 Ubicación geográfica del volcán.....	47
2.1.3.2 Historia eruptiva .....	48
2.1.3.3 La última erupción importante del volcán Cotopaxi.....	48
2.1.3.4 Restos eruptivos a lo largo del río Pita.....	49
2.1.4 ESCENARIOS ERUPTIVOS. ....	52
Escenario 1: Evento pequeño .....	52
Escenario 2: Evento moderado .....	53
Escenario 3: Evento grande .....	54
Escenario 4: Evento muy grande .....	55

Probabilidad de suscitarse cada escenario eruptivo .....	56
2.1.5 DEFINICIÓN DE LAHAR Y TIPOS DE LAHARES. ....	58
Definición .....	58
Tipos de lahares.....	59
Flujo de agua .....	59
Flujo de lodo .....	59
Flujo Hiperconcentrado.....	59
Flujo de Detritos.....	59
2.1.6 INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA HEC-RAS Y CFD FLOW-3D.....	61
2.1.6.1. HEC-RAS.....	61
Sistema de Análisis de Ríos .....	61
Capacidad del programa.....	61
Ecuaciones fundamentales en el HEC-RAS .....	62
Ecuaciones de Saint Venant.....	63
Simulación del Flujo no Permanente .....	64
Transporte de sedimentos / cálculo del cauce.....	65
Análisis de la calidad de agua.....	65
Manejo de Datos en HEC-RAS.....	65
Condiciones de contorno HEC-RAS .....	68
2.1.6.2. CFD FLOW-3D.....	70
Tipos de archivos manejados en FLOW 3D .....	73
Modelo Shallow Water .....	75
2.2 ESTUDIOS PREVIOS .....	76
2.2.1. ESTUDIO DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS SOBRE LA INFRAESTRUCTURA DE LA EMAAP-Q Y LA FACILIDAD DE LAS OBRAS DE MITIGACIÓN ANTE UNA EVENTUAL ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI (E.E.I).....	76
2.2.1.1. Implementación del modelo de flujo Dilatante en “n” de Manning. ....	77
2.2.2. PREPARACIÓN DE LA BASE GEOMORFOLÓGICA PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI “FLANCO NORTE” (P.B.G). ....	80

2.2.2.1. Evaluación de los coeficientes de rugosidad absoluta. ....	81
2.2.3 ACTUALIZACIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL DEL FLUJO EN EL FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI PRODUCTO DE UNA ERUPCIÓN Y COMPARACIÓN CON LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL EN LA ZONA CONSOLIDADA DE SANGOLQUÍ.....	82
2.3 INFORMACIÓN OBTENIDA.....	83
2.3.1 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA .....	83
2.3.2 ÁREAS Y VOLÚMENES DEL CASQUETE GLACIAR.....	83
2.2.3 CAUDALES E HIDROGRAMAS.....	85
2.2.3.1 Caudales e hidrogramas para la modelación unidimensional. ....	86
a) Caudales e hidrogramas para la modelación unidimensional con flujo permanente. ....	86
b) Caudales e hidrogramas para la modelación unidimensional con flujo no permanente. ....	87
2.2.3.2 Caudales e hidrogramas para la modelación tridimensional. ....	92
2.3.4 VALORES DE “n” DE MANING.....	93
CAPITULO III .....	95
DELIMITACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO PARA LA MODELACIÓN.....	95
3.1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	95
3.1.1 TRAMOS DE MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL .....	98
3.1.2 TRAMO DE MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL .....	100
3.2. CONDICIONES DE CONTORNO.....	100
3.2.1. GENERACIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES. ....	100
3.2.2. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE RESISTENCIA AL MOVIMIENTO.....	103
3.2.2.1 COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING.....	103
3.2.2.2 RUGOSIDAD ABSOLUTA. ....	103
3.2.3 CONDICIONES DE CONTORNO MODELACIÓN HEC-RAS .....	104
3.2.3.1 Condiciones de contorno Modelación HEC-RAS para flujo permanente.....	104

3.2.3.2 Condiciones de contorno Modelación HEC-RAS para flujo no permanente.....	106
3.2.4 CONDICIONES DE CONTORNO MODELACIÓN FLOW-3D .....	107
CAPÍTULO IV .....	113
RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	113
4.1. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL EN HEC-RAS.....	113
4.1.1. PLAN DE CORRIDAS DEL MODELO UNIDIMENSIONAL EN HEC-RAS .....	113
4.1.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL EN HEC-RAS .....	114
4.1.2.1 Simulación Unidimensional para flujo permanente tramo Pita	
3. 114	
4.1.2.2 Simulación Unidimensional para flujo permanente tramo Santa Clara.....	115
4.1.2.3 Simulación Unidimensional para flujo no permanente tramo Pita 3.....	117
4.1.2.4 Simulación Unidimensional para flujo no permanente tramo Santa Clara.....	121
4.1.3 DISCUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN HEC-RAS .....	124
4.2. RESULTADOS CFD FLOW-3D.....	129
4.2.1. PLAN DE CORRIDAS DEL MODELO.....	129
4.2.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN FLOW-3D.....	137
4.2.3. DISCUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN FLOW-3D.....	141
4.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS ENTRE LA SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL EN CFD FLOW-3D Y LA SIMULACIÓN UNIDIMENSIONAL DEL PROGRAMA HEC-RAS.....	142
CONCLUSIONES.....	147
ESTUDIOS FUTUROS.....	150
BIBLIOGRAFIA .....	151

ANEXO 1.....	154
ANEXO 2.....	165
ANEXO 3.....	169
ANEXO 4.....	180
ANEXO 5.....	185

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: TIPOS DE COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN FLUIDO .....	12
FIGURA 2.2: EJEMPLO DE CANALIZACIÓN DE AGUA.....	13
FIGURA 2.3: EJEMPLO DE RED DE AGUA POTABLE. ....	14
FIGURA 2.4: VENA LÍQUIDA.....	22
FIGURA 2.5 : EQUILIBRIO DE UNA PARTÍCULA.....	24
FIGURA 2.6: DESCRIPCIÓN DE LAS FUERZAS DE PRESIÓN.....	25
FIGURA 2.7: TENSIONES EN UN PRISMA IDEALIZADO DE FLUIDO .....	26
FIGURA 2.8: PESO DEL CUERPO EN UN PRISMA IDEALIZADO DE FLUIDO. ....	27
FIGURA 2.9: EQUILIBRIO DE UNA PARTÍCULA.....	31
FIGURA 2.10: DESCRIPCIÓN DE LAS FUERZAS DE PRESIÓN.....	32
FIGURA 2.11: TENSIONES EN UN PRISMA IDEALIZADO DE FLUIDO. ....	33
FIGURA 2.12: TENSIONES POSITIVAS .....	34
FIGURA 2.13: TENSIONES DE REYNOLDS .....	34
FIGURA 2.14: TENSIONES EN EL EJE “X” EN UN PRISMA IDEALIZADO DE FLUIDO. ....	35
FIGURA 2.15: TENSIONES EN EL EJE “Y” EN UN PRISMA IDEALIZADO DE FLUIDO. ....	35
FIGURA 2.16: TENSIONES EN EL EJE “Z” EN UN PRISMA IDEALIZADO DE FLUIDO. ....	36
FIGURA 2.17: CUADRO DE VALORES DE LA ACELERACIÓN.....	38
FIGURA 2.18: VALORES DE LAS TENSIONES DE REYNOLDS .....	39
FIGURA 2.19: SECUENCIA DE DESARROLLO TIPO EN LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	43
FIGURA 2.20: EJEMPLO DE ECUACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA EL MÉTODO DE ECUACIONES FINITAS. ....	45
FIGURA 2.21: REPRESENTACIÓN DEL ESCENARIO ERUPTIVO 1 .....	53
FIGURA 2.22: REPRESENTACIÓN DEL ESCENARIO ERUPTIVO 2 .....	54
FIGURA 2.23: REPRESENTACIÓN DEL ESCENARIO ERUPTIVO 3 .....	55

FIGURA 2.24: REPRESENTACIÓN DEL ESCENARIO ERUPTIVO 4 .....	56
FIGURA 2.25: ESQUEMA DE LA TRAYECTORIA Y SEGREGACIÓN DE LAS PARTÍCULAS EN UN FLUJO DE DETRITOS.....	60
FIGURA 2.26:: INTERFACE DE USUARIO HEC-RAS / DESCRIPCIÓN DE COMANDOS .....	66
FIGURA 2.27: SECCIONES DE MODELACIÓN EN UN RÍO. ....	67
FIGURA 2.28: TRAMO DE SIMULACIÓN GENERADO CON LA EXTENSIÓN HEC-GEORAS.....	68
FIGURA 2.29: INTERFAZ DE INGRESO DE LAS CONDICIONES DE BORDE EN EL SOFTWARE HEC-RAS.....	69
FIGURA 2.30 INTERFAZ DE INGRESO DE LAS CONDICIONES DE BORDE EN EL SOFTWARE HEC-RAS.....	69
FIGURA 2.31: Logotipo FLOW-3D .....	70
FIGURA 2.32: DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA DE GRANO PARA LA ZONA PROXIMAL. LA LÍNEA AZUL Y ROJA CORRESPONDERÍA A FLUJOS "GRANULAR" E "HIPERCONCENTRADO" RESPECTIVAMENTE.....	78
FIGURA 2.33: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANO, LAHAR DE 1877 .....	78
FIGURA 2.34: Clasificación de los flujos según el tamaño de grano y sorteo.....	79
FIGURA 2.35: DISTRIBUCIÓN DE GLACIARES DEL VOLCÁN COTOPAXI.....	84
FIGURA 2.36: NOMBRES DE LOS TRAMOS DE MODELACIÓN.....	86
FIGURA 2.37: CAUDALES ESTIMADOS EN EL SECTOR DE LA CALDERA PARA EL EVENTO DE 1877.....	87
FIGURA 2.38: HIDROGRAMA DE SALIDA DEL TRAMO PITA2.....	88
FIGURA 2.39: HIDROGRAMA DE INGRESO MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL TRAMO SANTA CLARA.....	91
FIGURA 2.40: HIDROGRAMA DE INGRESO MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL TRAMO PITA 3.....	91

FIGURA 2.41: SECCIÓN DE TOMA DEL HIDROGRAMA PARA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.....	92
FIGURA 2.42: HIDROGRAMA DE INGRESO MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.....	93
FIGURA 3.1: RED HIDROGRAFÍA FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI.....	95
FIGURA 3.2: ÁREA DE ESTUDIO.....	96
FIGURA 3.3: TRAMOS DE MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL.....	99
FIGURA 3.4: VENTANA DEL SOFTWARE HEC-RAS CON LA GEOMETRÍA DEL TRAMO PITA 3.....	101
FIGURA 3.5: VENTANA DEL SOFTWARE HEC-RAS CON LA GEOMETRÍA DEL TRAMO SANTA CLARA.....	102
FIGURA 3.6: VENTANAS DE HEC-RAS CON LAS CONDICIONES DE BORDE PARA EL RÍO PITA 3 EN FLUJO PERMANENTE.....	105
FIGURA 3.7: VENTANAS DE HEC-RAS CON LAS CONDICIONES DE BORDE PARA EL RÍO PITA 3 EN FLUJO PERMANENTE.....	105
FIGURA 3.8: VENTANAS DE HEC-RAS CON LAS CONDICIONES DE BORDE PARA EL RÍO PITA 3 EN FLUJO NO PERMANENTE.....	106
FIGURA 3.9: VENTANAS DE HEC-RAS CON LAS CONDICIONES DE BORDE PARA EL RÍO PITA 3 EN FLUJO NO PERMANENTE.....	107
FIGURA 3.10: TOPOGRAFÍA INGRESADA EN EL CFD FLOW-3D.....	108
FIGURA 3.11: MALLAS Y SALIDA DE AGUA PARA EL TRAMO DE SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL EN EL CFD FLOW-3D.....	108
FIGURA 3.12: MALLAS CON CONDICIONES DE BORDE PARA EL TRAMO DE SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL EN EL CFD FLOW-3D.....	109
FIGURA 3.13: PERFIL TRANSVERSAL DEL INICIO DEL TRAMO DE MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL CON LA COTA DE INGRESO DE LA SUPERFICIE DE AGUA.....	110
FIGURA 3.14: DIRECCIÓN DEL INGRESO DEL FLUJO EN EL TRAMO DE MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.....	110
FIGURA 3.15: VENTANA DEL CFD FLOW-3D CON LAS CONDICIONES DE BORDE PARA LA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.....	111

FIGURA 3.16: VENTANA DEL CFD FLOW-3D CON EL HIDROGRAMA DE INGRESO PARA LA MODELACIÓN.....	112
FIGURA 4.1: PERFIL RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN DEL TRAMO PITA 3 .....	115
FIGURA 4.2: PERFIL RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN DEL TRAMO SANTA CLARA .....	117
FIGURA 4.3: PERFIL RESULTADO DE MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO PITA 3. ....	119
FIGURA 4.4: VISUALIZACIÓN EN 3D DE LAS SECCIONES CON LOS CALADOS RESULTANTES DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO PITA 3. ....	120
FIGURA 4.5: HIDROGRAMA DE LA SECCIÓN 24.21488. RESULTADO DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO PITA 3.....	121
FIGURA 4.6: PERFIL RESULTADO DE MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO SANTA CLARA. ....	123
FIGURA 4.7: VISUALIZACIÓN EN 3D DE LAS SECCIONES CON LOS CALADOS RESULTANTES DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO SANTA CLARA. ....	123
FIGURA 4.8: HIDROGRAMA DE LA SECCIÓN 54.59314. RESULTADO DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO SANTA CLARA.....	124
FIGURA 4.9: TOPOGRAFÍA PARA EL MODELO SHALLOW WATER Y TRIDIMENSIONAL. ....	130
FIGURA 4.10: FLUIDO INGRESADO EN EL CFD FLOW-3D.....	134
FIGURA 4.11: PROPIEDADES DE SUPERFICIE DEL COMPONENTE 1 (COMPONENTE DE TOPOGRAFÍA).....	134
FIGURA 4.12: PROPIEDADES DE SUPERFICIE DEL COMPONENTE 2 (COMPONENTE DE RUGOSIDAD).....	135

FIGURA 4.13: PROPIEDADES DE SUPERFICIE DEL COMPONENTE 2 (COMPONENTE DE RUGOSIDAD).....	136
FIGURA 4.14: VENTANA DE CHEQUEO PREVIO .....	136
FIGURA 4.15: VENTANA DEL CFD FLOW-3D DONDE SE VE LA OPCIÓN RUNTIME OPTIONS.....	137
FIGURA 4.16: TIEMPO DE SIMULACIÓN EN EL CFD FLOW-3D .....	137
FIGURA 4.17: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO PITA (TRAMO PITA 3).....	138
FIGURA 4.18: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO SANTA CLARA (TRAMO SANTA CLARA) .....	138
FIGURA 4.19: NIVELES MÁXIMOS A LOS QUE LLEGA EL LAHAR EN LA SECCIÓN “ANTES CASCADA MOLINUCO” EN LA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.....	139
FIGURA 4.20: NIVELES MÁXIMOS A LOS QUE LLEGA EL LAHAR EN LA SECCIÓN “LA CALDERA (SANTA CLARA)” EN LA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.....	140
FIGURA 4.21: NIVELES MÁXIMOS A LOS QUE LLEGA EL LAHAR EN LA SECCIÓN “LA CALDERA (RÍO PITA)” EN LA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.....	140
FIGURA 4.22: GEOMETRÍA DEL PROGRAMA HEC-RAS Y CFD FLOW- 3D.....	143

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 TIPO DE FLUJO DE ACUERDO AL NÚMERO DE REYNOLDS .....	19
TABLA 2.2 TIPO DE FLUJO DE ACUERDO AL NÚMERO DE REYNOLDS .....	20
TABLA 2.3: SÍNTESIS DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCÁN COTOPAXI EN LOS ÚLTIMOS 2000 AÑOS. ....	57
TABLA 2.4: VARIACIÓN DEL ÁREA DEL GLACIAR DEL FLANCO NORTE 1976-2011 .....	84
TABLA 2.5: VOLUMEN DE LAHAR PARA EL ESCENARIO ERUPTIVO 3. ....	85
TABLA 2.6: PORCENTAJE DE VOLUMEN QUE PASA A LOS TRAMOS PITA3 Y SANTA CLARA PARA EL EVENTO DE 1877. ....	89
TABLA 2.7: CAUDALES PICO Y VOLÚMENES DE INGRESO DE LOS TRAMOS DE MODELACIÓN. ....	90
TABLA 2.8: SECCIONES DE VESTIGIO DE 1877 EN LOS TRAMOS PITA 2, PITA 3 Y SANTA CLARA. ....	94
TABLA 3.1: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	97
TABLA 3.2: COORDENADAS DE LOS TRAMOS DE MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL .....	98
TABLA 4.1: TABLA DE RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL TRAMO PITA3. ....	114
TABLA 4.2: TABLA DE RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL TRAMO SANTA CLARA.....	116
TABLA 4.3: TABLA DE RESULTADOS DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO PITA 3. ....	118
TABLA 4.4: TABLA DE RESULTADOS DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO SANTA CLARA. ....	122
TABLA 4.5: RESUMEN DE RESULTADOS DE CALADOS DEL ESTUDIO E.E.I Y PROYECTO DE TITULACIÓN.....	125

TABLA 4.6: RESUMEN DE RESULTADOS DE VELOCIDADES Y NÚMEROS DE FROUDE DEL ESTUDIO E.E.I Y PROYECTO DE TITULACIÓN.....	126
TABLA 4.7: RESUMEN DE RESULTADOS DE VELOCIDADES DEL VESTIGIO DE 1877 Y PROYECTO DE TITULACIÓN.....	127
TABLA 4.8: VALORES D50 PARA LA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.....	130
TABLA 4.9: RESUMEN DE RESULTADOS DE CALADOS ESTIMADOS EN CAMPO Y PROYECTO DE TITULACIÓN.....	141
TABLA 4.10: RESUMEN DE RESULTADOS DE VELOCIDADES ESTIMADAS EN CAMPO Y PROYECTO DE TITULACIÓN.....	142
TABLA 4.11: TABLA DE RESULTADOS DE CALADOS DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL EN LAS SECCIONES DE VESTIGIO.....	145
TABLA 4.12: TABLA DE RESULTADOS DE VELOCIDADES DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL EN LAS SECCIONES DE VESTIGIO.....	145
TABLA 4.13: TABLA DE RESULTADOS DE VOLÚMENES DE SALIDA DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL.....	146

## ABREVIATURAS

MDT	Modelo digital del terreno
E.E.I	Estudio de la evaluación de impactos sobre la infraestructura de la EMAAP-Q y la facilidad de las obras de mitigación ante una eventual erupción del volcán Cotopaxi.
P.B.G	Preparación de la base geomorfológica para la simulación numérica tridimensional del flujo de lahares del volcán cotopaxi “flanco norte”.
Proyecto PII-DICA-001-2016	Actualización de la modelación numérica unidimensional del flujo en el flanco norte del volcán cotopaxi producto de una erupción y comparación con la modelación numérica bidimensional y tridimensional en la zona consolidada de sangolquí.
IGM	Instituto Geográfico Militar
CFD	Computational Fluid Dynamics (Dinámica Computacional de Fluidos)

## RESUMEN

El presente proyecto de titulación tiene como objetivo, analizar el modelo numérico CFD FLOW-3D y el software HEC-RAS para la simulación del flujo de lahares primarios en la zona de la Caldera, de tal manera que se pueda determinar la eficiencia de cada uno y concluir cuál de los dos es el más óptimo.

Para ello, se revisará el fundamento teórico que emplea el CFD FLOW-3D y el software HEC-RAS. Se realizará una recopilación de la información útil para las simulaciones como: topografía, áreas y volúmenes del casquete glaciar, caudales e hidrogramas, calados de vestigios del evento eruptivo de 1877 y valores obtenidos en las estaciones de RunUp; posteriormente se establecerá el dominio de simulación, los tramos de modelación unidimensional y además se establecerá las condiciones de contorno para la simulación tridimensional y para cada tramo de la modelación unidimensional.

A continuación, se procederá a elaborar un plan de corridas para cada modelación. Posteriormente, se llevarán a cabo las dos simulaciones, cuyos resultados serán analizados en función de los datos de calados y de velocidades estimadas encontrados en campo correspondientes al evento eruptivo de 1877; esto en las secciones existentes en el dominio de simulación.

Se realizará una comparación de los resultados obtenidos de la simulación unidimensional con la tridimensional y finalmente se concluirá, en función de los vestigios del evento de 1877, cuál de los dos modelos es más eficiente.

## ABSTRACT

This dissertation project has as objective, analyzing the CFD FLOW-3D numerical model and the HEC-RAS software through the simulation of the primary lahars FLOW in the Caldera zone. Based on the results obtained, it will be possible to determine the efficiency of each one and to conclude which of the two is the most optimal software.

To comply with the above, the theoretical basis used by the CFD FLOW-3D and HEC-RAS software, will be reviewed. A compilation of the useful information for the simulations will be carried out. Information such as: topography, areas and volumes of the glacier cap, FLOWS and hydrographs, traces of the eruptive event of 1877 and values obtained in RunUp stations. Then, the simulation domain and the one-dimensional modeling sections will be established. The boundary conditions will be defined for the three-dimensional simulation and for each section of the one-dimensional modeling.

Next, it will proceed to elaborate a plan of runs for each modeling. Later, the two simulations will be carried out. The results will be analyzed according to the data of drafts and speeds found in field corresponding to the eruptive event of 1877. This in the existing sections in the simulation domain.

A comparison between the results obtained from the one-dimensional simulation and with the three-dimensional simulation will be carried out. Finally it will be concluded, according to the vestiges of the 1877 event, which of the two models is more efficient.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. ENFOQUE A LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación está orientado a comparar los resultados de la modelación numérica tridimensional en FLOW-3D con los resultados de la modelación unidimensional en HEC-RAS del flujo de lahares primarios en el sector de la caldera del drenaje norte del volcán Cotopaxi, para posteriormente analizar la diferencia de los resultados y así determinar la eficiencia de la modelación numérica tridimensional en FLOW-3D para flujo de lahares primarios.

Para la realización del proyecto se investigará el manejo del CFD FLOW-3D: herramientas, funciones, interpretación de resultados; así como también los conocimientos necesarios para introducir y procesar la información adecuadamente. Además, será necesaria la recopilación de información a ser ingresada tales como curvas de nivel e hidrogramas del sitio a investigar.

En cuanto a la metodología de investigación, se utilizará el método de la modelación para llevar a cabo las modelaciones numéricas del sector de interés en el programa HEC-RAS y CFD FLOW-3D la misma que ha tenido buenos resultados en modelamientos numéricos tanto para HEC-RAS como CFD FLOW-3D (Ruis & Narváez, 2015; Silva & Cueva, 2010; Carrillo, 2010-2012). Posteriormente se hará uso del método lógico inductivo para poder determinar si el comportamiento del CFD FLOW-3D se acerca a la realidad comparándolo con los resultados obtenidos en el programa HEC-RAS.

Es así que el modelamiento numérico a realizarse en este proyecto permitirá llegar a la obtención de videos actualizados del comportamiento del flujo de

lahares primarios en el sector de la caldera del drenaje norte del volcán Cotopaxi ante una posible erupción, sirviendo como base de información a las personas aledañas al sector de estudio.

## **1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

En los últimos años la modelación numérica en FLOW-3D se ha concentrado en estructuras hidráulicas, dejando una incógnita sobre el comportamiento del CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) para modelaciones en ríos y en tránsito de lahares. En contraparte el programa HEC-RAS ha sido muy usado para modelación de ríos obteniendo buenos resultados (Vargas, Santos, & Cubillos, 2008; Silva & Cueva, 2010).

Si la situación actual no cambia, es decir, si no se prueba el comportamiento del CFD FLOW-3D para modelamiento en ríos y en tránsito de lahares, no se podrá determinar cuan factible es la modelación numérica en 3D y no se tendría la posibilidad de apreciar el comportamiento de los ríos y lahares de una manera más aproximada a la realidad, ya que es lo que CFD FLOW-3D permite.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar la eficacia de la modelación numérica tridimensional del flujo de lahares primarios en el sector de la caldera del drenaje norte del volcán Cotopaxi en CFD FLOW-3D mediante la comparación con la modelación unidimensional del mismo sector en el programa HEC-RAS.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Comprender el fundamento teórico necesario para llevar a cabo la modelación numérica en el CFD FLOW-3D y el programa HEC-RAS.
- Determinar las condiciones de contorno y delimitación del sector de la caldera del drenaje norte del volcán Cotopaxi que serán usados para las modelaciones numéricas.
- Realizar la simulación numérica unidimensional del flujo de lahares primarios en el sector de la caldera del drenaje norte del volcán Cotopaxi en el programa HEC-RAS y analizar los resultados obtenidos.
- Realizar la simulación numérica tridimensional del flujo de lahares primarios en el sector de la caldera del drenaje norte del volcán Cotopaxi en el CFD FLOW-3D y analizar los resultados obtenidos.
- Comparar la simulación tridimensional obtenida en CFD FLOW-3D con la simulación unidimensional del programa HEC-RAS y determinar la viabilidad del uso del CFD para este tipo de simulaciones.

## **CAPITULO II**

### **RECOPIACIÓN TEÓRICA Y ESTUDIOS PREVIOS**

#### **2.1 BASE TEÓRICA.**

##### **2.1.1 CONCEPTOS HIDRÁULICOS.**

###### **2.1.1.1 Propiedades físicas de los fluidos.**

En la Naturaleza, la materia se puede encontrar en tres estados: sólido, líquido y gaseoso; de los cuales los dos últimos se conocen como fluidos. Los fluidos, a diferencia de los sólidos, pueden cambiar fácilmente la disposición relativa de sus moléculas.

Para estudiar el comportamiento de los fluidos se debería estudiar cada una de las moléculas del mismo, sin embargo, se los considera como un medio continuo ya que las aplicaciones de interés sobre ellos buscan sus condiciones medias, tales como velocidad, presión, temperatura, densidad, etc.

Se describen a continuación algunos de las propiedades físicas más importantes de los fluidos:

#### **Temperatura**

Esta magnitud se relaciona con la actividad molecular que resulta de la transferencia de calor. (Sotelo, 1997). Las escalas de medida han tomado como referencia al Mercurio y se define en términos de su expansión volumétrica. Una de las escalas es la de grados Celsius, en donde se consideró que el cero de la escala correspondía al punto de congelación del agua y 100°C el punto de ebullición de la misma en condiciones normales.

Se fijó el cero absoluto como aquella temperatura en la cual cesaba la actividad molecular como producto de la transferencia de calor y esta correspondía a  $-273^{\circ}\text{C}$  o a su vez a  $0^{\circ}\text{K}$  en una segunda escala que se creó por conveniencia, llamada escala Kelvin.

Adicionalmente, la energía calorífica de los fluidos se mide en Joules en el sistema métrico y en BTU en el sistema inglés.

### **Densidad ( $\rho$ )**

Representa la masa del fluido contenida en la unidad de volumen (Sotelo, 1997). Las unidades correspondientes en el sistema internacional son  $\text{Kg}/\text{m}^3$ .

### **Peso específico ( $\gamma$ )**

Está muy relacionado con la densidad y expresa el peso de fluido por unidad de volumen. Su expresión de cálculo es:

$$\gamma = \frac{\omega}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (2.1)$$

Donde:

$\gamma$ : peso específico

$\omega$ : peso de la sustancia

V: Volumen de la sustancia

m: masa de la sustancia

g: aceleración de la gravedad

$\rho$ : densidad de la sustancia

### Densidad relativa

Otra forma de calcular la densidad o el peso específico de un líquido es a través de la densidad relativa, la cual es adimensional y toma como referencia los valores correspondientes al agua:

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_{agua}} = \frac{\gamma}{\gamma_{agua}} \quad (2.2)$$

Se debe destacar que la densidad de los líquidos depende de la temperatura, pero no así de la presión, por lo que se les puede considerar incompresibles.

### Viscosidad

La viscosidad de un fluido mide la resistencia del mismo a fluir, como resultado de la cohesión e interacción de sus moléculas (Sotelo, 1997).

De acuerdo a Newton, el esfuerzo que se produce de manera tangencial entre dos láminas de fluido separadas una distancia  $dy$ , es proporcional al gradiente transversal de velocidades  $\partial v / \partial y$  de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.3)$$

Donde  $\mu$  es una magnitud que caracteriza la viscosidad del fluido y se conoce como *viscosidad dinámica* o simplemente *viscosidad*.

La viscosidad dinámica es función principal de la presión y la temperatura, aunque la dependencia con respecto a esta última es despreciable. Es así que la viscosidad en los líquidos disminuye con el aumento de la temperatura, mientras que bajo la misma circunstancia la viscosidad de los gases aumenta.

Las unidades de medida de la viscosidad dinámica en el Sistema Internacional (SI) es pascal-segundo (Pa·s) o (Kg·m<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>). En el Sistema Cegesimal (sistema CGS (centímetro, gramo, segundo)) la unidad correspondiente se conoce como Poise.

$$1 \text{ poise} = 100 \text{ centipoise} = 1 \text{ g/(cm}\cdot\text{s)} = 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

### Viscosidad cinemática

Se origina de la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad de la sustancia. La unidad correspondiente en el SI es el (m<sup>2</sup>/s). La unidad que le corresponde en el sistema CGS es el Stoke (abreviado S o St).

$$1 \text{ stoke} = 100 \text{ centistokes} = 1 \text{ cm}^2/\text{s} = 0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$$

### Compresibilidad

La compresibilidad es una medida del cambio de volumen (y a consecuencia también de su densidad) cuando el líquido es sometido a diversas presiones. (Sotelo, 1997).

Una medida directa de la compresibilidad de un fluido constituye el módulo de elasticidad volumétrica, que se expresa de la siguiente manera:

$$E_V = -\frac{D_P}{D_V/V} = +\frac{D_P}{D_P/P} \quad (2.4)$$

Donde:

$E_v$  : Módulo de elasticidad volumétrica

$p$ : presión

$\rho$ : densidad

$v$ : velocidad

Los líquidos son considerados incompresibles ya que sufren pequeñas variaciones de volumen y densidad inclusive para grandes variaciones de presión; esto debido a que poseen un módulo de elasticidad volumétrica relativamente grande que depende de la temperatura.

### 2.1.1.2. Rugosidad de Manning

En 1889, Robert Manning, Ingeniero Irlandés, presentó en el Instituto de Ingenieros Civiles de Irlanda, una fórmula para calcular la velocidad del agua en canales abiertos y tuberías, que después de sufrir algunas modificaciones, llega a su forma actual descrita a continuación en unidades métricas:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (2.5)$$

Donde:

V = Velocidad media en m/s

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

R = Radio hidráulico

S = Pendiente de la línea de energía

La misma ecuación puede ser expresada en unidades inglesas de la siguiente manera:

$$V = \frac{1.486}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (2.6)$$

La ecuación de Manning es de naturaleza empírica, ya que se obtuvo como resultado de una serie de ajuste de curvas, sin embargo, se ha constituido en la fórmula más empleada, de todas las fórmulas de flujo uniforme, para cálculos de escurrimiento en canal abierto.

### **Selección del coeficiente de rugosidad de Manning**

No hay un procedimiento exacto para establecer el coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning. Con el nivel de conocimiento que se tiene, seleccionar un valor de  $n$  significa estimar la resistencia al flujo en un determinado canal, lo cual realmente es un asunto de intangibles. Para ingenieros con experiencia, significa utilizar profundos criterios de Ingeniería; para principiantes, es un proceso de adivinanza y diferentes individuos, obtendrán diferentes resultados. (Ven Te Chow, 1994)

Para poder determinar de mejor manera el valor del coeficiente de rugosidad, se deberá tomar en cuenta ciertas consideraciones tales como: entender los factores que afectan el valor de  $n$  con el fin de disminuir el rango de incertidumbre, revisar los coeficientes de rugosidad para canales de los cuales ya se conocen su valor y consultar tablas de valores de  $n$  para canales de diferentes tipos.

Entre los diferentes factores que inciden sobre el coeficiente de rugosidad de Manning se deben tomar en cuenta factores tanto naturales como artificiales. Ven Te Chow describe algunos de estos factores a tomar en cuenta, los cuales se mencionan a continuación.

Rugosidad superficial. - Está determinada por el tamaño y forma de los granos por los cuales circula el fluido, produciendo un efecto retardador del mismo. De manera general, los granos finos dan un valor de  $n$  pequeño, mientras que los granos gruesos dan un valor alto de  $n$ .

Generalmente en el fondo de los canales se acumula sedimento grande y pesado, lo cual hace que el fondo del canal sea más rugoso y el valor de  $n$  sea mayor cuando el nivel del flujo sea bajo. De igual manera cuando el nivel del agua es alto, una parte de la energía se emplea para mover los sedimentos lo cual hace que el valor de  $n$  se incremente.

Vegetación. – Se trata de un elemento superficial que reduce la capacidad del fluido para desplazarse. Depende de factores tales como la densidad, la distribución, la altura y el tipo de vegetación.

Irregularidad del canal. - Se consideran irregularidades en el perímetro mojado, así como cambios de forma y tamaño en las secciones transversales a lo largo del canal. Cambios que se producen de manera gradual no generan un cambio considerable en el valor de  $n$ , sin embargo, cuando el cambio es abrupto entre secciones pequeñas y grandes, el valor de  $n$  deberá ser mucho mayor.

Alineamiento del canal. – Al presentarse curvas suaves con radios grandes se tendrán valores bajos de  $n$ , por el contrario, al presentarse curvas bruscas el valor de  $n$  será elevado.

Sedimentación y socavación. – La sedimentación puede hacer que la irregularidad de un canal se pierda y se vuelva relativamente uniforme produciendo de esta manera una disminución en el valor de  $n$ . Por otro lado, la socavación puede producir el efecto contrario y aumentar el valor de  $n$ .

*Obstrucción.* – La presencia de obstáculos en el camino del fluido tales como troncos de árboles, pilares de puentes, piedras de tamaño considerable, etc., harán que el valor de  $n$  se incremente en valores que dependerá del tipo de obstrucción, del tamaño, de la forma, del número de obstáculos, de la disposición, entre otros.

Tamaño y forma del canal. – Un incremento en el radio hidráulico puede aumentar o disminuir el  $n$ , según las condiciones del canal. (Ven Te Chow, 1994).

Nivel y caudal. – El valor de  $n$  disminuye cuando se produce un aumento de nivel y caudal. Cuando ocurre lo contrario y el agua es poco profunda, las irregularidades del fondo son más expuestas y sus efectos son más pronunciados, haciendo que el valor de  $n$  sea mayor. Por otro lado, el valor de  $n$  puede ser mayor si los márgenes están cubiertos por vegetación o por material rugoso.

Cambio estacional. – Debido a que en el canal puede haber presencia de plantas, hierbas, maleza, árboles, etc., el valor de  $n$  puede ser mayor en la época en la cual estas plantas crezcan y podrá disminuir en la época en la cual se mantengan inactivas.

Material en suspensión y carga de lecho. – Este tipo de material restará energía del movimiento y causará que el valor de  $n$  se incremente.

En definitiva, se deberá considerar que cualquier factor que disminuya la velocidad y cree turbulencia incrementará el valor de  $n$ , mientras que aquellos que produzcan una disminución de la turbulencia y el retardo, disminuirán el valor de  $n$ .

### 2.1.1.3. Clasificación de los fluidos:

Los Fluidos se pueden clasificar de acuerdo a varios criterios:

#### a) Por esfuerzo tangencial:

##### Fluidos Newtonianos

Los fluidos Newtonianos son aquellos fluidos que, al ser sometidos a un esfuerzo tangencial, presentan una relación directamente proporcional entre su gradiente transversal de velocidades y el esfuerzo al que fue sometido.

$$\tau \propto \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.7)$$

Donde:

$\tau$  : Esfuerzo tangencial

$\partial v$  : diferencial de la velocidad

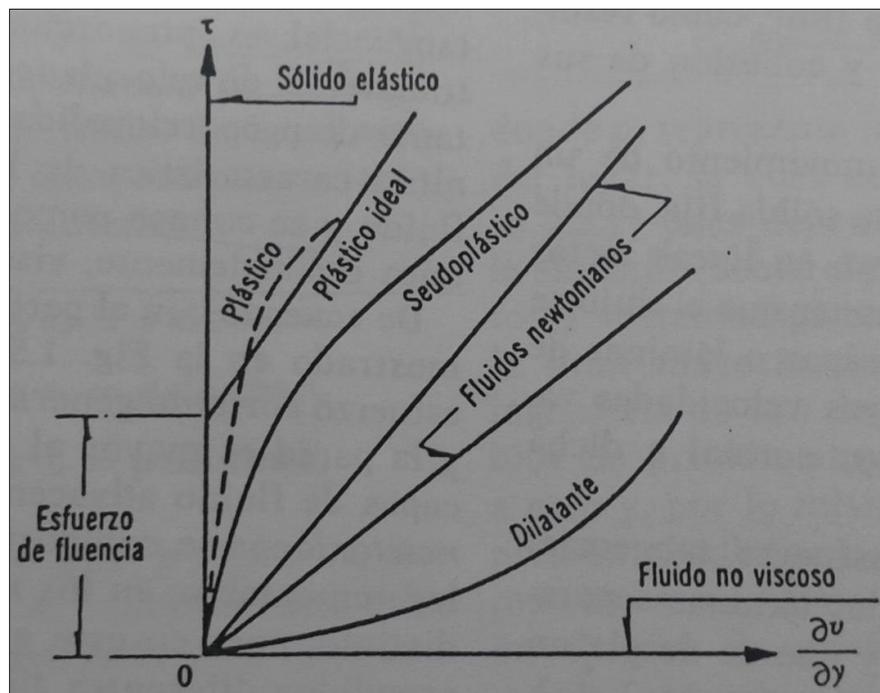
$\partial y$  : distancia de separación entre dos láminas de flujo laminar

## Fluidos No Newtonianos

Los fluidos no Newtonianos son aquellos que a diferencia de los newtonianos, el gradiente transversal de velocidad no es directamente proporcional al esfuerzo tangencial aplicado.

De esta clasificación de fluidos existen varios tipos como se muestra en la figura 2.1:

**FIGURA 2.1: TIPOS DE COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN FLUIDO**



FUENTE: Sotelo, 1997

### b) Por el tipo de movimiento:

#### Flujo libre:

Se trata de un flujo libre cuando el movimiento del fluido se produce, debido a la fuerza de gravedad, a través de un conducto abierto o cerrado parcialmente, de manera que existe una superficie libre que está en contacto con la atmósfera.

En forma natural, se encuentra flujo libre en lugares como ríos y de manera artificial en canales de conducción de fluidos tales como drenajes, alcantarillados, etc.

Se muestra en la Figura 2.2 un ejemplo de un flujo libre:

**FIGURA 2.2: EJEMPLO DE CANALIZACIÓN DE AGUA.**



FUENTE: Diario Correo de Perú, 2013

**Flujo a presión:**

El líquido circula por conductos cerrados dentro de los cuales se ejerce una presión diferente a la presión atmosférica. El movimiento se produce debido a que existe una presión hidráulica. Un claro ejemplo es la distribución de agua potable a través de las diferentes tuberías.

**FIGURA 2.3: EJEMPLO DE RED DE AGUA POTABLE.**



FUENTE: Gomera Noticias, 2017

**c) Por el espacio:**

De acuerdo al espacio pueden ser: flujo uniforme o flujo variado

**Flujo uniforme:**

En este tipo de flujo, los parámetros hidráulicos tales como velocidad y profundidad del fluido, permanecen constantes a lo largo de la tubería o conducto. Este tipo de flujo se puede encontrar en casos tales como líquidos transportados en tuberías de sección constante y de gran longitud.

**Flujo no uniforme:**

En este caso, los parámetros hidráulicos del fluido varían a lo largo del conducto que lo contiene debido a la presencia de cambios en la sección transversal, cambio de pendiente y presencia de ciertos equipos de control como válvulas.

Este tipo de flujo se clasifica en:

- flujo no uniforme rápidamente variado

$$\frac{du}{dx} > 0$$

- flujo no uniforme gradualmente variado

$$\frac{du}{dx} < 0$$

#### d) Por el tiempo

##### Flujo permanente:

En este tipo de flujo, los parámetros o características hidráulicas del fluido se mantienen constantes a lo largo del tiempo. La velocidad de las partículas es la misma para cada instante de tiempo.

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (2.8)$$

##### Flujo no permanente o inestable:

En este caso, los parámetros o características hidráulicas del fluido, varían constantemente en el tiempo.

$$\frac{\partial V}{\partial t} \neq 0 \quad \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0 \quad (2.9)$$

Un ejemplo de este tipo de flujo es precisamente la creciente de un río.

#### e) Según el tiempo y el espacio

**Flujo permanente uniforme:**

Las características hidráulicas del flujo se mantienen constantes en el tiempo y el espacio

**Flujo no permanente uniforme:**

Las características hidráulicas del flujo se mantienen constantes solamente en el espacio más no en el tiempo, este tipo de flujo es poco probable de encontrar.

**Flujo variado permanente:**

Las características hidráulicas del flujo varían en el espacio, pero no en el tiempo. Este tipo de flujo puede dividirse en dos tipos:

- Flujo gradualmente variado. – Se producen cambios graduales en la velocidad del flujo en base a su dirección principal pudiendo variar por ejemplo si se encuentran expansiones o contracciones suaves en las conducciones. Puede ser también acelerado o retardado dependiendo si la velocidad aumenta o disminuye en el sentido del flujo.
- Flujo rápidamente variado. – Los cambios que se producen en el flujo son bruscos a lo largo de la conducción. Al igual que el anterior, este también puede ser acelerado o retardado de acuerdo a la velocidad en el sentido del flujo.

**Flujo variado no permanente:**

Las características hidráulicas del flujo cambian tanto en el tiempo como en el espacio. Ya que el flujo uniforme no permanente prácticamente no se presenta en la naturaleza, a este tipo de flujo se lo llama simplemente como no permanente. Ejemplos de este tipo de flujo son las olas del mar y las mareas en flujo libre.

**Flujo espacialmente variado:**

En este flujo, el caudal varía a lo largo de la conducción, pero permanece constante en el tiempo:

$$\frac{\partial Q}{\partial L} \neq 0 \quad (2.10)$$

**f) Según el número de ejes considerados para el análisis****Flujo unidimensional:**

En este fluido las características hidráulicas varían con el tiempo en un solo eje del sistema cartesiano, cuya dirección es la misma que la del fluido, mientras que los otros dos ejes se consideran constantes.

**Flujo Bidimensional:**

En este flujo las características hidráulicas varían con el tiempo en una misma trayectoria en dos ejes cartesianos, como planos paralelos, mientras que el tercer eje se considera constante.

**Flujo Tridimensional:**

Es aquel donde sus características hidráulicas varían en el tiempo y en los tres ejes cartesianos.

**g) Según el régimen de flujo****Flujo con régimen laminar:**

Se da cuando la viscosidad no es despreciable en relación a las fuerzas inerciales. El fluido se desplaza en forma de capas con un espesor de tamaño infinitesimal de manera que cada una de ellas se desplaza junto a la capa adyacente, a manera de láminas en movimiento.

**Flujo con régimen transicional:**

El paso del comportamiento del fluido desde su régimen laminar a turbulento, se produce de forma gradual. Esta etapa se denomina transicional y da lugar al flujo con régimen del mismo nombre.

**Flujo con régimen turbulento:**

En este caso las fuerzas viscosas se tornan despreciables en relación a las fuerzas inerciales. Las partículas del fluido que se mueven con régimen laminar, al aumentar la velocidad, chocan entre ellas y se desvían en trayectorias irregulares, dando lugar de esta manera al flujo con régimen turbulento.

**Número de Reynolds**

Es un parámetro adimensional cuyo valor indica el tipo de régimen de flujo que le corresponde al fluido: laminar, transicional o turbulento. El número de Reynolds depende del diámetro de la tubería o diámetro equivalente si la conducción no es circular, de la velocidad del fluido, y de la viscosidad cinemática o a su vez de la densidad y la viscosidad dinámica.

El número de Reynolds está definido por:

$$R_e = \frac{VL}{\nu} \quad (2.11)$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

V: Velocidad del flujo

L: Longitud característica, generalmente en función del radio hidráulico

$\nu$ : Viscosidad cinemática ( $1.16 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  para el agua a  $20^\circ\text{C}$ )

Se considera que, si el número de Reynolds es pequeño, el flujo es laminar; por el contrario, si el número de Reynolds es grande, se trata de un flujo turbulento. En la práctica se han establecido los siguientes límites:

**TABLA 2.1 TIPO DE FLUJO DE ACUERDO AL NÚMERO DE REYNOLDS**

Tipo de flujo	Rango de número de Reynolds
Flujo laminar	$Re < 500$
Flujo transicional	$500 \leq Re \leq 2000$
Flujo turbulento	$Re > 2000$

FUENTE: Sotelo, 1997

#### **h) Número de Froude**

El número de Froude es un parámetro que define si el flujo es rápido o tranquilo, donde el valor uno es la frontera, de tal manera que los valores menores a uno corresponden a fluidos tranquilos y los mayores corresponden a fluidos rápidos.

Este parámetro está definido por la siguiente expresión.

$$F = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (2.12)$$

Donde:

F : Número de froude

V : velocidad del flujo

g : gravedad

D : profundidad Hidraulica (y).

Flujo rápido. – Este flujo se da cuando el valor  $\sqrt{gD}$  es menor que la velocidad del flujo (Streeter, 2000).

Flujo tranquilo. - El flujo tranquilo ocurre cuando la velocidad del flujo es menor que  $\sqrt{gD}$  (Streeter, 2000).

**TABLA 2.2 TIPO DE FLUJO DE ACUERDO AL NÚMERO DE REYNOLDS**

Tipo de flujo	Rango de número de Froude
Flujo subcrítico	Fr < 1
Flujo crítico	Fr = 1
Flujo supercrítico	Fr > 1

Fuente: Haro, 2006

#### i) Número de Vedernikov

Un flujo se torna inestable cuando su velocidad es muy alta o la pendiente es muy empinada. Cuando esto ocurre, la inestabilidad de la superficie se caracteriza porque en ella se forman una serie de ondas de remolino (Del Toro, 2013).

Surge entonces un indicador conocido como el número de Vedernikov (Ve), el cual describe la condición de estabilidad de un flujo de la siguiente manera (Haro, 2010):

- Ve = 1: Describe una condición de estabilidad neutra en el flujo
- Ve < 1: Describe la condición de un flujo estable.
- Ve > 1: Describe la condición de un flujo inestable.

El número de Vedernikov se expresa a través de la siguiente ecuación:

$$V_e = x * \gamma * Fr \quad (2.13)$$

Dónde:

$V_e$  = Número de Vedernikov

$x$  = Exponente del radio hidráulico en la ecuación general del flujo uniforme, siendo  $x = 2$  para flujo laminar,  $x = 0,5$  para flujo turbulento si se usa la fórmula de Chézy, y  $x = 2/3$  para flujo turbulento si se usa la fórmula de Manning (Del Toro, 2013).

$\gamma$  = Factor de forma de la sección del canal, siendo  $\gamma = 1$  para canales anchos y  $\gamma = 0$  para canales angostos. (Del Toro, 2013).

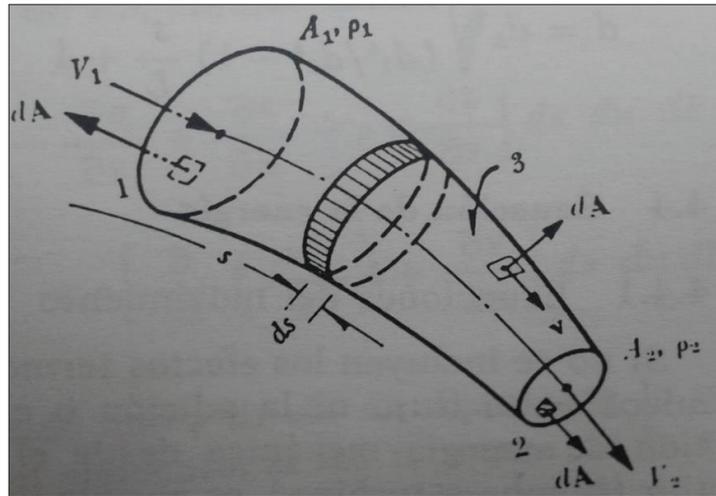
$Fr$  = Número de Froude

#### **2.1.1.4. Ecuaciones Fundamentales de la Hidráulica**

##### **a) Ecuación de Continuidad**

Esta ecuación se deriva del principio de la conservación de la materia, el mismo que expresa que la masa de un fluido que ingresa en un volumen es igual al que sale, esto en la unidad de tiempo como se cumple en la vena líquida de la figura 2.4.

FIGURA 2.4: VENA LÍQUIDA



FUENTE: Sotelo, 1997

A continuación, se expresa la ecuación de continuidad para diferentes condiciones del flujo:

Ecuación de continuidad para flujo no permanente y compresible:

$$\frac{\partial(\rho v A)}{\partial s} + \frac{\partial(\rho A)}{\partial t} = 0$$



$$\frac{\partial v}{\partial s} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.14)$$

Ecuación de continuidad para flujo permanente compresible ( $\partial t = 0$ ):

$$\frac{\partial(\rho v A)}{\partial s} + \frac{\partial(\rho A)}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho v A)}{\partial s} = 0$$

$$\rho v A = \text{constante}$$



$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (2.15)$$

Ecuación de continuidad para flujo permanente y no compresible ( $\rho = cte$ ) :

$$\begin{array}{c} \cancel{\rho_1} v_1 A_1 = \cancel{\rho_2} v_2 A_2 \\ \downarrow \\ v_1 A_1 = v_2 A_2 \end{array} \quad (2.16)$$

### b) Ecuación de la Energía

Esta ecuación proviene de la segunda ley de Newton, la cual menciona que la fuerza es igual a masa por aceleración, esta ley se analiza para una partícula de flujo que se mueve a lo largo de la corriente en los tres ejes que son, tangencial (s), normal (n) y binormal (b), en estos ejes que se estable un equilibrio dinámico de todas las fuerzas existentes que actúan sobre dicha partícula.

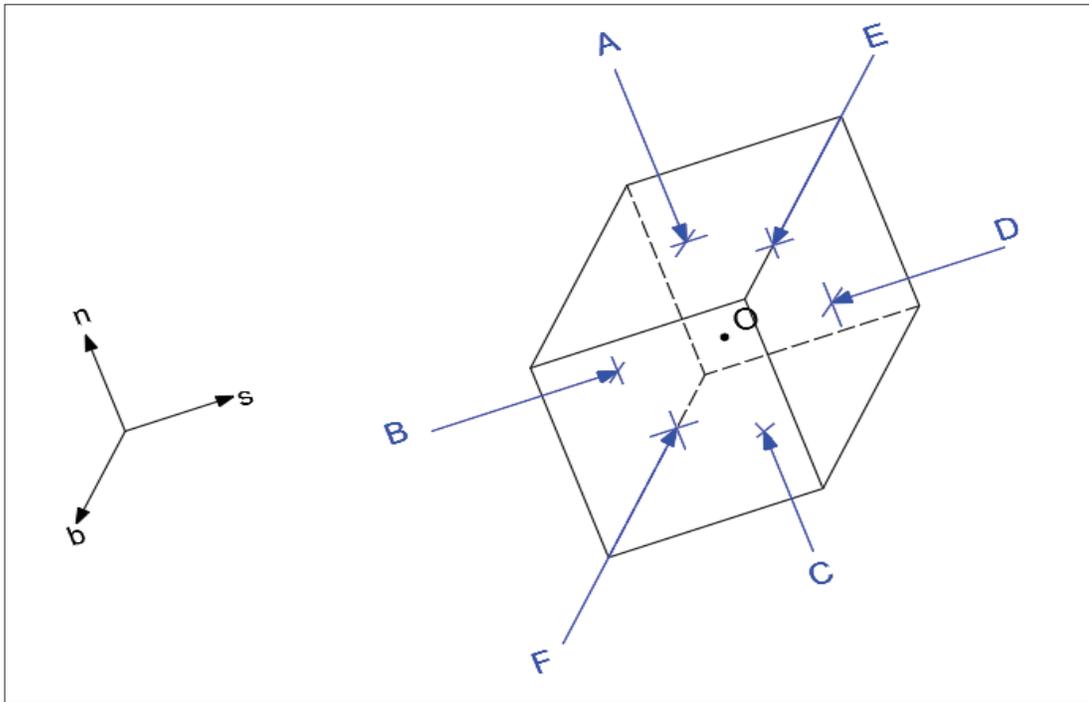
Las fuerzas actuantes en la partícula analizada se dividen en:

Fuerzas Superficiales. – estas fuerzas se componen por fuerzas de presión ( $P$ ) y fuerzas de tensión ( $\tau$ ) , que son esfuerzos normales y tangenciales respectivamente (Sotelo, 1997).

Fuerzas del cuerpo. – esta fuerza es el peso (Sotelo, 1997).

A continuación, se muestra el análisis de la deducción de la ecuación de energía en las tres direcciones ( $\vec{s}, \vec{n}, \vec{b}$ ).

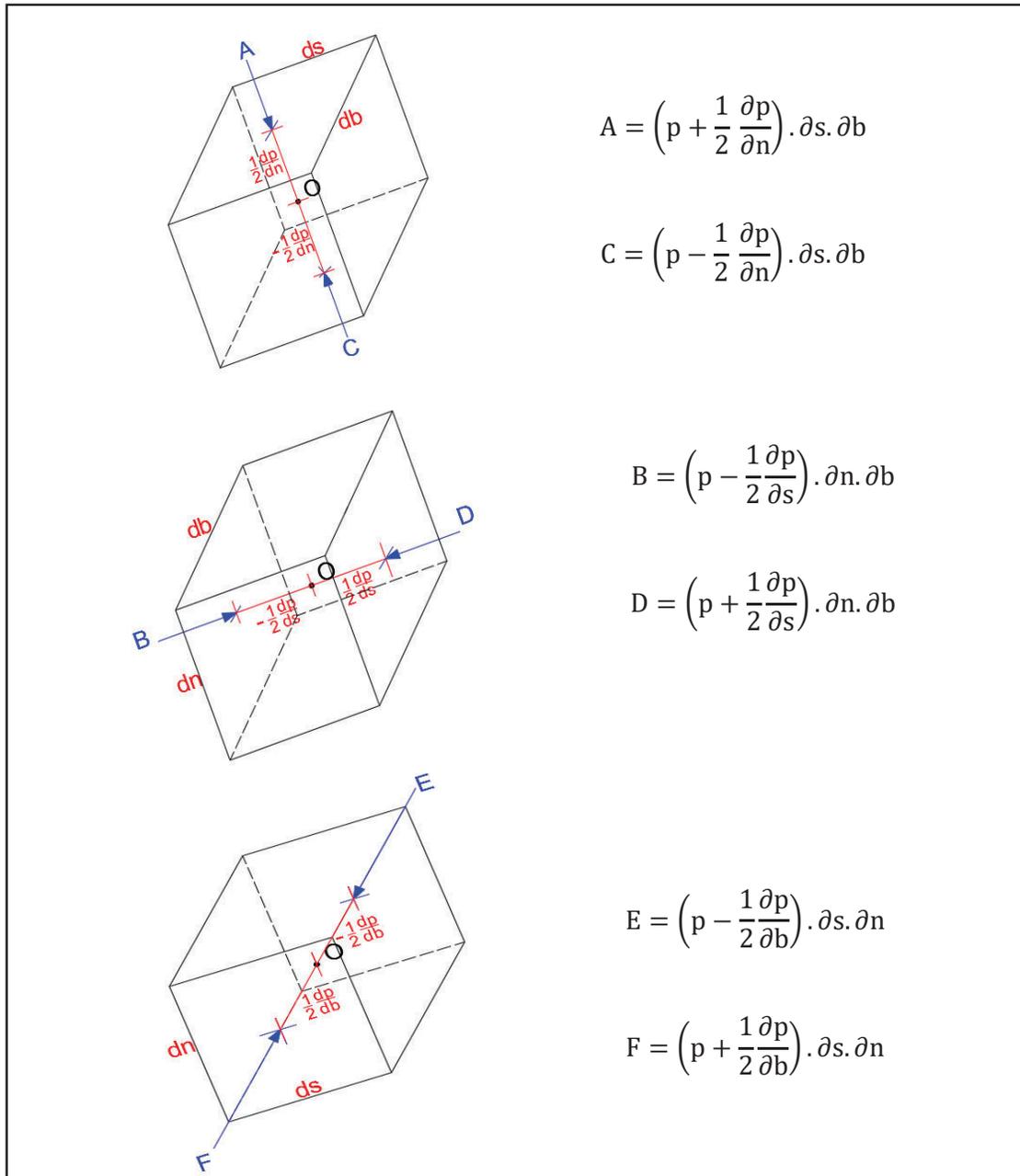
- Fuerzas Superficiales de presión:

**FIGURA 2.5 : EQUILIBRIO DE UNA PARTÍCULA.**

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Sabiendo que la fuerza es igual a la presión por el área y tomando como centro el punto P, se describe en la figura 2.6 la deducción de las diferentes presiones que actúan sobre una partícula de flujo que se mueve a lo largo de la corriente

**FIGURA 2.6: DESCRIPCIÓN DE LAS FUERZAS DE PRESIÓN**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Deducción de la fuerza resultante de presión en cada dirección:

$$F_s = \left( p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial s} \partial s \right) \partial n \cdot \partial b - \left( p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial s} \partial s \right) \cdot \partial n \cdot \partial b = -\frac{\partial p}{\partial s} \partial s \cdot \partial n \cdot \partial b \quad (2.17)$$

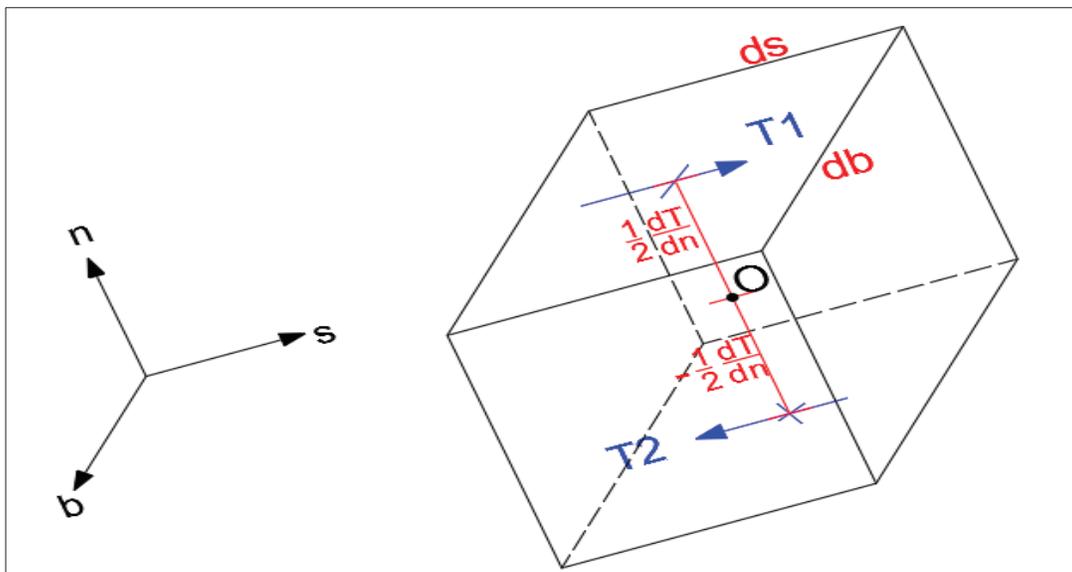
$$F_n = \left( p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial n} \partial n \right) \partial s \cdot \partial b - \left( p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial n} \partial n \right) \cdot \partial s \cdot \partial b = - \frac{\partial p}{\partial n} \partial s \cdot \partial n \cdot \partial b \quad (2.18)$$

$$F_b = \left( p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial b} \partial b \right) \partial n \cdot \partial n - \left( p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial b} \partial b \right) \cdot \partial s \cdot \partial n = - \frac{\partial p}{\partial b} \partial s \cdot \partial n \cdot \partial b \quad (2.19)$$

- Fuerzas Superficiales tangenciales:

Las fuerzas tangenciales actuantes sobre una partícula de flujo que se mueve a lo largo de la corriente se analizan a continuación en la figura 2.7:

**FIGURA 2.7: TENSIONES EN UN PRISMA IDEALIZADO DE FLUIDO**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

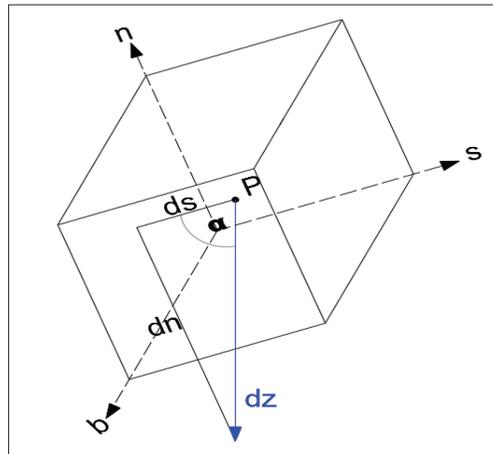
A continuación, se muestra las deducciones de las fuerzas resultantes de tensiones:

$$F_s = T1 + T2 \quad (2.20)$$

$$F_s = \left( T + \frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial n} \partial n \right) \partial s \cdot \partial b - \left( T - \frac{1}{2} \frac{\partial T}{\partial n} \partial n \right) \cdot \partial n \cdot \partial b = \frac{\partial T}{\partial n} \partial s \cdot \partial n \cdot \partial b \quad (2.21)$$

- Análisis de las fuerzas de peso del elemento:

**FIGURA 2.8: PESO DEL CUERPO EN UN PRISMA IDEALIZADO DE FLUIDO.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{P}{V} = \frac{m \cdot g}{V} & \text{si} & \quad \rho = \frac{m}{V} & \rightarrow & \quad \gamma = \rho \cdot g \\ P &= m \cdot g & \text{si} & \quad m = \rho \cdot V & \rightarrow & \quad P = \rho \cdot V \cdot g \\ P &= \rho \cdot V \cdot g & \text{si} & \quad \gamma = \rho \cdot g & \rightarrow & \quad P = \gamma \cdot V \\ P &= \gamma \cdot V & \text{si} & \quad V = (\partial s \partial n \partial b) & \rightarrow & \quad P = \gamma \cdot (\partial s \partial n \partial b) \end{aligned}$$

$$P = \gamma \cdot (\partial s \partial n \partial b) \tag{2.22}$$

$$P_s = -\gamma \cdot (\partial s \partial n \partial b) \cdot \cos \alpha$$

$$P_s = -\gamma \cdot (\partial s \partial n \partial b) \cdot \frac{\partial s}{\partial z} \tag{2.23}$$

$$P_n = -\gamma \cdot (\partial s \partial n \partial b) \cdot \frac{\partial n}{\partial z} \tag{2.24}$$

$$P_b = -\gamma \cdot (\partial s \partial n \partial b) \cdot \frac{\partial b}{\partial z} \tag{2.25}$$

Donde:

g : gravedad

$\rho$  : densidad

$\gamma$  : peso específico

P : peso

$(\partial s \partial n \partial b)$ : volumen del elemento

Una vez descritas las fuerzas superficiales de presión y tensión, además el peso del cuerpo, se aplica la segunda ley de Newton:

$$F = m \cdot a$$

(2.26)

$$\sum F = F_{\text{Presión}} + F_{\text{Tensión}} + F_{\text{Peso}}$$

(2.27)

$$F_{\text{Presión}} + F_{\text{Tensión}} + F_{\text{Peso}} = m \cdot a$$

(2.28)

$$\text{Componente tangencial de la aceleración} = \left( \frac{\partial}{\partial s} \cdot \frac{v^2}{2} \right) + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.29)$$

La fuerza superficial resultante en la dirección tangencial (s) se aplica en la ecuación 2.28 usando las ecuaciones 2.17, 2.21, 2.23 y 2.29 como se muestra a continuación:

$$-\frac{\partial p}{\partial s} \partial s \cdot \partial n \cdot \partial b + \frac{\partial T}{\partial n} \partial s \cdot \partial n \cdot \partial b - \gamma \cdot (\partial s \partial n \partial b) \cdot \frac{\partial s}{\partial z} = (\rho \cdot V) \cdot \left( \left( \frac{\partial}{\partial s} \cdot \frac{v^2}{2} \right) + \frac{\partial v}{\partial t} \right)$$



$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial n} - g \frac{\partial s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial s} \cdot \frac{v^2}{2} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.30)$$

Donde:

$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s}$  : Componente de presión.

$\frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial n}$  : Fuerza de resistencia al flujo en la dirección del movimiento

$g \frac{\partial s}{\partial z}$  : Fuerza de peso

$\frac{\partial}{\partial s} \cdot \frac{v^2}{2}$  : Cambio de energía cinética

$\frac{\partial v}{\partial t}$  : Aceleración del flujo

La fuerza superficial resultante en la dirección tangencial (n) se aplica en la ecuación 2.28 usando las ecuaciones 2.18 y 2.24 como se muestra a continuación:

$$-\frac{\partial p}{\partial n} \partial s \cdot \partial n \cdot \partial b - \gamma \cdot (\partial s \partial n \partial b) \cdot \frac{\partial n}{\partial z} = -\frac{v^2}{\Gamma} \cdot \rho \cdot (\partial s \partial n \partial b)$$



$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} - g \frac{\partial n}{\partial z} = -\frac{v^2}{2}$$

$$\text{Si } \Gamma \rightarrow \infty \Rightarrow -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} - g \frac{\partial n}{\partial z} = 0 \quad (2.31)$$

La fuerza superficial resultante en la dirección tangencial (b) se aplica en la ecuación 2.27 usando las ecuaciones 2.19 y 2.25 como se muestra a continuación:

$$-\frac{\partial p}{\partial b} \partial s \cdot \partial n \cdot \partial b - \gamma \cdot (\partial s \partial n \partial b) \cdot \frac{\partial b}{\partial z} = \rho \cdot (0) \cdot (\partial s \partial n \partial b)$$



$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial b} - g \frac{\partial b}{\partial z} = 0 \quad (2.32)$$

- Ecuación de energía para un flujo permanente:

Por ser flujo permanente el componente de la energía de la velocidad es cero. A continuación, la deducción de la ecuación de energía para flujo permanente.

$$\begin{aligned}
-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial n} - g \frac{\partial z}{\partial s} &= \frac{\partial}{\partial s} \cdot \frac{v^2}{2} + \frac{\partial v}{\partial t} \\
-\frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial T}{\partial n} - \frac{\partial}{\partial s} g \cdot z &= \frac{\partial}{\partial s} \cdot \frac{v^2}{2} + \frac{\partial v}{\partial t} \\
\frac{\partial p}{\partial s} - \frac{\partial T}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial s} g \cdot z + \frac{\partial}{\partial s} \cdot \frac{v^2}{2} &= -\frac{\partial v}{\partial t} \\
\frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + \frac{g \cdot z}{g} \right) - \frac{\partial T}{\partial n} \frac{1}{\rho g} &= -\frac{\partial v}{\partial t} \frac{1}{g} \\
\frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z \right) ds - \frac{\partial T}{\partial n} \frac{1}{\gamma} ds &= -\frac{\partial v}{\partial t} \frac{1}{g} ds \\
\int \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z \right) ds - \int \frac{\partial T}{\partial n} \frac{1}{\gamma} ds &= \int -\frac{\partial v}{\partial t} \frac{1}{g} ds \\
\left( \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z \right) - hf &= C - \frac{\partial v}{\partial t} \frac{1}{g} \\
\left( \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z \right) - hf &= 0
\end{aligned} \tag{2.33}$$

- Ecuación de energía para un flujo permanente y sin fricción (Ecuación de Bernoulli):

$$\left( \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z \right) = 0 \tag{2.34}$$

### c) Ecuaciones de Cantidad de Movimiento

Estas ecuaciones son generales es decir para todo tipo de flujo.

En la deducción de estas ecuaciones se aplica la segunda ley de Newton la misma que dice que la fuerza es igual a masa por aceleración. Esta se analiza para una partícula de flujo que se mueve a lo largo de la corriente en los tres ejes cartesianos (x, y, z), en los que se estable un equilibrio dinámico de todas las fuerzas existentes que actúan sobre dicha partícula.

Las fuerzas actuantes en la partícula analizada se dividen en:

Fuerzas Superficiales. – estas fuerzas se componen por fuerzas de presión ( $P$ ) y fuerzas de tensión ( $\tau$ ).

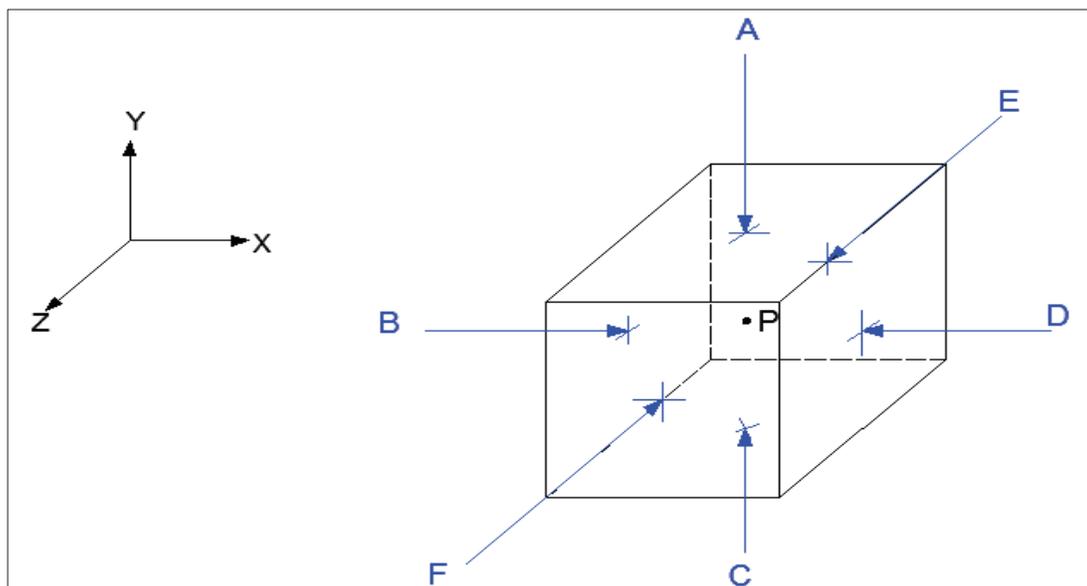
Fuerzas del peso. – esta fuerza es el peso.

A continuación, se muestra la deducción de las ecuaciones de cantidad de movimiento en las tres direcciones ( $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ ).

- Cálculo de la fuerza resultante de presión:

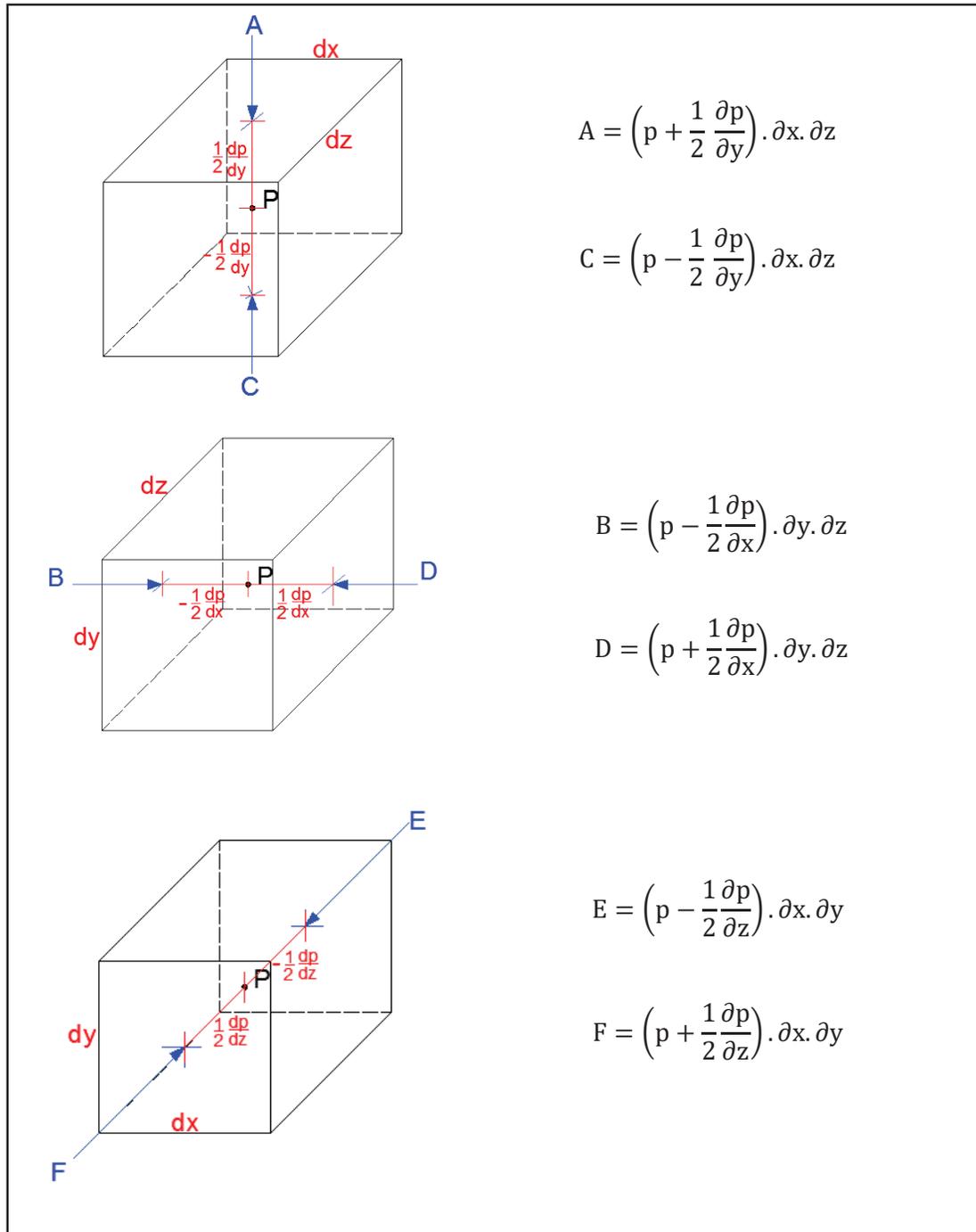
En un prisma idealizado de fluido se analizan las fuerzas superficiales de presión, tomando como referencia un punto  $P$  localizado en el centro del prisma como se puede ver en la figura 2.9.

**FIGURA 2.9: EQUILIBRIO DE UNA PARTÍCULA.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FIGURA 2.10: DESCRIPCIÓN DE LAS FUERZAS DE PRESIÓN.



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

$$F_x = \left( p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \partial x \right) \partial y \cdot \partial z - \left( p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \partial x \right) \cdot \partial y \cdot \partial z = -\frac{\partial p}{\partial x} \partial x \cdot \partial y \cdot \partial z \quad (2.35)$$

$$F_y = \left(p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial y} \partial y\right) \partial x \cdot \partial z - \left(p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial y} \partial y\right) \cdot \partial x \cdot \partial z = -\frac{\partial p}{\partial y} \partial x \cdot \partial y \cdot \partial z \quad (2.36)$$

$$F_z = \left(p - \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} \partial z\right) \partial x \cdot \partial y - \left(p + \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial z} \partial z\right) \cdot \partial x \cdot \partial y = -\frac{\partial p}{\partial z} \partial x \cdot \partial y \cdot \partial z \quad (2.37)$$

$$F_p = -\frac{\partial p}{\partial x} \partial x \cdot \partial y \cdot \partial z - \frac{\partial p}{\partial y} \partial x \cdot \partial y \cdot \partial z - \frac{\partial p}{\partial z} \partial x \cdot \partial y \cdot \partial z \quad (2.38)$$

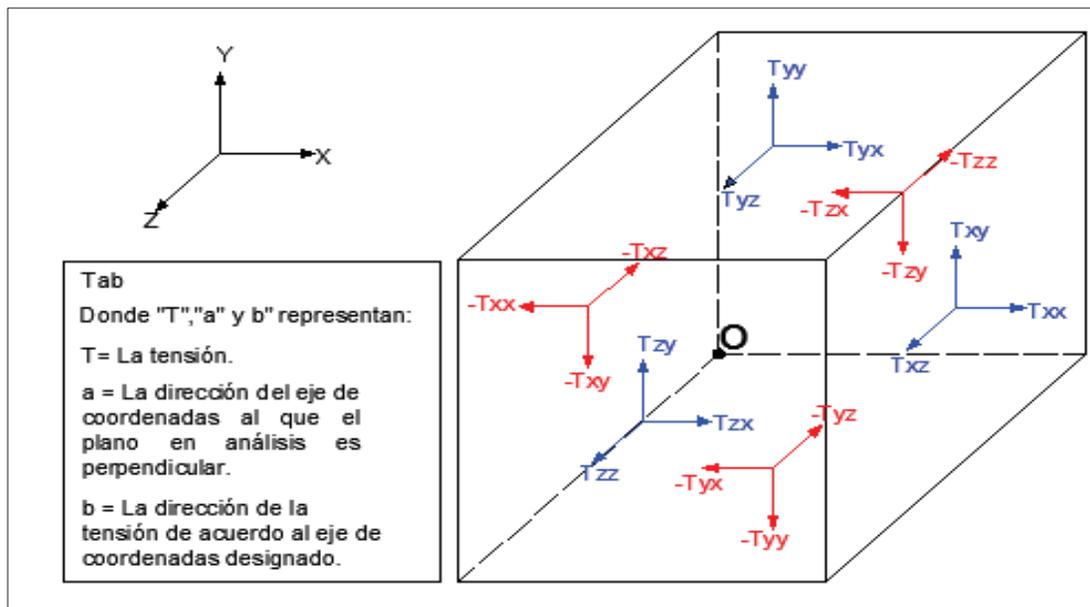
$$F_p = -\underbrace{\left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial z}\right)}_{\nabla p} \partial x \cdot \partial y \cdot \partial z \quad (2.39)$$

$\nabla p \longrightarrow$  Gradiente de presión

- Deducción de la fuerza resultante de tensión:

En un prisma idealizado de fluido se analizan las fuerzas superficiales de tensión, tomando como referencia un punto O, como se puede ver en la figura 2.11.

**FIGURA 2.11: TENSIONES EN UN PRISMA IDEALIZADO DE FLUIDO.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Para el análisis de las tensiones se considera flujo Newtoniano, por ende, la viscosidad es constante y, en consecuencia, todas las tensiones de la figura 2.11 serán consideradas positivas y además en el caso que las tensiones tengan direcciones similares como por ejemplo “T<sub>xy</sub>” y “T<sub>yx</sub>” se analizará una de las dos, por simetría en el flujo.

Después de realizar una simplificación tomando en cuenta las consideraciones mencionadas las tensiones resultantes son las tensiones tangenciales al flujo (T<sub>xx</sub>, T<sub>yy</sub>, T<sub>zz</sub>), y las tensiones normales al flujo (T<sub>xy</sub>, T<sub>xz</sub>, T<sub>yz</sub>).

#### FIGURA 2.12: TENSIONES POSITIVAS

$$\begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{pmatrix}$$

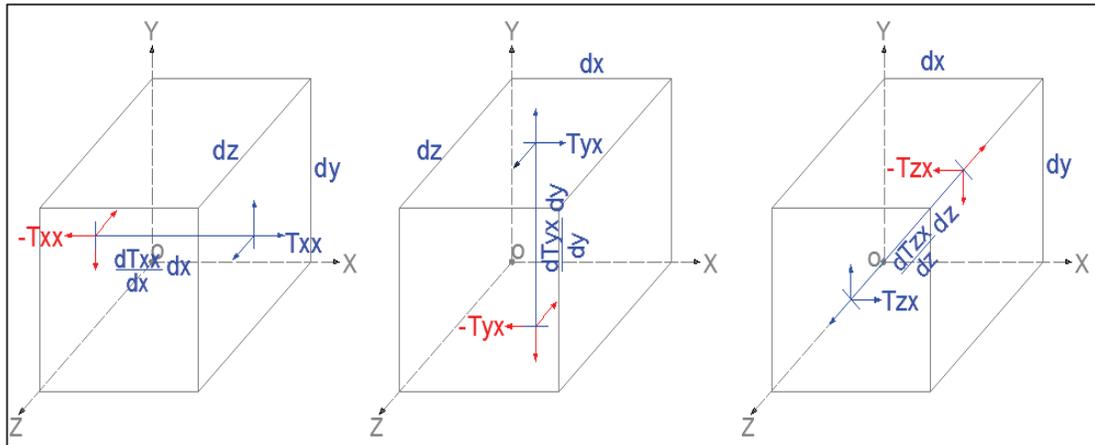
ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

#### FIGURA 2.13: TENSIONES DE REYNOLDS

$$\begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yy} & T_{xz} \\ T_{zz} & T_{yz} \end{bmatrix}$$

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**FIGURA 2.14: TENSIONES EN EL EJE “X” EN UN PRISMA IDEALIZADO DE FLUIDO.**

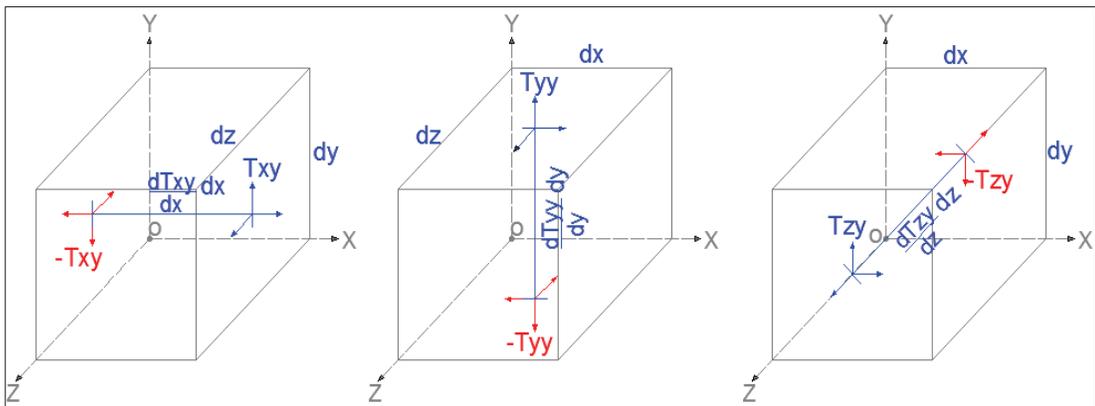


ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

$$F_x = \left( T_{xx} + \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} \partial x \right) \partial y \partial z - T_{xx} \partial y \partial z + \left( T_{yx} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} \partial y \right) \partial x \partial z - T_{yx} + \left( T_{zx} + \frac{\partial T_{zx}}{\partial z} \partial z \right) \partial x \partial y - T_{zx} \partial x \partial y \quad (2.40)$$

$$F_x = \left( \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zx}}{\partial z} \right) \partial x \partial y \partial z \quad (2.41)$$

**FIGURA 2.15: TENSIONES EN EL EJE “Y” EN UN PRISMA IDEALIZADO DE FLUIDO.**

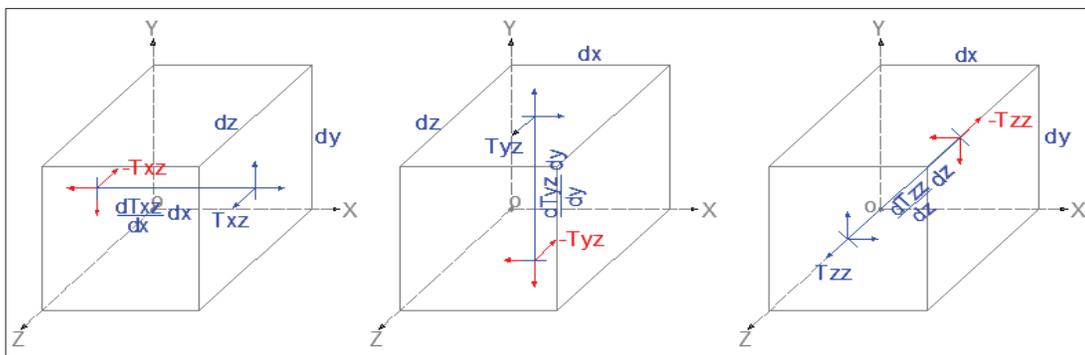


ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

$$F_y = \left( T_{xy} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} \partial x \right) \partial y \partial z - T_{xy} \partial y \partial z + \left( T_{yy} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} \partial y \right) \partial x \partial z - T_{yy} \partial x \partial z + \left( T_{zy} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial z} \partial z \right) \partial x \partial y - T_{zy} \partial x \partial y \quad (2.42)$$

$$F_y = \left( \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial z} \right) \partial x \partial y \partial z \quad (2.43)$$

**FIGURA 2.16: TENSIONES EN EL EJE “Z” EN UN PRISMA IDEALIZADO DE FLUIDO.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

$$F_z = \left( T_{xz} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} \partial x \right) \partial y \partial z - T_{xz} \partial y \partial z + \left( T_{yz} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} \partial y \right) \partial x \partial z - T_{yz} \partial x \partial z + \left( T_{zz} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} \partial z \right) \partial x \partial y - T_{zz} \partial x \partial y \quad (2.44)$$

$$F_z = \left( \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} \right) \partial x \partial y \partial z \quad (2.45)$$

$$F_R = F_x + F_y + F_z$$

$$F_R = \left( \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} \right) * \partial x \partial y \partial z \quad (2.46)$$

- Análisis de las fuerzas de peso (se analiza en las tres direcciones ya que es para todo tipo de fluido):

$$P = m \cdot g \quad \text{si} \quad m = \rho \cdot V \quad \rightarrow \quad P = \rho \cdot V \cdot g$$

$$P = \rho \cdot V \cdot g \quad \text{si} \quad V = (\partial x \partial y \partial z) \quad \rightarrow \quad P = \rho \cdot g \cdot (\partial x \partial y \partial z)$$

$$P = \rho \cdot g \cdot (\partial x \partial y \partial z) \quad \text{si} \quad g = g_x + g_y + g_z \quad \rightarrow \quad P = \rho \cdot (g_x + g_y + g_z) \cdot (\partial x \partial y \partial z)$$

$$P = \rho \cdot (g_x + g_y + g_z) \cdot (\partial x \partial y \partial z) \quad (2.47)$$

Donde:

$g$  : gravedad

$\rho$  : densidad

$P$  : peso

$(\partial x \partial y \partial z)$  : volumen del elemento

Una vez obtenidas las fuerzas superficiales de presión y tensión y la fuerza del peso en las ecuaciones 2.39, 2.46, 2.47. Se aplica la segunda ley de Newton como se muestra a continuación:

$$F = m \cdot a$$

$$\sum F = F_{\text{presión}} + F_{\text{tensión}} + F_{\text{peso}}$$

$$F_{\text{presión}} + F_{\text{tensión}} + F_{\text{peso}} = m \cdot a$$

$$F_{\text{presión}} + F_{\text{tensión}} + F_{\text{peso}} = (\rho \cdot \partial x \cdot \partial y \cdot \partial z) \cdot a$$

$$\left[ - \left( \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial z} \right) \partial x \cdot \partial y \cdot \partial z \right] + \left[ \left( \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial z} + \right. \right.$$

$$\left. \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} \right) * \partial x \partial y \partial z \left. \right] + \left[ \rho \cdot (g_x + g_y + g_z) \cdot \partial x \cdot \partial y \cdot \partial z \right] =$$

$$\rho \cdot \partial x \partial y \partial z \cdot a \quad (2.48)$$

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial z}\right) + \left(\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z}\right) + (\rho g_x + \rho g_y + \rho g_z) = \rho \cdot a \quad (2.49)$$

**FIGURA 2.17: CUADRO DE VALORES DE LA ACELERACIÓN**

$$\mathbf{a}_x = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$\mathbf{a}_y = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$\mathbf{a}_z = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}$$

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: Hamad, 2015

**Primera ecuación diferencial de cantidad de movimiento**

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \rho g_x = \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.50)$$

**Segunda ecuación diferencial de cantidad de movimiento**

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} + \rho g_y = \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.51)$$

**Tercera ecuación diferencial de cantidad de movimiento**

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial T_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + \rho g_z = \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.52)$$

#### d) Ecuación de Navier Stokes

La ecuación de Navier Stokes es solo para flujos Newtonianos en consecuencia en esta ecuación se asume que la viscosidad es constante en el tiempo.

Para la deducción de las tres ecuaciones de Navier Stokes se sustituye las tensiones de Reynolds (figura 2.18) en las tres ecuaciones diferenciales de cantidad de Movimiento.

**FIGURA 2.18: VALORES DE LAS TENSIONES DE REYNOLDS**

$$\begin{array}{l}
 T_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad ; \quad T_{xz} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\
 T_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad ; \quad T_{xy} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\
 T_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad ; \quad T_{yz} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)
 \end{array}$$

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: Hamad, 2015

#### Primera ecuación de Navier Stokes

$$\rho \cdot g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.53)$$

#### Segunda ecuación de Navier Stokes

$$\rho \cdot g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.54)$$

### Tercera ecuación de Navier Stokes

$$\rho \cdot g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \cdot \frac{\partial w}{\partial t} \quad (2.55)$$

Donde:

$\rho$  : densidad

$\mu$  : viscosidad dinámica

$u$  : componente de la velocidad en "x"

$v$  : componente de la velocidad en "y"

$w$  : componente de la velocidad en "z"

### e) Ecuación general de conservación

De manera general, las ecuaciones que gobiernan la Mecánica de Fluidos, tales como la de conservación de la masa, conservación de momento o conservación de energía, revisados en los apartados anteriores, son expresadas en términos de variables específicas, es decir, en cantidades por unidad de masa. (Fernández, 2012).

Debe considerarse un volumen de control que delimite un flujo y en él seleccionar un sistema en un tiempo inicial en el cual todas las partículas del sistema de control están dentro de dicho volumen. El origen de este volumen, como se verá más adelante, se expresa en la ecuación general de conservación con la letra  $S$ , y se denomina término fuente ( $S = \Delta v \Delta t$ ).

En el paso del tiempo, algunas de las partículas se mantendrán dentro del sistema de control, otras ingresarán al mismo y otras saldrán. Se debe considerar que existen dos mecanismos físicos responsables de la generación de un flujo, estos son: la difusión, a nivel molecular, microscópico, y la convección asociado al fluido a nivel macroscópico (Fernández, 2012).

Cada uno de estos términos forman parte de la ecuación general de conservación, tal como se lo muestra a continuación en su forma vectorial (Fernández, 2012):

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{Temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\vec{v}\phi)}_{\text{Convectivo}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla\phi)}_{\text{Difusivo}} + \underbrace{S}_{\text{Fuente}} \quad (2.56)$$

Donde:

**Término temporal:** Representa la variación en el tiempo de la variable  $\phi$  dentro del volumen de control.

**Término convectivo:** Representa el movimiento de la variable  $\phi$  dentro del volumen de control debido a la velocidad del flujo.

**Término difusivo:** Representa el fenómeno de transferencia que ocurre a nivel molecular.

**Término fuente:** Considera cualquier tipo de fuente que genere o destruya la variable transportada.

## 2.1.2 MODELACIÓN NUMÉRICA

En el área de la mecánica de fluidos la modelación numérica ha presentado un gran avance en los últimos tiempos, gracias a los progresos en la capacidad de procesamiento del hardware permitiendo así disminuir el tiempo de simulación, contribuyendo de esta manera las investigaciones.

### 2.1.2.1. CFD

La metodología de la Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD), resuelve de manera numérica las ecuaciones de Navier – Stokes, las mismas que rigen el movimiento de un fluido en tres dimensiones considerando

todas las fuerzas que intervienen sobre un elemento infinitesimal del mismo (Ortega, 2015).

Esta metodología analiza y resuelve los problemas de la dinámica de fluidos basándose en las ecuaciones generales de conservación en base a los siguientes principios:

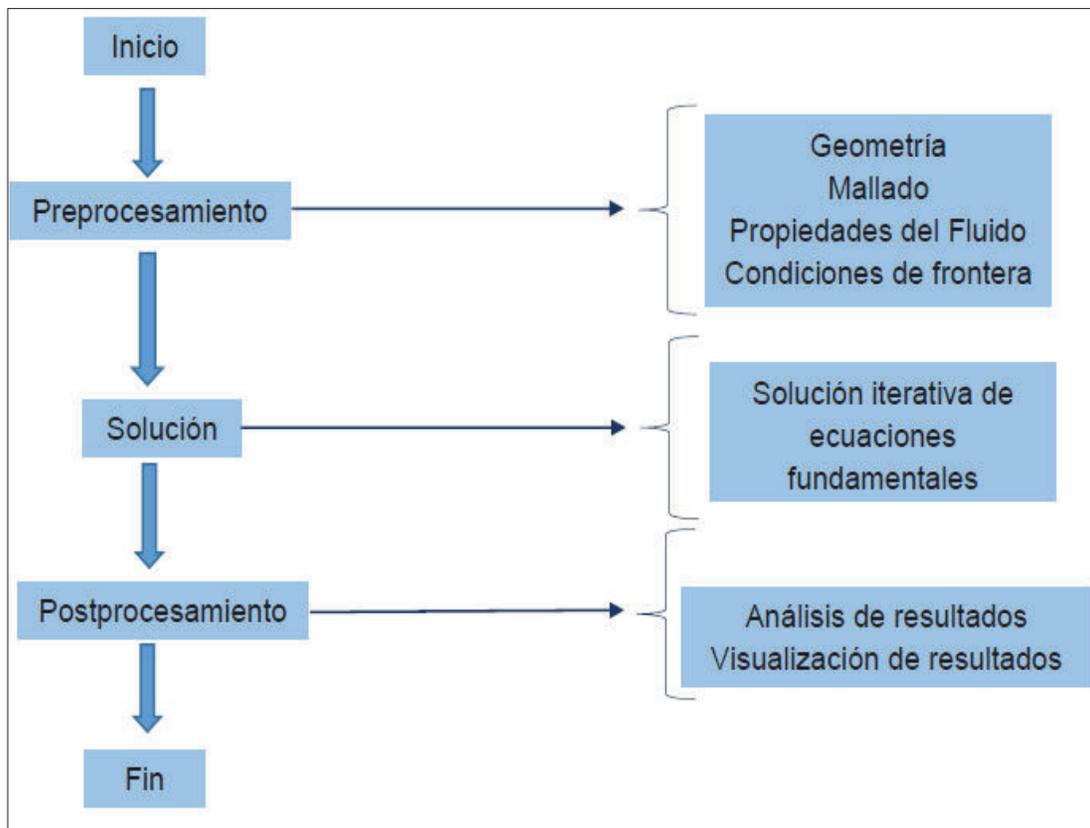
- Principio de conservación de la masa, expresado a través de la ecuación de continuidad.
- Principio de conservación de la cantidad de movimiento, en donde se presentan dos casos:
  - Si se toma en cuenta las propiedades viscosas del fluido y de disipación de energía, se utilizará las ecuaciones de Navier – Stokes.
  - Si se desprecian las anteriores propiedades, se utilizará la ecuación de Euler (ecuación general de la hidrostática).
- Principio de la conservación de la Energía, expresado en la ecuación de la Energía
- Ecuación de estado o de comportamiento del fluido.
- Ecuaciones constitutivas del medio continuo.

El CFD tiene como objetivo principal facilitar al usuario los cálculos de cualquier flujo dentro de una geometría, condiciones de inicio y condiciones de contorno determinados, proporcionando gran cantidad de resultados con mayor flexibilidad y rapidez que los obtenidos con procedimientos experimentales. Para esto es importante y necesario realizar una comparación y calibración previa con resultados que se obtengan de modelos físicos y/o prototipos.

Un CFD emplea muchas ramas de la ciencia como son programación, matemática, métodos numéricos, ciencias físicas e ingeniería las mismas que se interrelacionan con el fin de desarrollar un código que podrá resolver las ecuaciones del flujo; Este código permite el ingreso de los datos de inicio de forma ordenada y luego da lugar a la resolución de las ecuaciones generales que rigen a un fluido en tres

dimensiones, para finalmente presentar resultados que deberán ser analizados por el modelador.

**FIGURA 2.19: SECUENCIA DE DESARROLLO TIPO EN LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**



FUENTE: Ortega, 2015

Preprocesamiento. - corresponde al ingreso de datos como la geometría, mallado, propiedades del fluido y condiciones de frontera, tal como se muestra en la figura anterior, también se debe tener en cuenta los resultados a los que se quieren llegar para de esta manera únicamente solicitar estos, permitiendo así optimizar el tiempo de solución.

El dominio ingresado es continuo, pero para la modelación en un CFD es necesario pasar el dominio continuo a uno discreto delimitado por una malla. Esta

discretización del dominio se puede realizar por varios métodos como son el método de diferencias finitas, método de volúmenes finitos y el método de elementos finitos, siendo estos los más comunes.

#### **2.1.2.2. Método de Diferencias Finitas**

Este método expresa las ecuaciones diferenciales de gobierno usando la serie de Taylor, para luego truncarla de tal manera que el dominio es discretizado, pasando de una ecuación diferencial de todo el dominio a una ecuación diferencial sobre un punto. En la figura 2.20, se muestra un ejemplo con una ecuación unidimensional.

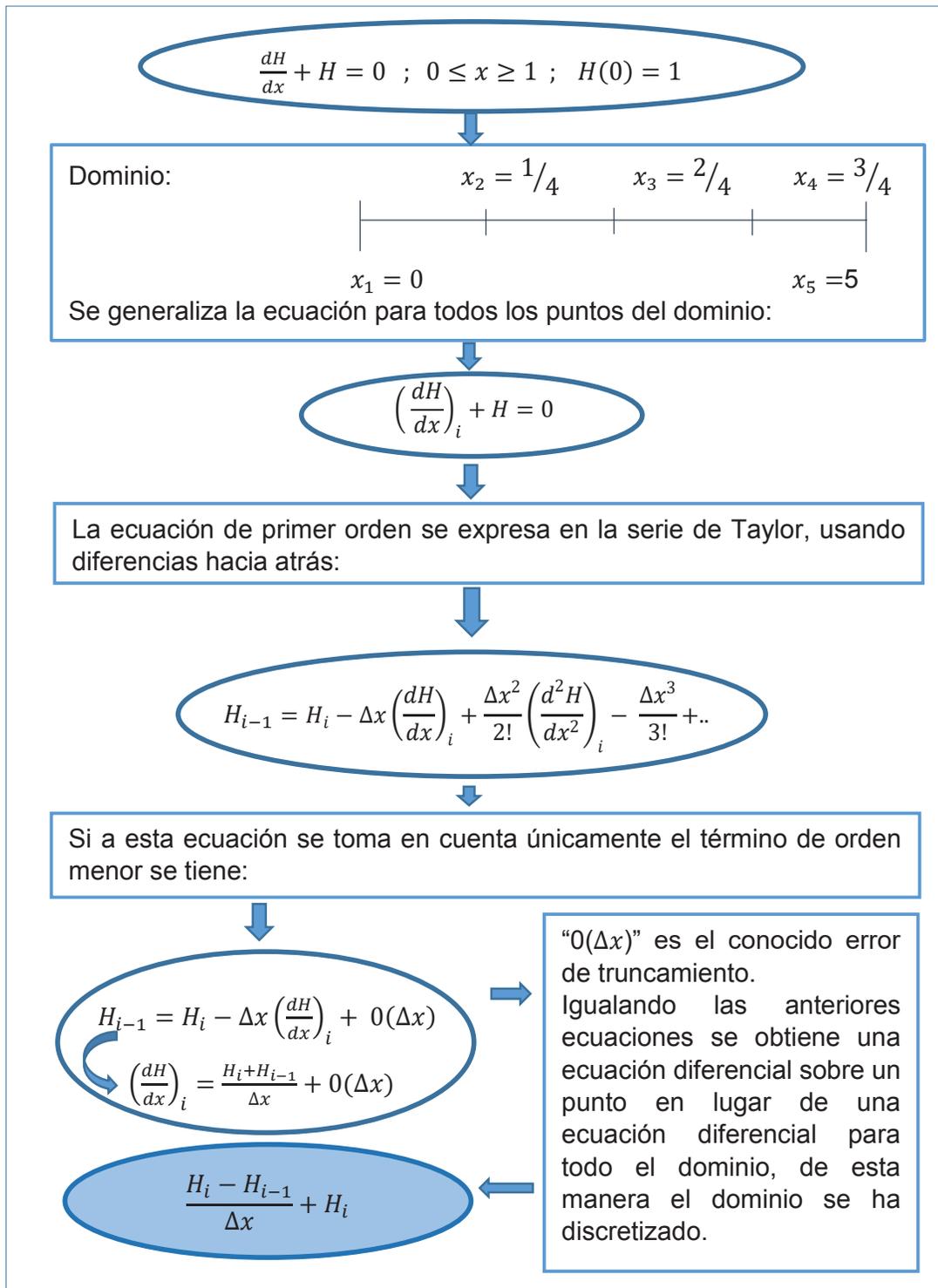
#### **2.1.2.3. Método de Volúmenes finitos**

Se puede decir que la mayor parte de softwares comerciales usan este método, el mismo que consiste en dividir en un número finito de volúmenes de control (celdas) a el dominio; para cada volumen de control sea este plano o volumétrico se plantea las ecuaciones de conservación de energía, momento y masa y al final se resuelven las ecuaciones de forma iterativa.

### **Ecuaciones Diferenciales de Conservación**

Los principios de conservación que son de interés para el presente trabajo están constituidos en las ecuaciones de conservación de la masa, ecuación de la conservación de la energía y la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento que fueron descritos en el ítem 2.1.1.5.

**FIGURA 2.20: EJEMPLO DE ECUACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA EL MÉTODO DE ECUACIONES FINITAS.**



ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

#### **2.1.2.5. Mallado**

El mallado es una división del dominio o geometría ingresada, son celdas que no deben estar sobrepuestas y deben cubrir toda la geometría que se desea sea modelada, teniendo en cuenta que mientras más pequeñas las celdas de la malla más aproximados a la realidad serán los resultados ya que las variables del flujo se resolverán solamente en los nodos del mallado; por esta razón mientras más complejo el dominio, más fina deberá ser la malla, a menos que los resultados obtenidos para diferentes tamaño de malla no varíen dentro de un nivel de tolerancia fijado por el modelador. Solo en este caso los resultados serán independientes de la malla (es significativo hacer pruebas para determinar cuán influyente es el tamaño de la celda de la malla para cada dominio), el inconveniente del mallado fino (malla con celdas pequeñas) es que, a mayor número de celdas, mayor capacidad del computador será necesaria y mayor será el tiempo de solución (Carrillo, Castillo, 2012).

El mallado puede ser estructurado o no estructurado. El primero está formado por rectángulos o paralelepípedos dispuestos en una matriz, que se pueden deformar para adaptarse a superficies no lineares de la geometría. El segundo en cambio, está formado por triángulos o tetraedros sin un orden matricial.

#### **2.1.2.6. Solución**

Es la espera de la resolución de las ecuaciones fundamentales, este proceso podrá demorar poco o mucho tiempo, dependiendo de las condiciones ingresadas en el preprocesamiento.

### **2.1.2.7. Ventajas e inconvenientes de un CFD**

#### **Ventajas**

El CFD permite reducir costos y tiempo en la etapa de diseño, también provee una gran cantidad de valiosa información en sus resultados. Otra gran ventaja de usar un CFD es su aplicación en ámbitos en los cuales un modelamiento físico sería muy complicado, como por ejemplo altas temperaturas, accidentes, entre otros.

#### **Inconvenientes**

Un gran inconveniente es el elevado costo de la licencia (softwares comerciales) para poder hacer uso del CFD, otro problema es la necesidad de un computador con gran capacidad (también se puede hacer uso de computadoras en paralelo). Para el uso del CFD se necesita personal calificado que sea capaz de modelar, interpretar y analizar los resultados obtenidos.

### **2.1.3 HISTORIA Y NATURALEZA ERUPTIVA DEL VOLCÁN COTOPAXI**

#### **2.1.3.1 Ubicación geográfica del volcán**

El volcán Cotopaxi está ubicado en la Cordillera Real de los Andes a 35 Km al Noreste de Latacunga y 45 Km al Sureste de Quito, sus coordenadas geográficas son: 0,638° S; 78,436° W. Tiene una altura de 5897 msnm y su diámetro es de 20 Km. Se trata de un volcán de tipo: Estratovolcán compuesto que se encuentra en estado activo y cuya periodicidad de erupción hacen considerarlo uno de los volcanes más peligrosos del mundo. (Instituto Geofísico EPN, 2017).

El diámetro del cráter del volcán Cotopaxi es aproximadamente de 700 metros y se estima una profundidad mayor a los 100 metros. Se puede constatar además la presencia de contantes fumarolas en el interior del cráter, así como también en sus alrededores (Hall, 2004).

### 2.1.3.2 Historia eruptiva

El Cotopaxi ha presentado cinco grandes erupciones registradas a partir de la conquista española: 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1853-1854 y 1877-1880 (IG EPN, 2017). Estas erupciones han sido comúnmente de dos tipos: pequeñas a moderadas, llamadas *andesíticas* ( $\text{SiO}_2 = 56 - 62\%$ ) y aquellas inmensas y con un gran impacto, las *riolíticas* ( $\text{SiO}_2 > 69\%$ ) (Hall, 2004). Vale la pena mencionar que durante el siglo XX, no se produjo ningún proceso eruptivo de importancia, por lo que ya han pasado 140 años desde la última erupción importante, la misma que data del 26 de junio de 1877.

El principal factor de peligro del volcán Cotopaxi lo constituyen los lahares que pueden formarse a consecuencia de una eventual erupción y afectar a zonas pobladas adyacentes tales como el valle entre Latacunga y Mulaló y el Valle de Los Chillos pudiendo afectar a cerca de 300000 personas que viven en estos sectores. (IG EPN, 2017).

### 2.1.3.3 La última erupción importante del volcán Cotopaxi

A inicios de 1877, el volcán Cotopaxi presentó un incremento en su actividad, provocando emisiones de ceniza y explosiones consideradas pequeñas o moderadas. De acuerdo a los hechos descritos en documentos de Luis Sodiro (1877) y Teodoro Wolf (1878), el volcán presentó emisión de “flujos piroclásticos” provenientes del cráter del volcán. Es así que Wolf mencionó en sus escritos que: “la lava no se derramaba en una o algunas corrientes, sino uniformemente en todo el perímetro del cráter, sobre el borde más bajo, así como sobre la cúspide más alta”. Wolf menciona también que hubo un intervalo de tiempo de entre 15 a 30 minutos en el derrame de la lava y que esta se presentaba de forma violenta cubriendo todo el cono del volcán.

Los mencionados autores describen además que lo más impactante de la erupción del 26 de junio de 1877 fueron los lahares originados por causa del derretimiento de los glaciares a consecuencia del contacto de los mismos con los flujos piroclásticos emitidos por el volcán; lahares que avanzaron por los cauces de los

ríos Pita, Salto, Cutuchi y Tamboyacu, provocando gran destrucción en las zonas aledañas a los mismos, a causa de las inundaciones provocadas.

Wolf describe que la velocidad que alcanzaron los lahares, permitieron a los mismos alcanzar Latacunga en alrededor de 30 minutos, el valle de los Chillos en aproximadamente una hora y la desembocadura del río Esmeraldas con el Océano Pacífico en cerca de 18 horas.

Si bien es cierto que, de acuerdo a estudios geológicos y vulcanológicos del Cotopaxi, este es capaz de dar lugar a eventos eruptivos de mayor magnitud que la del 26 de junio de 1877, esta última puede ser considerada como la “erupción típica del volcán Cotopaxi” (Andrade, 2005), motivo por el cual se ha utilizado información recopilada sobre este evento para realizar la calibración de las simulaciones llevadas a cabo en el presente proyecto.

#### **2.1.3.4 Restos eruptivos a lo largo del río Pita**

De acuerdo a los estudios realizados a lo largo del Río Pita, en base a la presencia de lavas, se ha podido determinar que al menos cinco flujos de gran tamaño circularon por el valle del Río Pita siendo el más extenso aquel que llegó hasta Selva Alegre, lo cual representa una distancia de más de 40 Km desde su origen. Además, se evidenciaron otros dos flujos que alcanzaron 27 y 32 Km de recorrido.

De manera general los flujos de lava han sido angostos (menor a 1 Km de ancho) y alargados y generalmente se han expandido cuando han llegado a zonas planas y abiertas en la base del volcán.

En relación a los flujos piroclásticos, cuyos depósitos se encuentran en los flancos del volcán así en ciertos lugares que rodean al mismo, han tenido recorridos de entre 6 a 9 Km, siendo el más extenso de 12 Km. La mayor cantidad de estos flujos piroclásticos se habrían formado cerca de la cima del volcán (Hall, 2004).

Con respecto a los depósitos de flujo de escombros, conocidos como lahares, estos se presentan por todas partes alrededor del volcán. Se trata de los únicos fluidos que alcanzan distancias superiores a los 30 Km de recorrido desde su origen. Estos flujos se originan del contacto de los flujos piroclásticos con el casquete glaciar provocando la fusión instantánea del mismo.

Con respecto a la caída de material piroclástico de tamaño de 2 a 64 mm, denominado lapilli, se han presentado en todos los ciclos eruptivos, produciendo capas de entre 10 y 20 cm de espesor (Hall, 2004); sin embargo, se ha observado también caída de granos más finos causando capas más delgadas en los ciclos individuales.

Finalmente, en referencia a los gases que se originan del volcán, no son tóxicos ni peligrosos ya que ellos salen principalmente del cráter y se dispersan rápidamente por efecto del viento diluyéndose al poco tiempo.

Es así que los 18 ciclos eruptivos registrados en el Volcán Cotopaxi en el Episodio Andesítico Presente, se han caracterizado por presentar un patrón repetitivo de eventos eruptivos (Hall, 2004), todos ellos generados cerca del cráter en la cumbre:

- Caída de lapilli, especialmente al oeste del volcán.
- Expulsión de flujos piroclásticos sobre las pendientes.
- Uno o más flujos de lava, sin un flanco de preferencia para su ocurrencia.
- Flujos de escombros o lahares en todos los flancos del volcán, recorriendo distancias tan largas que pueden afectar los valles de Latacunga y de Los Chillos y las orillas del Río Napo en el Oriente.

#### **Red hidrográfica del Flanco Norte del Volcán Cotopaxi**

Existen principalmente dos ríos que concentran el cauce de las aguas en el flanco norte del volcán Cotopaxi: El río Pita y el río Salto.

El Río Pita drena por el lado Nororiental del volcán y tiene su curso entre el Volcán Sincholagua y la planicie de lahares que vienen del Cotopaxi. Se debe tomar en cuenta también que gran parte de sus aportes son aguas freáticas provenientes del volcán Sincholagua. Más adelante tiene como aportantes las quebradas Chilcahuaycu y Pucará, ambas provenientes del flanco norte del volcán.

Estudios previos, tal como el de la Ing. Patricia Mothes, del Departamento de Geofísica de la Escuela Politécnica Nacional, menciona que las superficies lisas producidas por las lavas, en los alrededores del Río Pita, favorecen el fluído de los lahares por la poca fricción que estas superficies presentan, hacia afuera del cauce del Río, afectando a poblaciones y campos aledaños.

El Río Salto por su parte, drena por el lado Noroccidental del volcán, por el gran Cañón Colorado, justo al occidente del Refugio. Debido a que el cauce del Río Salto es poco profundo, en varios puntos, los flujos se han dividido y han formado trayectos paralelos (Mothes, 2004).

Más adelante el Río Pita y el Río Salto se unen, recorren cañones muy profundos por cerca de 2 Km, hasta llegar a la curva denominada “La Caldera”, la cual encausa el río hacia el oriente. En este lugar, los flujos provocados por la erupción de 1877, chocaron contra la pared sur del cañón y cerca del 20% del caudal pico del flujo se encauzó a lo largo del río Santa Clara (Mothes, 2004).

Después de “La Caldera”, el río Pita continua en un cauce angosto y profundo, atraviesa dos cascadas: La de Molinuco y la de Patichubamba hasta después de 7 Km aproximadamente, con un cauce de por lo menos 200m de ancho y una pendiente del 2%, llegar a San Rafael, zona en la cual los lahares han tenido tendencia a desbordarse del cauce en forma diagonal hasta la desembocadura del Río Ushimana con el Río San Pedro, el cual se extiende hasta Nayón.

El Río Santa Clara nace en la zona de “La Caldera”. Presenta pendientes iniciales del 6% entre su inicio y la zona de Rumipamba; mientras que, hasta la zona de

Selva Alegre, tiene pendientes de hasta 3.5%. En su unión con el Río San Pedro, la pendiente es de alrededor del 1.5% y esta unión es casi imperceptible por la gran cantidad de urbanizaciones que existen en esta zona.

Los cauces de los Ríos Pita y San Pedro se caracterizan por tener secciones muy anchas, por ejemplo, alrededor del volcán y en San Rafael y por cerrarse en los cañones, lo cual es semejante a una sarta de chorizos. (Mothes, 2004)

#### **2.1.4 ESCENARIOS ERUPTIVOS.**

##### **Escenarios eruptivos relacionados con una posible erupción del Volcán Cotopaxi**

De acuerdo al estudio realizado por el Dr. Pablo Samaniego del Departamento de Geofísica de la Escuela Politécnica Nacional en abril del 2004, se definieron cuatro posibles escenarios que se podrían presentar ante una eventual erupción del Volcán Cotopaxi. Estos escenarios tomaron en cuenta aspectos tales como los que se mencionan a continuación:

- Los diferentes tipos de erupción que se podría presentar.
- La magnitud de las erupciones pasadas.
- El comportamiento de otros volcanes de características similares al Volcán Cotopaxi.
- El tamaño y el estado del glaciar, el porcentaje de fusión del mismo y su grado de interacción con las emisiones volcánicas.

Se muestra a continuación la descripción de los posibles eventos que se pueden presentar:

##### **Escenario 1: Evento pequeño**

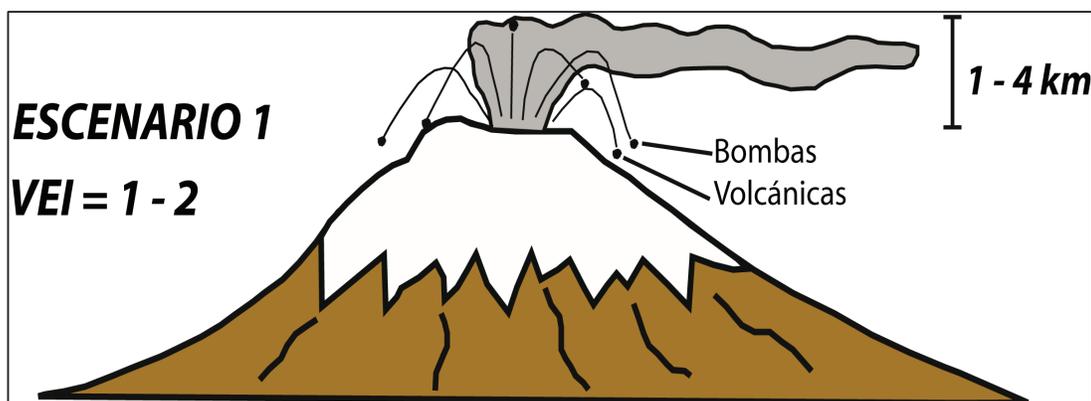
Índice de explosividad volcánica (VEI): ~1 – 2

Se produciría un evento poco explosivo en el cual se presentaría una fuente de lava en el cráter de tipo estromboliano. Esta actividad se consideraría como base durante todo su proceso eruptivo, pudiendo evolucionar a cualquiera de los escenarios que presentarían una mayor explosividad. Las emisiones de ceniza tendrían una intensidad entre pequeña y moderada afectando principalmente a las áreas más cercanas al volcán. En caso de presentarse un VEI = 2, se observarían flujos piroclásticos en los flancos del volcán.

En este escenario, se pueden presentar impactos de fragmentos producidos por las explosiones o fuentes de lava lo que a la vez produciría pequeñas avalanchas de hielo y roca lo cual puede generar flujos de lodo de un alcance limitado.

De acuerdo a lo mencionado en el estudio del Dr. Pablo Samaniego, en este escenario se presentaría un volumen máximo de lahar de 13 a 15 millones de metro cúbicos, generados por la disminución promedio de 1 metro de espesor del glaciar. Así mismo se debe tomar en cuenta que este volumen se generaría paulatinamente mientras se prolonga la actividad del volcán. El hidrograma correspondiente presentaría múltiples pulsos.

**FIGURA 2.21: REPRESENTACIÓN DEL ESCENARIO ERUPTIVO 1**



FUENTE: Andrade, 2005

**Escenario 2: Evento moderado**

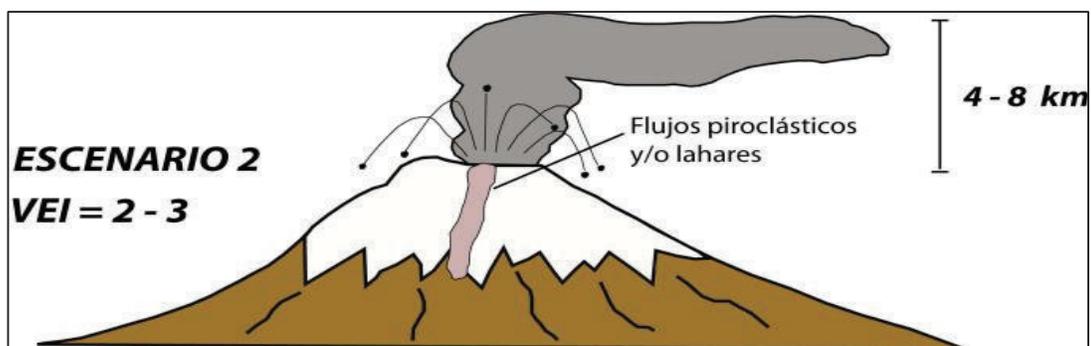
Índice de explosividad volcánica (VEI): ~3

De acuerdo al estudio de Samaniego, el volumen de agua que se generaría por flujos piroclásticos moderados se ha fijado de manera arbitraria en  $8.5 \times 10^6 \text{ m}^3$  tras una disminución de dos metros de espesor del glaciar. Por otro lado, si el escenario es con flujo de lava, se presentaría un lahar de aproximadamente 20 millones de metros cúbicos. Al flujo de lava le tomaría varias horas atravesar el glaciar, de esta manera, el hidrograma tipo para un lahar inducido por flujo de lava, tendría un inicio lento y varios pulsos.

En este escenario se considera que la actividad del volcán pasa de explosiva de tipo estromboliana a volcánica moderada. Se esperarían emisiones continuas de ceniza y flujos piroclásticos pequeños a moderados e incluso flujo de lava que podría brotar del cráter o de una fisura lateral.

La afectación del glaciar tendría un grado mayor que en el escenario anterior, sin embargo, en base a estudios teóricos, se puede mencionar que la fusión del glaciar sería lenta y limitada ya que, a pesar del claro contraste de temperaturas entre hielo y lava, la superficie de contacto entre los materiales calientes y el material del glaciar es limitada. (Samaniego, 2004).

**FIGURA 2.22: REPRESENTACIÓN DEL ESCENARIO ERUPTIVO 2**



FUENTE: Andrade, 2005

### Escenario 3: Evento grande

Índice de explosividad volcánica (VEI): ~4

La historia geológica muestra que este escenario es el más frecuente y a consecuencia el que se podría producir con mayor probabilidad. Este sería un evento con una actividad vulcaniana a subpliniana con emisiones importantes de ceniza. Se generarían flujos piroclásticos debido a que el magma se desbordaría por todos los flancos del volcán.

El glaciar sería seriamente afectado, estimándose una disminución de aproximadamente cuatro metros del mismo, produciendo un volumen de agua de 17 millones de metros cúbicos y un volumen máximo del evento lahárico de 60 millones de metros cúbicos (Samaniego, 2004).

A diferencia de los eventos anteriores, este se produciría de manera muy rápida, generando un hidrograma tipo de forma triangular, con un pico dominante y una atenuación lenta (Samaniego, 2004). De acuerdo a reportes de la erupción del 26 de junio de 1877, la duración del evento podría tomar entre 40 a 45 minutos.

**FIGURA 2.23: REPRESENTACIÓN DEL ESCENARIO ERUPTIVO 3**



FUENTE: Andrade, 2005

#### **Escenario 4: Evento muy grande**

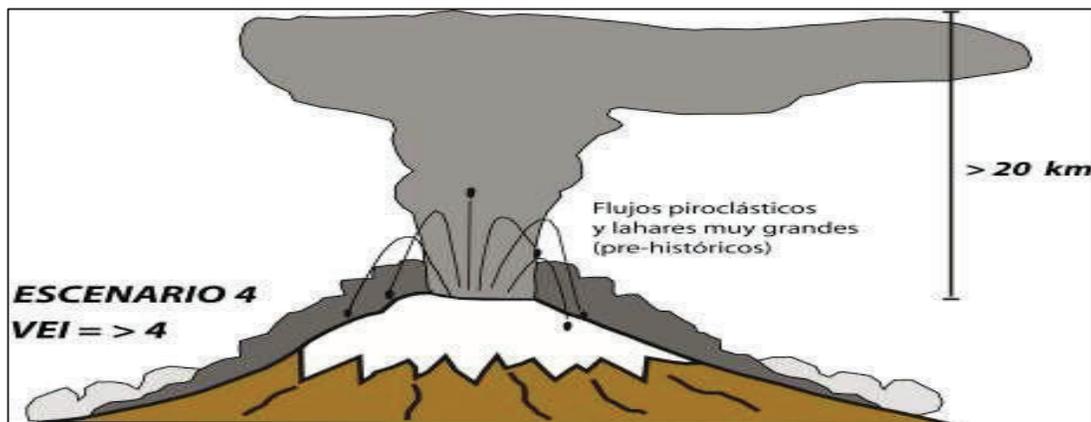
Índice de explosividad volcánica (VEI): Mayor a 4

Este evento presentaría una actividad altamente explosiva; las emisiones de ceniza provocarían un impacto regional mientras que los flujos piroclásticos, al romperse la columna eruptiva, tendrían un gran alcance desplazándose por varios flancos del volcán. Estas características corresponderían a una actividad pliniana.

Se estima que el casquete del glaciar disminuya en alrededor de ocho metros y que el volumen del agua disponible sea de 34 millones de metros cúbicos de agua, lo que produciría un volumen máximo del evento lahárico de 110 a 120 millones de metros cúbicos (Samaniego, 2004).

El hidrograma, al igual que en el evento anterior, tendría un inicio muy abrupto, los caudales serían mayores y su atenuación más lenta.

**FIGURA 2.24: REPRESENTACIÓN DEL ESCENARIO ERUPTIVO 4**



FUENTE: Andrade, 2005

### **Probabilidad de suscitarse cada escenario eruptivo**

De acuerdo al estudio realizado por el Dr. Pablo Samaniego, del Departamento de Geofísica de la Escuela Politécnica Nacional, menciona que estudios geológicos realizados en el Volcán Cotopaxi, permitieron establecer 18 episodios eruptivos de importancia en los últimos 2000 años, los mismos que han sido tabulados en la tabla que se muestra a continuación:

**TABLA 2.3: SÍNTESIS DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCÁN COTOPAXI EN LOS ÚLTIMOS 2000 AÑOS.**

Edad	Emisión de ceniza	Flujos Piroclásticos	Lahares	Flujos de lava	VEI
1880 DC	X				2-3
1877 DC	X	X	2		4
1854 DC	X	X	1	1	3
1853 DC	X		1	1	3
1768 DC	X	X	1	1	4
1766 DC	X	X	1		3
1744 DC	X	X	2		4
1742 DC	X	X	3		4
1532 – 34 DC	X	X	2	1	3
~1150 DC	X	X	2		4
~1000 DC	X	X			3
950 DC	X	X	2		>4
850 DC	X	X	1		3-4
750 DC	X	X	2		4
~180 DC	X	X	1	Varios	4
~150 DC	X	X	2	1	>4
~100 DC	X		Varios		4
50 AC	X	X			4

FUENTE: Samaniego, 2004

De acuerdo a lo mostrado en la tabla anterior, Samaniego concluyó que el tipo de erupción más probable es aquella descrita en el Escenario 3: VEI 4, como la presentada en 1877, con una probabilidad del 60%. Los eventos con un VEI > 4 tienen una probabilidad de volver a ocurrir del 10% mientras que los eventos correspondientes al Escenario 2 tienen una probabilidad del 30%. Finalmente, un evento eruptivo que produzca únicamente flujo de lava tiene una probabilidad del 10%.

El escenario usado para esta modelación es el 3 ya que este corresponde al de mayor probabilidad de ocurrencia según la tabla 2.3.

### **2.1.5 DEFINICIÓN DE LAHAR Y TIPOS DE LAHARES.**

#### **Definición**

Un lahar consiste en la mezcla de agua y sedimentos provenientes de un volcán, que fluyen a una determinada velocidad, siendo esta generalmente de avance rápido.

El comportamiento de un flujo lahárico se ve condicionado por las propiedades de las partículas y el fluido y de las interacciones fluido – partícula y partícula – partícula (Manville, 2013); interacciones que variarán de acuerdo a la concentración de volumen, tipo y tamaño de las partículas.

Con el fin de estudiar este y otros casos de fluidos en movimiento, Bingham (1929) introdujo el concepto de reología, el cual se basa en el estudio de la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos, tales como la plasticidad, viscosidad, y elasticidad de los fluidos.

En base a ello, se pueden mencionar los siguientes tipos de flujos o lahares:

## **Tipos de lahares**

### **Flujo de agua**

Este corresponde a una gran cantidad de descarga de agua con una concentración de sedimentos igual o menor al 5% en volumen. En este tipo de flujos, el tamaño de los sedimentos es función de la pendiente del cauce, siendo así que, en pendientes elevadas, se moverán y se sedimentarán bloques y gravas; mientras que cuando la pendiente sea baja, predominarán las arenas y el limo.

### **Flujo de lodo**

Son productos de lluvia de gran intensidad y duración. De manera general, los flujos de lodo tienen una alta concentración de finos (limos y arcillas), aunque también puede transportar grandes bloques y cantos de roca. (Suarez, 2001).

### **Flujo Hiperconcentrado**

Los flujos hiperconcentrados están formados por densas suspensiones de sedimento en agua, en concentraciones lo suficientemente bajas para que las partículas más gruesas puedan sedimentarse cuando la velocidad se reduzca. Son flujos turbulentos, pero una pequeña parte de esa turbulencia, se pierde debido a la más alta viscosidad del fluido (Pierson, 1991).

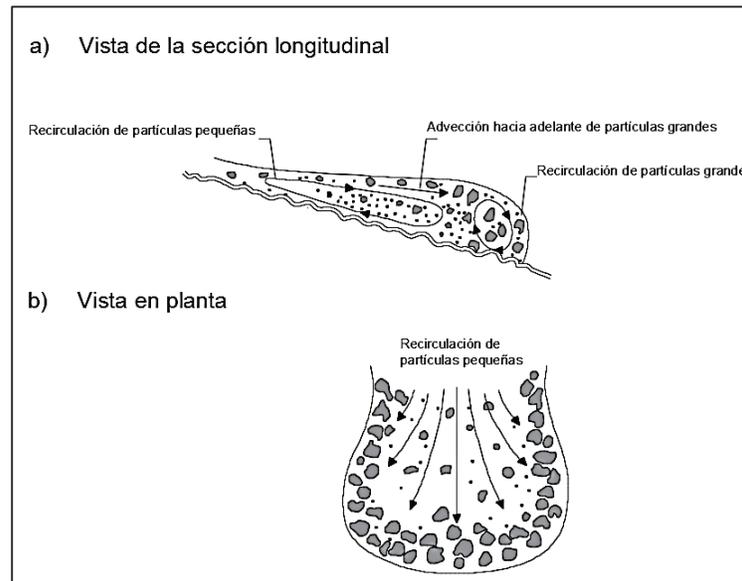
Este tipo de flujos, si bien poseen un límite elástico, aún parece fluir como un líquido.

### **Flujo de Detritos**

Los flujos de escombros o detritos, conocidos también como "Debris FLOW", se definen como flujos acuosos, con una concentración elevada de agua y sedimentos

y con un elevado límite elástico (Pierson y Costa, 1987). Están compuestos por elementos que van de tamaño arcilla hasta bloques.

**FIGURA 2.25: ESQUEMA DE LA TRAYECTORIA Y SEGREGACIÓN DE LAS PARTÍCULAS EN UN FLUJO DE DETRITOS**



FUENTE: Takahashi, 2008

Los flujos de detritos pueden ser de dos tipos: cohesivos (>3% - 5% de arcillas) o no cohesivos (<3% - 5% de arcillas), teniendo ambos un comportamiento significativamente diferente (Scott, 1995). Los flujos cohesivos tienden a permanecer de este tipo durante su trayecto, mientras que los no cohesivos tienden a transformarse de flujos hiperconcentrados en primera instancia a flujos cargados de sedimentos en forma final.

Cabe destacar que los lahares pueden cambiar de tipo durante su trayectoria pudiendo pasar de hiperconcentrados a flujo de detritos o viceversa; esto dependerá del tipo de sedimentos y concentración de los mismos y también por pérdida de agua (Manville, 2013).

## **2.1.6 INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA HEC-RAS Y CFD FLOW-3D.**

### **2.1.6.1. HEC-RAS.**

#### **Sistema de Análisis de Ríos**

El Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center (HEC)) de las fuerzas armadas de los Estados Unidos desarrolló un programa llamado Sistema de Análisis de Ríos (River Analysis System (RAS)) el cual permite desarrollar cálculos en una dimensión, tanto para fluidos permanentes como no permanentes. También permite realizar cálculos para el transporte de sedimentos y modelado de la temperatura del agua.

El programa está diseñado para uso interactivo con el usuario en un ambiente multi-tarea. Posee una interface gráfica de usuario, componentes para el análisis hidráulico, almacenamiento de datos y capacidades de gestión, gráficos y herramientas para reportes o informes.

El programa HEC-RAS contiene cuatro componentes para el análisis hidráulico unidimensional:

1. Flujo permanente en el cálculo del perfil de la superficie
2. Simulación de flujo no permanente
3. Cálculo del transporte de sedimentos
4. Análisis de la calidad del agua

Un aspecto muy importante es que el programa utiliza representación geométrica de datos común, así como rutinas de cálculo geométrico e hidráulico comunes.

#### **Capacidad del programa**

El programa es capaz de ejecutar cálculos hidráulicos unidimensionales en un sistema de canales naturales y/o construidos. Se pueden llevar a cabo modelajes para régimen subcrítico, supercrítico y para régimen de flujo mixto para los perfiles de la superficie de agua.

El computo básico realizado por el programa está basado en la solución de la ecuación unidimensional. Las pérdidas de energía son calculadas en base a la ecuación de Manning y las contracciones y expansiones. En los casos en los que el perfil de la superficie del agua es rápidamente variado se utiliza la ecuación del momentum, caso en el cual también se incluyen cálculos para el régimen de flujo mixto, hidráulica de puentes y análisis de los perfiles en las confluencias de los ríos.

En los cálculos también se pueden considerar ciertos obstáculos en el cauce tales como alcantarillas, puentes, vertederos y demás estructuras ya que el sistema de flujo permanente se ha diseñado para aplicaciones en dirección de los cauces y revisar la seguridad del flujo lo cual permite evaluar este tipo de obstrucciones.

Finalmente se puede mencionar que se han incluido en el programa características especiales de los componentes del flujo permanente tales como: análisis de planes múltiples, cálculo de perfiles múltiples, análisis de orificios múltiples y puentes y/o alcantarilla.

### **Ecuaciones fundamentales en el HEC-RAS**

El programa HEC-RAS basa su funcionamiento en la solución de la ecuación de energía en una dimensión, evalúa las pérdidas producidas por fricción mediante la ecuación de Manning (descrita en la sección 2.1.1.2) y adicionalmente utiliza coeficientes de contracción y expansión, los mismos que son multiplicados por el cambio de la carga de velocidad. (Méndez, 2017).

Adicionalmente, el perfil de agua de una determinada sección transversal, lo evalúa mediante el uso y la resolución de la ecuación de Energía (descrita en la sección

2.1.1.5), la cual es utilizada a través de un proceso iterativo denominado “método de paso estándar” (estándar step method).

La pérdida de energía ( $h_e$ ), compuesta por las pérdidas longitudinales o de fricción y las pérdidas localizadas de expansión y contracción, son evaluadas mediante la siguiente ecuación: (Méndez, 2017)

$$h_e = LS_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2.57)$$

Donde:

L: Longitud del tramo

Sf: Pendiente representativa de la fricción (pendiente motriz o pendiente de la línea de energía)

C: Coeficiente de pérdida por expansión y contracción.

### **Ecuaciones de Saint Venant**

Las ecuaciones usadas por el software Hec-RAS para la simulación unidimensional de un canal abierto en flujo no permanente son las ecuaciones de Saint Venant, las cuales se basan en las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento y de continuidad (Chaudhry 1993). Las ecuaciones se muestran a continuación (Delleur, 1993):

Ecuación de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q + (i - f) \quad (2.58)$$

Ecuación de Continuidad:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta \cdot Q^2 / A)}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e \right) - \beta \cdot q \cdot v_x + W_f \cdot B = 0 \quad (2.59)$$

Donde:

$\beta$ = Coeficiente de Boussinesq

q= Caudal específico

i= inestabilidad de precipitación.

f= tasa de infiltración

Q= caudal que entra en el volumen de control

$S_f$ = pendiente de fricción

$S_e$ = pendiente de pérdidas de energía por turbulencia

$W_f$ = factor de corte del viento

B= ancho de espejo de agua

A= la sección

Las ecuaciones de Saint Venant pueden ser resueltas completas o simplificadas, el programa HEC-RAS resuelve las ecuaciones de manera completa, haciendo uso del método de diferencias finitas implícitas (Hamad, 2008).

### **Simulación del Flujo no Permanente**

El programa está en capacidad de simular flujo no permanente unidimensional a través de una red de canales abiertos. Esta característica fue desarrollada principalmente para realizar cálculos en el régimen subcrítico sin embargo también puede realizar cálculos en régimen de flujo mixto.

En el módulo de flujo inestable se incorporan cálculos hidráulicos para secciones transversales, alcantarillas, puentes y otras estructuras hidráulicas desarrolladas para el componente de flujo constante.

Dentro de las características especiales en la simulación de flujo no permanente se incluyen también análisis de rotura de presas, saltos de diques, desbordamiento, estaciones de bombeo y sistemas de tuberías a presión.

### **Transporte de sedimentos / cálculo del cauce**

El programa puede simular unidimensionalmente el transporte de sedimentos que provocan el ensanchamiento o reducción de los canales en el transcurso del tiempo. También se incluyen características para modelar una red completa de corrientes, dragado de canales, diques, depósito en un embalse, análisis de profundidad de navegación, estimar la socavación máxima y analizar la sedimentación de canales.

### **Análisis de la calidad de agua**

El programa también está en capacidad de analizar la calidad del agua fluvial y detectar componentes tales como algas, oxígeno disuelto, orto fosfato disuelto, fósforo orgánico disuelto, entre otros.

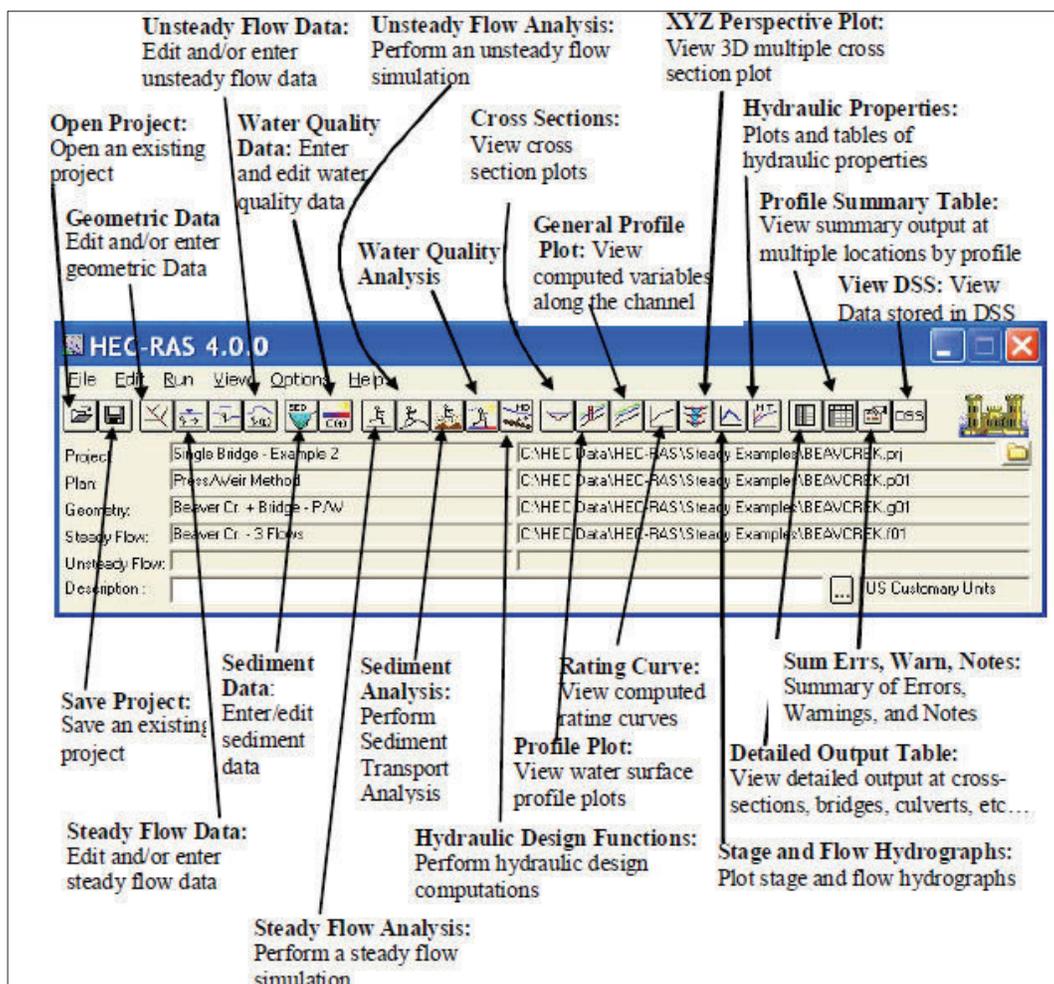
### **Manejo de Datos en HEC-RAS**

En HEC-RAS, un proyecto está formado por un conjunto de archivos de datos que están asociados a un sistema fluvial particular. El usuario puede realizar todos los análisis disponibles dentro del programa o solamente aquellos que creyera necesarios.

Los archivos de datos que se pueden manejar en un proyecto son los siguientes: datos geométricos, datos del plan, datos de flujo no estacionario, datos de flujo cuasi-estacionario, datos de flujo estacionario, datos de sedimentos, datos de calidad de agua y datos de diseño hidráulico. Todos estos datos, después de realizar el trabajo de simulación, se podrán comparar de forma tabular y gráfica y enviarlos a imprimir o exportar los datos hacia otros programas.

Se presenta a continuación la ventana principal del programa HEC-RAS, interfaz de usuario principal del mismo. En ella se puede describe la función de cada uno de los botones de comando.

**FIGURA 2.26:: INTERFACE DE USUARIO HEC-RAS / DESCRIPCIÓN DE COMANDOS**



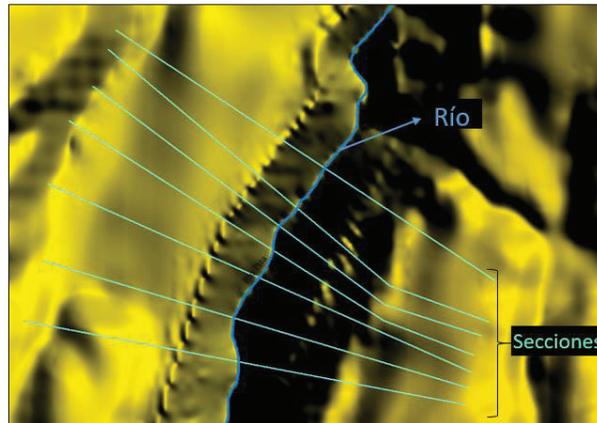
FUENTE: Manual de usuario HEC-RAS, 2017

### Secciones transversales

Para la modelación unidimensional en el programa Hec-Ras es necesario determinar secciones transversales a lo largo del río a modelar.

La ubicación de las secciones transversales para la modelación unidimensional se designa con el fin de obtener una morfología aproximada a la realidad como se detalla en la Figura 2.27.

**FIGURA 2.27: SECCIONES DE MODELACIÓN EN UN RÍO.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Las secciones seleccionadas deben ser revisadas en el MDT debido a la limitación que presenta trabajar con un MDT de tres metros por tres metros de pixel.

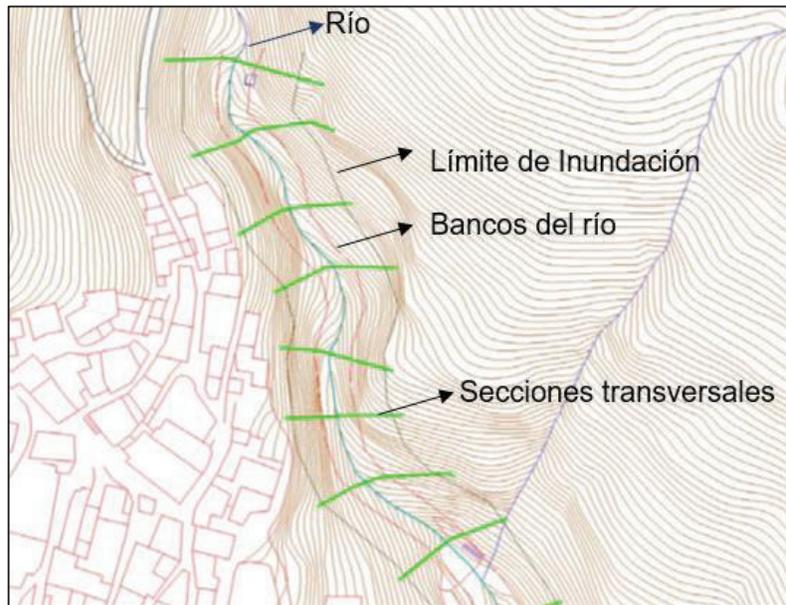
#### **Generación de secciones para HEC-RAS**

Existen diferentes maneras de ingresar la geometría a ser modelada en el software, en este caso se habla de la que se usó para el proyecto de titulación.

Haciendo uso del MDT, red hidrográfica, márgenes del río, área de posible inundación, secciones transversales y la extensión HEC-GeoRAS en el software ArcMAP se puede generar el tramo de simulación.

En la figura 2.28 se muestra un ejemplo del tramo de simulación generado en el software ArcMAP con la extensión HEC-GeoRAS el cual es exportado al software HEC-RAS.

**FIGURA 2.28: TRAMO DE SIMULACIÓN GENERADO CON LA EXTENSIÓN HEC-GEORAS**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: (Nanía & Emilio, 2007)

### **Condiciones de contorno HEC-RAS**

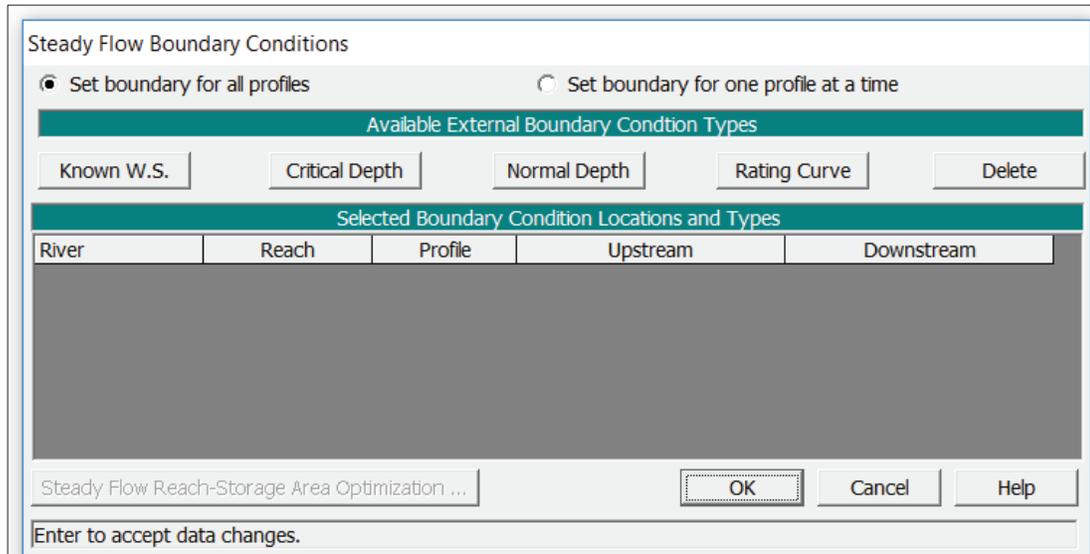
Para el modelamiento en el software HEC-RAS es indispensable establecer las condiciones de contorno, las cuales pueden variar en las secciones existentes, o a su vez en la inicial y final (Nanía & Emilio, 2007).

Las condiciones de borde varían dependiendo del tipo de flujo que se modele como se analiza a continuación:

### **Condiciones de contorno para flujo permanente en el software HEC-RAS**

Para flujo permanente las opciones de condiciones de contorno a ingresar en el software HEC-RAS son calado conocido, calado crítica, calado normal y curva de descarga, como se muestra en la figura 2.29.

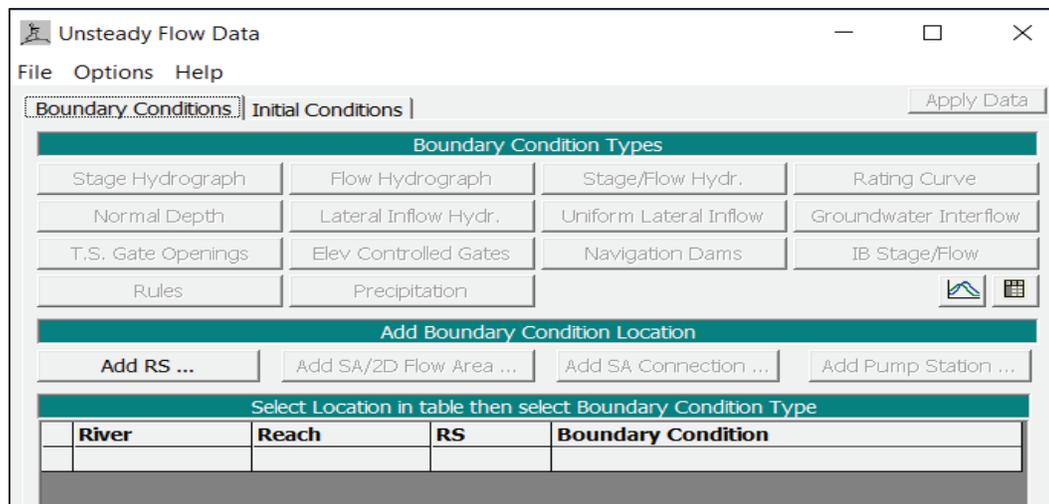
**FIGURA 2.29: INTERFAZ DE INGRESO DE LAS CONDICIONES DE BORDE EN EL SOFTWARE HEC-RAS.**



FUENTE: Software HEC-RAS

### Condiciones de contorno para flujo no permanente en el software HEC-RAS

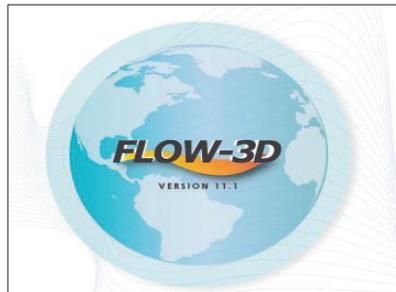
**FIGURA 2.30 INTERFAZ DE INGRESO DE LAS CONDICIONES DE BORDE EN EL SOFTWARE HEC-RAS.**



FUENTE: Software HEC-RAS

### 2.1.6.2. CFD FLOW-3D.

**FIGURA 2.31: LOGOTIPO FLOW-3D**



FUENTE: Manual de usuario FLOW-3D V 11.1

FLOW 3D es un programa desarrollado por FLOW Science, Inc.. Es considerado un programa para el cálculo de la Dinámica de Fluidos (Computational Fluid Dynamics (CFD)), ya que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran fluidos utilizando netamente ecuaciones que gobiernan el movimiento de fluidos: conservación de la masa, momento y energía; en hasta tres dimensiones.

Este programa es compatible con sistemas operativos de 64 bits, como los siguientes:

- Microsoft Windows 7 y superior
- Microsoft Windows Server 2008 y superior
- Linux 6 Red Hat Enterprise y superior

De igual manera el desarrollador del paquete recomienda estrictamente utilizar procesadores Core i7 e Intel Xeon. No se recomienda procesadores AMD y de igual manera se recomienda contar con una tarjeta gráfica dedicada para el procesamiento de video.

El objetivo que persigue el programa es dar al usuario la capacidad de crear diseños de productos optimizados y reducir el tiempo de comercialización de los mismos haciendo uso de simulaciones de alta precisión en la dinámica de fluidos.

Entre las características con las cuales cuenta este programa se tienen las siguientes:

**Precisión.** - FLOW-3D entrega resultados rápidos y de alta precisión

**Eficiencia.** – Los Ingenieros invierten su tiempo observando, optimizando y colaborando en conceptos de diseño, mientras el programa ejecuta los cálculos necesarios en menor tiempo y con resultados más precisos.

**Colaboración.** - A través de FLOWSight se puede procesar los resultados de la simulación, tanto numéricos como visuales, para que sean comparados y/o analizados por otros expertos en la materia.

El programa solamente soporta archivos en formato *.STL*, por lo que, si se requiere importar un archivo CAD al programa, este debe ser primero convertido a *.STL* usando alguna de las herramientas que entrega el software. Para el caso puntual de archivos CAD, la herramienta a utilizar sería CAD2STL.

Por otro lado, el programa incorpora algunas herramientas tales como ciertas calculadoras, agregadas al menú de Utilidades y administrador de bases de datos, tanto externas como propias del programa que permiten al usuario contar con datos de propiedades de materiales para realizar las diferentes simulaciones. Algunas de estas bases de datos se deben comprar por separado a la licencia del programa. Estas herramientas están enfocadas en su mayoría para realizar simulaciones térmicas de materiales.

Entre las características principales que posee el programa FLOW 3D en relación a las aplicaciones hidráulicas, se pueden mencionar las siguientes:

- Se puede definir las condiciones de contorno de la malla de entrada usando una curva de evaluación que relacione la elevación del fluido con la tasa de flujo.

- Los datos de batimetría pueden ser importados desde los archivos con datos raster que contengan valores de elevación del terreno a intervalos regulares. Adicionalmente se permite asignar la rugosidad del terreno a la geometría lo cual permite realizar modelaciones más realistas de inundaciones en terrenos complejos.
- Se permite definir la rugosidad de la superficie de componentes a subcomponentes.
- Cuenta con un algoritmo que, basado en el principio de la capa de esponja, permite minimizar la reflexión de la onda en la capa de superficie y a consecuencia minimizar su interferencia con la solución.
- Permite considerar en la modelación, líneas de amarre que se utilizan para sujetar por ejemplo plataformas flotantes al fondo marino, considerando la masa, la tensión, la flotabilidad y las fuerzas del flujo que actúan sobre la sección sumergida de estas líneas.
- Se ha ampliado el rango de aplicabilidad del modelo de transporte de sedimentos.

Es sumamente importante que el modelador represente con mucha precisión una situación real para llevar a cabo la simulación, ya que, si no lo hace de esta manera, los resultados que se obtengan no representarán lo que ocurriría en la vida real.

El manual del software FLOW 3D publicado por FLOW Science para la versión 11.1.0, recomienda al usuario, hacerse las siguientes preguntas antes de iniciar el modelamiento:

- ¿Qué quiero aprender del cálculo?
- ¿Cuál es la escala y como debe diseñarse la malla para captar fenómenos importantes?
- ¿Qué tipos de condiciones de frontera representan mejor la situación física real?
- ¿Qué tipos de fluidos deberán ser utilizados?

- ¿Qué propiedades de los fluidos son importantes para este problema?
- ¿Qué otros fenómenos físicos son importantes?
- ¿Cuál debería ser el estado inicial del fluido?
- ¿Qué sistema de unidades se debe utilizar?

Es importante que, al realizar una modelación, el problema que se esté modelando sea lo más parecido a la situación real, además es recomendable realizar la modelación desde lo más sencillo hacia los más complejo. En este punto, es recomendable iniciar con una sencilla aproximación del proceso, verificar que se obtengan resultados adecuados y válidos, y posteriormente agregar otros fenómenos físicos de mayor complejidad.

El uso del programa FLOW 3D, es una muy buena alternativa en casos en los cuales los cálculos de ingeniería son muy complejos y poco prácticos y requieren un gran nivel de detalle, cuando la ejecución de experimentos físicos son complejos, muy costosos y no entregan la suficiente cantidad de información requerida. En contraparte es muy poco efectivo cuando el fenómeno físico es desconocido, muy poco entendido o extremadamente complejo ya que esta información es información de ingreso al CFD.

No se debe olvidar que el CFD es un programa numérico y entregará los resultados en base a las ecuaciones de gobierno que se hayan especificado y a las condiciones iniciales y de frontera que se hayan establecido. También se debe considerar que las computadoras pueden presentar residuos numéricos, lo cual puede afectar también a los resultados que se obtengan.

### **Tipos de archivos manejados en FLOW 3D**

Existen algunos tipos de archivos que pueden ser utilizados en FLOW 3D, a continuación, se mencionan los más importantes:

- prepin. - Este archivo contiene toda la información de entrada para la simulación: variables y configuración. Es el archivo de ingreso para realizar la modelación.
- prpgrf. - Es un archivo previo que contiene cálculos iniciales y que puede ser revisado previamente para verificar su validez antes de correr toda la simulación.
- flsgrf. - Contiene los resultados de la simulación.
- prperr, report, prpout. - Son archivos de diagnóstico previo a ejecutar la simulación.
- hd3err, hd3msg, hd3out. - Son archivos de diagnóstico posteriores a ejecutar la simulación.

### **Metodología utilizada por el programa FLOW 3D**

En forma general (Blanco, 2007) menciona los siguientes pasos a llevar a cabo para realizar una simulación numérica en el programa FLOW 3D:

- Definir la geometría del problema
- Crear el mallado o celdas donde serán calculadas todas las variables
- Definir el modelo de turbulencia a utilizarse
- Definir las propiedades del fluido
- Especificar las condiciones de contorno
- Ingresar las condiciones iniciales de la simulación numérica
- Controlar durante el proceso los parámetros que afectan la resolución del problema
- Supervisar la evolución de la simulación y controlar la evolución de las variables.
- Analizar y validar la solución generada.

### Modelo Shallow Water

Se considera un flujo de agua superficial a aquel en el cual la extensión horizontal es mucho más grande que la extensión vertical. Claros ejemplos de este tipo de flujo son: el flujo del agua en el mar, grandes lagos, inundaciones, agua sobre la carrocería de un vehículo, aguas poco profundas, etc. (Manual FLOW 3D v. 11.1). Así mismo, el fenómeno estudiado en el presente proyecto de titulación, cabe también dentro de este modelo, puesto que la extensión del lahar en estudio será mayor a la profundidad que registre el mismo en los diferentes puntos de su trayectoria.

En un flujo superficial, la aceleración vertical del fluido es despreciable, por lo cual, las ecuaciones de movimiento en tres dimensiones, se pueden reducir a ecuaciones de movimiento en dos dimensiones sobre el plano horizontal. Con este modelo, la superficie del fluido estará libre de presentar fenómenos de olas. Por otro lado, límites no uniformes en el plano horizontal, pueden inducir pequeñas desviaciones del flujo netamente plano, por lo cual la aproximación aún incluye ciertos efectos tridimensionales.

Si se aplica el promedio de profundidad a las ecuaciones de momento en tres dimensiones descritas en el punto 2.1.1.5, se obtienen las siguientes ecuaciones de momento aplicables al modelo Shallow Water:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + G_x + \frac{\tau_{s,x} + \tau_{b,x}}{\rho d} + 2\phi v \quad (2.60)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + G_y + \frac{\tau_{s,y} + \tau_{b,y}}{\rho d} + 2\phi u \quad (2.61)$$

Donde  $u$  y  $v$  son el promedio de profundidad de las velocidades  $x$  y  $y$  respectivamente. El tercer término del lado derecho representa el promedio de profundidad de la difusión viscosa en dirección vertical (en dirección horizontal es

despreciable) el cual está relacionado a la suma del esfuerzo cortante del viento en la superficie libre y el esfuerzo cortante en el fondo del reservorio. En este término,  $d$  es la profundidad del agua;  $\tau_{s,x}$  y  $\tau_{s,y}$  representan el esfuerzo cortante del viento en la superficie libre en las direcciones  $x$  y  $y$  respectivamente.  $\tau_{b,x}$  y  $\tau_{b,y}$  por su parte, representan los componentes en  $x$  y  $y$  del esfuerzo cortante en el fondo respectivamente (Manual FLOW 3D v. 11.1).

El último término en las ecuaciones 2.60 y 2.61 representa la fuerza Coriolis debido a la rotación de la Tierra, el cual es importante cuando se trata de fluidos geofísicos como aquellos en el mar, estuarios y lagunas.

El bloque de malla, para el modelo Shallow Water, debe tener al menos dos celdas ubicadas en la dirección del eje  $Z$ , de las cuales la celda inferior contiene el flujo y la capa superior queda libre de fluido y geometría. Suelen producirse errores cuando el fluido pasa a la capa superior.

## **2.2 ESTUDIOS PREVIOS**

Se describe a continuación tres estudios previos sobre la modelación numérica de los lahares primarios consecuencia de una posible erupción del volcán Cotopaxi en el flanco norte.

### **2.2.1. ESTUDIO DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS SOBRE LA INFRAESTRUCTURA DE LA EMAAP-Q Y LA FACILIDAD DE LAS OBRAS DE MITIGACIÓN ANTE UNA EVENTUAL ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI (E.E.I).**

En abril del 2004 la Escuela Politécnica Nacional (EPN) realizó una investigación para la Empresa Metropolitana De Alcantarillado y Agua Potable De Quito (EMAAP-Q); que es un estudio de la amenaza, evaluación de la vulnerabilidad y evaluación

del riesgo del flanco norte del volcán Cotopaxi. Al que en adelante se le denominara con E.E.I.

El dominio del estudio comprende los ríos Salto, Pita, Santa Clara y San Pedro, las estaciones iniciales se denominan Hostería Tambopaxi que corresponde al río Salto, Hummoks antes del cañón Pita que corresponde al río Pita y la estación final se denomina El Nacional que corresponde al Río San Pedro.

Este estudio consistió inicialmente en la recopilación de medidas en campo de calados de vestigios de la erupción del 26 de junio de 1877, en diferentes estaciones designadas en toda el área del dominio, además, determinaron secciones de RunUp, las mismas que proporcionan valores aproximados de caudales del mencionado evento. Esto fue llevado a cabo por el Instituto Geofísico de la EPN.

Haciendo uso del software HEC-RAS se realizaron corridas para los tres escenarios vulcanológicos denominados Antiguo Histórico, mediano y bajo, para finalmente calibrar estos datos con los datos obtenidos por el IGEPN.

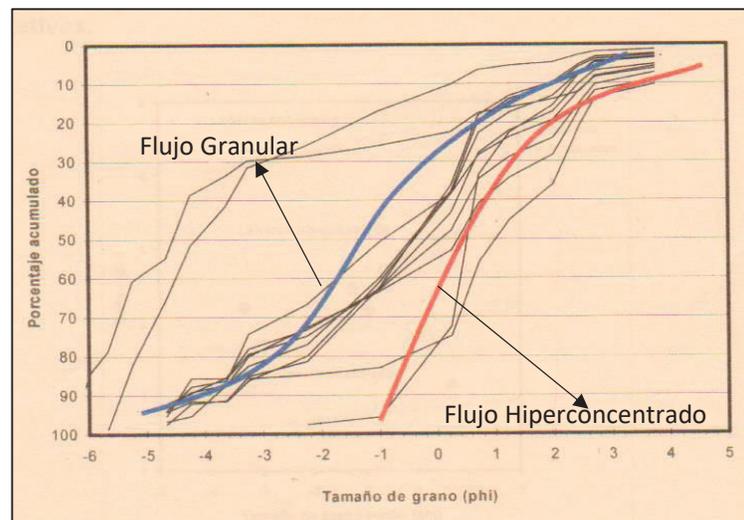
Finalmente, como resultado presenta caudales y calados máximos para cada estación, mapa de posible afectación por flujo laharítico, obras de mitigación y zonas habitables.

#### **2.2.1.1. Implementación del modelo de flujo Dilatante en “n” de Manning.**

Para analizar la granulometría de los flujos laharíticos en el estudio E.E.I, se tomaron 26 muestras en campo, de las cuales 15 corresponden al evento eruptivo de 1877; las demás corresponden a eventos eruptivos anteriores. Las muestras pertenecen a los ríos Pita, Salto y San Pedro; dichas muestras fueron divididas en dos grupos dependiendo de la cercanía con el cráter, en base a lo cual se les denominó muestras proximales y muestras distales.

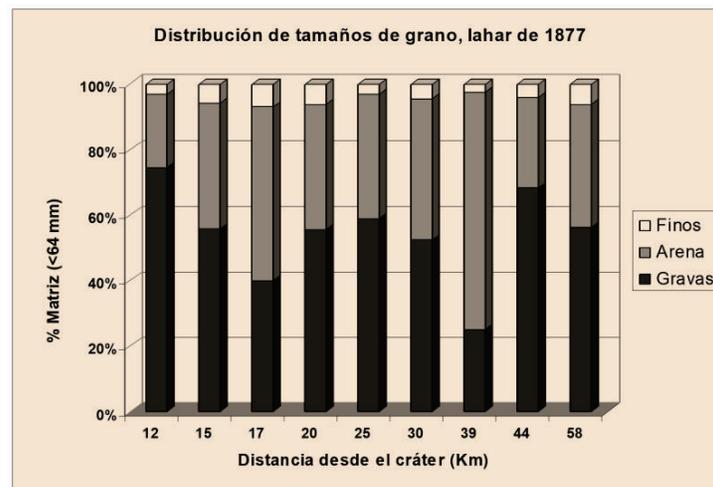
Debido a que el sector de la caldera se encuentra dentro de la zona proximal, se hará uso únicamente de la distribución granulométrica de esta zona. Para el análisis de la granulometría usan la escala granulométrica "Phi" como se puede observar en la figura 2.32.

**FIGURA 2.32: DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA DE GRANO PARA LA ZONA PROXIMAL. LA LÍNEA AZUL Y ROJA CORRESPONDERÍA A FLUJOS "GRANULAR" E "HIPERCONCENTRADO" RESPECTIVAMENTE.**



FUENTE: E.E.I; Mothes, 2004

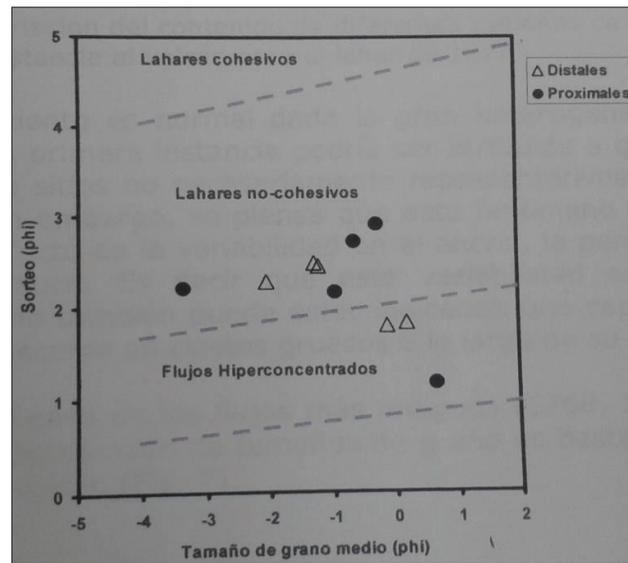
**FIGURA 2.33: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANO, LAHAR DE 1877**



FUENTE: E.E.I; Mothes, 2004

Mothes clasifica a los flujos que transitaron por el drenaje norte del volcán Cotopaxi como “no-cohesivos” e “hiperconcentrados” (figura 2.34), también los caracteriza como “flujos de escombros granulares” según el diagrama granulométrico de Scottet de 1995.

**FIGURA 2.34: CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS SEGÚN EL TAMAÑO DE GRANO Y SORTEO.**



**Fuente:** E.E.I; Mothes, 2004

En base a las curvas de la figura 2.32 suponen que, para justificar la carga de sedimentos formados por el lahar de 1877, una explosión inicial fuerte debió generar modificaciones en el lahar, además la concentración de sedimentos debió ir variando mientras el lahar transitaba aguas abajo. Debido a este hecho la reología del lahar fue modificada hasta transformarse posiblemente en un flujo hiperconcentrado.

Costa (1987) asume que los flujos hiperconcentrados o ricos en sedimentos pueden ser modelados con valores de coeficiente de resistencia al movimiento para flujo dilatante y además los considera como aquellos que contienen las propiedades de un flujo Newtoniano.

Costa (1987) además menciona otros estudios y autores (De León y Jeppson, 1982; Swift y Kresch, 1983; y Laulen y Hansen, 1988) que usaron modelos unidimensionales en evoluciones de lahares mediante el ajuste de parámetros, los que a criterio del autor arrojaron resultados razonables.

Se considera que en el coeficiente “n” de Manning está contenida la disipación de energía y las características reológicas del fluido.

Para el presente proyecto se toma como base inicial, para la calibración en flujo permanente los valores “n” de Manning establecidos en este estudio, con el fin de garantizar que en los valores de rugosidad estén contenidas las características reológicas del fluido.

### **2.2.2. PREPARACIÓN DE LA BASE GEOMORFOLÓGICA PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI “FLANCO NORTE” (P.B.G).**

En noviembre del 2015 la Escuela Politécnica Nacional (EPN) realizó una investigación para el Banco Interamericano de Desarrollo (BID); este estudio fue una preparación de datos para una posible modelación numérica de los lahares en el CFD FLOW-3D. Al que en adelante se le denominará como P.B.G.

Este estudio se realizó en una extensión de 65 km del flanco norte del volcán Cotopaxi, los límites de esta longitud son la cumbre del volcán y el complejo deportivo El Nacional.

Los datos generados fueron geometría actualizada en archivos “.stl” y “.cad”, valores de rugosidad absoluta (k) para los diferentes tramos y condiciones hidráulicas de frontera, estos datos están asociados al evento eruptivo ocurrido en 1877, además se generó mallado de celda de 3 x 3 m para todo el dominio a ser simulado.

Los valores de rugosidad absoluta (k) tienen como origen los coeficientes “n” de Manning en los que se encuentra contenido el modelo de fluido dilatante. Dichos coeficientes fueron tomados del estudio (E.E.I), antes mencionado.

### 2.2.2.1. Evaluación de los coeficientes de rugosidad absoluta.

La rugosidad absoluta fue un parámetro fundamental de ingreso para la modelación numérica en Flow-3D.

Nikuradse en su experimento aplica el concepto que indica que la rugosidad absoluta se basa en pruebas granulométricas del material de contorno, dicho ensayo podría ser representado adecuadamente por el valor (D50) de la curva granulométrica, esto con la finalidad de establecer la resistencia al movimiento.

En este estudio se menciona que:

*“Haciendo uso de la ecuación de Manning para flujo dilatante se deriva la relación entre el coeficiente “n” de Manning y el valor del D50 de la curva granulométrica del material de contorno, mismo que por definición corresponde a la rugosidad absoluta”.*

$$D_{50} = \left( \frac{n}{\left( \frac{25 * \rho_s * a * \text{sen} \alpha^{1/2}}{4 * \rho_m} \right)} \right) * \left( \frac{h^{5/6} * \sqrt{g}}{\lambda} \right) \quad (2.62)$$

Donde:

- n      coeficiente de Manning calculado en el estudio (EEI 2004),
- $\tau$       esfuerzo cortante en el fondo,
- a      constante igual a 0.042,
- $\text{sen} \alpha^{1/2}$  constante igual a 0.371,

- $\lambda$  constante igual a 19.3,
- g constante gravitacional igual a 9.81 m/s<sup>2</sup>,
- h profundidad de la mezcla agua – material sólido (EEI 2004), m

Según lo mencionado el valor D50 contiene la disipación de energía y las características reológicas del fluido ya que este es calculado en base al coeficiente de rugosidad “n” de Manning, el mismo que contiene estas características, como se menciona en el punto 2.2.1.1. Este concepto de cálculo de la rugosidad absoluta es el que se adoptó para en el presente proyecto de titulación.

### **2.2.3. ACTUALIZACIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL DEL FLUJO EN EL FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI PRODUCTO DE UNA ERUPCIÓN Y COMPARACIÓN CON LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL EN LA ZONA CONSOLIDADA DE SANGOLQUÍ.**

En marzo del 2016 la facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional inicio el proyecto PII-DICA-001-2016 cuyo objetivo es actualizar la modelación numérica unidimensional del flujo generado por un evento eruptivo en el flanco norte del volcán Cotopaxi hasta la zona consolidada de Sangolquí. El mismo que se encuentra en desarrollo hasta la fecha. A este proyecto, en adelante se le denominara PII-DICA-001-2016.

En este proyecto se ha realizado la modelación numérica unidimensional en el programa HEC-RAS hasta el sector de la caldera con el escenario de mayor probabilidad de ocurrencia para flujo permanente y no permanente.

El presente proyecto de titulación se deriva del proyecto PII-DICA-001-2016 como una continuación al estudio, motivo por el cual, el tramo que se definirá más adelante como Pita 2, se tomará de este proyecto para llevar a cabo las simulaciones.

## **2.3 INFORMACIÓN OBTENIDA**

En este apartado se describe la información recopilada de los estudios E.E.I y P.B.G, que fueron de utilidad para el presente proyecto.

### **2.3.1 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA**

La cartografía digital proporcionada por el IGM que se utilizó en la modelación es:

- Modelo Digital del terreno de tamaño de pixel 3 x 3 metros, formato .tiff a escala 1:5000.
- Ortofotografías escala 1:5000.
- Red hidrográfica.

Además, se usó el límite de inundación para el escenario de mayor probabilidad determinado en el estudio E.E.I.

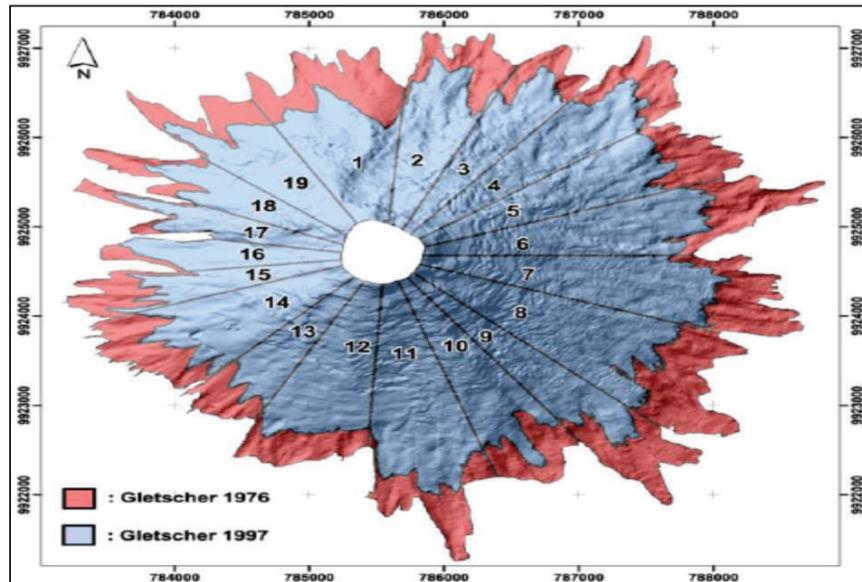
### **2.3.2 ÁREAS Y VOLÚMENES DEL CASQUETE GLACIAR**

El área y volumen del casquete glaciar son de gran importancia ya que en una posible erupción del Volcán Cotopaxi estos factores repercuten en la cantidad de lahar que se produzca.

En 1983 en base a controles de campo y fotografías aéreas, Jordan determinó la distribución de los diferentes glaciares existentes en el volcán Cotopaxi (Figura 2.35), así como su área y volumen, los mismos que han variado en el tiempo. Esta distribución de glaciares corresponde a la utilizada en el proyecto PII-DICA-001-2016, por lo cual los valores de la distribución a manejar en este estudio son los mismos.

Los glaciares que alimentan a la red de drenaje norte según Cáceres son los glaciares enumerados del 1 al 6 en la figura 2.35.

FIGURA 2.35: DISTRIBUCIÓN DE GLACIARES DEL VOLCÁN COTOPAXI



FUENTE: Jordan, 2004

La información de las áreas de los diferentes glaciares correspondientes al drenaje norte del volcán Cotopaxi actualizada a la fecha se encuentra en la tabla 2.4.

TABLA 2.4: VARIACIÓN DEL ÁREA DEL GLACIAR DEL FLANCO NORTE 1976-2011

	Nombre	Área 1976	Área 1997	Área 2006	Área 2011
		(m <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> )
1	<b>Glaciar Sindipamba</b>	1437000	865288	751789	738831
2	<b>Glaciar Carero Machay</b>	975100	770737	580208	570208
3	<b>Glaciar Potrerillos</b>	982800	772697	531162	522008
4	<b>Glaciar Pucahuaycu Norte</b>	1203800	889490	674696	663067
5	<b>Glaciar Mudadero</b>	1170900	725944	721445	709011
6	<b>Glaciar Cajas</b>	1362500	934392	765086	751900
	<b>Sumatoria</b>	<b>7132100</b>	<b>4958549</b>	<b>4024385</b>	<b>3955025</b>

FUENTE: Cáceres, 2015

Para la determinación del volumen del lahar en un posible escenario eruptivo tipo 3 (tabla 2.5), inicialmente se calcula el volumen del glaciar que consiste en

multiplicar el área del glaciar (tabla 2.3) por el espesor que podría derretirse que para este escenario es 4m, seguido se calcula el volumen de agua multiplicando el volumen del glaciar por la reducción del volumen de agua del paso del estado sólido a estado líquido que es -10% y por último se multiplica el volumen de agua por 3 ya que se considera que un lahar tiene 1/3 de volumen de agua y 2/3 de partículas sólidas. Todo esto tomando en cuenta que los glaciares que aportan al río Salto son el 1 y 2 y los aportantes al río Pita son del 3 al 6 (Proyecto PII-DICA-001-2016).

**TABLA 2.5: VOLUMEN DE LAHAR PARA EL ESCENARIO ERUPTIVO 3.**

		1976 (1877)	2011
<b>Volumen del Glaciar (m3)</b>	<b>Río Pita</b>	18880000	10583944
	<b>Río Salto</b>	9648400	5236156
<b>Volumen de Agua (m3)</b>	<b>Río Pita</b>	16992000	9525549.6
	<b>Río Salto</b>	8683560	4712540.4
<b>Volumen del Lahar (m3)</b>	<b>Río Pita</b>	50976000	28576648.8
	<b>Río Salto</b>	26050680	14137621.2

ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017 - FUENTE: Proyecto E.E.I

### 2.2.3 CAUDALES E HIDROGRAMAS.

Los caudales tomados de los RunUp del estudio E.E.I que se muestran en el siguiente punto, son los utilizados en la modelación unidimensional para flujo permanente. Por otra parte, los hidrogramas de ingreso para la modelación unidimensional para flujo no permanente y para la modelación tridimensional son extraídos de la modelación unidimensional del proyecto PII-DICA-001-2016, cuya modelación parte con hidrogramas determinados en base a los valores de volúmenes de la tabla 2.4.

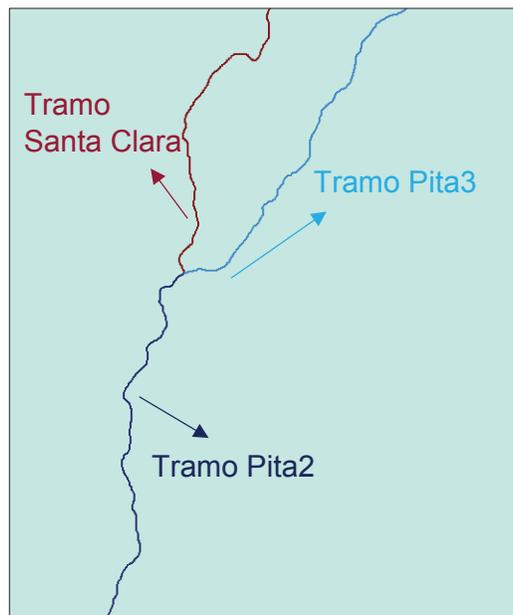
### 2.2.3.1 Caudales e hidrogramas para la modelación unidimensional.

La modelación unidimensional se realiza para flujo permanente y no permanente en tres tramos que están contenidos en el área de estudio (descrita en el siguiente capítulo); los tramos son Santa Clara, Pita 2 y Pita3 (figura 2.36), los dos últimos forman parte de un mismo río, pero fueron divididos debido al fenómeno del desbordamiento del mismo. Además, del tramo Pita 2, se toma únicamente los valores resultantes necesarios para la comparación y modelación tridimensional ya que su modelamiento es tomado del proyecto PII-DICA-001-2016.

#### a) Caudales e hidrogramas para la modelación unidimensional con flujo permanente.

Para la modelación unidimensional en flujo permanente se utilizan los caudales determinados en las estaciones de RunUp del estudio E.E.I (figura 2.37), los mismos que son resultado de una estimación en campo del tránsito de los flujos laharicos del evento de 1877.

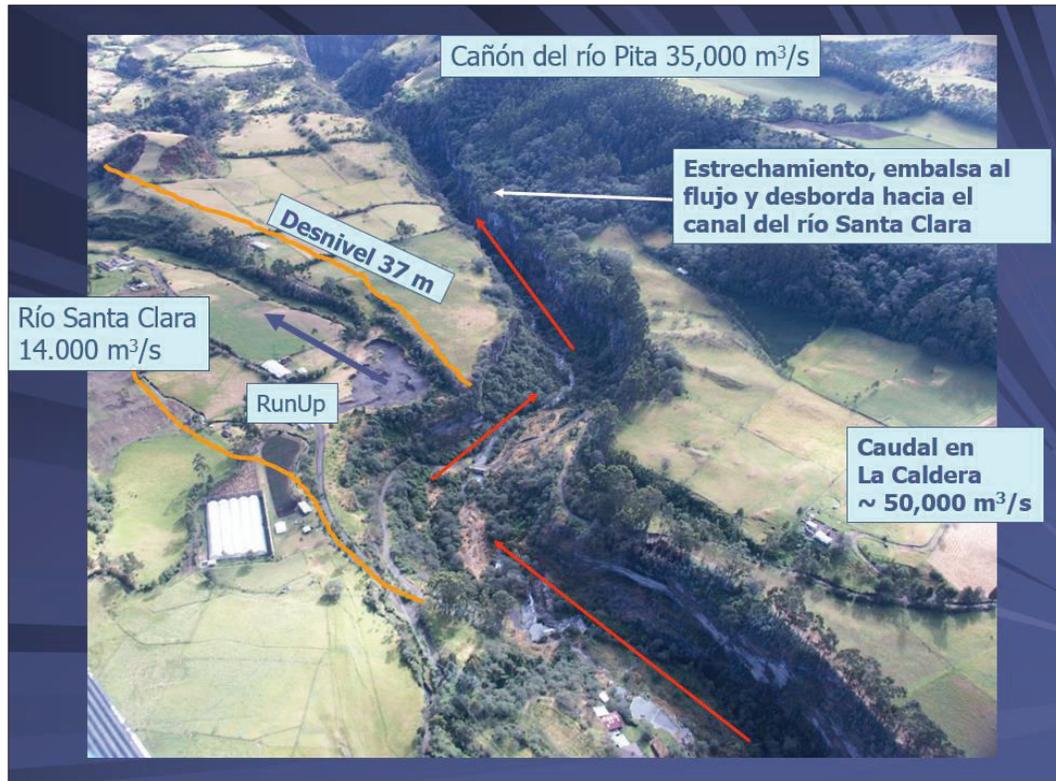
**FIGURA 2.36: NOMBRES DE LOS TRAMOS DE MODELACIÓN.**



ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: IGM

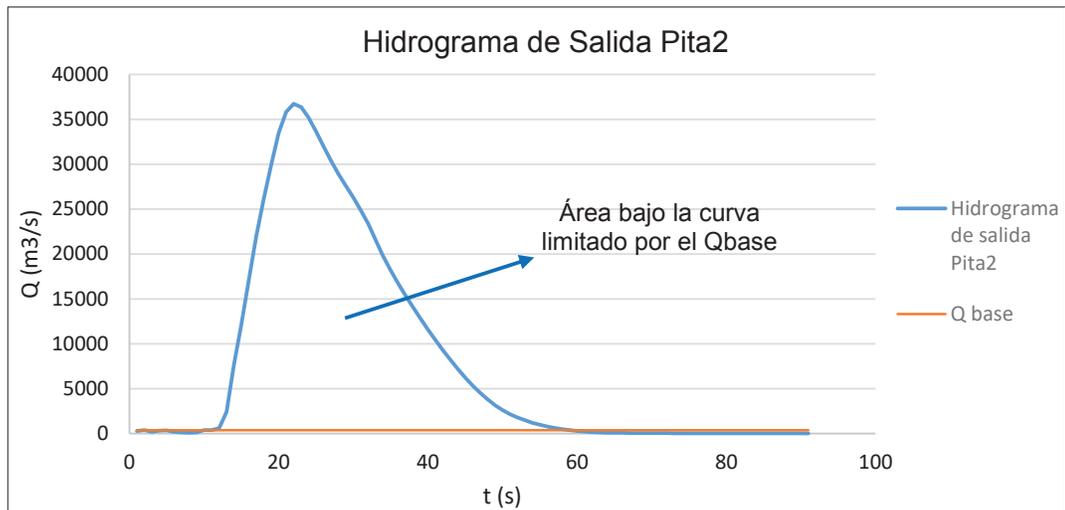
**FIGURA 2.37: CAUDALES ESTIMADOS EN EL SECTOR DE LA CALDERA PARA EL EVENTO DE 1877**



FUENTE: Estudio E.E.I

**b) Caudales e hidrogramas para la modelación unidimensional con flujo no permanente.**

Los hidrogramas para los tramos Pita 3 y Santa Clara se determinaron de la partición del hidrograma de salida del tramo Pita2 (figura 2.38). Dicha partición se hace en función de los porcentajes de volúmenes que pasan a cada tramo (tabla 2.5).

**FIGURA 2.38: HIDROGRAMA DE SALIDA DEL TRAMO PITA2**

ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Fuente: Proyecto PII-DICA-001-2016

Para la determinación de los porcentajes se usan los valores de caudales empleados en la modelación unidimensional para flujo permanente; además debido a que el volumen de agua se considera sería liberado de manera repentina, el hidrograma tipo para el cálculo de los volúmenes (tabla 2.5) es triangular, esta consideración es la usada en la modelación de los eventos eruptivos del Mount. St. Helens y del Nevado del Ruiz (proyecto PII-DICA-001-2016).

**TABLA 2.6: PORCENTAJE DE VOLUMEN QUE PASA A LOS TRAMOS PITA3 Y SANTA CLARA PARA EL EVENTO DE 1877.**

<b>Tramo Pita 2 antes de la caldera</b>	
Caudal estimado en campo (figura 2.30) (m3/s)	50000
Tiempo estimado (Estudio E.E.I) (min)	40
Volumen de Ingreso al tramo (m3)	60000000

<b>Tramo Santa Clara</b>	
Caudal estimado en campo (figura 2.28) (m3/s)	14000
Tiempo estimado (Estudio E.E.I) (min)	10
Volumen de Ingreso al tramo (m3)	4200000

<b>Tramo Pita3</b>	
Caudal estimado en campo (figura 2.28) (m3/s)	35000
Tiempo calculado (min)	53
Volumen de Ingreso al tramo (calculado) (m3)	55800000

<b>Porcentaje de Volumen que pasa</b>	
Porcentaje de volumen que pasa al tramo Santa Clara	7 %
Porcentaje de volumen que pasa al tramo Pita 3	93 %

ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Fuente: Estudio E.E.I

El área bajo la curva del hidrograma de la figura 2.38 se limita por el caudal base, que es un valor asumido para la modelación del tramo Pita 2 en el proyecto PII-DICA-001-2016.

Los volúmenes determinados en función de los porcentajes que pasan a cada tramo se muestran en la tabla 2.7; así como también los valores de caudal pico determinados con los tiempos recomendados en el estudio E.E.I. Los hidrogramas para cada tramo se muestran en las figuras 2.39 y 2.40.

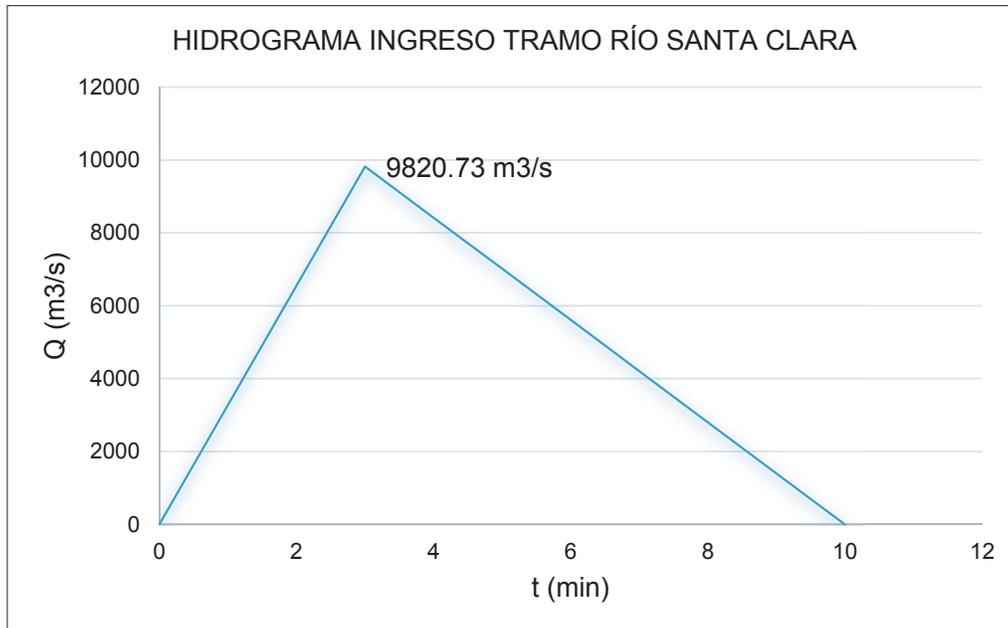
**TABLA 2.7: CAUDALES PICO Y VOLÚMENES DE INGRESO DE LOS TRAMOS DE MODELACIÓN.**

	Tramo Río Santa Clara	Tramo Río Pita 3
Volumen de Salida Pita2 (m3)	42088839.35	42088839.35
Volumen de Ingreso (m3)	2946218.75	39142620.60
Tiempo de duración del hidrograma (Estudio E.E.I.) (min)	10	53
Caudal Pico (m3/s)	9820.73	24551.82

ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Fuente: Estudio E.E.I.

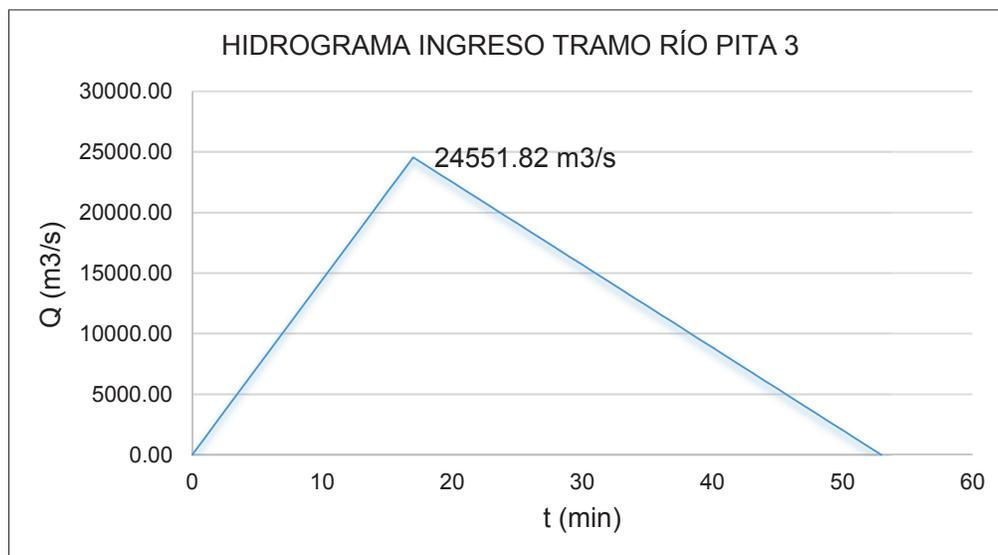
**FIGURA 2.39: HIDROGRAMA DE INGRESO MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL TRAMO SANTA CLARA**



ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Fuente: Estudio E.E.I

**FIGURA 2.40: HIDROGRAMA DE INGRESO MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL TRAMO PITA 3**



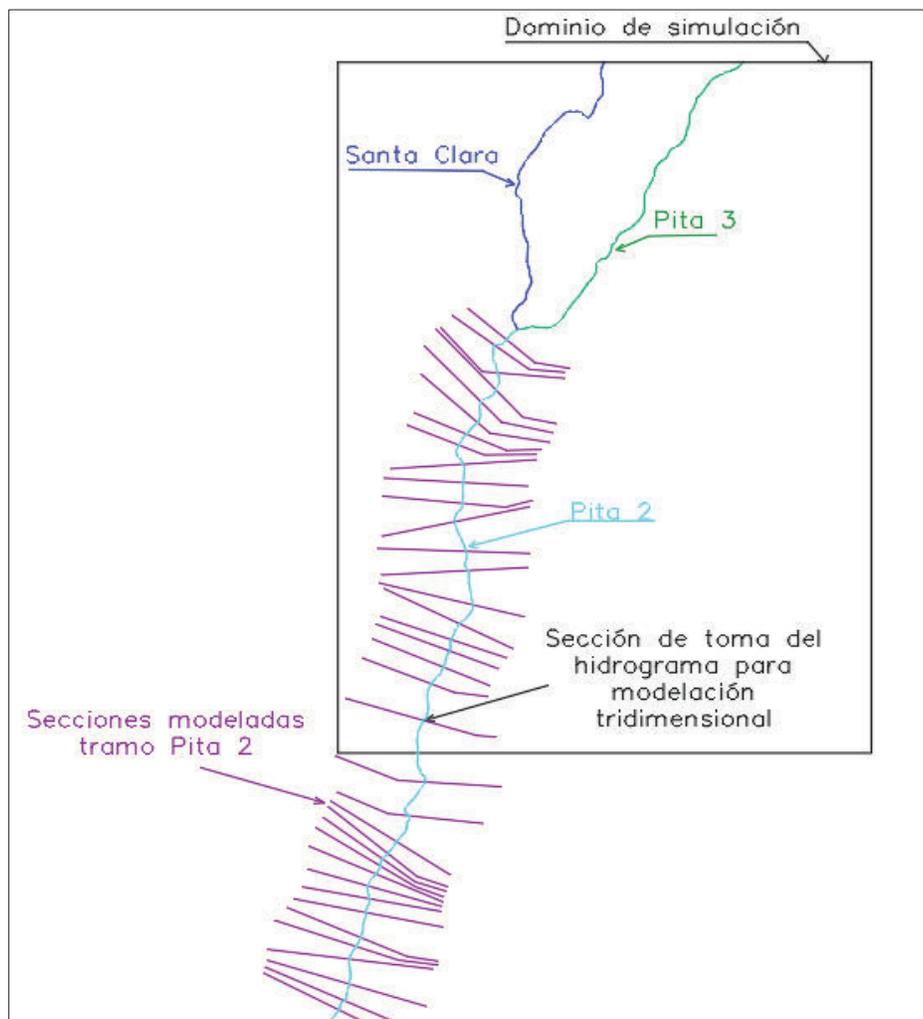
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Fuente: Estudio E.E.I

### 2.2.3.2 Caudales e hidrogramas para la modelación tridimensional.

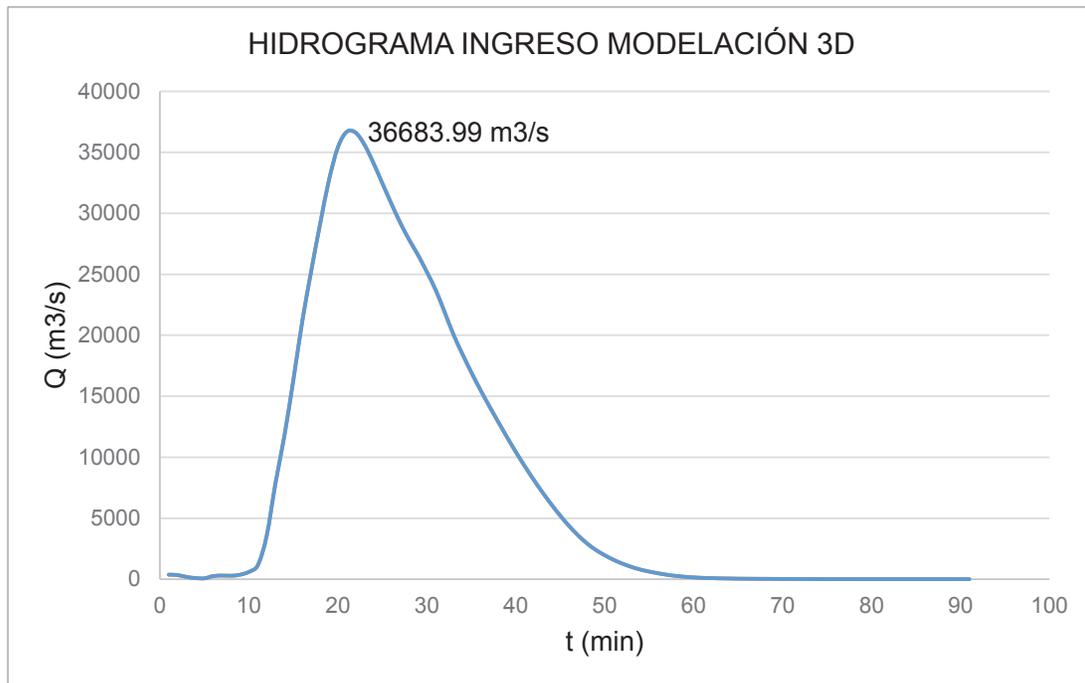
El hidrograma de ingreso para la modelación tridimensional (figura 2.42) es resultado de una de las secciones modeladas en HEC-RAS del tramo Pita 2 de la modelación unidimensional para flujo no permanente del proyecto PII-DICA-001-2016, dicha sección es la más cercana al inicio del dominio de modelación (figura 2.41).

**FIGURA 2.41: SECCIÓN DE TOMA DEL HIDROGRAMA PARA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.**



ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Fuente: Proyecto PII-DICA-001-2016

**FIGURA 2.42: HIDROGRAMA DE INGRESO MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL**

ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017 Beltran, 2017

Fuente: Proyecto PII-DICA-001-2016

### 2.3.4 VALORES DE “n” DE MANING

Los valores “n” de Manning resultado de la modelación unidimensional en flujo permanente del estudio E.E.I, son un referente para la simulación del presente proyecto de titulación.

A continuación, se muestran las tablas con los valores “n” de Manning correspondientes a las secciones de vestigio del evento eruptivo de 1877 en los tramos Pita 2, Pita3 y Santa Clara, así como las velocidades y calados estimados en campo:

**TABLA 2.8: SECCIONES DE VESTIGIO DE 1877 EN LOS TRAMOS PITA 2, PITA 3 Y SANTA CLARA.**

<b>Tramo de modelación</b>	<b>Sección de vestigio</b>	<b>Calado estimado en campo (m)</b>	<b>"n" de Manning</b>	<b>Velocidad m/s</b>
Pita 2	Hacienda Santa Rita	36	Canal central n=0.095 Margenes Laterales n=0.097	22
Pita 3	La Caldera (río Pita)	35	Canal central n=0.08	15-20
Pita 3	Antes Cascada Molinuco	40	Canal central n=0.09 Margenes Laterales n=0.08	>22
Santa Clara	La Caldera	13	Canal central n=0.03 Margenes Laterales n=0.025	15-18

ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Fuente: Proyecto E.E.I

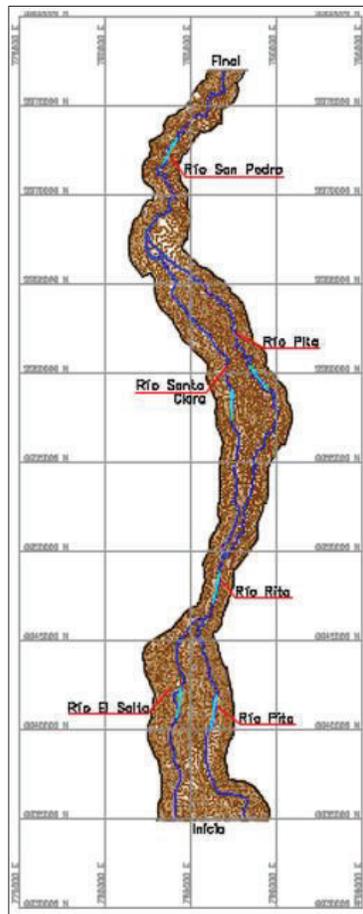
## CAPITULO III

### DELIMITACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO PARA LA MODELACIÓN.

#### 3.1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El flanco norte del volcán Cotopaxi está compuesto por dos redes hidrográficas iniciales que son los ríos Pita y Salto, los mismos que confluyen dando continuidad al río Pita. A 4.1 km de la confluencia, se encuentra el sector de la caldera, donde se presenta un desbordamiento que se encauza en el río Santa Clara Figura 3.1.

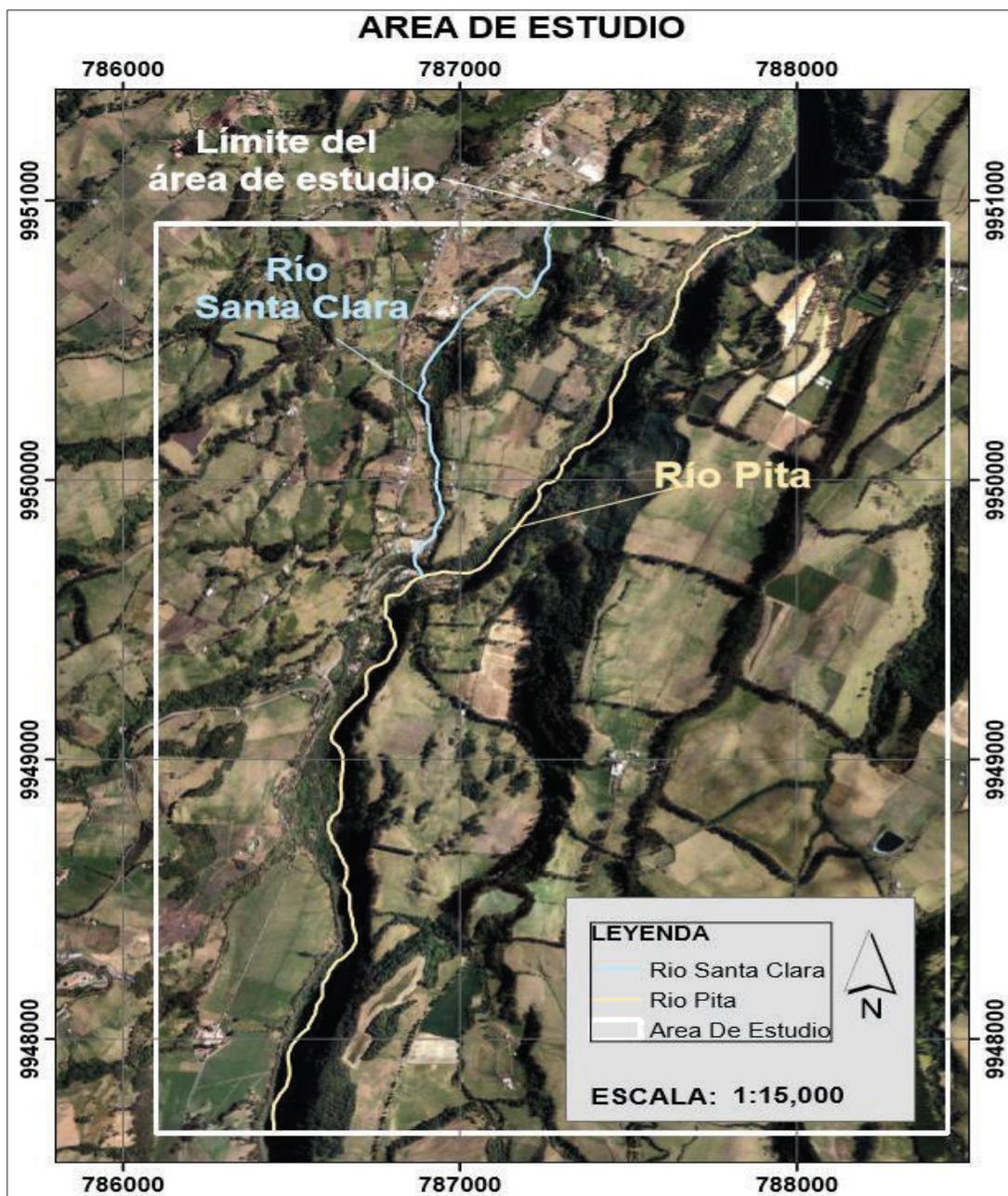
**FIGURA 3.1: RED HIDROGRAFÍA FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI.**



FUENTE: Estudio (P.B.G)

El área de estudio (figura 3.2) corresponde al sector de la caldera, la cual abarca un área de 7.6 km<sup>2</sup> (tabla 3.1). Dentro de esta área se encuentran los ríos Pita y Santa Clara con longitudes de 4.02 km y 1.56 Km respectivamente.

**FIGURA 3.2: ÁREA DE ESTUDIO.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: IGM

TABLA 3.1: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Área De Estudio		
	Dimensiones	
	Longitud x (m)	2352.00
	Longitud y (m)	3252.00
	Área (km <sup>2</sup> )	7.65
	Longitud Río Pita (Km)	4.02
	Longitud Río Santa Clara (km)	1.56
Coordenadas		
Punto	Coordenadas UTM	
	x	y
1	786096	9947664
2	788448	9947664
3	788448	9950916
4	786096	9950916

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: IGM

Esta área fue seleccionada debido al fenómeno hidráulico que se presenta: el desbordamiento del río Pita que se encauza en el río Santa Clara; además de las diferentes formas de cauces como encañonados y cauces amplios, representando de esta manera, el mencionado efecto chorizo.

Los valores de las coordenadas UTM son múltiplo de tres con la finalidad de hacer coincidir el inicio del dominio de la modelación con el inicio de un pixel del MDT; de igual manera las longitudes son múltiplo de tres con el fin de no cortar ningún pixel. Esto permite que para cada celda del mallado del CFD FLOW-3D exista un número entero de pixeles.

### 3.1.1 TRAMOS DE MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL

Los tramos de modelación unidimensional son tres: Pita 2, Pita 3 y Santa Clara (Figura 3.3). Entre el punto final del tramo Pita 2 y el punto inicial del tramo Pita 3, existe una longitud de 244 m debido a que en esta zona existe una cascada de aproximadamente 6m de alto ubicada en las coordenadas UTM (787096.678; 9949730.568). En la finalización del tramo Pita 3 se encuentra una cascada de aproximadamente 60 m de alto ubicada en las coordenadas UTM (787774.184; 9950853.925) lo que provoca la reducción de 237 m del tramo. En la modelación unidimensional no se puede contemplar un tramo que contenga una cascada debido a que el programa interpolaría los resultados antes y después de la cascada, lo que nos daría una pendiente muy alta de sección a sección, provocando resultados erróneos.

Las dimensiones de los tramos Pita 2, Pita 3 y Santa Clara son 2.25 km, 1.3 km y 1.55 km respectivamente. Estos tramos se encuentran dentro del dominio de modelación ya descrito; las coordenadas de los tramos se muestran en la tabla 3.2.

**TABLA 3.2: COORDENADAS DE LOS TRAMOS DE MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL**

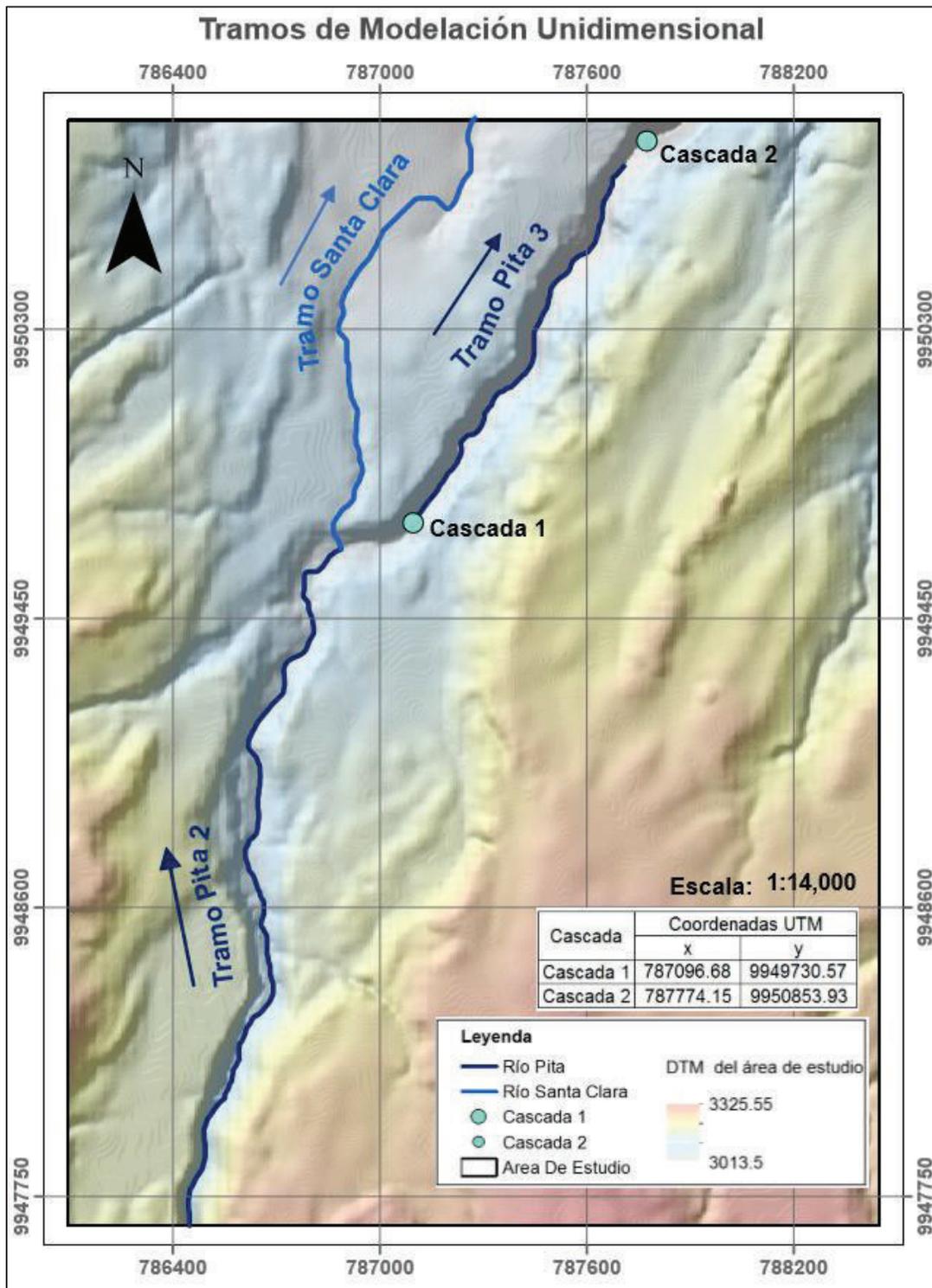
Tramo	Coordenadas UTM			
	Inicio		Fin	
	x	y	x	y
Pita 2	786447.943	9947664.538	786887.458	9949653.378
Pita 3	787097.376	9949731.457	787710.513	9950784.416
Santa Clara	786887.458	9949653.378	787270.648	9950916.000

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: IGM

En el presente trabajo de titulación se realiza la modelación de los tramos Pita3 y Santa Clara; del proyecto PII-DICA-001-2016 se toma la modelación del tramo Pita2.

FIGURA 3.3: TRAMOS DE MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: IGM

### **3.1.2 TRAMO DE MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL**

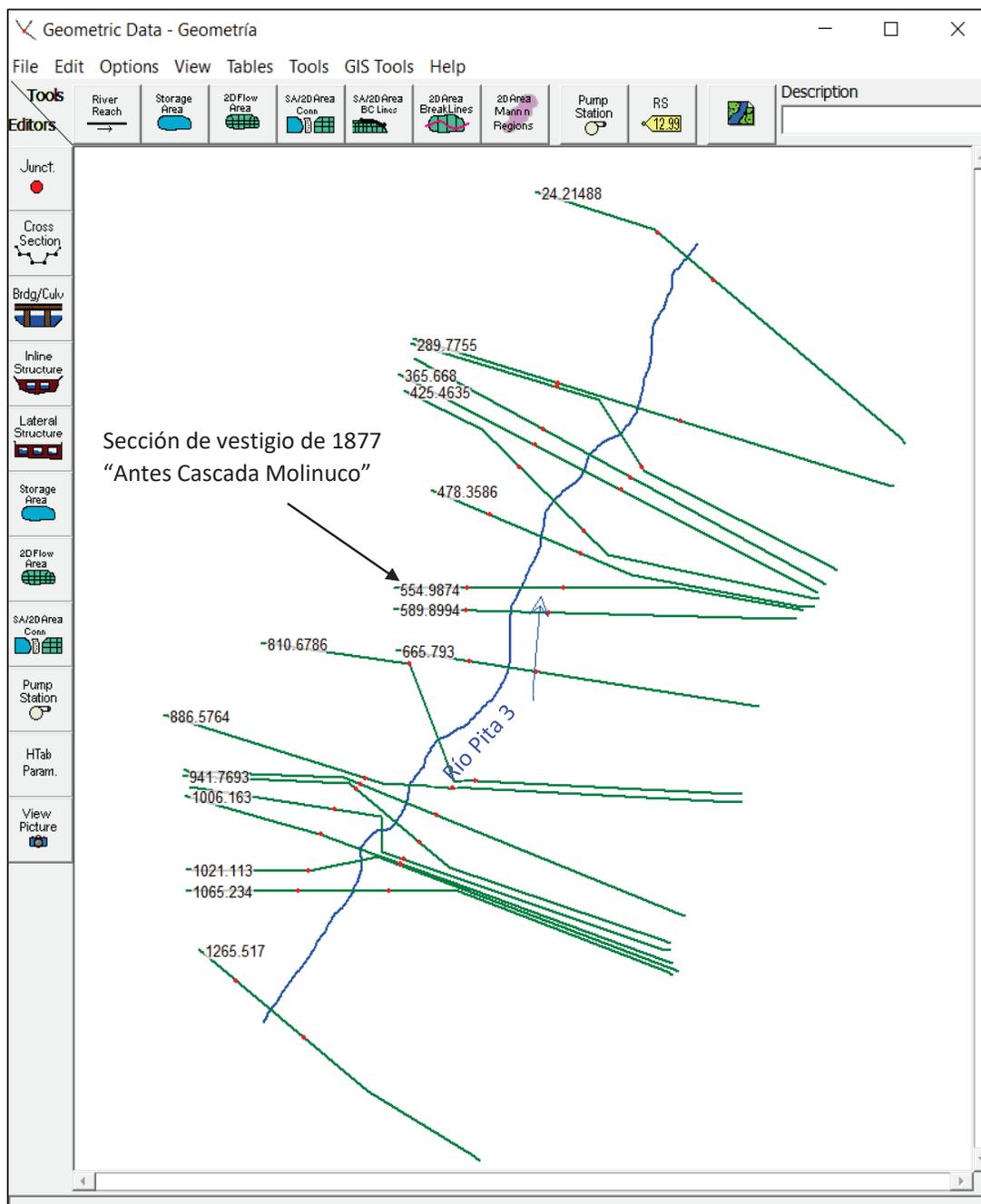
El área del tramo de modelación tridimensional es la misma que el área de estudio, de manera que en ella están contenidos 4.02 km del río Pita y 1.56 km del río Santa Clara.

## **3.2. CONDICIONES DE CONTORNO.**

### **3.2.1. GENERACIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES.**

La generación de secciones transversales es indispensable para la modelación unidimensional ya que estas definen la morfología del río a ser modelado. En la figura 3.4 se puede ver las secciones transversales del tramo Pita 3 y en la figura 3.5 las secciones transversales del tramo Santa Clara. Usando la herramienta HecGeoRAS fueron generadas las secciones transversales; estas se crearon considerando la manera como el programa HEC-RAS enlaza los puntos de cada sección transversal, de manera que el mismo genere la morfología del río lo más apegado a la realidad.

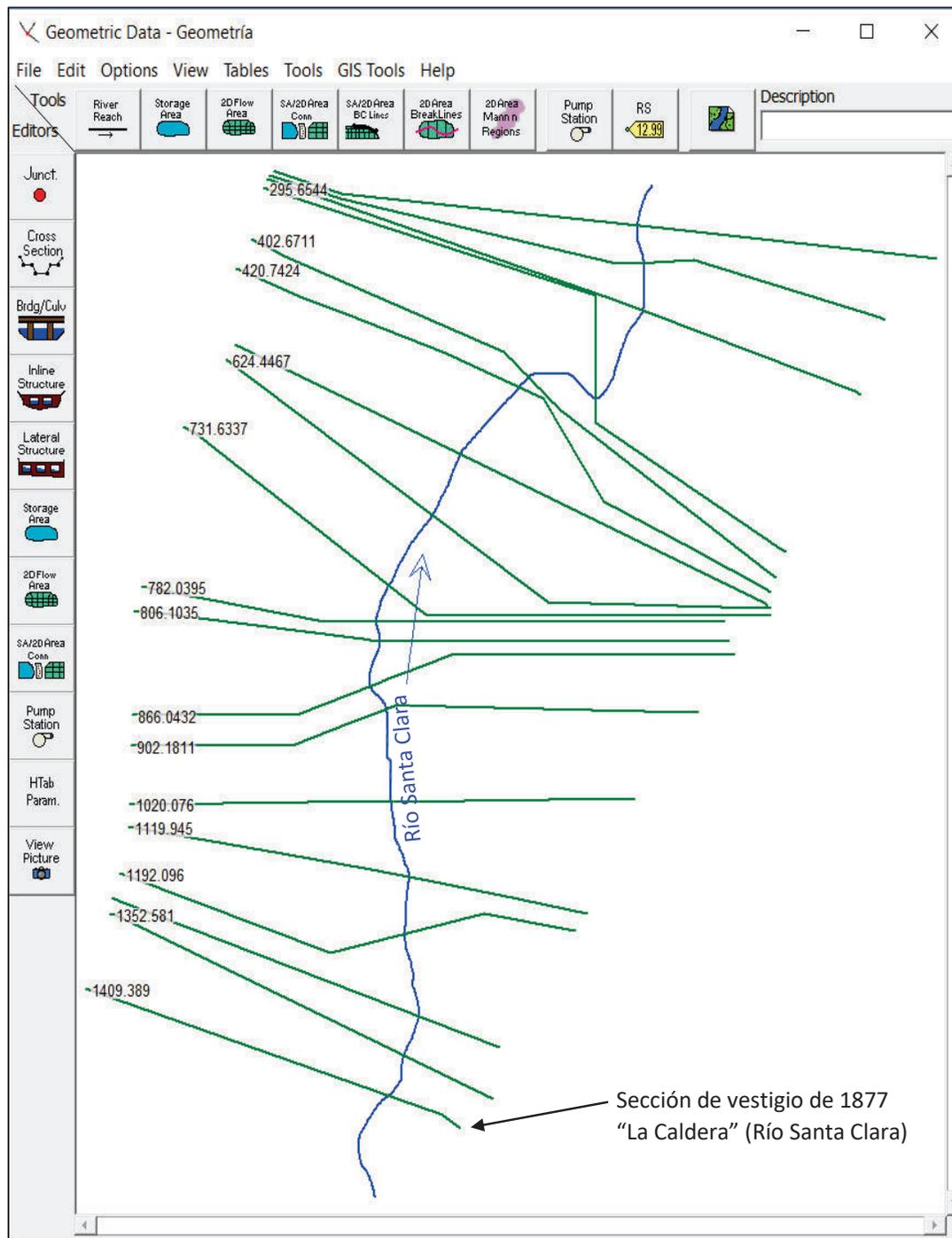
**FIGURA 3.4: VENTANA DEL SOFTWARE HEC-RAS CON LA GEOMETRÍA DEL TRAMO PITA 3**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: IGM

**FIGURA 3.5: VENTANA DEL SOFTWARE HEC-RAS CON LA GEOMETRÍA DEL TRAMO SANTA CLARA**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: IGM

### **3.2.2. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE RESISTENCIA AL MOVIMIENTO.**

#### **3.2.2.1 COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING**

Los valores de rugosidad de Manning para esta modelación parten de los valores recomendados en el estudio (E.E.I) para las secciones de vestigio que se muestra en la tabla 2.7 y Figuras 3.4 y 3.5. Las secciones restantes, que son 18, tanto para el tramo Pita 3 como para el tramo Santa Clara (figura 3.4 y 3.5), son secciones de calibración, cuyos valores de rugosidad “n” de Manning parten de la sección de vestigio existente en el tramo y se ajustan de acuerdo a variaciones en el cauce del mismo como cambio de pendiente, posible socavación y sedimentación, además de posibles cambios en la morfología del río; dichos valores tomarán como referente los “n” de resistencia al movimiento reportados para el evento eruptivo del Nevado del Ruiz de 1985 los cuales están comprendidos entre 0.040 y 0.077 s/m<sup>1/3</sup> para diferentes tramos de la trayectoria del flujo que ocurrieron sobre mantos duros de lava y entre 0.1 y 0.2 para flujos de escombros, en varios tramos recorridos por el lahar (Pierson, 1990).

#### **3.2.2.2 RUGOSIDAD ABSOLUTA.**

Como se menciona en el punto 2.2.2.1 la rugosidad absoluta por definición corresponde al valor D50, cuyo calculo está ligado al coeficiente de rugosidad “n” de Manning, que en este caso es resultado de la modelación unidimensional para flujo no permanente.

Para cada una de las 19 secciones del tramo Pita 3 y tramo Santa Clara se calcula un valor de rugosidad absoluta, la cual es empleada para la modelación tridimensional.

### **3.2.3 CONDICIONES DE CONTORNO MODELACIÓN HEC-RAS**

Las condiciones de borde varían dependiendo del tipo de flujo que se modele como se analiza a continuación:

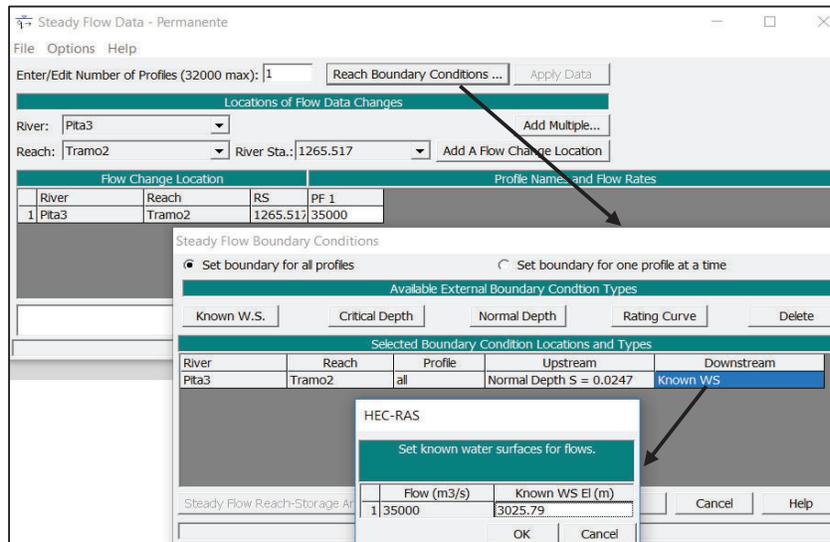
#### **3.2.3.1 Condiciones de contorno Modelación HEC-RAS para flujo permanente**

Las condiciones de borde consideradas para esta modelación varían para cada tramo. En la figura 3.6 se muestran las condiciones de borde consideradas para el tramo Pita 3 que son: “Upstream” (aguas arriba), la pendiente con la que llega el flujo y “Downstream” (aguas abajo), el calado de vestigio de 1877 más cercano a la sección final del tramo que en este caso es el de la sección denominada “Antes Cascada Molinuco” que se encuentra en la tabla 2.7.

En la figura 3.5 se muestra las condiciones de borde consideradas para el tramo Santa Clara que son: “Upstream”, el calado de vestigio de la sección denominada “La Caldera” que se encuentra en la tabla y “Downstream”, la pendiente aguas abajo del tramo.

En las siguientes gráficas se puede ver el caudal ingresado que corresponde al mencionado en la figura 2.37.

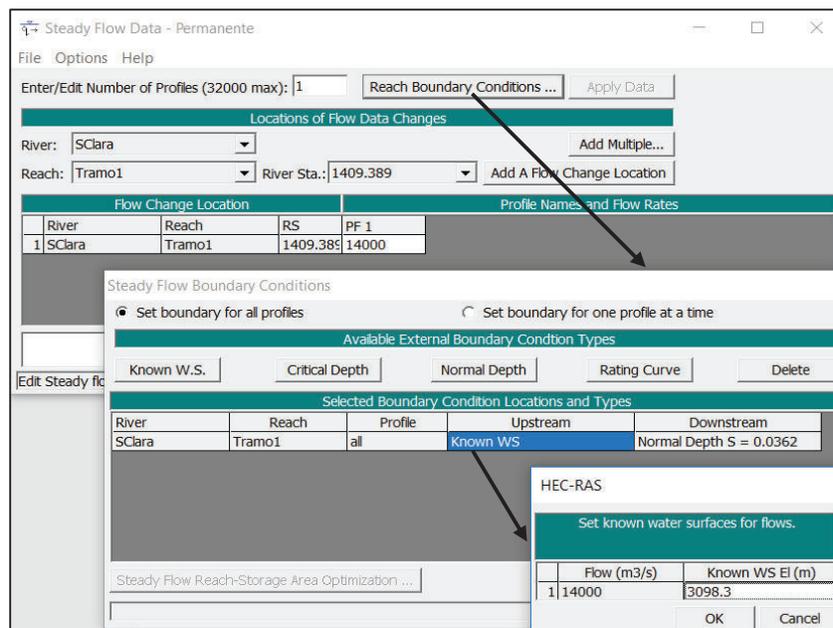
**FIGURA 3.6: VENTANAS DE HEC-RAS CON LAS CONDICIONES DE BORDE PARA EL RÍO PITA 3 EN FLUJO PERMANENTE.**



ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: Proyecto (E.E.I).

**FIGURA 3.7: VENTANAS DE HEC-RAS CON LAS CONDICIONES DE BORDE PARA EL RÍO PITA 3 EN FLUJO PERMANENTE.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

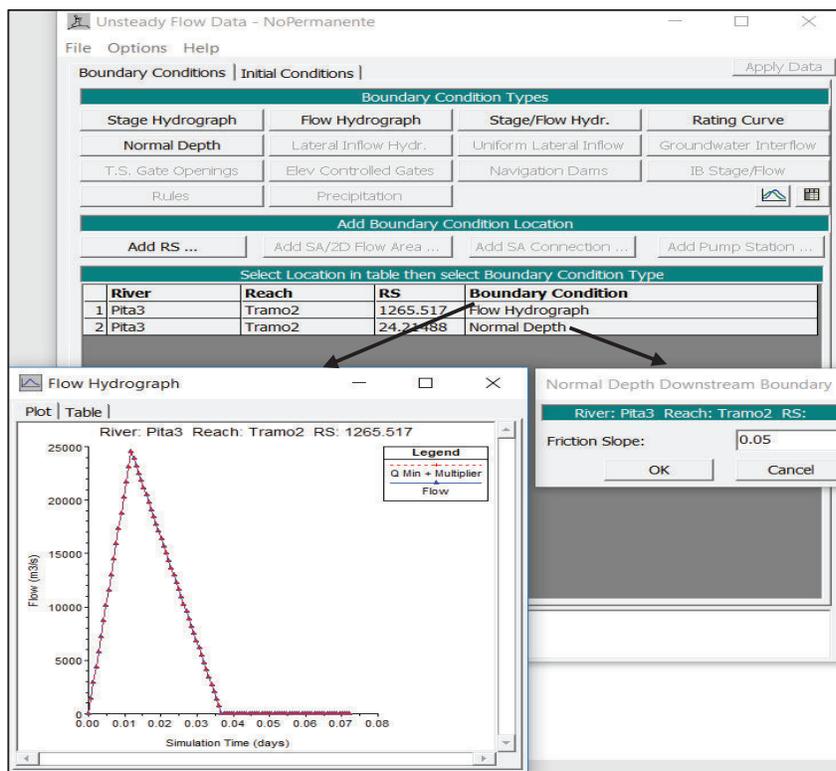
FUENTE: Proyecto (E.E.I).

### 3.2.3.2 Condiciones de contorno Modelación HEC-RAS para flujo no permanente

Las condiciones de borde consideradas para esta modelación varían para cada tramo. En la figura 3.6 se muestran las condiciones de borde consideradas para el tramo Pita 3, las cuales varían en las sección inicial y final del tramo. En la sección inicial se introdujo el hidrograma antes determinado y mostrado en la figura 2.40 y en la sección final del tramo se introdujo la pendiente aguas abajo del tramo.

En la figura 3.7 se muestran las condiciones de borde consideradas para el tramo Santa Clara, las cuales varían en las sección inicial y final del tramo; En la sección inicial se introdujo el hidrograma antes determinado y mostrado en la figura 2.39 y en la sección final del tramo se introdujo la pendiente aguas abajo del mismo.

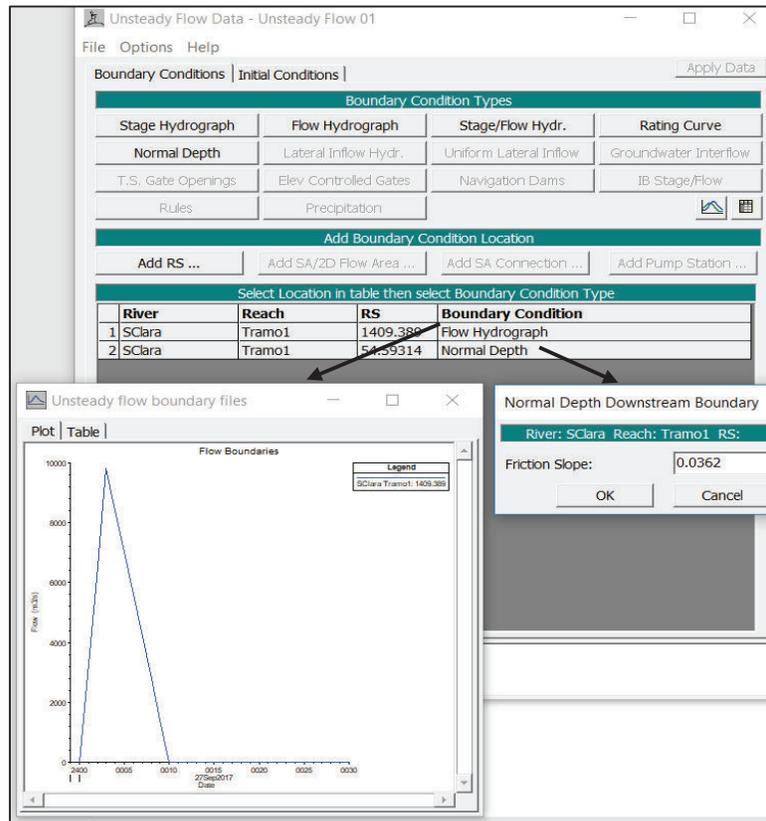
**FIGURA 3.8: VENTANAS DE HEC-RAS CON LAS CONDICIONES DE BORDE PARA EL RÍO PITA 3 EN FLUJO NO PERMANENTE.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: Proyecto (E.E.I).

**FIGURA 3.9: VENTANAS DE HEC-RAS CON LAS CONDICIONES DE BORDE PARA EL RÍO PITA 3 EN FLUJO NO PERMANENTE.**



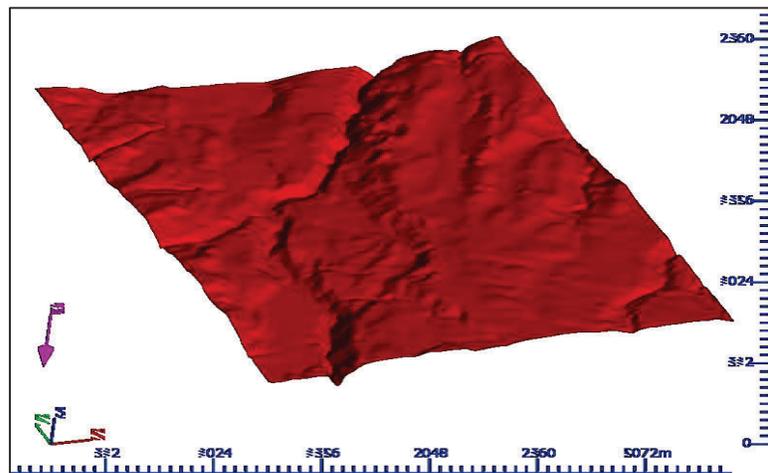
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: Proyecto (E.E.I).

### 3.2.4 CONDICIONES DE CONTORNO MODELACIÓN FLOW-3D

Para la simulación tridimensional, inicialmente se ingresa en el CFD FLOW-3D el tramo de modelación definido en el punto 3.1.2 transformado a formato ASCII, como se puede ver en la figura 3.10. Una vez ingresada la topografía, se generan dos mallados estructurados de tamaño de celda de 6m por 6m. Las mallas cubren todo el tramo de modelación tridimensional y la razón por la que se utilizaron dos mallas es la existencia de dos salidas de flujo en la finalización del tramo que son: río Pita 3 y río Santa Clara como se muestra en la figura 3.11. Además, las longitudes de las dos mallas son múltiplo de 6 de manera que dentro de cada hexaedro exista un número entero de píxeles.

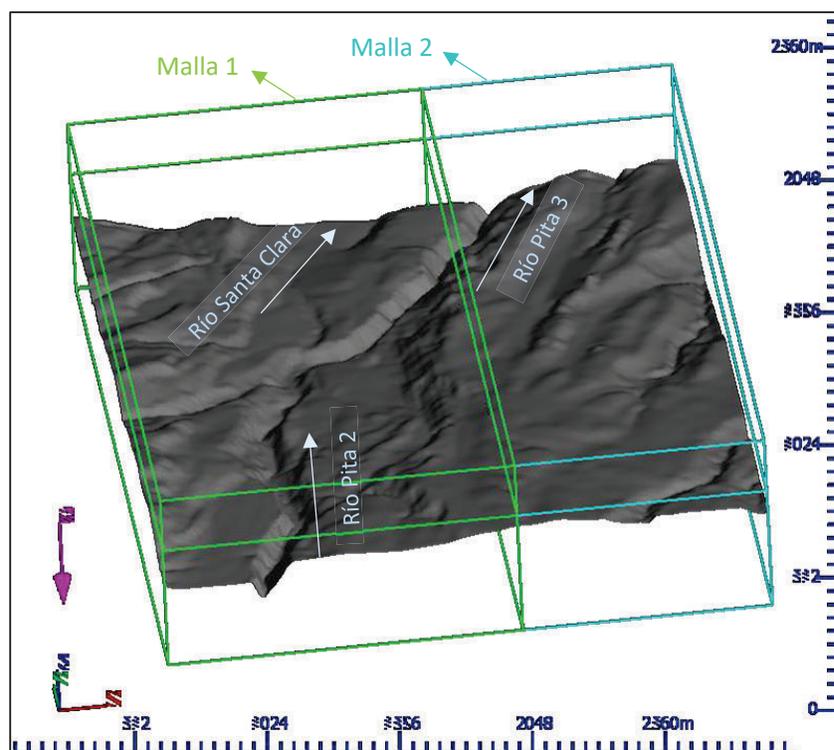
FIGURA 3.10: TOPOGRAFÍA INGRESADA EN EL CFD FLOW-3D.



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: IGM

FIGURA 3.11: MALLAS Y SALIDA DE AGUA PARA EL TRAMO DE SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL EN EL CFD FLOW-3D.

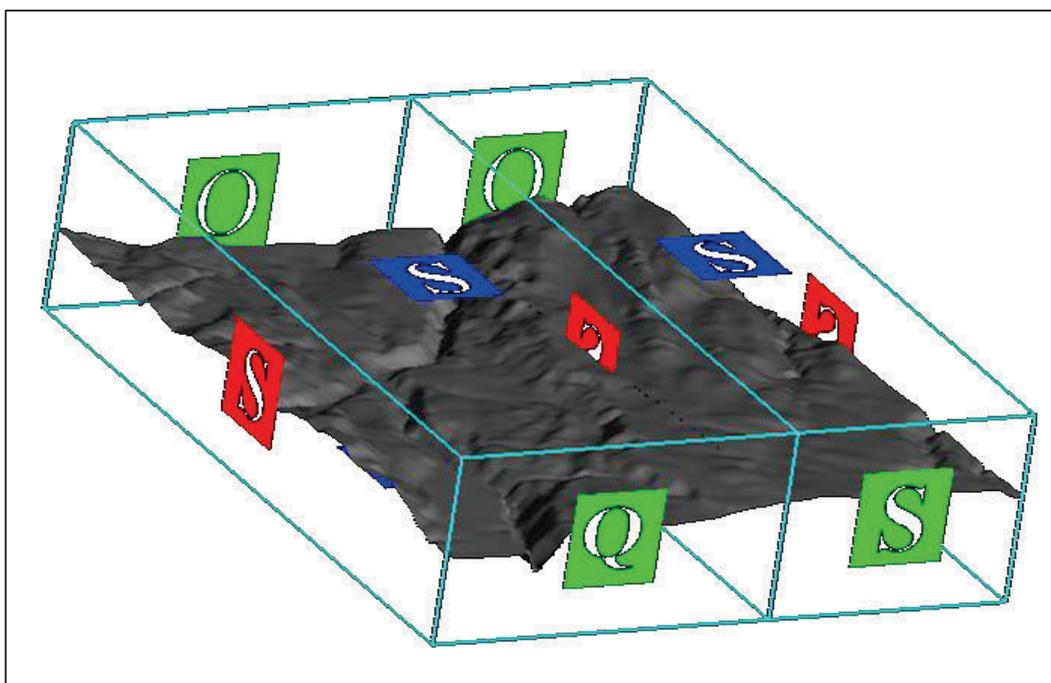


ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: IGM

Las condiciones de borde en las mallas pueden ser modificadas en los 6 lados. En la malla 1 se modifica el lado de ingreso de caudal del río Pita 2, correspondiente al lado marcado con la letra “Q” en la figura 3.11. La letra “Q” indica que en esa cara de la malla existe un ingreso de Caudal. Además, se modifica el lado donde existe la salida del caudal del río Santa Clara, que corresponde a la letra “O”. Por otra parte, en la malla 2 se modifica el lado de salida del caudal del río Pita 3, correspondiente al lado marcado con la letra “O” en la misma figura.

**FIGURA 3.12: MALLAS CON CONDICIONES DE BORDE PARA EL TRAMO DE SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL EN EL CFD FLOW-3D.**

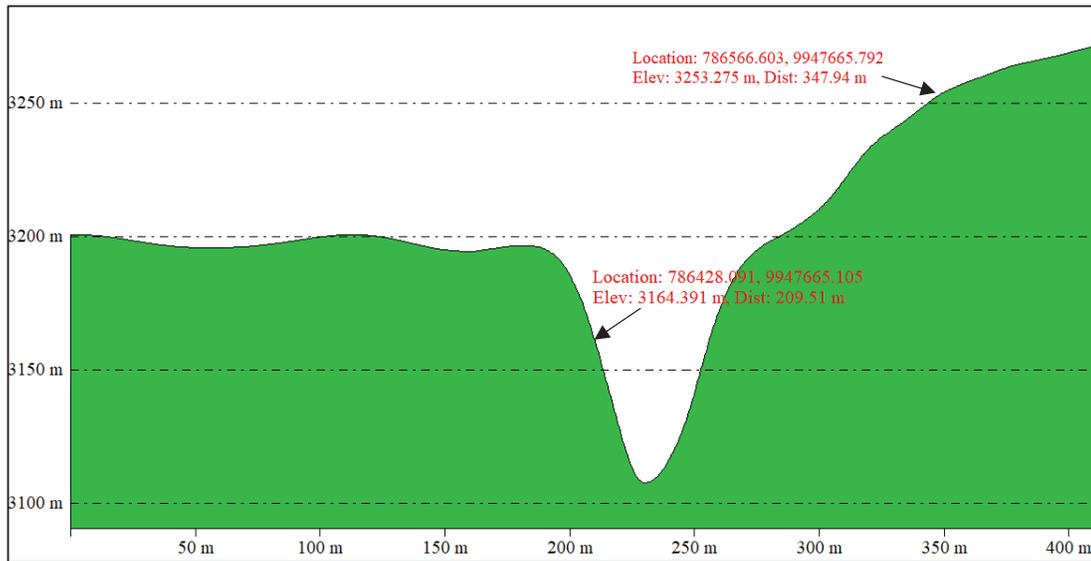


ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: IGM

Para poder condicionar la cara de la malla como ingreso de caudal “Q” se ingresó: hidrograma (figura 2.42 y 3.16), cota de ingreso de la superficie de agua (figura 3.13) y dirección del ingreso del flujo (figura 3.14). Estas condiciones se muestran en la figura 3.15.

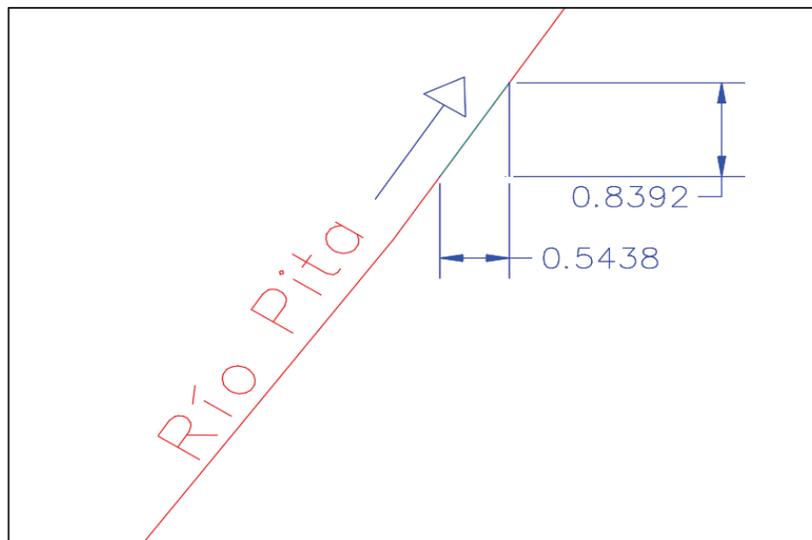
**FIGURA 3.13: PERFIL TRANSVERSAL DEL INICIO DEL TRAMO DE MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL CON LA COTA DE INGRESO DE LA SUPERFICIE DE AGUA.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: IGM

**FIGURA 3.14: DIRECCIÓN DEL INGRESO DEL FLUJO EN EL TRAMO DE MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: IGM

**FIGURA 3.15: VENTANA DEL CFD FLOW-3D CON LAS CONDICIONES DE BORDE PARA LA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.**

Mesh block 1: Block 1 [Y Min Boundary]

Boundary type

Symmetry       Continuative       Specified pressure       Grid overlay       Wave  
 Wall       Periodic       Specified velocity       Outflow       Volume flow rate

Volume flow rate must be positive

**Volume flow rate**  m<sup>3</sup>/s

X flow direction vector:

Y flow direction vector:

Z flow direction vector:

Pressure  Pa  
 Stagnation pressure  
 Wave absorbing layer

Length  m

Damping coefficient at wave approach face  1/s

Damping coefficient at boundary  1/s

Background stream velocity

Stream velocity in X  m/s

Stream velocity in Y  m/s

Stream velocity in Z  m/s

Time scale  s

Density  kg/m<sup>3</sup>  
 Volume fraction of entrained air   
 Alloy solute concentration  kg/m<sup>3</sup>  
 Dissolved solute concentration  kg/m<sup>3</sup>  
 Dispersed phase drop diameter  m

Non-condensable gas volume fraction   
 Relative saturation

Sediment  
 Scalars

Use fluid elevation

Fluid fraction   
 Fluid elevation  m  
 Rating Curve  m

Natural inlet, automatic flow regime  
 Natural inlet, sub-critical flow  
 Natural inlet, super-critical flow  
 Natural inlet, critical flow

Min. elevation:

Max. elevation:

Electric Charge  Coul/m<sup>3</sup>  
 Specified potential boundary  
 Electric potential  kg-m<sup>2</sup>/Coul/s<sup>2</sup>

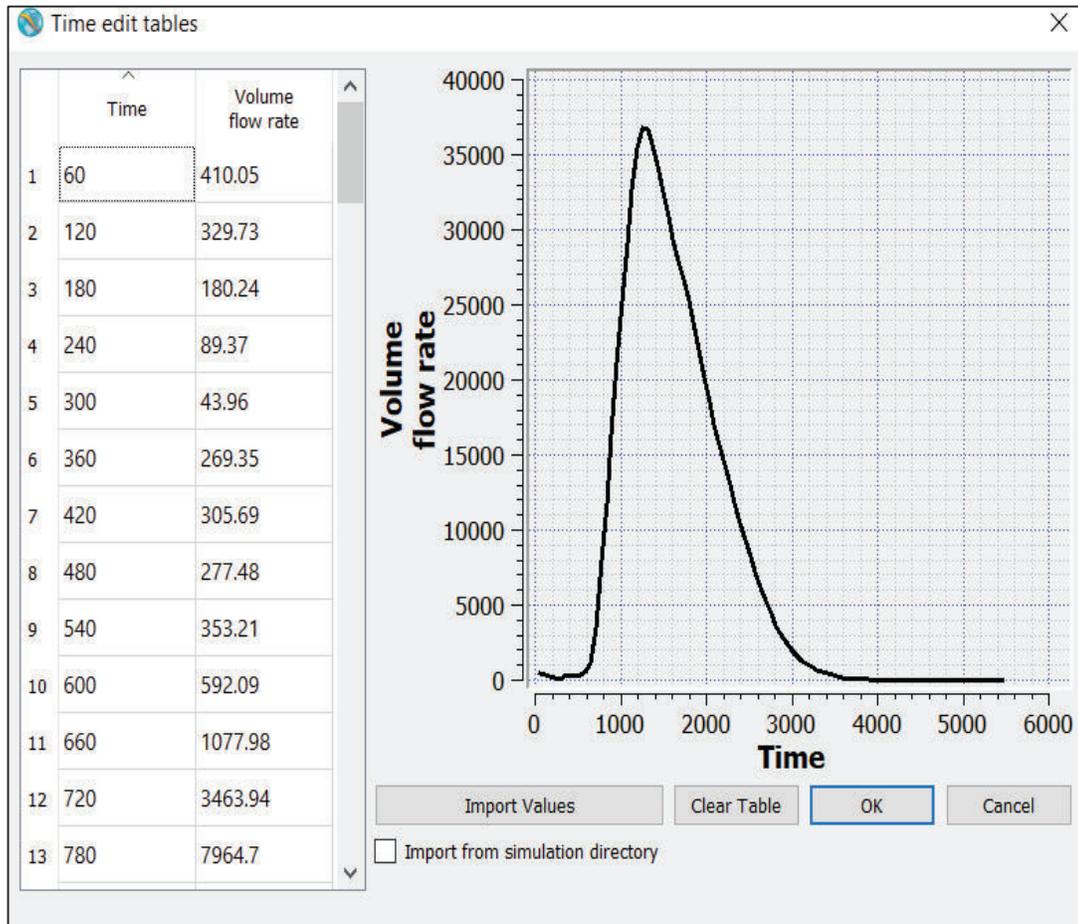
Turbulence quantities Thermal information

OK Cancel

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: IGM, Proyecto PII-DICA-001-2016

**FIGURA 3.16: VENTANA DEL CFD FLOW-3D CON EL HIDROGRAMA DE INGRESO PARA LA MODELACIÓN.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

FUENTE: Proyecto PII-DICA-001-2016

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIONES**

#### **4.1. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL EN HEC-RAS**

##### **4.1.1. PLAN DE CORRIDAS DEL MODELO UNIDIMENSIONAL EN HEC-RAS**

La modelación unidimensional se divide en dos tramos descritos anteriormente que son: Pita 3 y Santa Clara, estos tramos son simulados en el software HEC-RAS por separado para flujo permanente y no permanente cada uno.

La modelación de flujo permanente tiene como finalidad conformar una base para la simulación en flujo no permanente; esto se consigue calibrando el modelo al evento eruptivo del 26 de junio de 1877, que consiste en representar los calados medidos en campo en las secciones del modelo unidimensional. Las secciones que no tienen vestigio de campo se calibrarán considerando los parámetros mencionados en el punto 3.2.2.1. Una vez calibrado el modelo se inicia la simulación para flujo no permanente que toma como base los valores de caudales actualizados mostrados en el punto 3.2.3.2, así como las condiciones de contorno mencionadas en el mismo punto; esto con la finalidad de representar un posible evento eruptivo.

En la modelación del tramo Pita 3 para flujo permanente, las secciones iniciales toman como referencia de calibración el valor de calado de la sección de vestigio más cercana a ellas que es la sección denominada La Caldera río Pita que se encuentra en la tabla 2.7; las demás secciones tomaran como referente la sección de vestigio que se encuentra en el tramo denominada Antes Cascada Molinicos.

## 4.1.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL EN HEC-RAS

### 4.1.2.1 Simulación Unidimensional para flujo permanente tramo Pita 3.

Como resultado de la modelación unidimensional para flujo permanente se muestra la tabla 4.1 con los valores de calibración, donde se puede ver que en la sección de vestigio del evento de 1877 denominada Antes Cascada Molinuco que corresponde en este caso a la sección 554.9874, está representado el calado medido en campo y en las secciones iniciales los calados toman valores aproximados al vestigio más cercano denominado La Caldera Río Pita. Además, en las secciones finales se muestran los valores resultantes del análisis de una posible circulación del flujo.

**TABLA 4.1: TABLA DE RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL TRAMO PITA3.**

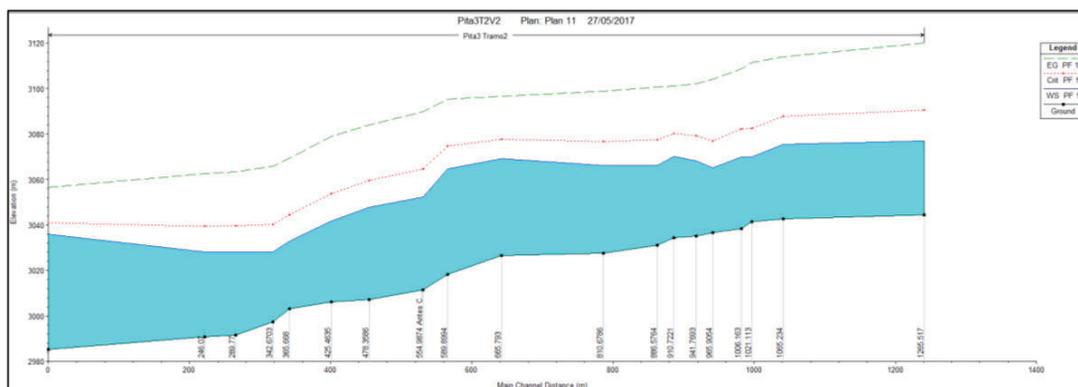
Sección	Tramo	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	"n" de Manning	Calado (m)	Vel Total (m/s)	Froude # XS
1265.517	Pita 3	35000	0.030	32.5	29.0	2.1
1065.234	Pita 3	35000	0.030	32.8	27.4	2.0
1021.113	Pita 3	35000	0.085	28.6	28.5	2.2
1006.163	Pita 3	35000	0.060	31.7	27.6	2.1
965.9054	Pita 3	35000	0.080	28.4	27.7	2.2
941.7693	Pita 3	35000	0.015	33.2	25.8	1.9
910.7221	Pita 3	35000	0.015	35.8	24.7	1.8
886.5764	Pita 3	35000	0.065	34.9	26.0	1.9
810.6786	Pita 3	35000	0.018	38.5	25.4	1.8
665.793	Pita 3	35000	0.015	42.5	23.2	1.5
589.8994	Pita 3	35000	0.090	46.5	24.6	1.6
<b>554.9874</b>	<b>Pita 3</b>	<b>35000</b>	<b>0.069</b>	<b>40.7</b>	<b>27.2</b>	<b>1.8</b>

Sección	Tramo	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	"n" de Manning	Calado (m)	Vel Total (m/s)	Froude # XS
478.3586	Pita 3	35000	0.045	40.6	26.6	1.8
425.4635	Pita 3	35000	0.097	35.4	27.1	2.0
365.668	Pita 3	35000	0.071	29.6	26.8	2.0
342.6703	Pita 3	35000	0.095	30.7	27.3	2.0
289.7755	Pita 3	35000	0.025	36.4	26.3	1.9
246.0788	Pita 3	35000	0.015	37.3	26.1	1.9
24.21488	Pita 3	35000	0.040	50.7	20.1	1.3

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

En la figura 4.1 se muestra el perfil resultado de la calibración donde se puede observar las líneas de: calado máximo (color azul), energía (color verde) y calado crítico (color rojo). Además, se puede apreciar en la gráfica que se trata de un tránsito de flujo con régimen supercrítico.

**FIGURA 4.1: PERFIL RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN DEL TRAMO PITA 3**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

#### 4.1.2.2 Simulación Unidimensional para flujo permanente tramo Santa Clara

En la tabla 4.2 se muestra los resultados de la modelación unidimensional para flujo permanente, donde se puede ver que en la sección de vestigio del evento de 1877

denominada La Caldera Río Santa Clara que corresponde a la sección 1409.389, está representando un valor de calado semejante al medido en campo. Además, las secciones restantes toman valores cercanos al calado de calibración de la sección inicial los mismos que son resultado del análisis de una posible circulación del flujo.

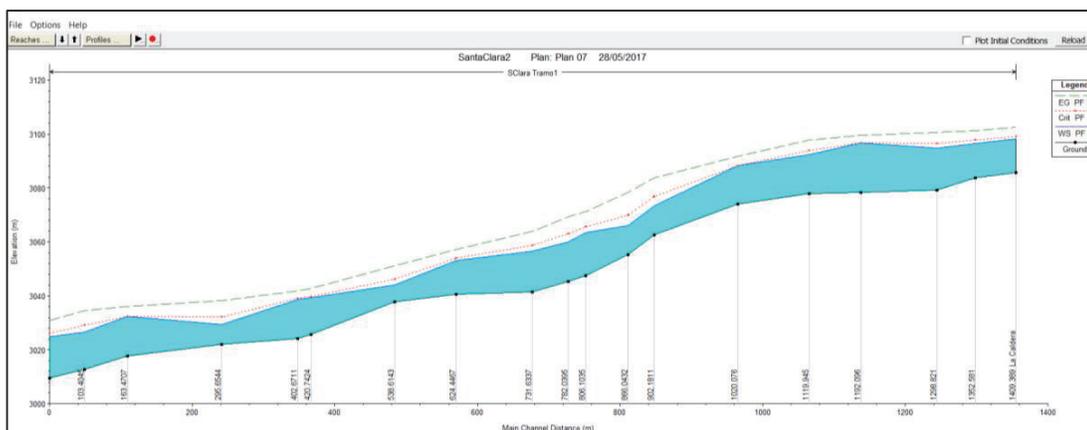
**TABLA 4.2: TABLA DE RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL TRAMO SANTA CLARA.**

SEcción	Tramo	Q Total	"n" de	Calado	Vel Total	Froude # XS
		(m <sup>3</sup> /s)	Manning	(m)	(m/s)	
<b>1409.389</b>	<b>Santa Clara</b>	<b>14000</b>	<b>0.069</b>	<b>12.6</b>	<b>9.0</b>	<b>1.2</b>
1352.581	Santa Clara	14000	0.030	12.8	9.7	1.4
1298.821	Santa Clara	14000	0.030	15.6	10.6	1.6
1192.096	Santa Clara	14000	0.051	18.2	5.6	1.0
1119.945	Santa Clara	14000	0.085	14.5	10.1	1.4
1020.076	Santa Clara	14000	0.086	14.3	7.8	1.0
902.1811	Santa Clara	14000	0.086	10.8	13.9	1.8
866.0432	Santa Clara	14000	0.088	10.6	15.3	2.1
806.0432	Santa Clara	14000	0.083	16.0	11.7	1.4
782.0395	Santa Clara	14000	0.085	14.8	12.9	1.6
731.6337	Santa Clara	14000	0.095	15.0	12.1	1.5
624.4467	Santa Clara	14000	0.064	12.6	8.8	1.2
538.6143	Santa Clara	14000	0.095	6.3	11.9	1.8
420.7424	Santa Clara	14000	0.070	13.8	8.0	1.1
402.6711	Santa Clara	14000	0.095	14.3	8.1	1.1
295.6544	Santa Clara	14000	0.026	7.4	13.3	2.0
163.4707	Santa Clara	14000	0.040	14.7	8.5	1.0
103.4045	Santa Clara	14000	0.095	13.8	12.5	1.4
54.59314	Santa Clara	14000	0.080	15.3	11.0	1.2

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

En la figura 4.2 se muestra el perfil resultado de la calibración donde se puede observar las líneas de: calado máximo (color azul), energía (color verde) y calado crítico (color rojo). Además, se puede apreciar en la gráfica, que el régimen predominante en el tramo es supercrítico.

**FIGURA 4.2: PERFIL RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN DEL TRAMO SANTA CLARA**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

#### 4.1.2.3 Simulación Unidimensional para flujo no permanente tramo Pita 3

Como resultado de la modelación unidimensional para flujo no permanente se presenta: la tabla 4.3 y las figuras 4.3 a la 4.5, que son resultado de una configuración de cálculos analizados para representar un posible evento eruptivo.

En la tabla 4.3 se presenta para cada sección: valores de caudales pico, “n” de Manning, calado máximo, velocidad y número de Froude. Además, en el Anexo 1 se encuentra las secciones resultantes de la simulación en el software HEC-RAS.

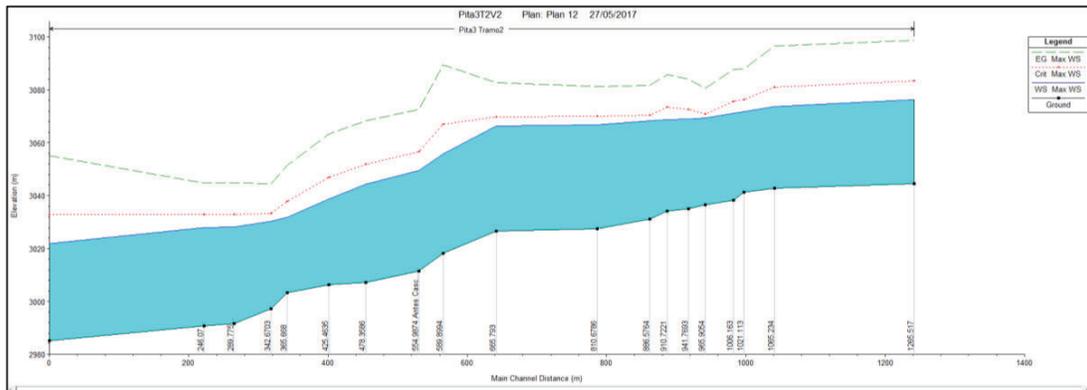
**TABLA 4.3: TABLA DE RESULTADOS DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO PITA 3.**

Sección	Tramo	Q Total	"n" de	Calado	Vel Total	Froude # XS
		(m <sup>3</sup> /s)	Manning	(m)	(m/s)	
1265.517	Pita 3	24369.96	0.030	31.9	20.9	1.6
1065.234	Pita 3	24289.32	0.030	30.9	21.2	1.6
1021.113	Pita 3	24258.43	0.085	30.4	17.8	1.3
1006.163	Pita 3	24258.11	0.060	32.7	18.1	1.3
965.9054	Pita 3	24229.62	0.080	32.8	14.9	1.1
941.7693	Pita 3	24235.60	0.015	33.8	17.3	1.3
910.7221	Pita 3	24229.06	0.015	34.5	18.2	1.3
886.5764	Pita 3	24224.27	0.065	37.1	16.1	1.1
810.6786	Pita 3	24219.45	0.018	39.3	16.8	1.2
665.793	Pita 3	24216.07	0.015	39.9	17.9	1.2
589.8994	Pita 3	24211.72	0.090	37.6	25.7	1.9
<b>554.9874</b>	<b>Pita 3</b>	<b>24208.22</b>	<b>0.069</b>	<b>37.9</b>	<b>21.3</b>	<b>1.5</b>
478.3586	Pita 3	24202.24	0.045	37.1	21.7	1.5
425.4635	Pita 3	24189.60	0.097	32.5	21.9	1.7
365.668	Pita 3	24164.85	0.071	28.6	19.6	1.5
342.6703	Pita 3	24156.84	0.095	32.9	16.8	1.2
289.7755	Pita 3	24148.02	0.025	36.4	18.1	1.3
246.0788	Pita 3	24145.26	0.015	37.0	18.2	1.3
24.21488	Pita 3	24143.53	0.040	36.8	25.5	1.8

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

En la figura 4.3 se muestra el perfil resultado de la calibración donde se puede observar las líneas de: calado máximo (color azul), energía (color verde) y calado crítico (color rojo). Además, se puede ver que el régimen del tramo es supercrítico.

**FIGURA 4.3: PERFIL RESULTADO DE MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO PITA 3.**

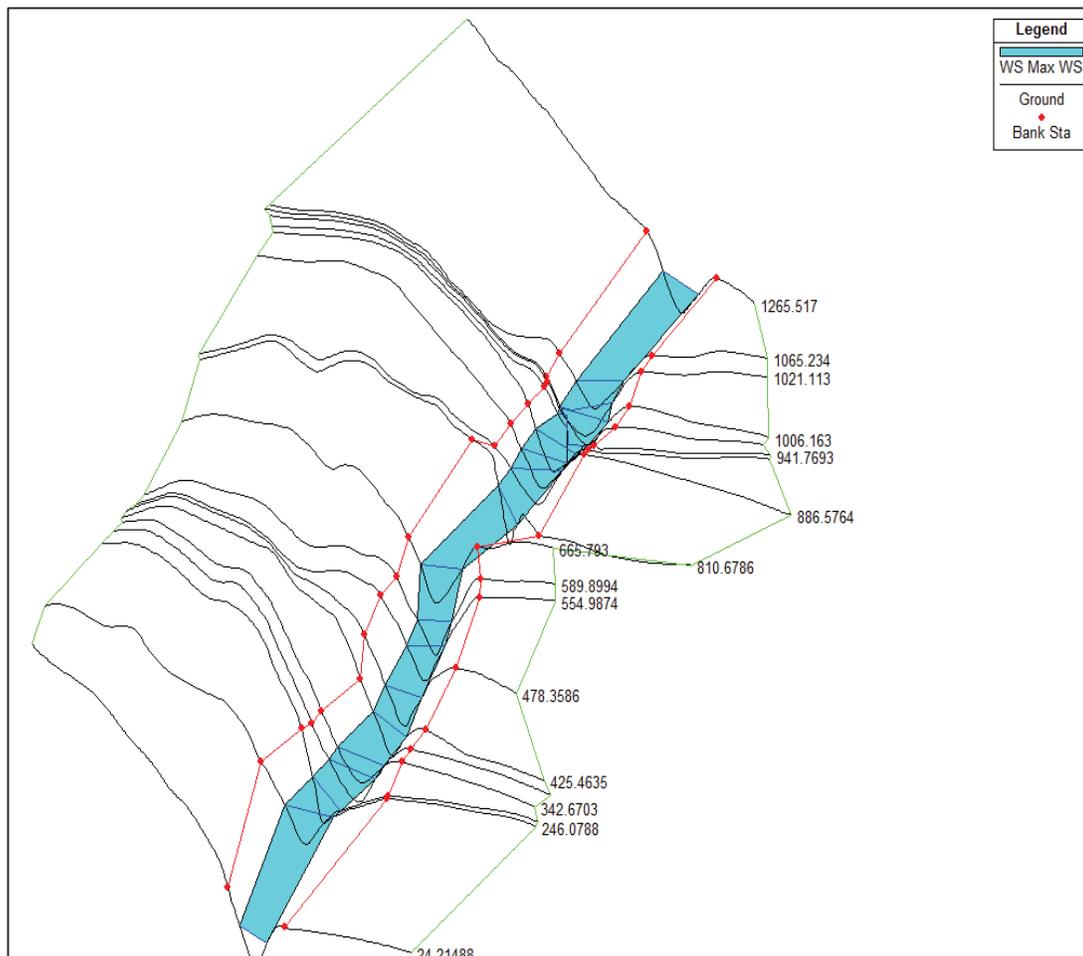


ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

En la figura 4.4 se muestra una visualización en 3D de las secciones con los calados resultantes de calibración. En ella se puede observar la representación del tránsito del flujo de sección a sección del programa HEC-RAS.

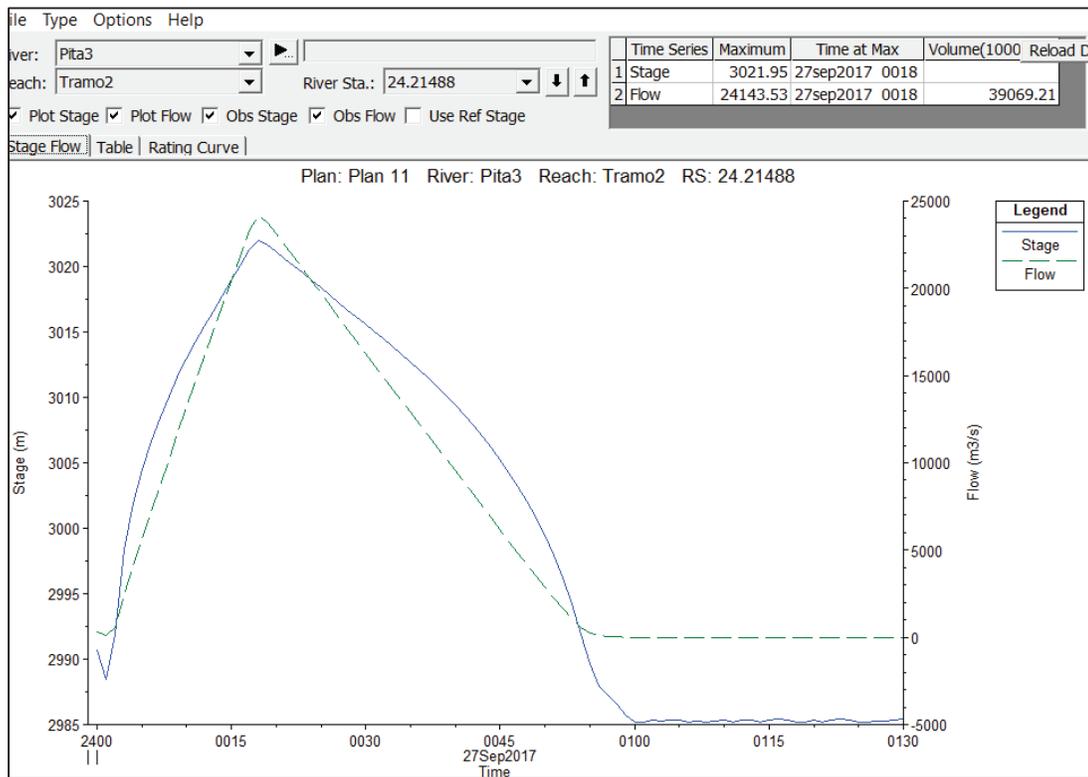
En la figura 4.5 se muestra el hidrograma de la sección 24.21488 que es la sección final del tramo cuyo pico es 3021.95m<sup>3</sup>/s y su volumen corresponde a 39'069,210 m<sup>3</sup>. En el Anexo 2 se encuentra la tabla del hidrograma.

**FIGURA 4.4: VISUALIZACIÓN EN 3D DE LAS SECCIONES CON LOS CALADOS RESULTANTES DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO PITA 3.**



ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**FIGURA 4.5: HIDROGRAMA DE LA SECCIÓN 24.21488. RESULTADO DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO PITA 3.**



ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

#### 4.1.2.4 Simulación Unidimensional para flujo no permanente tramo Santa Clara

Como resultado de la modelación unidimensional para flujo no permanente se presenta: la tabla 4.4 y las figuras 4.6 a la 4.8, que son resultado de una configuración de cálculos analizados para representar un posible evento eruptivo.

En la tabla 4.4 se presenta para cada sección: valores de caudales pico, “n” de Manning, calado máximo, velocidad y numero de Froude. Además, en el Anexo 3 se encuentra las secciones resultantes de la simulación en el software HEC-RAS.

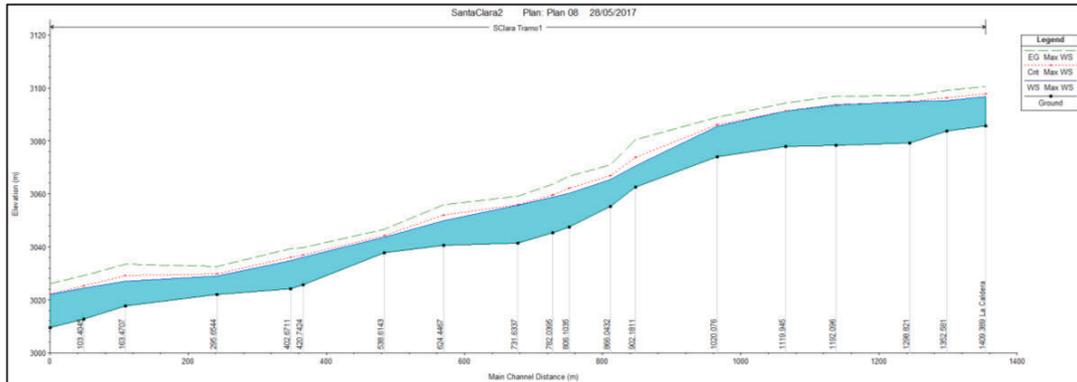
**TABLA 4.4: TABLA DE RESULTADOS DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO SANTA CLARA.**

Sección	Tramo	Q Total	"n" de	Calado	Vel Total	Froude # XS
		(m <sup>3</sup> /s)	Manning	(m)	(m/s)	
<b>1409.389</b>	<b>Santa Clara</b>	<b>9820.73</b>	<b>0.069</b>	<b>11.07</b>	<b>8.54</b>	<b>1.26</b>
1352.581	Santa Clara	9122.72	0.03	11.47	8.64	1.46
1298.821	Santa Clara	9060.99	0.03	15.57	6.96	1.08
1192.096	Santa Clara	8807.79	0.041	15.21	7.32	1.25
1119.945	Santa Clara	8761.8	0.095	13.4	7.79	1.04
1020.076	Santa Clara	8692.09	0.085	11.57	7.95	1.21
902.1811	Santa Clara	8655.34	0.093	7.96	13.95	1.99
866.0432	Santa Clara	8622.06	0.089	10.03	10.43	1.44
806.0432	Santa Clara	8605.12	0.087	12.89	11.05	1.41
782.0395	Santa Clara	8590.69	0.086	13.35	9.78	1.25
731.6337	Santa Clara	8521.96	0.095	14.26	8.21	1.02
624.4467	Santa Clara	8494.43	0.065	9.26	10.88	1.58
538.6143	Santa Clara	8435.17	0.095	5.85	7.87	1.23
420.7424	Santa Clara	8354.75	0.07	10.57	8.39	1.2
402.6711	Santa Clara	8352.2	0.095	10.56	9.38	1.39
295.6544	Santa Clara	8225.44	0.026	6.94	8.52	1.3
163.4707	Santa Clara	8111.09	0.04	9.25	11.26	1.54
103.4045	Santa Clara	8100.92	0.095	11.66	9.54	1.15
54.59314	Santa Clara	8087.04	0.08	12.65	8.87	1.04

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

En la figura 4.6 se muestra el perfil resultante de la calibración donde se puede observar las líneas de: calado máximo (color azul), energía (color verde) y calado crítico (color rojo). Además, se puede ver que el régimen predominante en el tramo es supercrítico.

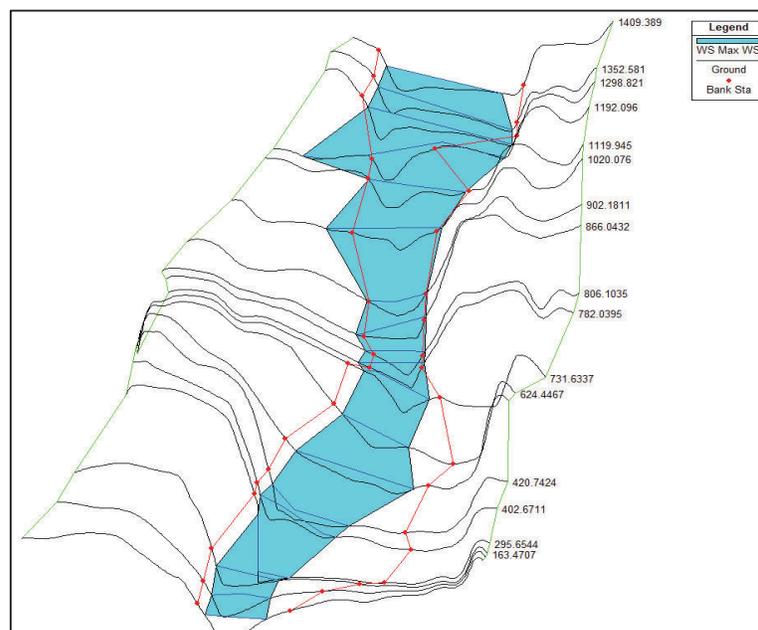
**FIGURA 4.6: PERFIL RESULTADO DE MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO SANTA CLARA.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

En la figura 4.7 se muestra una visualización en 3D de las secciones con los calados resultantes de calibración. En ella se puede observar la representación del tránsito del flujo de sección a sección del programa HEC-RAS.

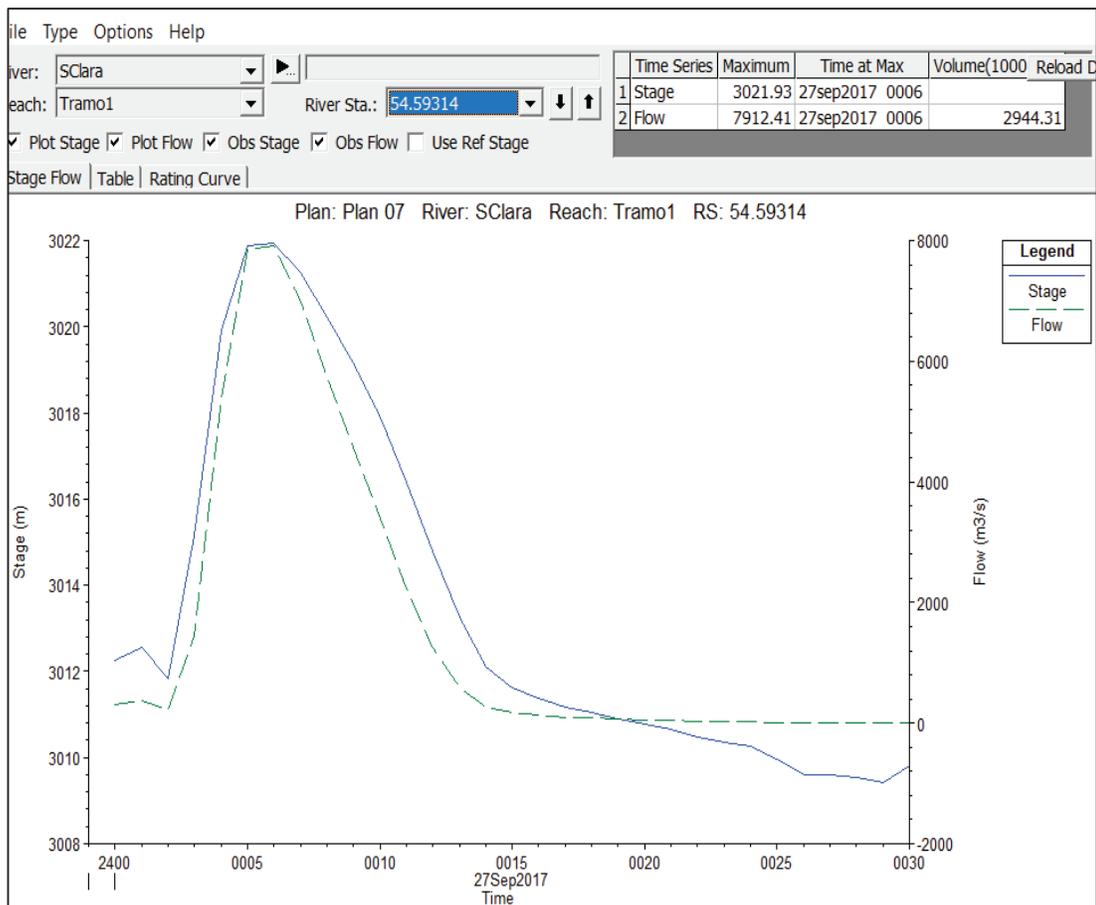
**FIGURA 4.7: VISUALIZACIÓN EN 3D DE LAS SECCIONES CON LOS CALADOS RESULTANTES DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO SANTA CLARA.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

En la figura 4.8 se muestra el hidrograma de la sección 54.59314 que es la sección final del tramo cuyo pico es 3021.93m<sup>3</sup>/s y su volumen corresponde a 2'944,310 m<sup>3</sup>. En el Anexo 4 se encuentra la tabla del hidrograma.

**FIGURA 4.8: HIDROGRAMA DE LA SECCIÓN 54.59314. RESULTADO DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE DEL TRAMO SANTA CLARA.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**4.1.3 DISCUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN HEC-RAS**

En las tablas 4.5 y 4.6 se encuentra los resultados de la calibración del modelo unidimensional en las secciones de vestigio del presente proyecto de titulación

como los vestigios de campo del evento eruptivo de 1877 y los resultados obtenidos en el proyecto E.E.I.

En la tabla 4.5 se puede ver que los resultados obtenidos en el presente proyecto son más cercanos a los valores de calado de vestigio encontrado en campo para cada sección a diferencia de los resultados de calado del estudio E.E.I. Además, en la tabla 4.6 se encuentran los resultados de velocidad y número Froude obtenidos en el presente proyecto de titulación y en el estudio E.E.I, donde se puede observar que las velocidades en el caso de la sección La caldera (Santa Clara) son cercanas aun cuando los regímenes de flujo son distintos, en el caso de la sección Antes Cascada Molinuco los valores de velocidades difieren entre si a pesar que se encuentran en el mismo régimen.

**TABLA 4.5: RESUMEN DE RESULTADOS DE CALADOS DEL ESTUDIO E.E.I Y PROYECTO DE TITULACIÓN (MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL).**

Tramo de modelación	Sección de vestigio	Calado estimado en campo (1877) (m)	Calado calculado estudio (2004) E.E.I (m)	Calado calculado en el presente proyecto de titulación (2017) (m)
Pita 3	Antes Cascada Molinuco	40	18.48	37.9
Santa Clara	La Caldera (Santa Clara)	13	20.48	11.07

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Fuente: Estudio E.E.I

**TABLA 4.6: RESUMEN DE RESULTADOS DE VELOCIDADES Y NÚMEROS DE FROUDE DEL ESTUDIO E.E.I Y PROYECTO DE TITULACIÓN.**

Tramo de modelación	Sección de vestigio	Velocidad calculada estudio E.E.I (2004) (m/s)	Velocidad calculada en el presente proyecto de titulación (2017) (m/s)	Número de Froude calculado estudio E.E.I (2004)	Número de Froude calculado en el presente proyecto de titulación (2017)
Pita 3	Antes Cascada Molinuco	13.65	21.3	1.23	1.5
Santa Clara	La Caldera (Santa Clara)	9.16	8.54	0.85	1.2

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Fuente: Estudio E.E.I

Las posibles razones por las que los resultados son diferentes a pesar de que las secciones comparadas son las mismas tanto en dimensiones como en ubicación pueden ser:

- El MDT de donde se obtuvo los datos de modelación para el estudio E.E.I tiene un tamaño de pixel de 30m x 30m a diferencia del usado para el presente proyecto de titulación que tiene un tamaño de pixel de 3m x 3m que permite tener información más detallada para cada sección.
- Las condiciones de borde usadas en el estudio E.E.I son aguas arriba pendiente media y aguas abajo calado crítico para los dos tramos de simulación; por otra parte, en el presente proyecto de titulación se consideró como condiciones de borde para el tramo Pita 3 aguas arriba la pendiente de aproximación del flujo y aguas abajo el calado de vestigio de 1877 más cercano a la sección final del tramo, en el caso del tramo Santa Clara aguas

arriba el calado de vestigio de la sección denominada “La Caldera” y aguas abajo la pendiente aguas abajo del tramo, permitiendo representar de una forma más aproximada las condiciones de flujo del evento eruptivo de 1877.

- La separación entre sección en los tramos donde se encuentran las secciones analizadas; en el estudio E.E.I son de 400m a 1000m aproximadamente en los dos tramos y en el presente proyecto de titulación la distancia esta entre 60m y 80m aproximadamente para los dos tramos dando como resultado una geometría del río más acercada a la realidad.

En la tabla 4.7 se encuentran las velocidades resultado de la simulación unidimensional para flujo no permanente y las velocidades estimadas en campo para el evento eruptivo de 1877, de las secciones de vestigio, donde se puede ver que la velocidad calculada en el proyecto de titulación para la sección Antes Cascada Molinuco está dentro del rango reportado en el vestigio de 1877, además se puede ver que la velocidad calculada para la sección La Caldera (Santa Clara) está fuera del rango estimado para el tránsito del vestigio de 1877.

**TABLA 4.7: RESUMEN DE RESULTADOS DE VELOCIDADES DEL VESTIGIO DE 1877 Y PROYECTO DE TITULACIÓN.**

<b>Tramo de modelación</b>	<b>Sección de vestigio</b>	<b>Velocidad estimada en campo (1877) (m/s)</b>	<b>Velocidad calculada en el presente proyecto de titulación (2017) (m/s)</b>
Pita 3	Antes Cascada Molinuco	>20	21.3
Santa Clara	La Caldera (Santa Clara)	15-18	8.54

ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Fuente: Estudio E.E.I

Una posible razón de lo mencionado en el párrafo anterior es la diferencia de volúmenes en los eventos comparados, ya que como se ve en la tabla 2.4 el volumen total de lahar que ingreso para el evento de 1877 es 45.7% mayor que el que ingreso en la simulación para el evento del 2011; de manera que en el sector de la caldera el volumen total que llegaría sería menor que el del evento de 1877, provocando una disminución del volumen desbordado hacia el río Santa Clara más no una reducción del volumen que se acumularía en la caldera y continuaría en el tramo Pita 3, lo que posiblemente provocaría la disminución de la velocidad en la sección de vestigio de la Caldera y la conservación en el rango de la velocidad del tramo Pita 3.

## **4.2. RESULTADOS CFD FLOW-3D.**

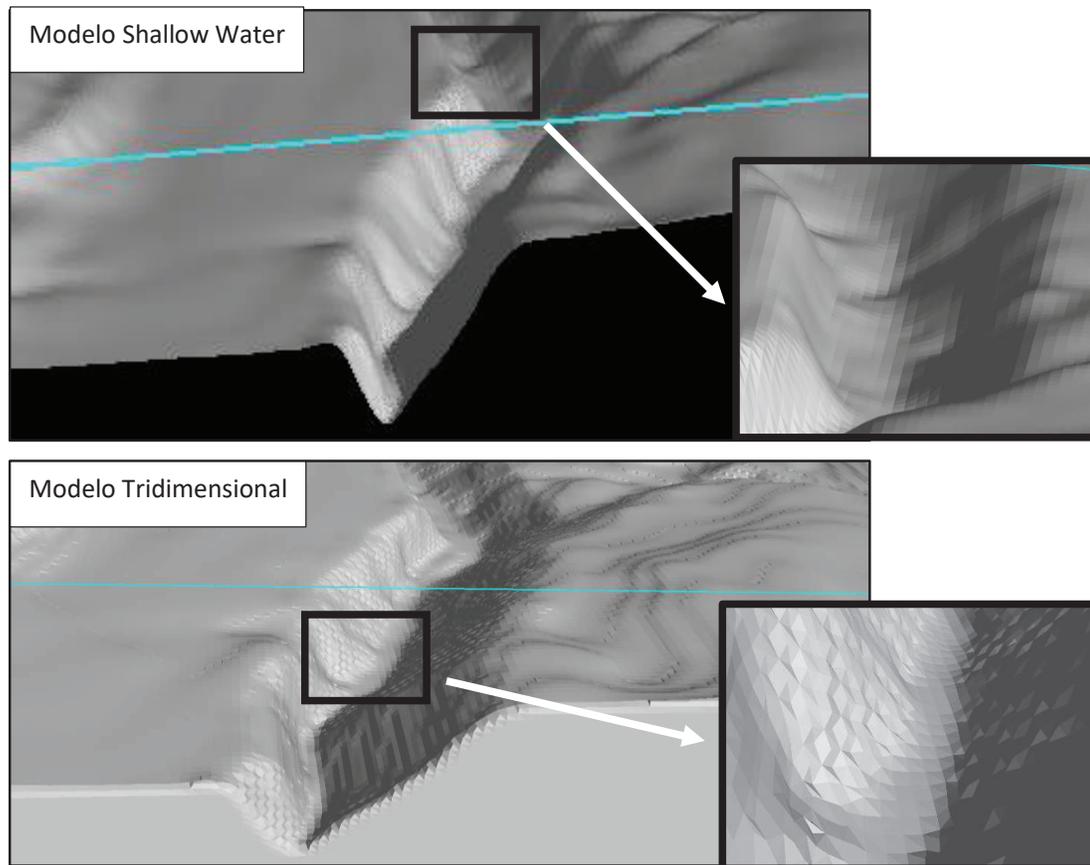
### **4.2.1. PLAN DE CORRIDAS DEL MODELO.**

La modelación tridimensional se realiza en un solo tramo de modelación como se analizó anteriormente. Este tramo de modelación tiene un ingreso de caudal que se da por el río Pita, específicamente por el denominado Tramo Pita 2; el hidrograma de ingreso se muestra en la figura 2.42.

La simulación se realizará aplicando el modelo Shallow Water que se explica en el punto 2.1.6.2, el mismo que es, según el manual del programa, una buena aproximación al modelo tridimensional. Las causas de la aplicación de este modelo es la distorsión de la geometría por el ingreso de la rugosidad absoluta a diferencia del caso del modelo Shallow Water, como se puede ver en la figura 4.9. Otra causa es el tiempo de corrida, ya que con el modelo Shallow Water disminuye en un 80% aproximadamente para este caso. Además, con el modelo a aplicar se puede ingresar archivos de rugosidad detallados para el componente de la topografía.

Con la finalidad de establecer las mismas condiciones para la modelación unidimensional como para la modelación tridimensional, se calcula la rugosidad absoluta con los calados y valores de “n” de Manning obtenidos en la simulación unidimensional que se muestran en la tabla 4.9; esto haciendo uso de la ecuación descrita en el punto 2.2.2.1.

**FIGURA 4.9: TOPOGRAFÍA PARA EL MODELO SHALLOW WATER Y TRIDIMENSIONAL.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA 4.8: VALORES D50 PARA LA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.**

Tramo	Sección (Nomenclatura HEC-RAS)	Calado calculado (m)	n	D50
Pita 2	2206.459	26.72	0.010	0.072
	2024.225	26.17	0.010	0.071
	1929.856	26.77	0.025	0.181
	1848.523	25.94	0.025	0.177
	1793.797	23.66	0.030	0.196
	1709.97	21.83	0.010	0.061

<b>Tramo</b>	<b>Sección (Nomenclatura HEC-RAS)</b>	<b>Calado calculado (m)</b>	<b>n</b>	<b>D50</b>
	1601.655	22.71	0.025	0.158
	1438.486	25.15	0.025	0.172
	1346.976	31.23	0.010	0.083
	1200.034	26.81	0.090	0.654
	1109.891	21.43	0.025	0.151
	1011.54	21.22	0.010	0.060
	925.0155	23.41	0.010	0.065
	822.5015	25.97	0.010	0.071
	760.2983	25.31	0.025	0.173
	687.5701	25.25	0.025	0.173
	586.5607	23.27	0.025	0.161
	497.3721	21.4	0.025	0.151
	410.8597	19.27	0.025	0.138
	282.8274	22.13	0.025	0.155
	146.1105	24.29	0.025	0.167
<b>Santa Clara</b>	2206.459	11.07	0.069	0.240
	2024.225	11.47	0.030	0.107
	1929.856	15.57	0.030	0.139
	1848.523	15.21	0.041	0.186
	1793.797	13.4	0.095	0.387
	1709.97	11.57	0.085	0.307
	1601.655	7.96	0.093	0.246
	1438.486	10.03	0.089	0.285
	1346.976	12.89	0.087	0.343
	1200.034	13.35	0.086	0.350
	1109.891	14.26	0.095	0.408

<b>Tramo</b>	<b>Sección (Nomenclatura HEC-RAS)</b>	<b>Calado calculado (m)</b>	<b>n</b>	<b>D50</b>
	1011.54	9.26	0.065	0.195
	925.0155	5.85	0.095	0.194
	822.5015	10.57	0.070	0.234
	760.2983	10.56	0.095	0.318
	687.5701	6.94	0.026	0.061
	586.5607	9.25	0.040	0.120
	497.3721	11.66	0.095	0.345
	410.8597	12.65	0.080	0.311
<b>Pita 3</b>	2206.459	31.9	0.030	0.252
	2024.225	30.9	0.030	0.245
	1929.856	30.4	0.085	0.686
	1848.523	32.7	0.060	0.514
	1793.797	32.8	0.080	0.687
	1709.97	33.8	0.015	0.132
	1601.655	34.5	0.015	0.135
	1438.486	37.1	0.065	0.619
	1346.976	39.3	0.018	0.180
	1200.034	39.9	0.015	0.152
	1109.891	37.6	0.090	0.868
	1011.54	37.9	0.069	0.669
	925.0155	37.1	0.045	0.429
	822.5015	32.5	0.097	0.827
	760.2983	28.6	0.071	0.544
	687.5701	32.9	0.095	0.819
586.5607	36.4	0.025	0.234	
497.3721	37.0	0.015	0.143	

<b>Tramo</b>	<b>Sección (Nomenclatura HEC-RAS)</b>	<b>Calado calculado (m)</b>	<b>n</b>	<b>D50</b>
	410.8597	36.8	0.040	0.378

ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Estos valores de rugosidad son ingresados en el CFD FLOW-3D como un archivo en formato ASCII que contiene un valor o código para cada área que rodea cada sección, posteriormente se ingresa un archivo .txt con los valores de D50 correspondientes a cada código.

Una vez ingresada la rugosidad, el mallado y las condiciones de borde descritas en el punto 3.2.4 se realiza el ingreso de la gravedad y del flujo (figura 4.10) que en este caso es agua; seguido se define las propiedades de superficie para cada componente (figura 4.11 y 4.12), donde, entre el coeficiente de resistencia al arrastre CD y la rugosidad de la superficie, se escoge la segunda, de manera que la ecuación simplificada para el modelo Shallow Water descrita en el punto 2.1.6.2 toma como dato el archivo de rugosidad en lugar de CD.

**FIGURA 4.10: FLUIDO INGRESADO EN EL CFD FLOW-3D**

Properties

- Fluid 1
  - Material Name: Water at 20 C
  - Density Properties
    - Density:  Tabular 1000 kg/m<sup>3</sup>
    - Volumetric Thermal Expansion:  0 1/K
  - Viscosity
    - Viscosity: Constant  Tabular 0.001 kg/m/s
    - Function Coefficients
    - Thixotropic
  - Thermal Properties
    - Specific Heat:  Tabular 4182 J/kg/K
    - Thermal Conductivity:  Tabular 0.597 W/m/K
    - Power source per unit mass: 0 W/kg
    - Heat transfer to void type 1: 0 W/m<sup>2</sup>/K
    - Heat transfer to void type 2: 0 W/m<sup>2</sup>/K
    - Heat transfer to void type 3: 0 W/m<sup>2</sup>/K
    - e \* SB constant - void type 1: 0 J/s/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>
    - e \* SB constant - void type 2: 0 J/s/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>
    - e \* SB constant - void type 3: 0 J/s/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>
  - Solidification Model
    - Solidified Fluid 1 Properties
      - Liquidus Temperature: 0.1 C
      - Solidus Temperature: 0 C
      - Latent Heat of Fusion: 3.35e+05 J/kg
    - Latent Heat Release Definition: Linearly with temperature
    - Binary Alloy Segregation Model
  - Compressibility:  1/Pa
  - Electrical Properties
  - Elasto-viscoplastic Properties

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**FIGURA 4.11: PROPIEDADES DE SUPERFICIE DEL COMPONENTE 1 (COMPONENTE DE TOPOGRAFÍA).**

Geometry

- Global
- FAVOR tolerances
- Component 1: total
- Component 2: Rugosidad
- Solidified Fluid Region

Component Properties

Axisymmetric Spinning Object

FSI Deformable Properties

Mass Source Properties

Output

Surface Properties

Inactive Properties

Search for:

Static Friction Coefficient:  kg/m<sup>2</sup>/s

Surface Roughness:  m

Use Roughness File

Shallow Water Shear Stress Method: Surface Roughness

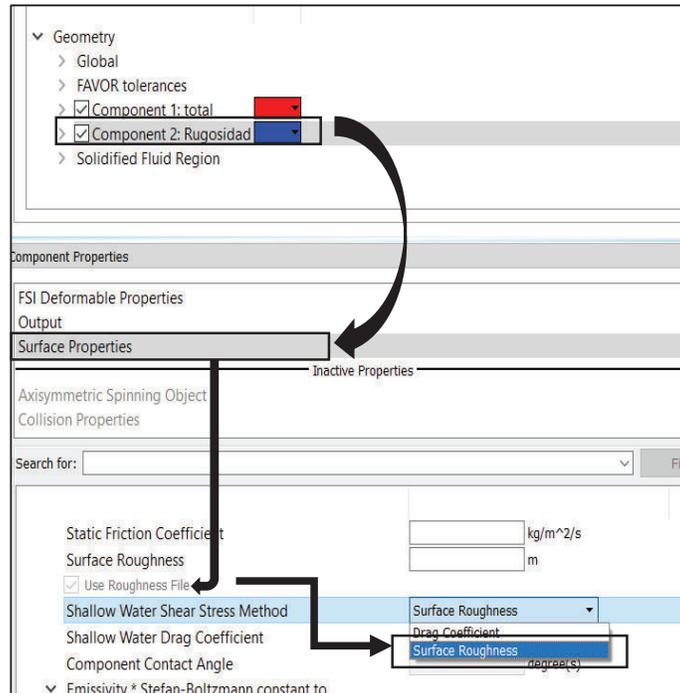
Shallow Water Drag Coefficient: Drag Coefficient

Component Contact Angle: Surface Roughness (degrees)

Emissivity \* Stefan-Boltzmann constant to Void type 1:  J/s/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**FIGURA 4.12: PROPIEDADES DE SUPERFICIE DEL COMPONENTE 2 (COMPONENTE DE RUGOSIDAD).**

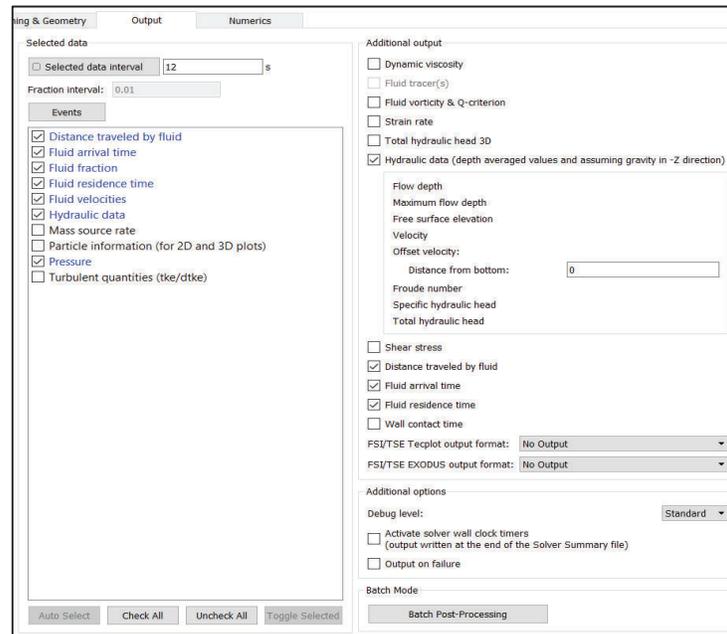


ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Los datos de salida seleccionados se muestran en la figura 4.13 al igual que el intervalo de tiempo impuesto para la generación de resultados que es 12s. El tiempo de finalización de la corrida será variado hasta que todo el volumen del hidrograma ingresado haya salido del tramo de modelación.

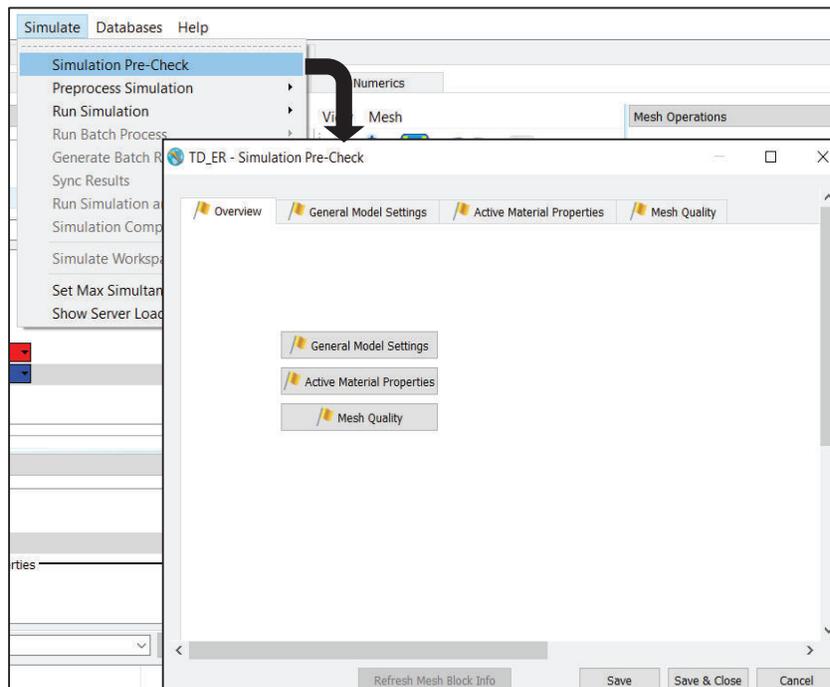
La corrida en el CFD iniciará con un chequeo previo (figura 4.14) donde se podrá verificar que las características geométricas del mallado sean las correctas de acuerdo a las condiciones ingresadas, también se podrá verificar el fluido ingresado y los posibles errores y errores fatales. Una vez realizado el chequeo previo, se mandará a correr el modelo, y mientras se realiza la corrida, se verificará que el fluido ingrese y salga totalmente cuando haya finalizado la simulación. Si en el proceso de corrida se constata que el tiempo de finalización no es el suficiente, se aumentará haciendo clic en la opción Runtime Options (figura 4.15).

**FIGURA 4.13: PROPIEDADES DE SUPERFICIE DEL COMPONENTE 2 (COMPONENTE DE RUGOSIDAD).**



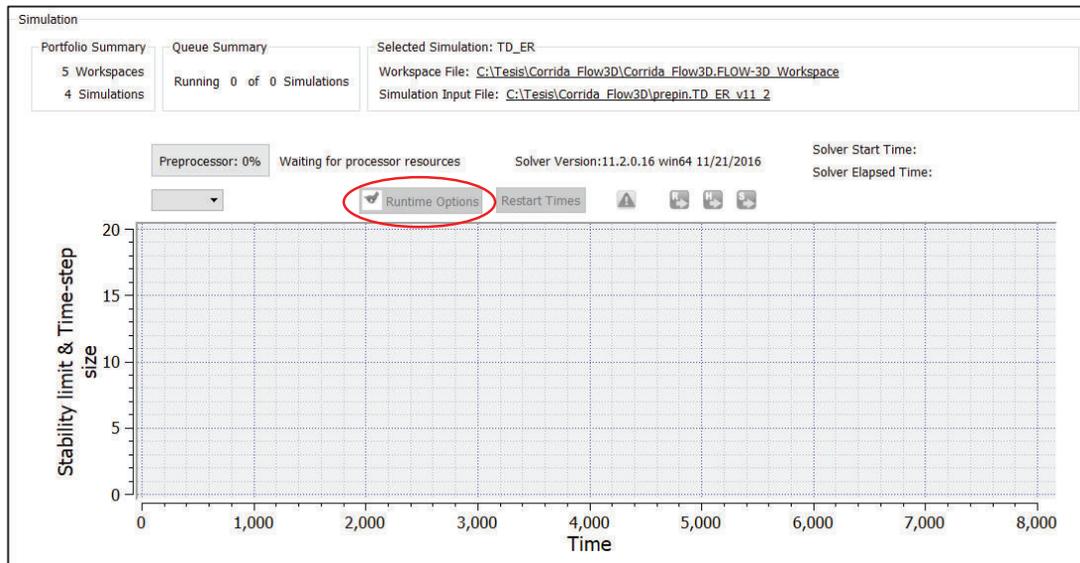
ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**FIGURA 4.14: VENTANA DE CHEQUEO PREVIO**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**FIGURA 4.15: VENTANA DEL CFD FLOW-3D DONDE SE VE LA OPCIÓN RUNTIME OPTIONS.**

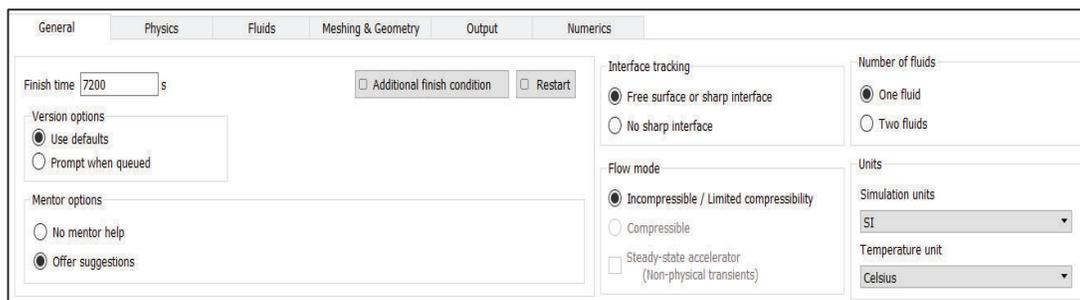


ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

#### 4.2.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN FLOW-3D

Como resultado de la modelación tridimensional se obtuvo: un tiempo de simulación de 7200 s (figura 4.16).

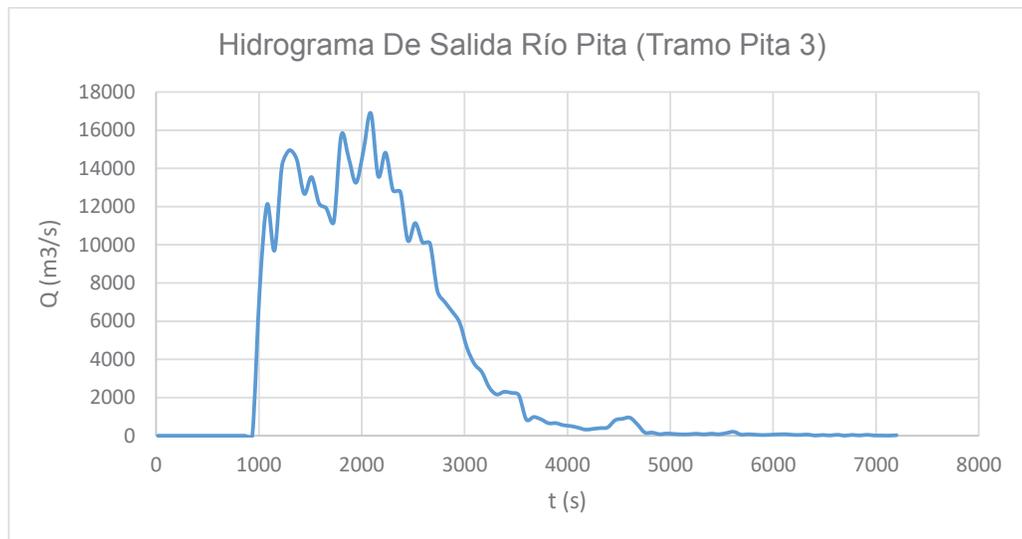
**FIGURA 4.16: TIEMPO DE SIMULACIÓN EN EL CFD FLOW-3D**



ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

En la figura 4.17 se muestra el hidrograma de salida en el río Pita (tramo Pita 3), cuyo caudal máximo es 16893.309 m<sup>3</sup>/s y su volumen es de 26496558.921 m<sup>3</sup>. En el Anexo 4 se encuentra la tabla correspondiente al gráfico 4.17.

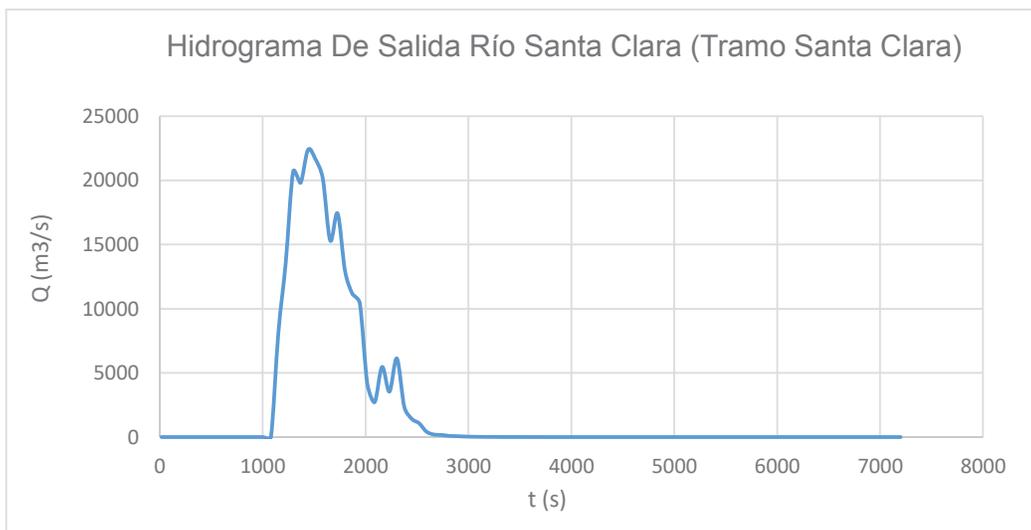
**FIGURA 4.17: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO PITA (TRAMO PITA 3), RESULTADO DE LA SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL.**



ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

El hidrograma de salida para el río Santa Clara (tramo Santa Clara) se muestra en la figura 4.18 cuyo caudal máximo es 22377.11  $\text{m}^3/\text{s}$  y su volumen es 15958506.337  $\text{m}^3$ . En el Anexo 5 se encuentra la tabla correspondiente al gráfico 4.18.

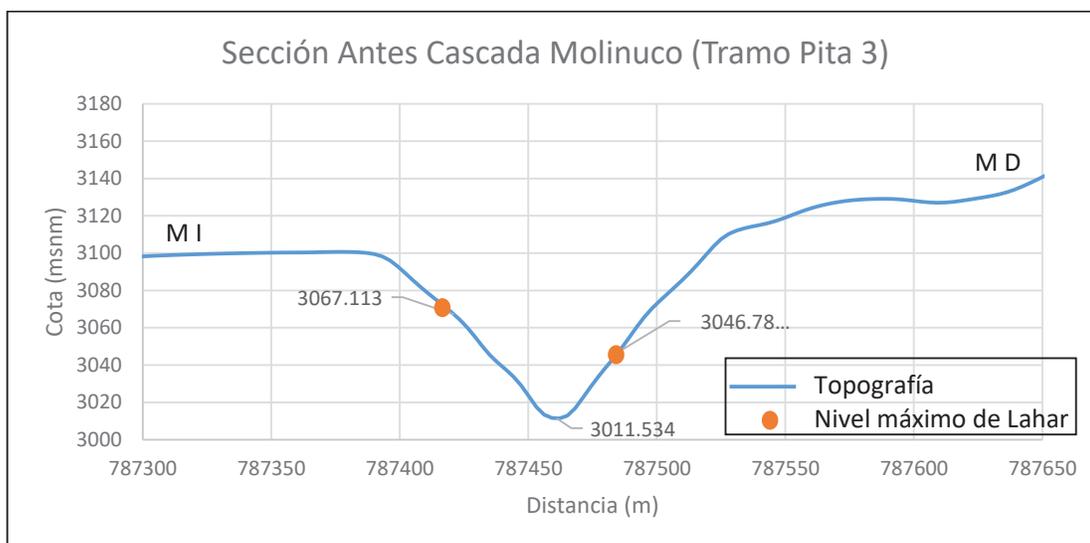
**FIGURA 4.18: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO SANTA CLARA (TRAMO SANTA CLARA), RESULTADO DE LA SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

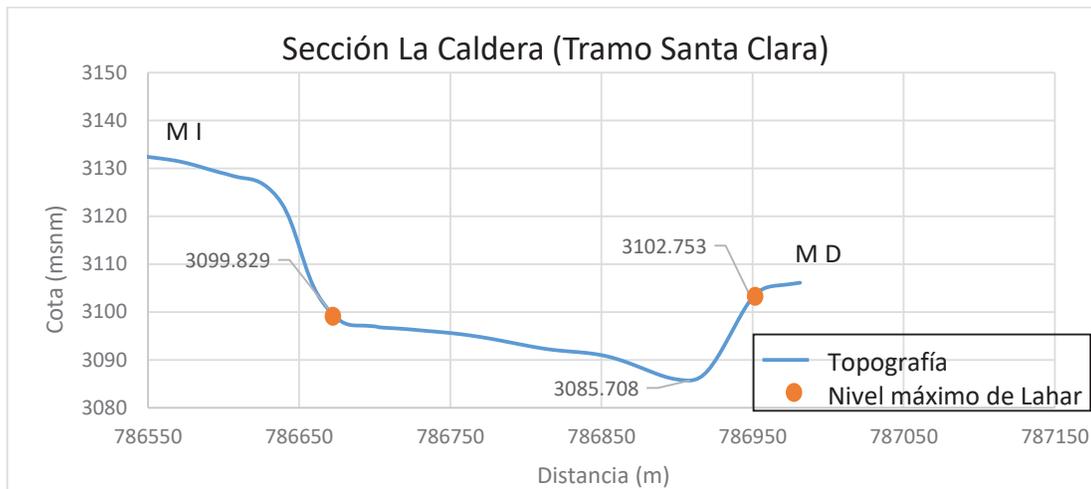
Los niveles máximos a los que llega el lahar en los márgenes de las dos secciones de vestigios que se encuentran dentro del tramo de modelación tridimensional, se pueden ver en las figuras 4.19, 4.20 y 4.21.

**FIGURA 4.19: NIVELES MÁXIMOS A LOS QUE LLEGA EL LAHAR EN LA SECCIÓN “ANTES CASCADA MOLINUCO” EN LA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.**



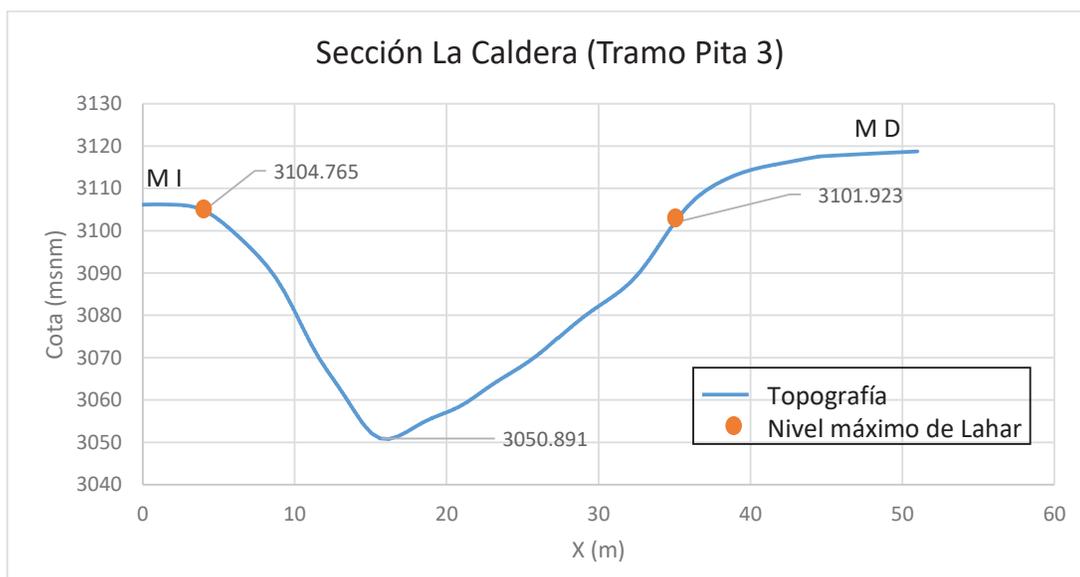
ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**FIGURA 4.20: NIVELES MÁXIMOS A LOS QUE LLEGA EL LAHAR EN LA SECCIÓN “LA CALDERA (SANTA CLARA)” EN LA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**FIGURA 4.21: NIVELES MÁXIMOS A LOS QUE LLEGA EL LAHAR EN LA SECCIÓN “LA CALDERA (RÍO PITA)” EN LA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL.**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

Las velocidades máximas obtenidas en las secciones de vestigio son: 32.17 m/s en la sección “La Caldera (Río Pita)”, 27.67 m/s en la sección “Antes cascada Molinuco” y 25.55 m/s en la sección “La Caldera (Río Santa Clara).

#### 4.2.3. DISCUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN FLOW-3D

En las tablas 4.9 y 4.10 se encuentran los resultados de la modelación tridimensional y los valores estimados en campo que se obtuvieron en el proyecto E.E.I para las secciones de vestigio del tramo.

En la tabla 4.9 se puede observar que los valores de calados calculados en el presente proyecto de titulación de las secciones “La Caldera (Santa Clara)” y “Antes cascada Molinuco”, son semejantes e iguales a los valores estimados en campo para el evento eruptivo de 1877. A diferencia del calado resultante en la sección “La Caldera (Río Pita)”, donde el valor de vestigio es menor al calculado en el presente proyecto. El resultado de esta sección no se considera erróneo ya que los valores obtenidos en campo tienen cierto margen de error, motivo por el cual se recomendaría revisar la posible existencia de vestigio en cotas superiores a las reportadas en el estudio E.E.I.

**TABLA 4.9: RESUMEN DE RESULTADOS DE CALADOS ESTIMADOS EN CAMPO Y PROYECTO DE TITULACIÓN.**

Tramo de modelación	Sección de vestigio	Calado estimado en campo (1877) (m)	Calado calculado en el actual proyecto de titulación (2017) (m)
Pita 3	La Caldera (Río Pita)	35	51
	Antes Cascada Molinuco	40	40
Santa Clara	La Caldera (Santa Clara)	13	14

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

En la tabla 4.10 se puede observar que los valores de velocidades calculados en el presente proyecto de titulación son altos en comparación a los valores estimados en campo y al mismo tiempo son consecuentes con los valores de calados analizados anteriormente. De manera que, si se analizan estas velocidades en función de los calados calculados, estas serían aceptadas.

**TABLA 4.10: RESUMEN DE RESULTADOS DE VELOCIDADES ESTIMADAS EN CAMPO Y PROYECTO DE TITULACIÓN.**

Tramo de modelación	Sección de vestigio	Velocidad estimada en campo (1877) (m/s)	Velocidad calculada en el presente proyecto de titulación (2017) (m/s)
Pita 3	La Caldera (Río Pita)	15-20	32.17
	Antes Cascada Molinuco	>20	27.67
Santa Clara	La Caldera (Santa Clara)	15-18	25.55

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

#### **4.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS ENTRE LA SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL EN CFD FLOW-3D Y LA SIMULACIÓN UNIDIMENSIONAL DEL PROGRAMA HEC-RAS.**

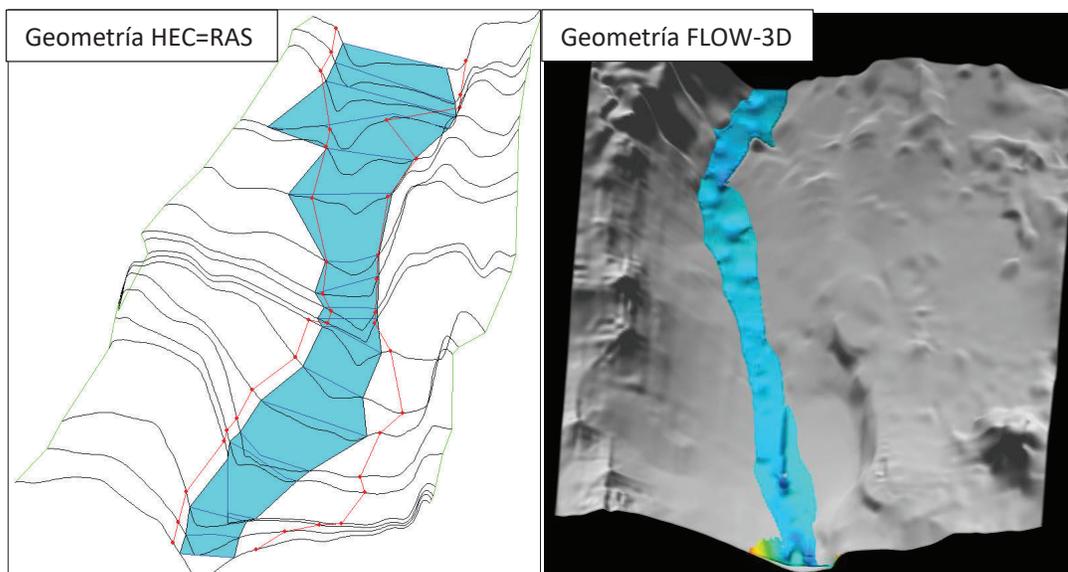
El modelo unidimensional del programa HEC-RAS, al conformar la geometría de los ríos por medio de secciones que se unen entre sí como se ve en la figura 4.22, limita al modelo a tener una geometría aproximada, a pesar de tomar secciones seguidas. A diferencia del CFD FLOW-3D que permite el ingreso de toda la topografía, cuya lectura depende del mallado con el que se corra el modelo y a su vez de la capacidad de la máquina con la que se cuenta.

El modelo tridimensional requiere como dato de ingreso la rugosidad absoluta, que según la literatura puede ser el D50, cuyo valor se calcula con el “n” de Manning,

que en este caso se toma de la simulación unidimensional, lo que hace que la simulación tridimensional sea dependiente de la simulación unidimensional, a menos que se tenga datos de rugosidad absoluta o valores de “n” de Manning recomendados para el área a simular. En cuanto al modelo unidimensional, los valores “n” de Manning son generados en base a los calados encontrados como vestigio.

Para la modelación tridimensional es indispensable utilizar ordenadores con una gran capacidad de procesamiento, así como de memoria RAM y espacio disponible en el disco duro ya que esto agiliza la obtención de resultados en menor tiempo, siendo esto gran ayuda para el usuario ya que optimiza el tiempo de trabajo. A diferencia de lo anterior, el programa HEC-RAS requiere de un computador con características promedio ya que no demanda tanto gasto computacional y tampoco genera gran cantidad de información como resultados.

**FIGURA 4.22: GEOMETRÍA DEL PROGRAMA HEC-RAS Y CFD FLOW-3D**



ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

La corrida de la modelación unidimensional para flujo no permanente se demora 5 minutos aproximadamente a diferencia de la corrida en el modelo tridimensional que toma aproximadamente cuatro horas.

En las tablas 4.11, 4.12 y 4.13 se muestran los resultados obtenidos tanto para la modelación unidimensional como para la modelación tridimensional. En el caso de las tablas 4.11 y 4.12 no existen resultados en la modelación tridimensional para la sección “La caldera (Río Pita)” ya que esta sección quedo fuera del tramo de modelación unidimensional “Tramo Pita 3”, debido a que entre la sección y el inicio del tramo de modelación existe una cascada, lo cual fue analizado en el punto 3.1.1. La inevitable exclusión de la sección es un inconveniente que presenta el programa HEC-RAS el momento de generar la geometría del tramo.

En la tabla 4.11 y 4.12 se pueden ver que los valores de calados y velocidades obtenidos en la modelación tridimensional son mayores que los resultantes de la modelación unidimensional en las dos secciones de vestigio. Esto posiblemente pasa porque los volúmenes repartidos para cada tramo en la modelación unidimensional son valores determinados de acuerdo a análisis descritos anteriormente (Tabla 2.6) , a diferencia de los valores de caudales que se reparten para los dos tramos en la modelación tridimensional que son resultado de la resolución de algoritmos que se ejecutan de manera automática por parte del programa y que toman en cuenta consideraciones físicas y fenómenos físicos que pueden ocurrir en el evento, de manera que se esperaría que los resultados entregados por el CFD FLOW-3D sean más apegados a la realidad.

**TABLA 4.11: TABLA DE RESULTADOS DE CALADOS DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL EN LAS SECCIONES DE VESTIGIO.**

Tramo de modelación	Sección de vestigio	Calado calculado en el actual proyecto de titulación (HEC-RAS no-permanente) (2017) (m)	Calado calculado en el actual proyecto de titulación (FLOW-3D) (2017) (m)
Pita 3	La Caldera (Río Pita)	-	51
	Antes Cascada Molinuco	37.9	40
Santa Clara	La Caldera (Santa Clara)	11.07	14

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA 4.12: TABLA DE RESULTADOS DE VELOCIDADES DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL EN LAS SECCIONES DE VESTIGIO.**

Tramo de modelación	Sección de vestigio	Velocidad calculada en el actual proyecto de titulación (HEC-RAS no-permanente) (2017) (m/s)	Velocidad calculada en el actual proyecto de titulación (CFD FLOW-3D) (2017) (m/s)
Pita 3	La Caldera (Río Pita)	-	32.17
	Antes Cascada Molinuco	21.3	27.67
Santa Clara	La Caldera (Santa Clara)	8.54	25.55

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

El volumen que transita por la sección inicial del tramo Pita 2 es el mismo que ingresa en la modelación tridimensional que corresponde al valor de 43604240 m<sup>3</sup>. Dicho volumen en la salida de la modelación tridimensional disminuye un 3% y en la salida de la modelación unidimensional disminuye 4%. Esta disminución de volumen en el caso de la modelación tridimensional se le atribuye a posible

estancamiento de agua y en el caso de la modelación unidimensional se atribuye esta variación a los valores establecidos como “intervalo de cálculo”, “Intervalo de salida del hidrograma” e “Intervalo de salida detallado” para cada tramo de modelación que contribuyen en la estabilización del flujo no permanente, pero a su vez intervienen directamente en los resultados.

**TABLA 4.13: TABLA DE RESULTADOS DE VOLÚMENES DE SALIDA DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL**

<b>Tramo de modelación</b>	<b>Volumen de salida calculado en el actual proyecto de titulación (HEC-RAS) (2017) (m3)</b>	<b>Volumen de salida calculado en el actual proyecto de titulación (FLOW-3D) (2017) (m3)</b>
Pita 3	39069210	26496558
Santa Clara	2944310	15958506

ELABORACIÓN: Diana Vilaña Beltrán, 2017

## CONCLUSIONES

- Bajo la suposición de que los datos de vestigio de campo de 1877 son reales, la precisión de la modelación numérica tridimensional del flujo de lahares primarios del drenaje norte del volcán Cotopaxi, en el sector de la caldera con CFD FLOW-3D, con respecto a los vestigios del evento eruptivo de 1877 determinados en el estudio E.E.I., es de aproximadamente 96%.
- Bajo la suposición de que los datos de vestigio de campo de 1877 son reales, la precisión de la modelación numérica tridimensional del flujo de lahares primarios del drenaje norte del volcán Cotopaxi, en el sector de la caldera en el software HEC-RAS con respecto a los vestigios del evento eruptivo de 1877 determinados en el estudio E.E.I., es de aproximadamente 89%.
- Entre los resultados de la modelación numérica unidimensional y tridimensional en las secciones de análisis se encontró una diferencia de 7%, esto se atribuye a las características predominantes del movimiento del fluido en el tramo de simulación; que son las de una morfología encañonada, donde si bien existen fuerzas en las tres direcciones la predominante está en la dirección longitudinal del flujo, por lo tanto se determinó que se pueden obtener buenos resultados mediante la modelación unidimensional en tramos de este tipo, a pesar de que se desprecien las fuerzas en las otras dos direcciones.
- El fundamento teórico que aplica el CFD FLOW-3D para llevar a cabo la modelación se basa en el uso de las ecuaciones de momento simplificadas de acuerdo al modelo Shallow Water, el cual aplica sobre estas ecuaciones el promedio de profundidad, simplificando las mismas en dos ecuaciones, mostradas al final del apartado 2.1.6.2. Por otro lado, el programa HEC-RAS, se basa en el uso de la ecuación de energía en una dimensión en el modelo permanente y para el modelo no permanente se basa en las ecuaciones de Saint Venant para modelos unidimensionales, descritos en el punto 2.1.6.1.

- El CDF Flow-3D es una herramienta de simulación no muy asequible debido a que para su uso es necesario adquirir la licencia que tiene un alto costo y además de un ordenador con gran capacidad a diferencia del software HEC-RAS que es una herramienta de simulación de libre acceso y no demanda mayor gasto computacional.
- Una de las limitantes del software HEC-RAS es que no se puede modelar un tramo que contenga una cascada debido a que el programa interpola los resultados antes y después de la misma, lo que da como efecto una pendiente muy alta de sección a sección, provocando resultados erróneos. Por esta razón el tramo Pita 3 tuvo que ser reducido 480 m aproximadamente.
- A pesar de que la geometría ingresada en el programa HEC-RAS tiene 19 secciones para el tramo Pita2 y Santa Clara, de 1.3km y 1.55km de longitud respectivamente, no llega a representar fielmente la topografía en estudio como se puede ver en la Figura 4.22.
- No todos los valores “n” de Manning resultantes en la modelación unidimensional se ajustan a los valores establecidos en la literatura. Una de las razones por lo que esto ocurre, es que están consideradas las características reológicas del fluido, así como la energía disipada durante el tránsito del lahar del volcán Cotopaxi. Otra razón es que los valores establecidos en la teoría están basados en eventos eruptivos de otros volcanes.
- Si bien el CFD FLOW-3D tiene una buena interpretación de la geometría ingresada, al establecer los valores de rugosidad por componente, esta se distorsiona, a pesar de que el tamaño de pixel es de 3m x 3m que es el óptimo para este MDT; lo que nos permite darnos cuenta que un MDT con este tamaño de pixel aún es muy grande para este tipo de simulación.

- El modelo Shallow Water contribuye en el CFD FLOW-3D dando una mejor interpretación de la geometría puesto que al usar este modelo, la rugosidad ingresada no genera ninguna distorsión en la misma.
- En la modelación tridimensional en el CFD FLOW-3D, la condición de borde de mínima elevación, se refiere a la mínima elevación de la superficie de agua esperada, más no a la de la sección de ingreso.
- Los valores de rugosidad absoluta son indispensables para la simulación de este tipo de eventos, de manera que, a menos que se tengan valores recomendados, esta simulación deberá iniciar con una modelación unidimensional donde se pueda obtener los valores “n” de Manning necesarios para el cálculo de dicha rugosidad.
- El modelo Shallow Water permite ingresar diferentes valores de rugosidad para un solo componente de topografía, contribuyendo de esta manera en la obtención una base topográfica más apegada a la realidad para la simulación del tránsito de lahar.
- Como resultado de la modelación tridimensional, el porcentaje aproximado de volumen que pasa hacia el río pita en el sector de la caldera es 61% y 37% se desborda y encauza en el río Santa Clara, además el 3% restante de volumen se considera volumen depositado en el tramo, como se puede ver en las figuras 4.17 y 4.18.
- De acuerdo a los números de Froude obtenidos, tanto en la modelación unidimensional para flujo no permanente como en la simulación tridimensional, el tipo de flujo que gobierna el movimiento del lahar en el sector de La Caldera, es flujo de tipo supercrítico.

## ESTUDIOS FUTUROS

- Recopilar la mayor cantidad de vestigios de campo del evento eruptivo de 1877 en el sector de la caldera del Flanco norte del volcán Cotopaxi.
- Realizar simulaciones en el CFD FLOW-3D para topografías con detalles de pixel diferentes para una misma área de simulación y determinar la variación en los calados y volúmenes de tránsito.
- Realizar un análisis de sensibilidad del mallado en el CFD FLOW-3D para este tipo de eventos.
- Realizar un análisis de sensibilidad de los valores de rugosidad absoluta en el CFD FLOW-3D de manera que se intente calibrar al evento eruptivo de 1877 sin valores de “n” de Manning.
- Determinar el volumen de tránsito en el sector de la caldera en el que ocurre el desbordamiento del río pita y se encauza en el río Santa Clara.
- Determinar la diferencia del modelo Shallow Water con el modelo tridimensional del CFD FLOW-3D, en una topografía de pixel detallado.

## BIBLIOGRAFIA

- Ahmed Hamad, K. M. (2008). *Aplicaciones del Modelo HEC-RAS para el análisis del flujo no permanente con superficie libre*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Cáceres, B. (2008). *Evaluación geométrica del casquete glaciar del volcán Cotopaxi usando fotografía digital*. Quito: Revista técnica Sigma, Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha (CICP).
- Chow, V.-T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Del Toro Ávila, N. V. (2013). *Bases y criterios de diseño de canales con flujo escalonado y sujetos a aireación natural*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Escuela Politécnica Nacional. (2004). *Estudio de evaluación de impactos sobre la infraestructura de la EMAAP-Q y factibilidad de las obras de mitigación antes una eventual erupción del volcán Cotopaxi. Parte A: Estudio de la amenaza volcánica*. Quito: Departamento de Ciencias del Agua - Departamento de Geofísica.
- Escuela Politécnica Nacional. (2005). *Estudio de evaluación de impactos sobre la infraestructura de la EMAAP-Q y factibilidad de las obras de mitigación ante una eventual erupción del volcán Cotopaxi. Parte B: Modelación matemática unidimensional, flujo gradualmente variado*. Quito: Escuela Politécnica Nacional - Departamento de Geofísica.
- Fernández Oro, J. M. (2012). *Técnicas numéricas den Ingeniería de Fluidos: Introducción a la Dinámica de Fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Barcelona: Reverté.

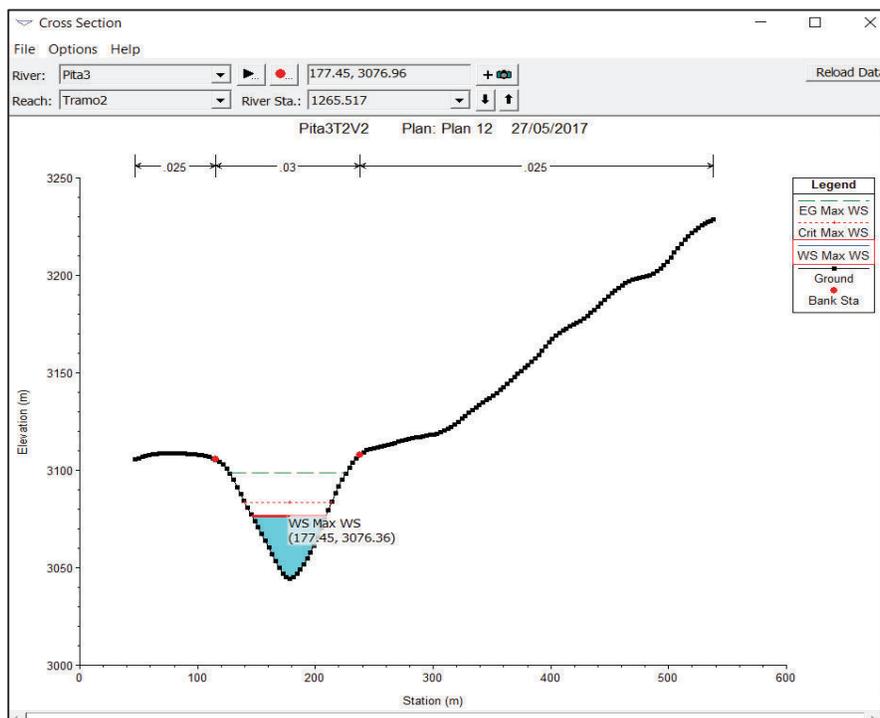
- FLOW Science. (2015). *FLOW-3D Version 11.1 - User Manual*. Nuevo México: FLOW Science.
- Hall, M. (2004). *Estudio de evaluación de impactos sobre la infraestructura de la EMAAP-Q y factibilidad de las obras de mitigación ante una eventual erupción del volcán Cotopaxi*. Escuela Politecnica Nacional , Departamento de Geofísica . Quito : EPN. Recuperado el 27 de Mayo de 2017
- Hall, M., & Mothes, P. (2007). *The rhyolitic-andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano*. Quito: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.
- Haro Ruiz, P. L., & Jara Vaca, M. F. (2006). *Manual básico de diseño de estructuras de cambio de nivel y cambio de dirección con flujo a gravedad*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Haro Ruiz, P. L., & Jara Vaca, M. F. (2010). *Análisis de flujo inestable y autoaireado en canales de fuerte pendiente*. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Instituto Geofísico EPN. (23 de Mayo de 2017). *Instituto Geofísico*. (E. P. Nacional, Editor) Recuperado el 23 de Mayo de 2017, de <http://www.igepn.edu.ec/cotopaxi>
- Méndez Padilla, J. A. (2017). *Simulación numérica bidimensional con el programa Iber del flujo de lahares primarios del Río Santa Clara en la población de Sangolquí correspondiente al drenaje norte del volcán Cotopaxi*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Nanía, L., & Emilio, M. (2007). *Manual Básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRAS 3.1.1*. Granada, España: Universidad de Granada.
- Nanía, L., & Molero, E. (2007). *Manual Básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRAS 3.1.1*. Granada: Universidad de Granada.

- Ortega Lara, P. R. (2015). *Simulación numérica de una estructura separadora de caudales con metodología CFD, aplicando el paquete computacional ANSYS CFX 15.0*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Pierson, T., & Costa, J. (1987). *A rheologic classification of subreal sediment-water FLOWS*. Geological Society of America.
- Sodiro, L. (1877). *Relación sobre la erupción del Cotopaxi acaecida el día 26 de junio de 1877*. Quito: Imprenta Nacional.
- Sotelo Dávila, G. (1976). *Hidráulica General: Volumen 1 - Fundamento*. México: Limusa.
- Streeter, V., Wylie, B., & Bedford, K. (2000). *Mecánica de Fluidos*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Suárez Díaz, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Ediciones Universidad Industrial de Santander.
- Takahashi, T. (1991). *Debris FLOW*. Rotterdam: International Association for Hydraulic Research.
- US Army Corps of Engineers. (2008). *HEC-RAS River Analysis System - User's Manual - Version 4.0*. Davis: US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources. Hydrologic Engineering Center.
- Wolf, T. (1878). *Memoria sobre el Cotopaxi y su última erupción acaecida el 26 de junio de 1877*. Guayaquil: Imprenta del Comercio.

## **ANEXO 1**

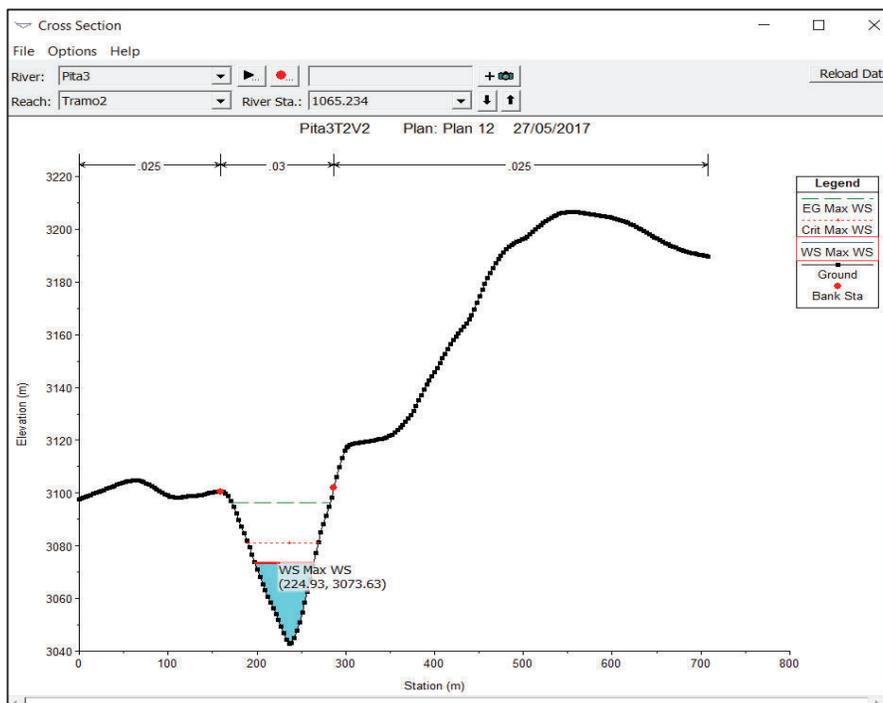
**SECCIONES TRANSVERSALES RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN DE FLUJO NO PERMANENTE EN EL SOFTWARE HEC-RAS DEL TRAMO PITA 3**

**TABLA A1.1: Sección transversal 1265.517**



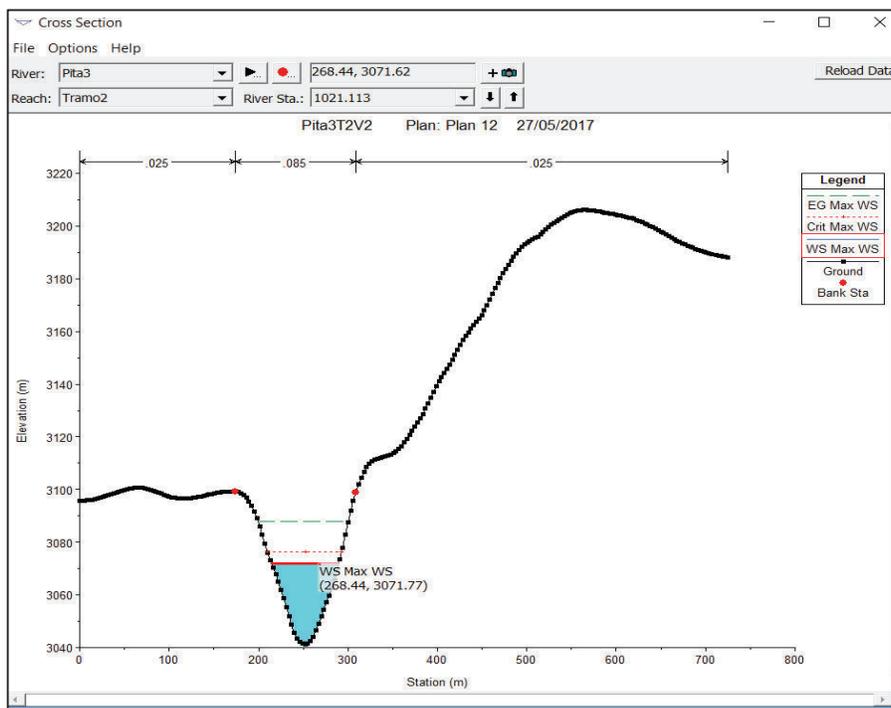
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.2: Sección transversal 1065.234**



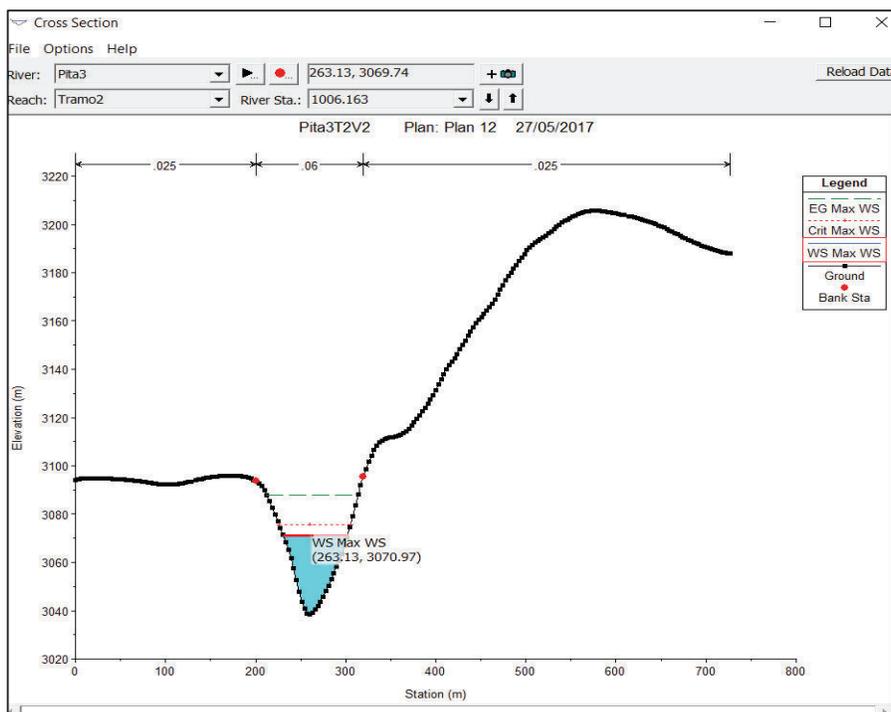
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.3: Sección transversal 1065.234**



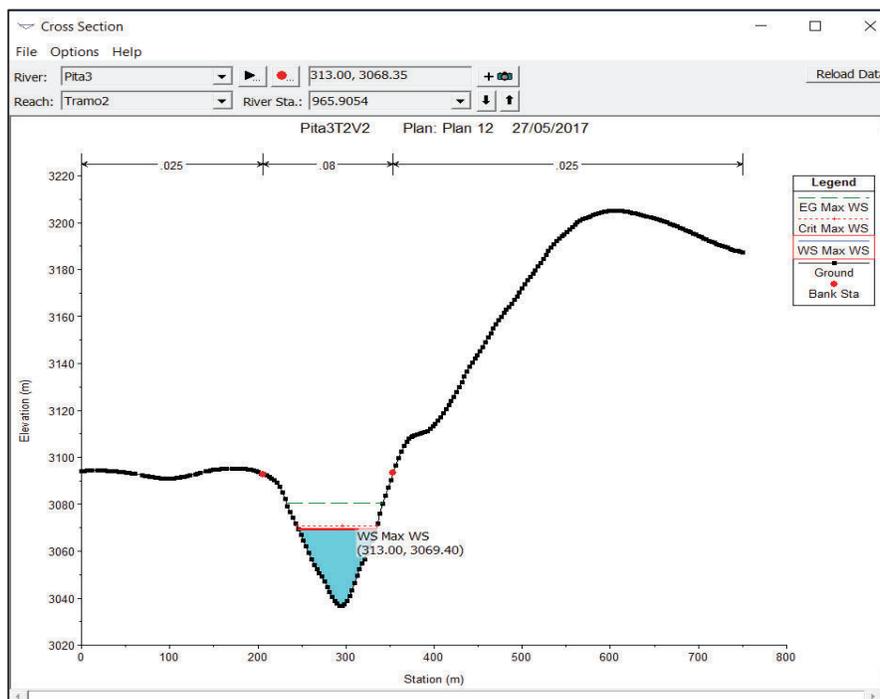
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.4: Sección transversal 1065.234**



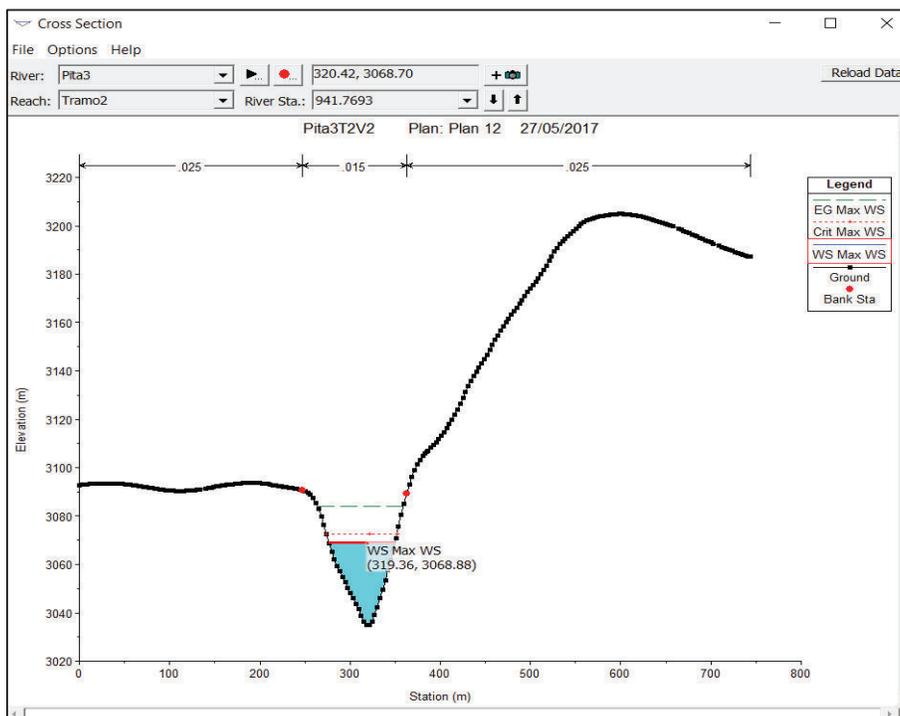
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.5: Sección transversal 965.9054**



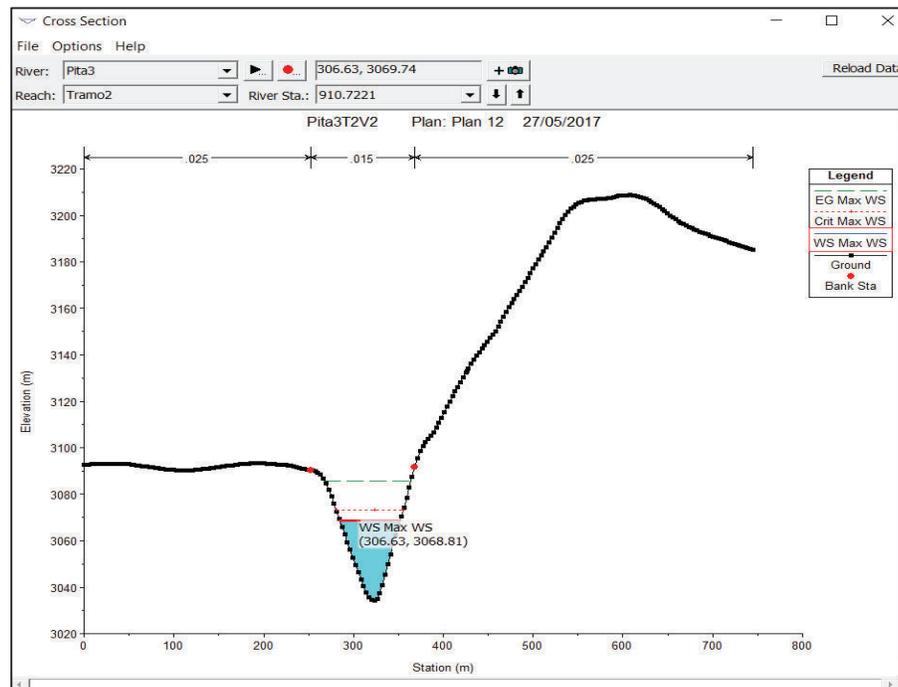
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.6: Sección transversal 941.7693**



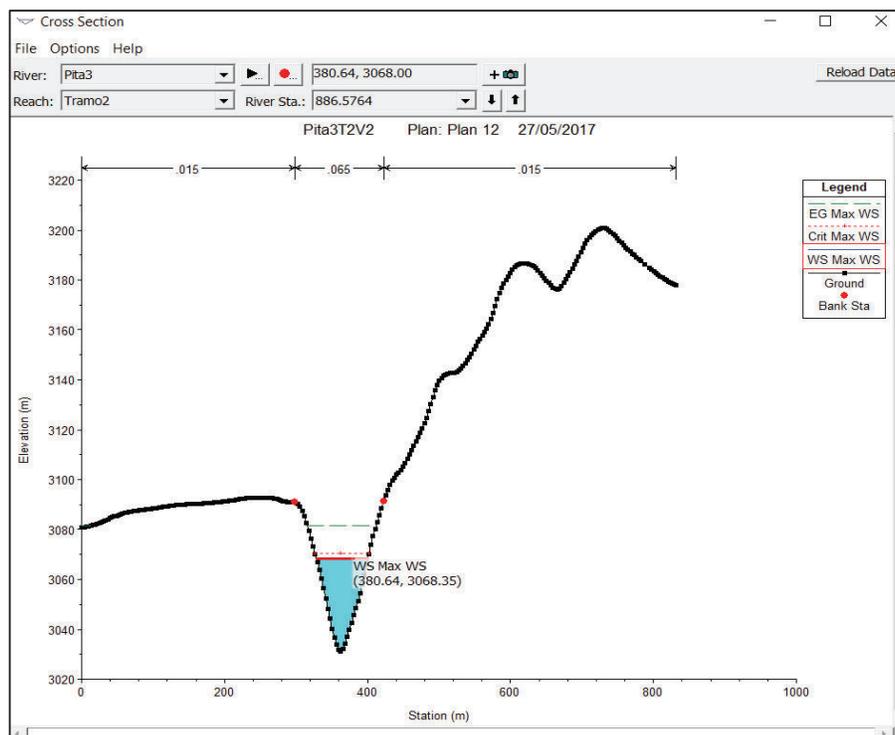
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.7: Sección transversal 910.7221**



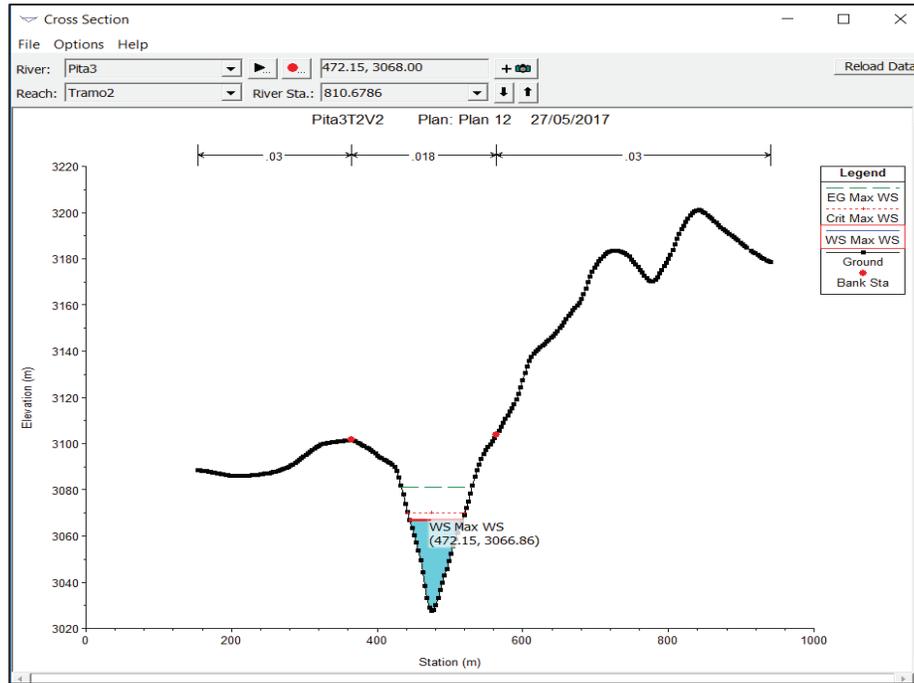
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.8: Sección transversal 886.5764**



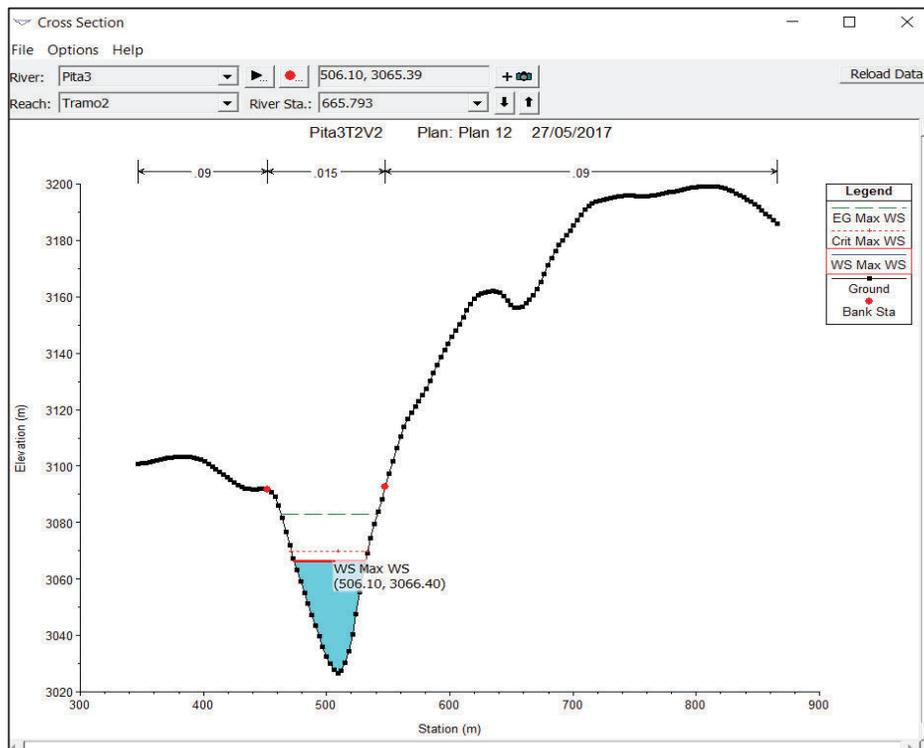
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.9: Sección transversal 810.6786**



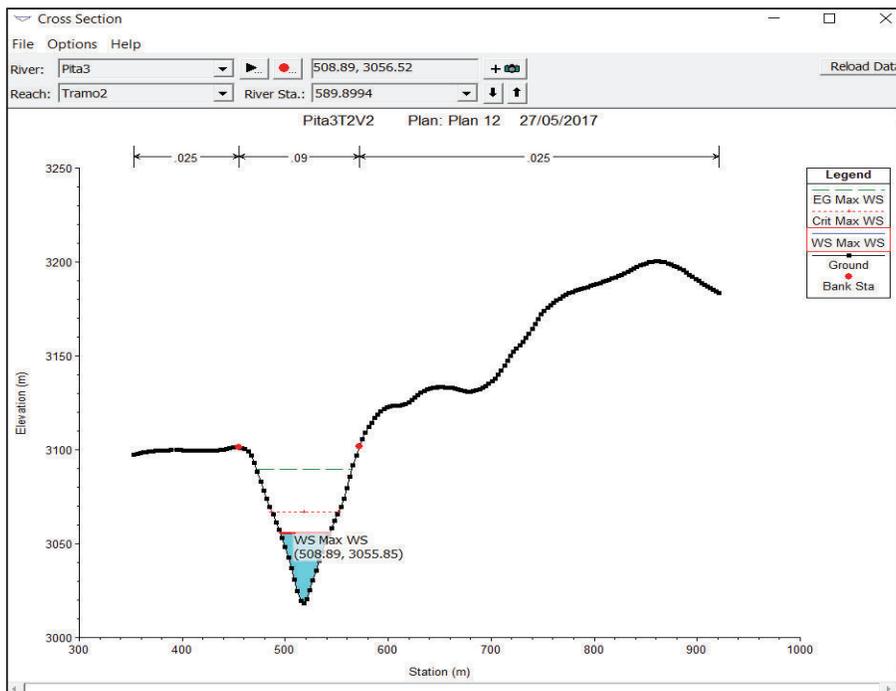
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.10: Sección transversal 665.793**



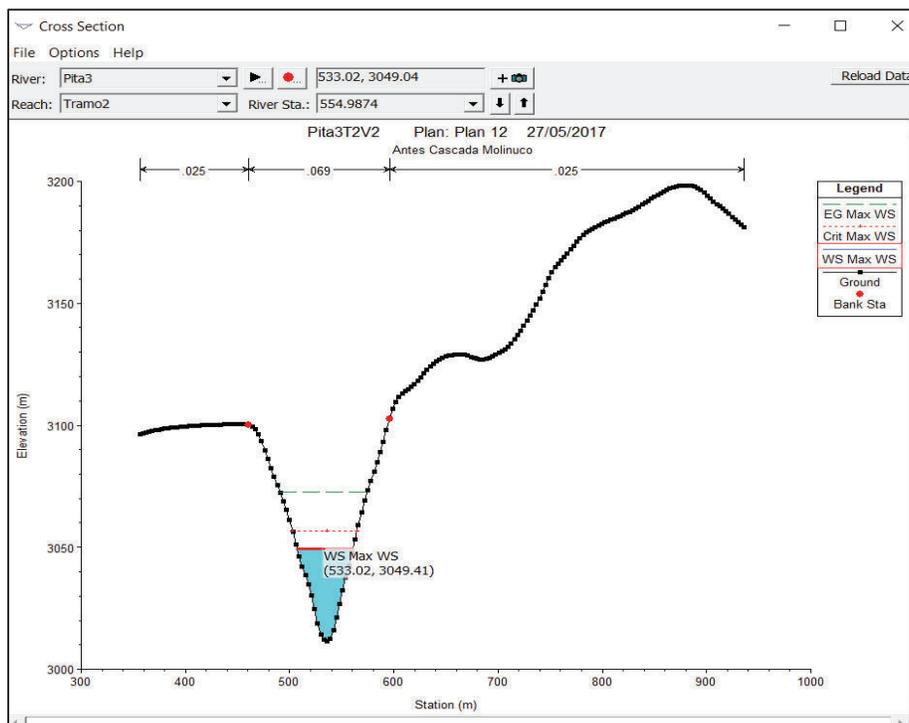
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.11: Sección transversal 589.8994**



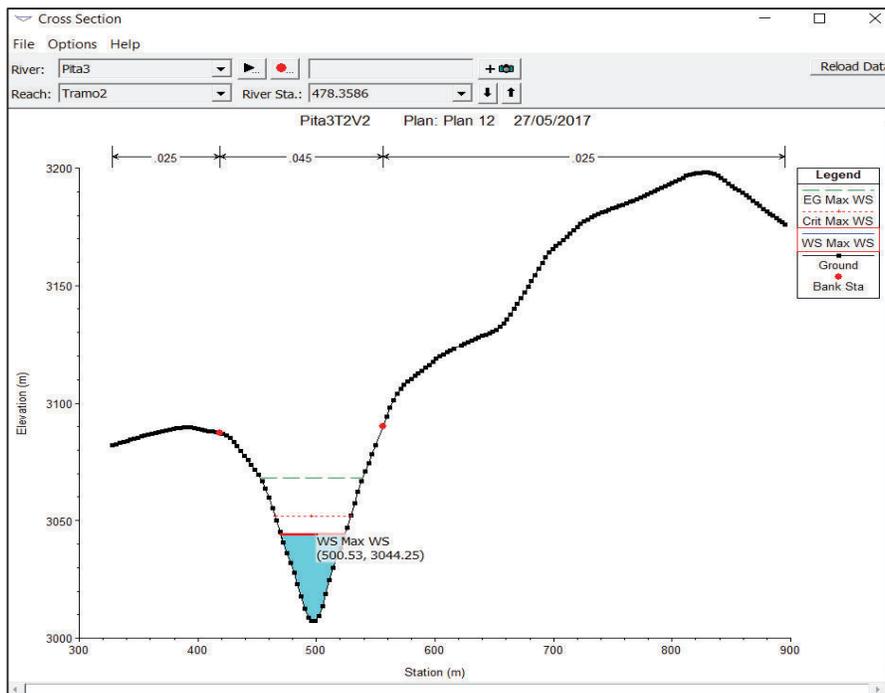
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.12: Sección transversal 554.9874**



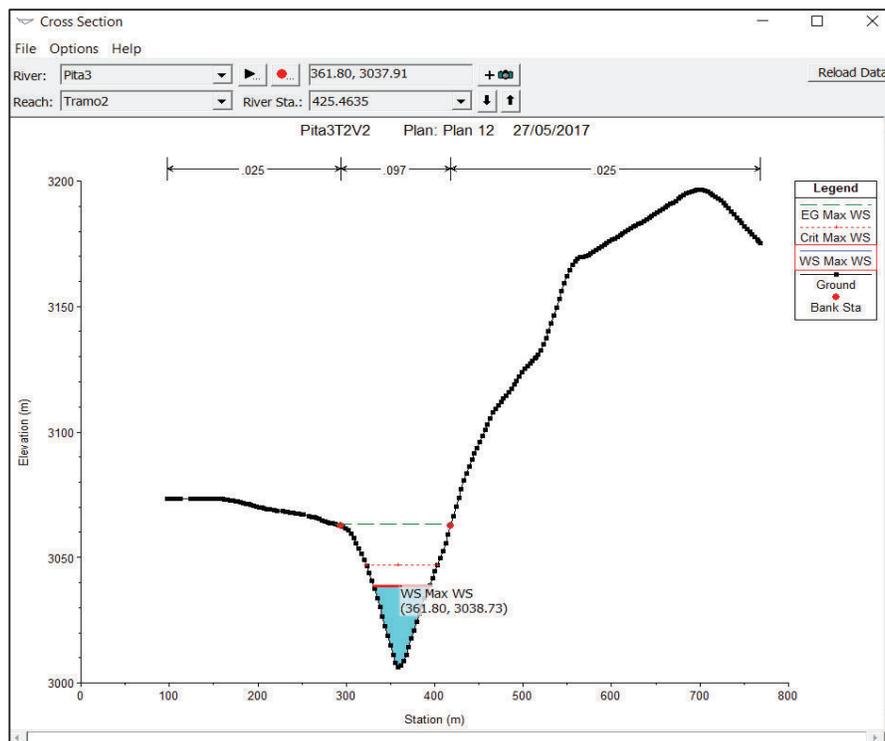
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.13: Sección transversal 478.3586**



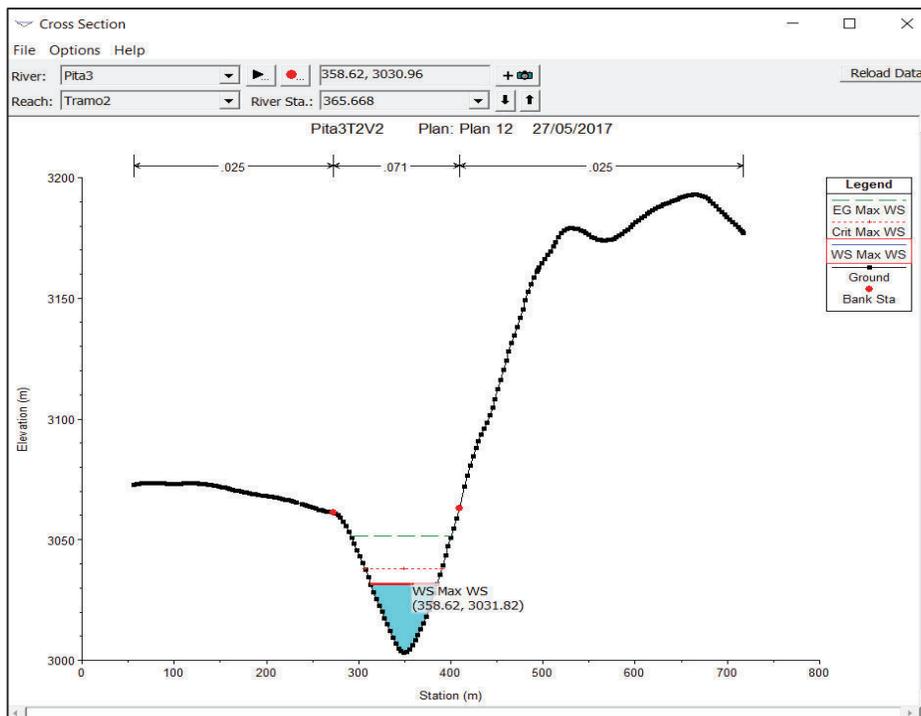
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.14: Sección transversal 425.4635**



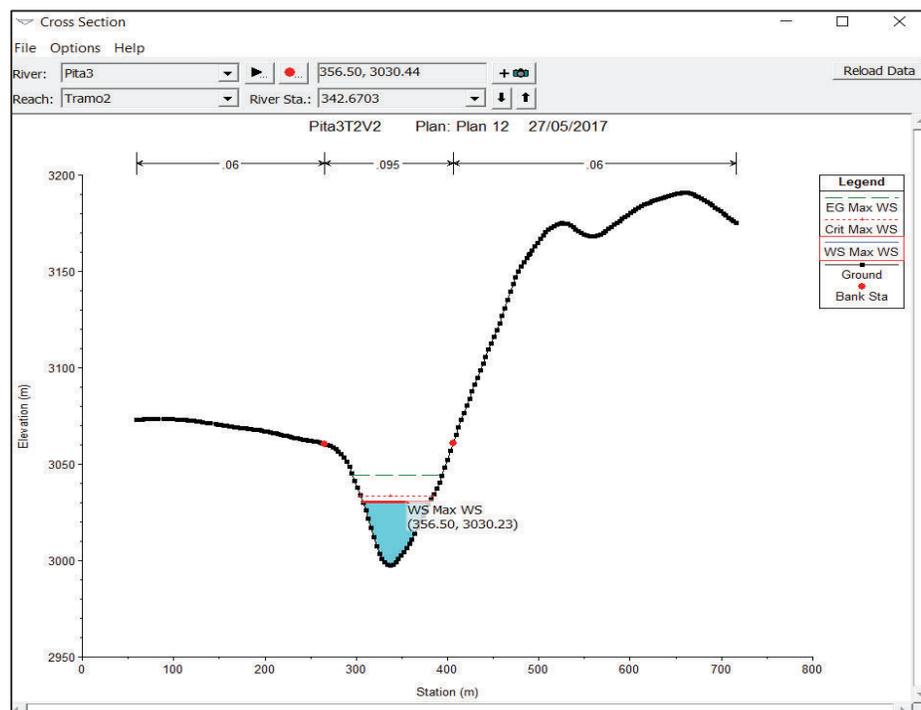
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.15: Sección transversal 365.668**



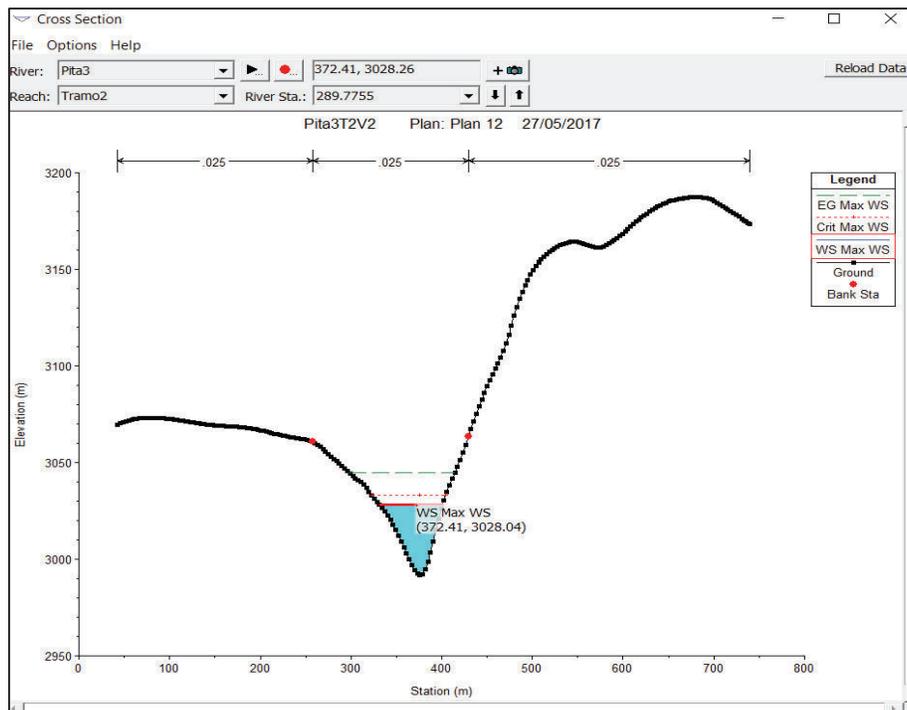
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.16: Sección transversal 342.6703**



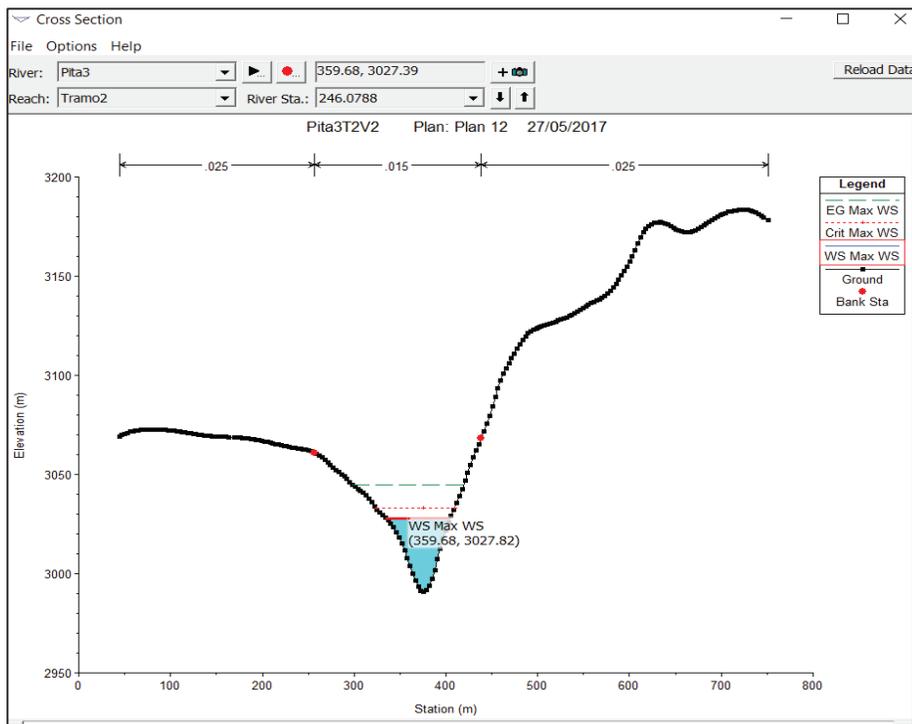
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.17: Sección transversal 289.7755**



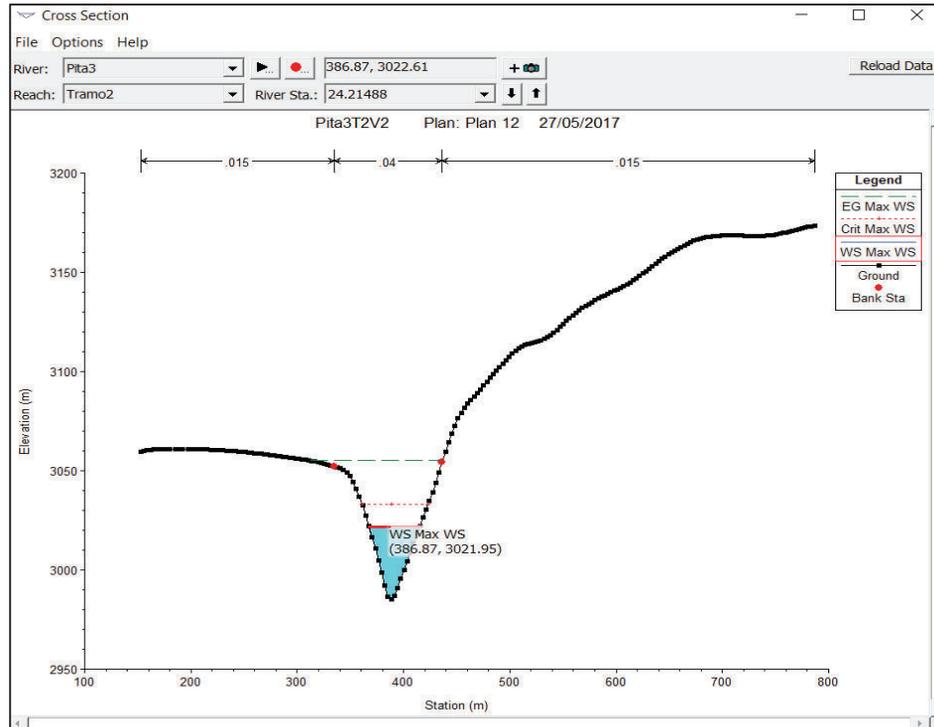
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.18: Sección transversal 246.0788**



ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A1.19: Sección transversal 24.21488**



ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 201

## **ANEXO 2**

**TATABLA DEL HIDROGRAMA DE LA SECCIÓN 54.59314  
DEL TRAMO PITA 3 DE LA MODELACIÓN  
UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE**

**TABLA A2.1: TABLA DEL HIDROGRAMA DE LA SECCIÓN 54.59314 DEL TRAMO PITA 3 DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NO PERMANENTE.**

<b>t (min)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>
1	300
2	122.41
3	565.7
4	2414.92
5	4112.03
6	5677.63
7	7201.34
8	8701.78
9	10193.99
10	11678.48
11	13157.06
12	14639.42
13	16096.29
14	17535.69
15	18974.32
16	20413.43
17	21851.49
18	23290.52
19	24143.53
20	23752.45
21	23102.7
22	22423.14
23	21740.5
24	21057.15
25	20373.81
26	19690.5

<b>t (min)</b>	<b>Q (m3/s)</b>
27	19007.71
28	18324.56
29	17641.7
30	16958.38
31	16275.2
32	15591.97
33	14910.03
34	14230.73
35	13556.96
36	12883.55
37	12209.36
38	11534.37
39	10860.84
40	10188.13
41	9515.63
42	8844.72
43	8173.44
44	7503.66
45	6835.76
46	6169.5
47	5505.57
48	4845.14
49	4187.67
50	3534.28
51	2889.01
52	2255.72
53	1642.19
54	1068.38
55	568.19

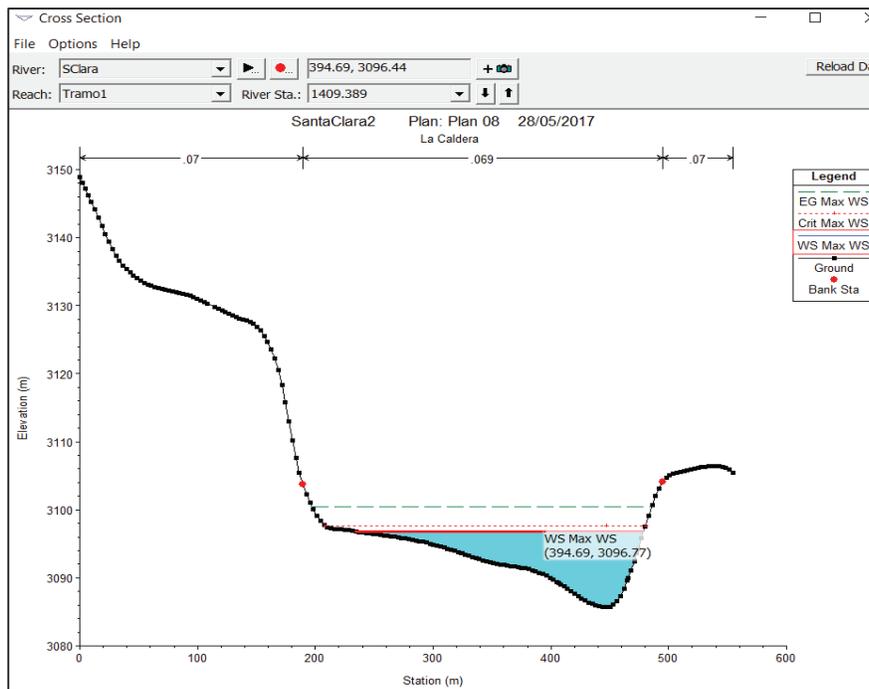
<b>t (min)</b>	<b>Q (m3/s)</b>
56	236.93
57	84.82
58	43.02
59	14.52
60	0.78

ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

### **ANEXO 3**

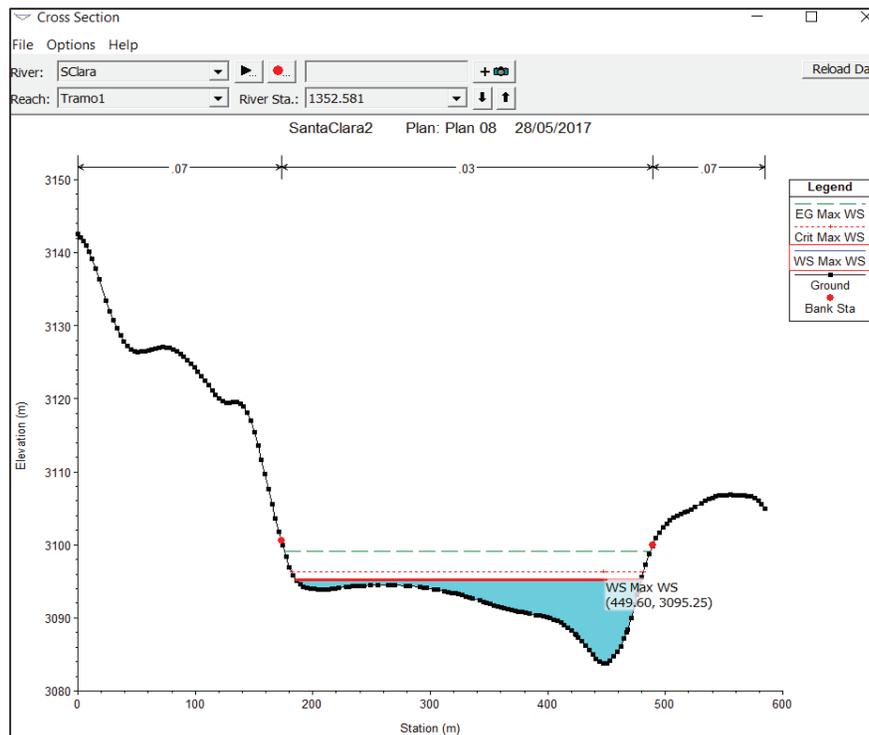
**SECCIONES TRANSVERSALES RESULTADO DE LA  
CALIBRACIÓN DE FLUJO NO PERMANENTE EN EL  
SOFTWARE HEC-RAS DEL SANTA CLARA**

**TABLA A3.1: Sección transversal 1409.389 (La Caldera)**



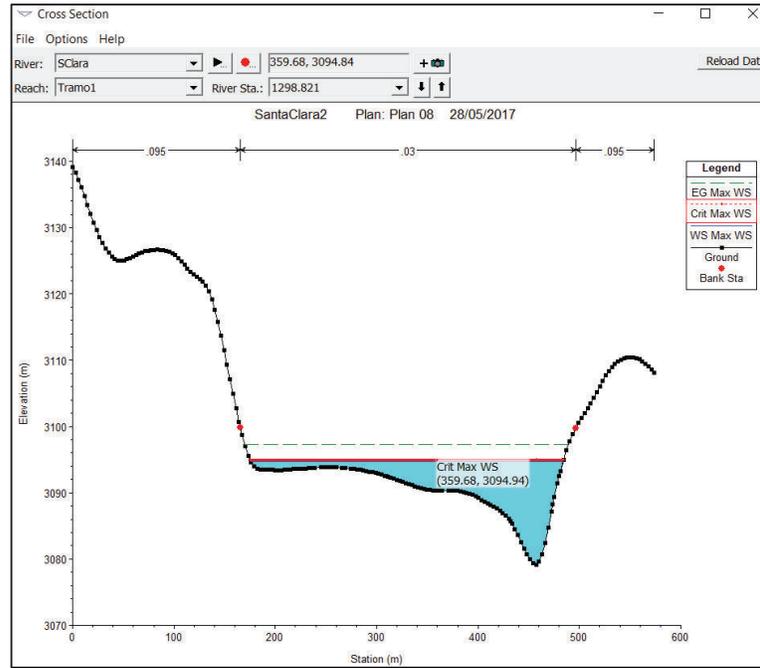
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.2: Sección transversal 1352.581**



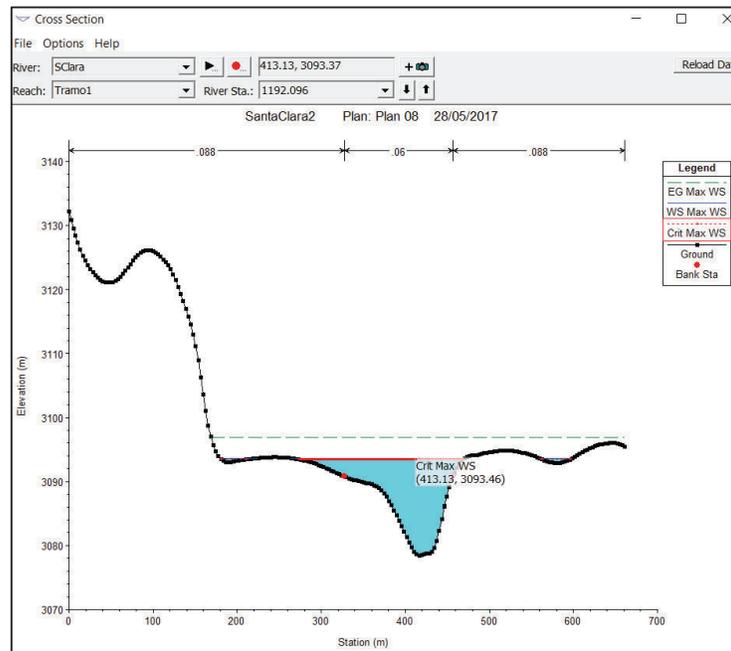
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.3: Sección transversal 1298.821**



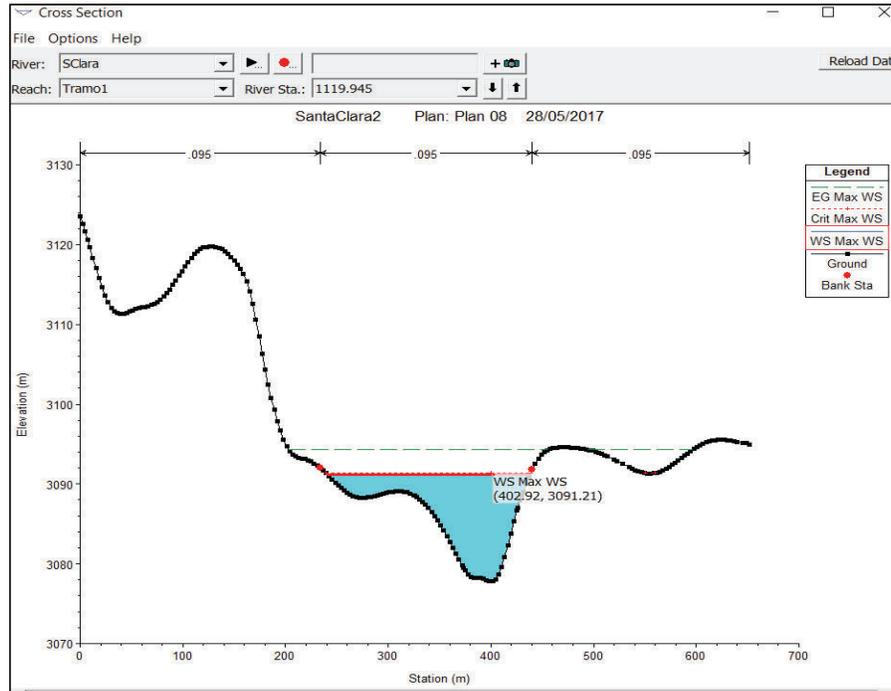
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.4: Sección transversal 1192.096**



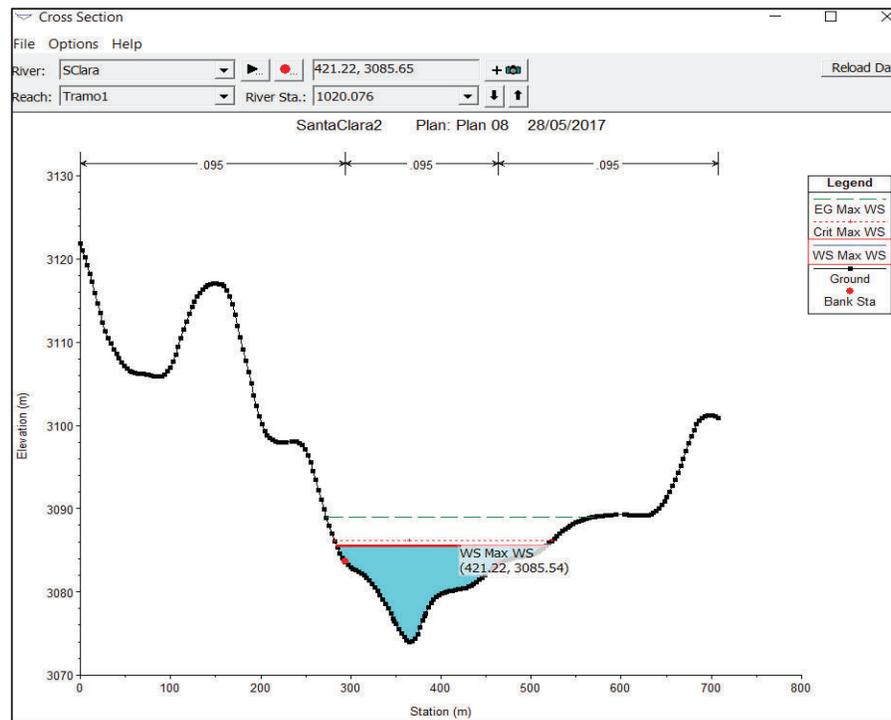
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.5: Sección transversal 1119.945**



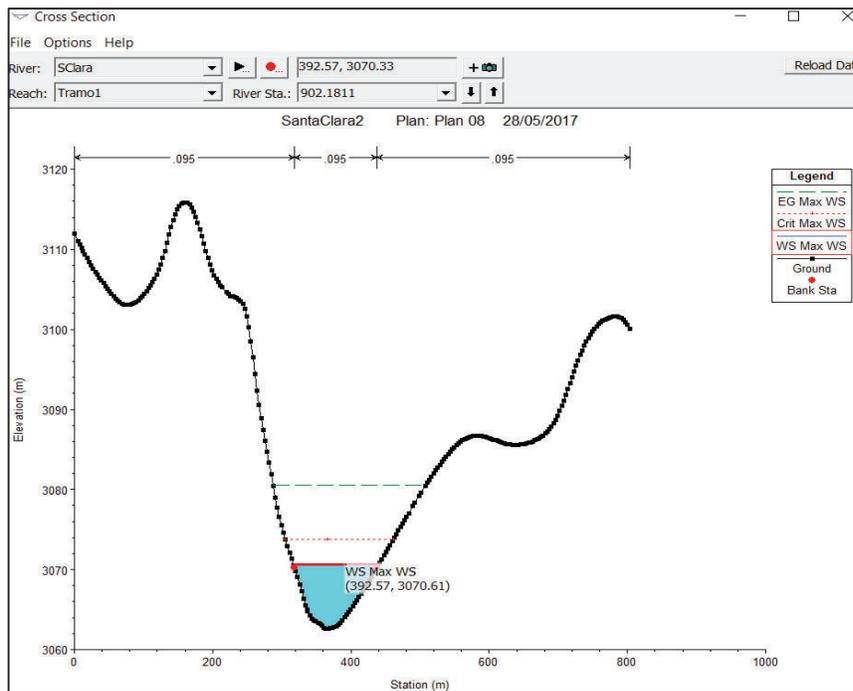
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.6: Sección transversal 1020.076**



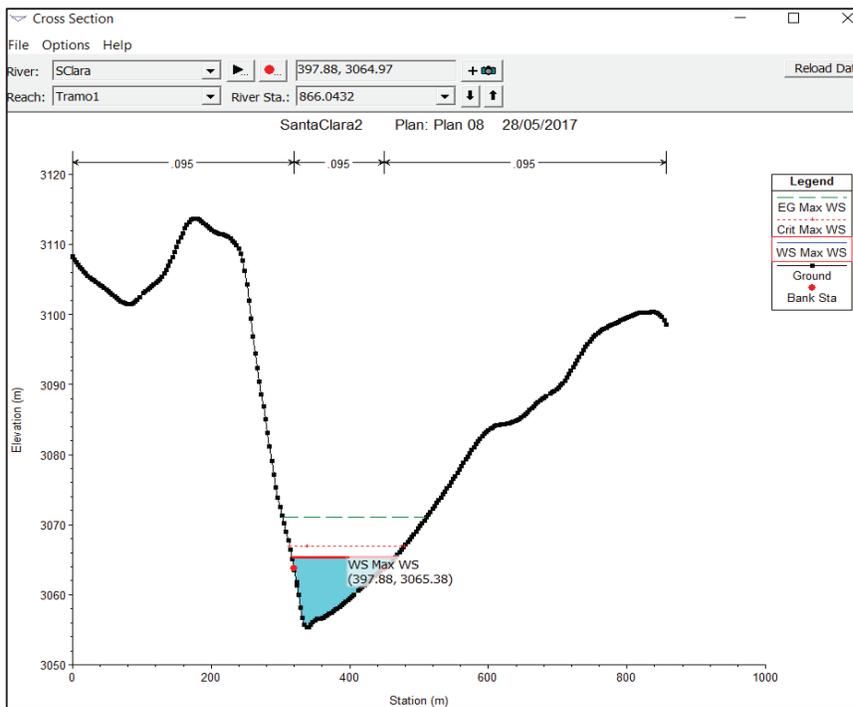
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.7 Sección transversal 902.1811**



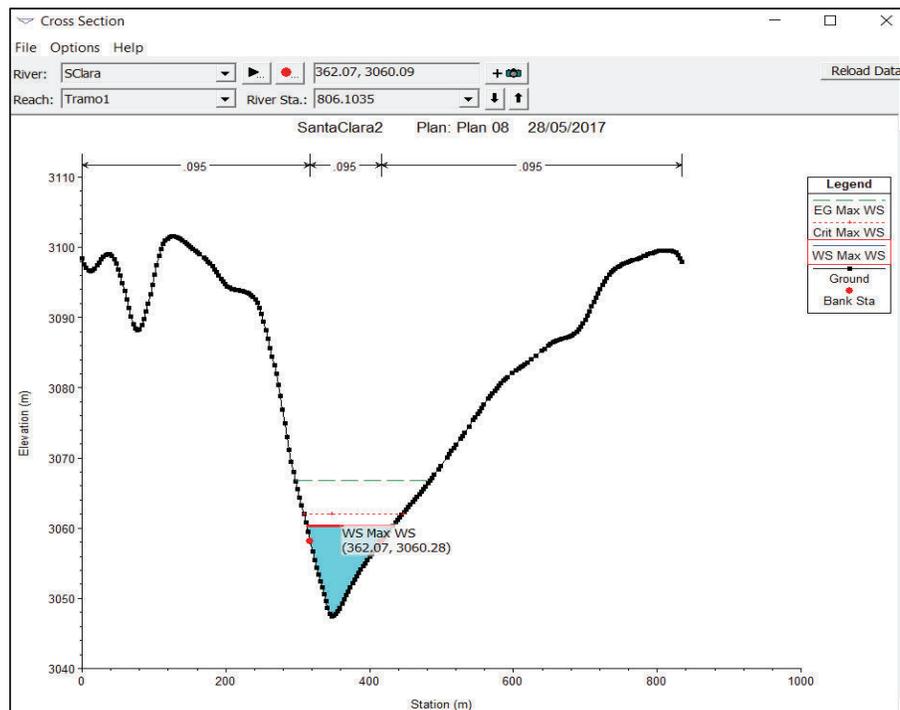
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.8: Sección transversal 866.0432**



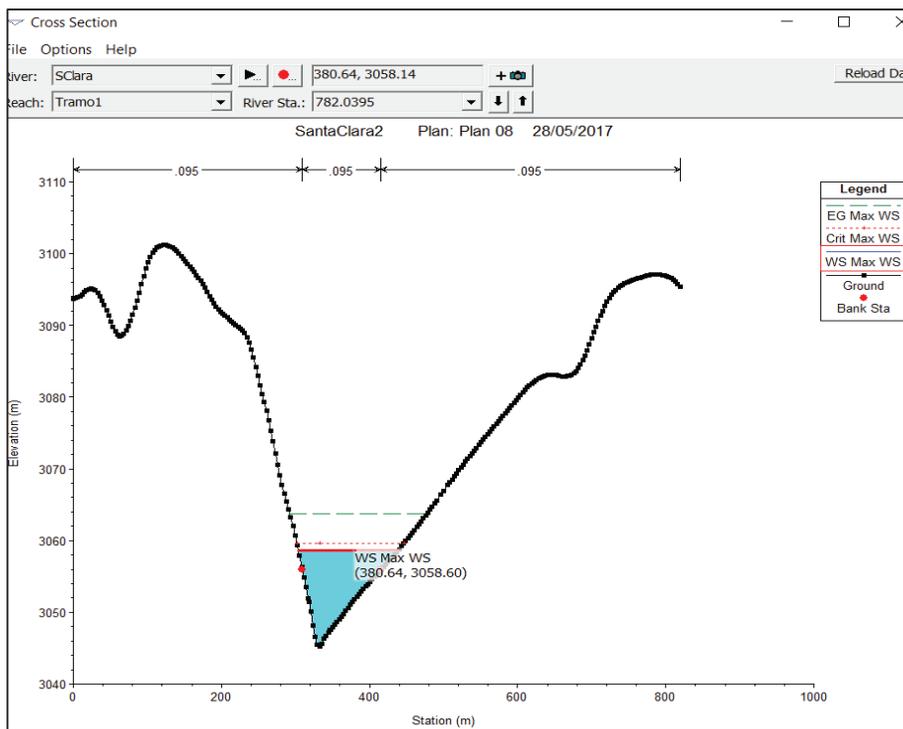
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.9: Sección transversal 806.1035**



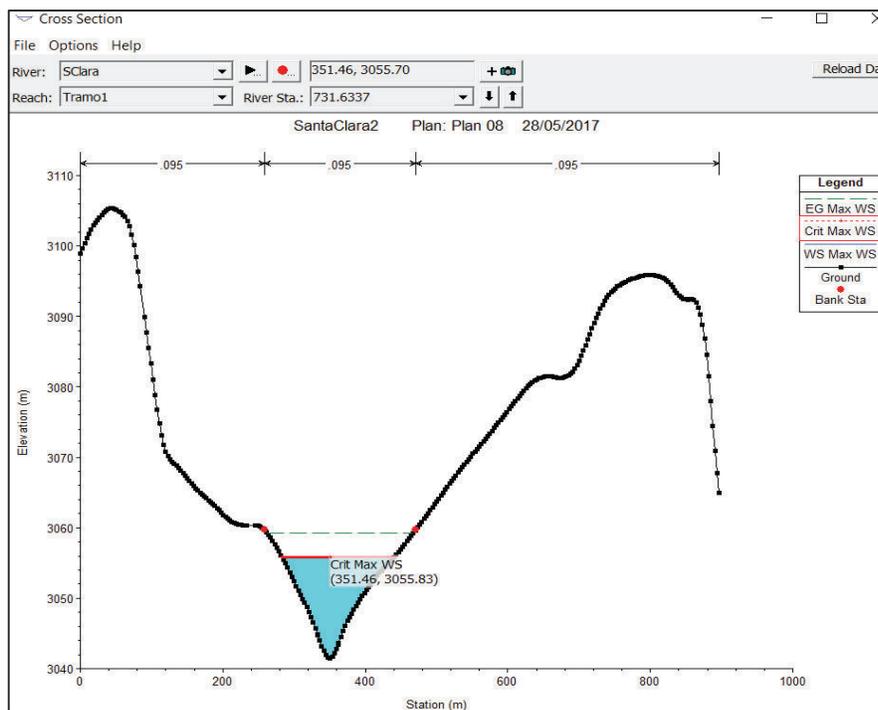
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.10: Sección transversal 782.0395**



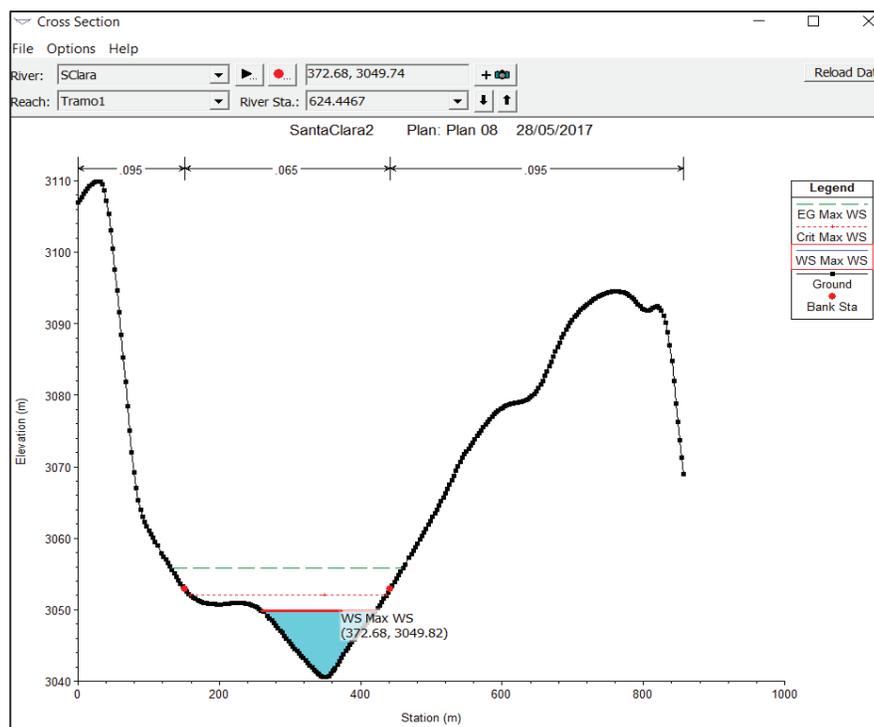
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.11: Sección transversal 731.6337**



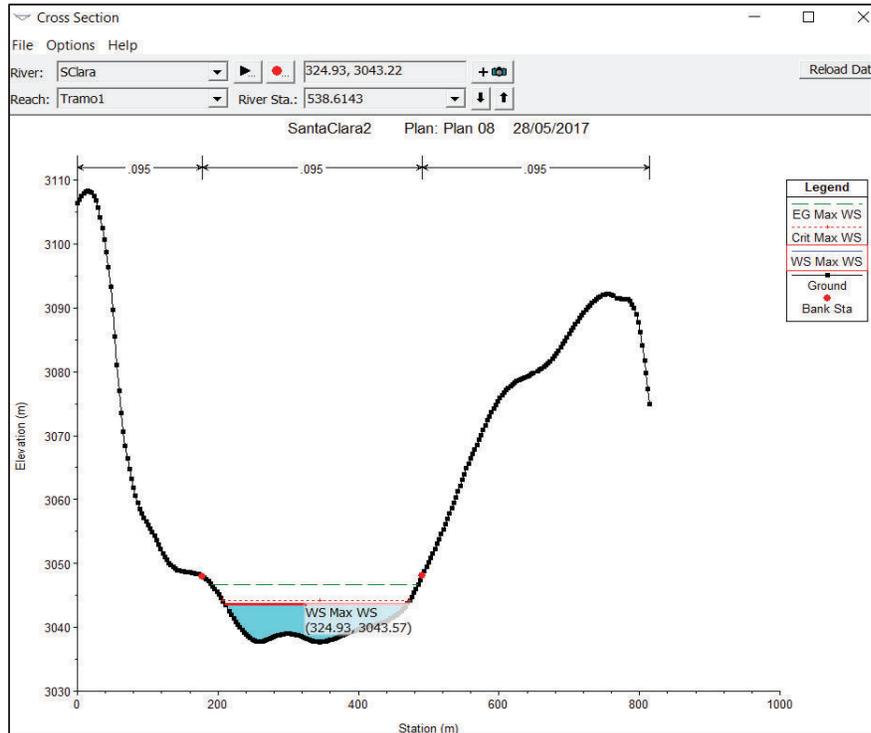
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.12: Sección transversal 624.4467**



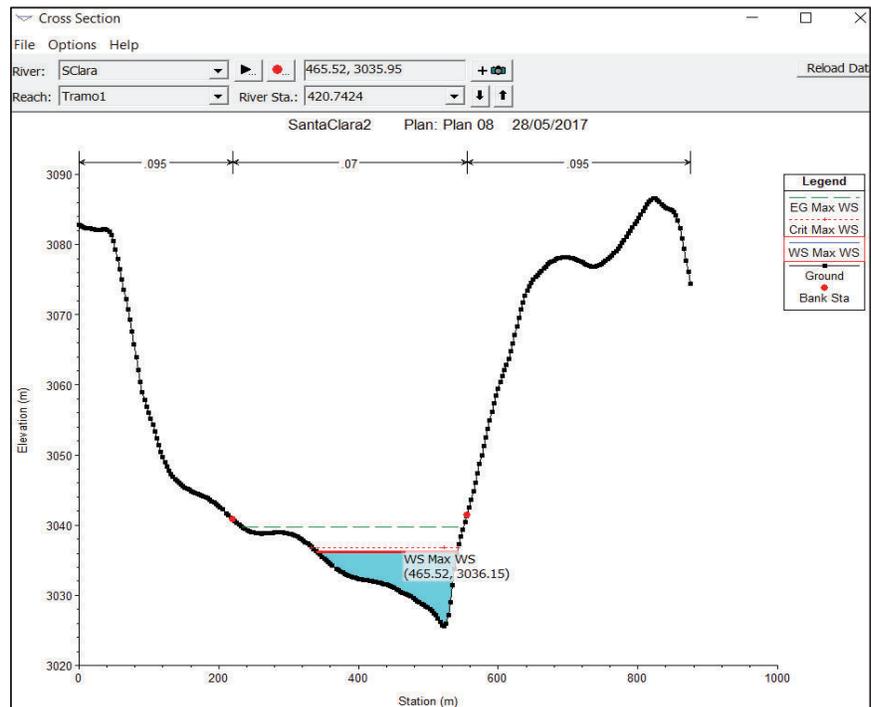
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.13: Sección transversal 538.6143**



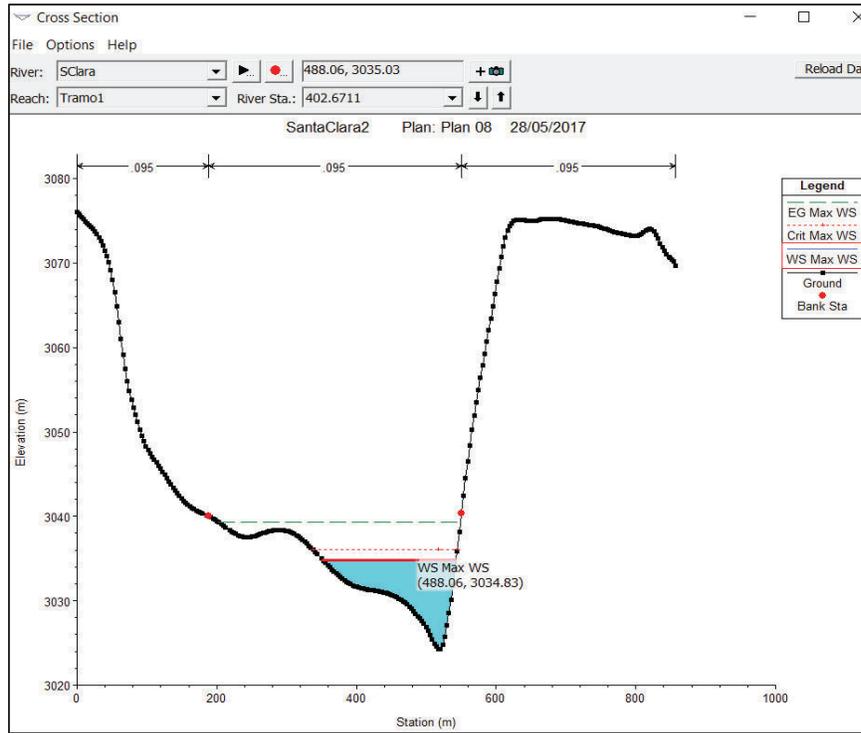
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.14: Sección transversal 420.7424**



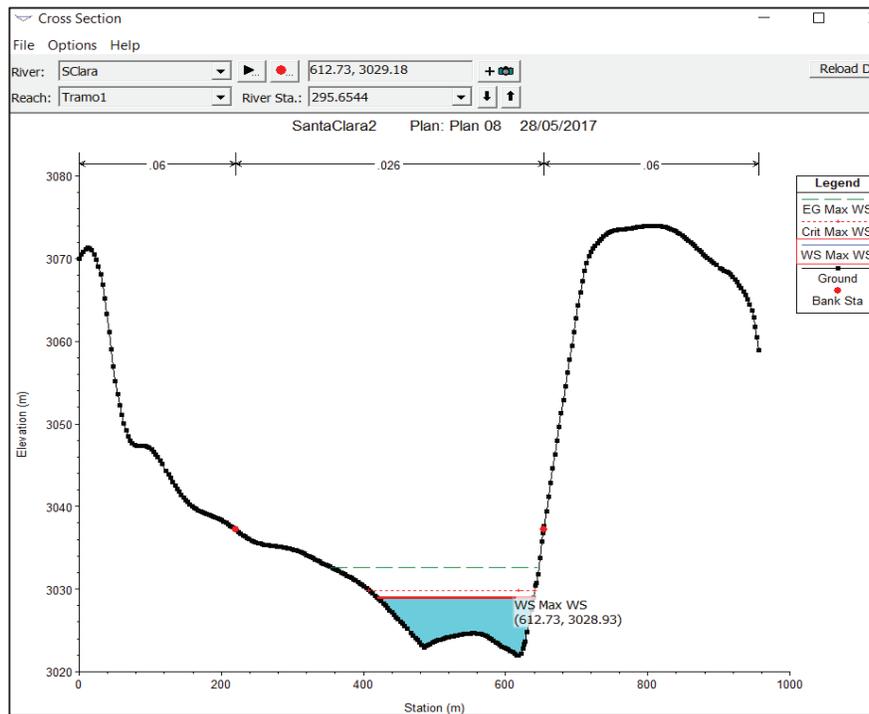
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.15: Sección transversal 402.6711**



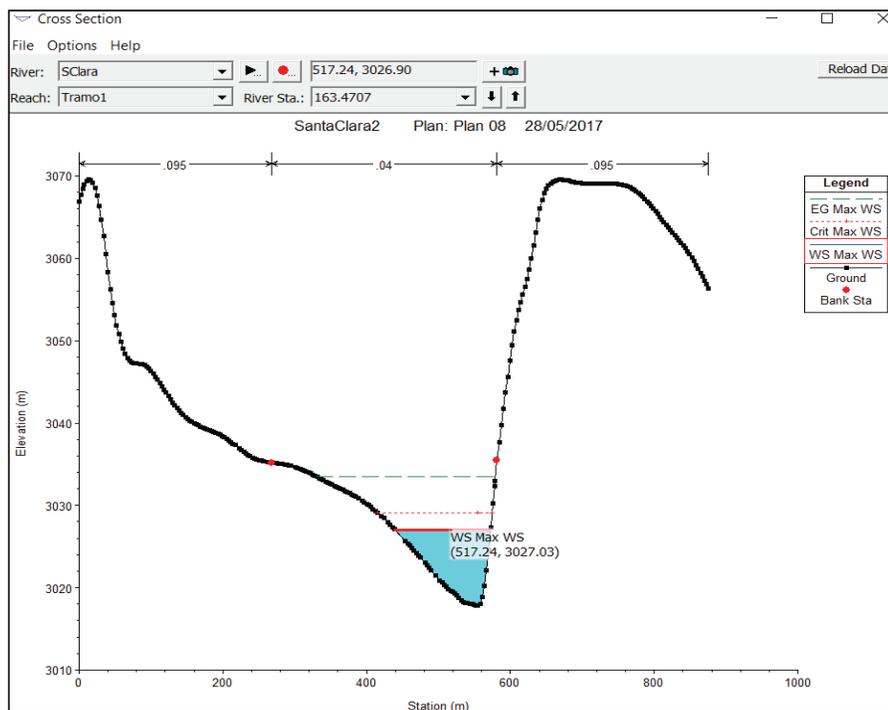
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.16: Sección transversal 295.6544**



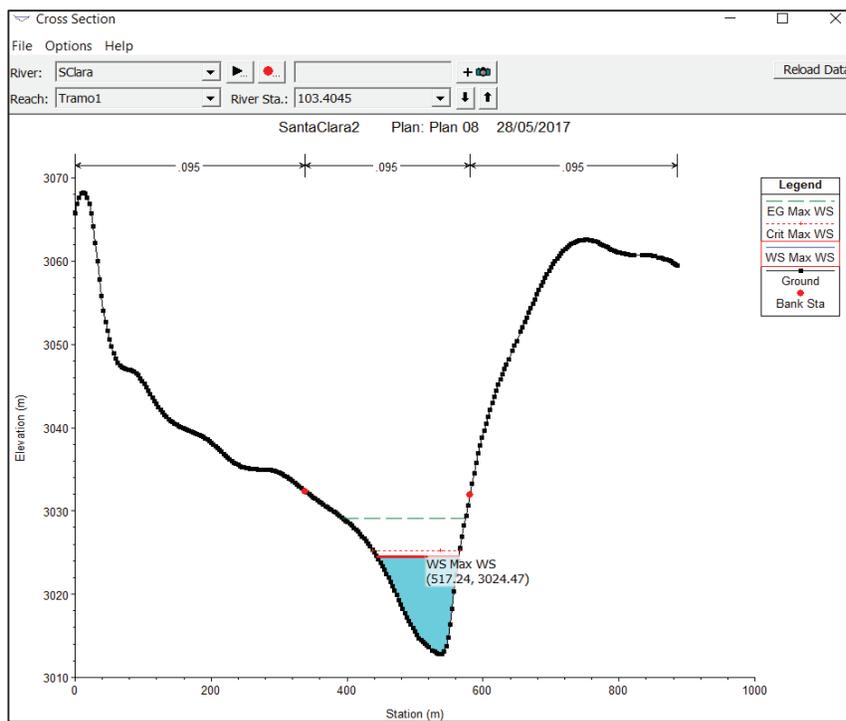
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.17: Sección transversal 163.4707**



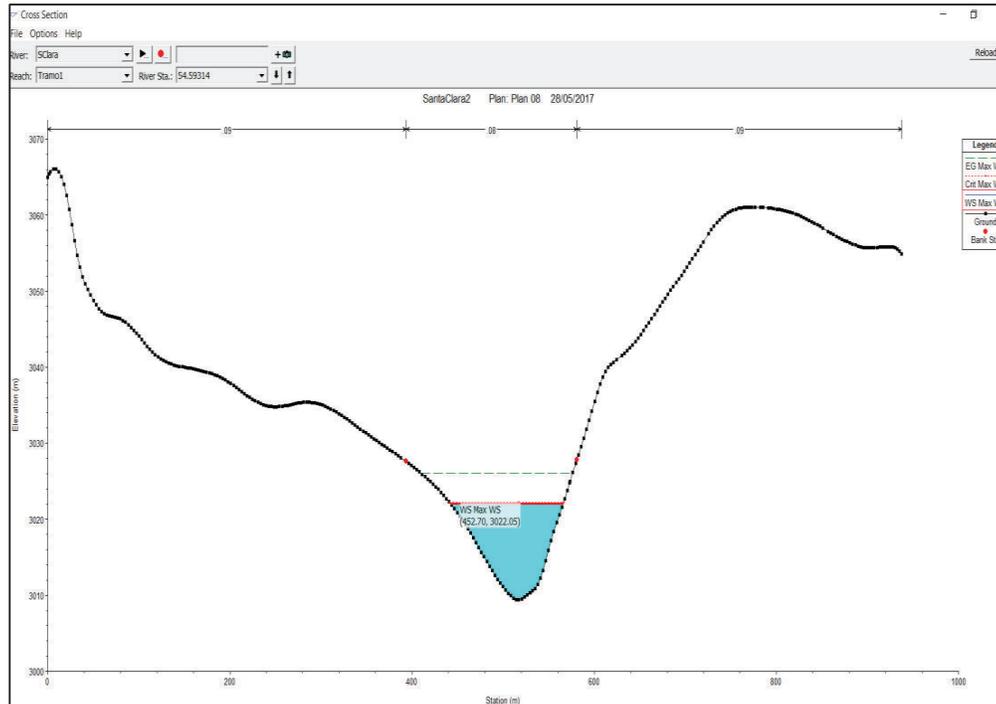
ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.18: Sección transversal 103.4045**



ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

**TABLA A3.19: Sección transversal 54.59314**



ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

## **ANEXO 4**

**TABLA DEL HIDROGRAMA DE SALIDA DEL RÍO PITA  
(TRAMO PITA 3) DE LA MODELACIÓN  
TRIDIMENSIONAL EN EL CFD FLOW-3D**

**TABLA A4.1: TABLA DEL HIDROGRAMA DE SALIDA DEL RÍO PITA (TRAMO PITA 3) DE LA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL EN EL CFD FLOW-3D.**

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>
16.943569	0
72.005997	0
143.98811	0
215.98917	0
288.0242	0
360.04987	0
431.99277	0
503.95728	0
576.04773	0
647.96149	0
719.9884	0
792.02893	0
864.02173	0
936.02545	0
1007.9737	7683.439
1080.0095	12120.958
1152.0135	9707.4805
1224.0227	14122.08
1296.0127	14950.118
1367.9935	14468.608
1439.9954	12670.4
1512.0176	13545.689
1583.985	12173.162
1656.011	11913.365
1727.9868	11205.268
1800.0076	15714.97
1871.9913	14569.579

1944.0359	13249.091
2015.9792	14907.909
2087.9893	16893.309
2160.0117	13592.294
2231.9917	14820.394
2303.9946	12843.646
2375.9617	12760.914
2448.0269	10223.692
2519.9556	11137.959
2592.0247	10111.124
2664.0471	10063.419
2736.041	7570.4463
2808.0022	7000.9849
2880.0498	6496.3735
2952.0247	5917.1792
3023.9534	4594.3711
3096.0427	3754.4915
3168.0137	3331.6777
3240.0046	2527.0789
3311.9932	2162.2092
3383.988	2298.8994
3455.9961	2241.6023
3528.01	2116.0557
3599.9495	848.46423
3671.9651	981.75055
3743.9722	857.81195
3815.9656	653.06592
3888.0317	659.24011
3960.0637	551.53839
4031.9453	506.41229

4103.9653	421.54791
4176.0303	318.6517
4247.9692	359.86594
4320.064	398.5517
4391.9878	437.5155
4464.0293	811.77393
4536.0132	887.34003
4607.9961	943.15143
4680	596.45459
4751.9434	167.53966
4823.9409	163.78595
4896.0371	81.058815
4968.0469	116.40217
5040.0029	90.703064
5111.9072	69.013634
5184.0396	76.215149
5255.9453	106.04658
5327.9492	68.924873
5400.042	108.21944
5472.0562	75.866081
5543.9497	139.40863
5616.0664	205.91803
5688.0718	59.582661
5760.0254	75.518929
5831.978	52.858662
5904.0239	36.058277
5975.9458	51.978859
6048.0249	71.164795
6119.9814	78.526474
6191.9561	47.40815

6263.9258	42.296448
6335.9609	62.749672
6407.9634	8.0621853
6479.9546	38.772274
6551.9814	13.885109
6624.0356	50.330246
6695.9478	3.9328613
6768.0723	42.957932
6840.0396	13.091388
6912.002	49.080658
6983.979	13.528675
7055.9404	11.693217
7128.0024	5.4619493
7200.0664	26.648817

ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017

## **ANEXO 5**

**TABLA DEL HIDROGRAMA DE SALIDA DEL RÍO SANTA CLARA (TRAMO SANTA CLARA) DE LA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL EN EL CFD FLOW-3D.**

**TABLA A5.1: TABLA DEL HIDROGRAMA DE SALIDA DEL RÍO SANTA CLARA (TRAMO SANTA CLARA) DE LA MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL EN EL CFD FLOW-3D.**

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Q (m3/s)</b>
16.944	0.000
72.006	0.000
143.988	0.000
215.989	0.000
288.024	0.000
360.050	0.000
431.993	0.000
503.957	0.000
576.048	0.000
647.961	0.000
719.988	0.000
792.029	0.000
864.022	0.000
936.025	0.000
1007.974	0.000
1080.010	0.000
1152.014	8099.989
1224.023	13604.805
1296.013	20676.770
1367.994	19807.689
1439.995	22377.111
1512.018	21659.908
1583.985	20157.600
1656.011	15315.370
1727.987	17421.918
1800.008	12944.622

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Q (m3/s)</b>
1871.991	11149.370
1944.036	10413.483
2015.979	4201.769
2087.989	2721.324
2160.012	5465.973
2231.992	3543.714
2303.995	6127.003
2375.962	2356.052
2448.027	1425.065
2519.956	1076.962
2592.025	419.733
2664.047	198.200
2736.041	169.849
2808.002	98.934
2880.050	72.264
2952.025	47.382
3023.953	30.327
3096.043	20.712
3168.014	14.404
3240.005	10.836
3311.993	7.558
3383.988	5.557
3455.996	4.340
3528.010	3.978
3599.950	3.114
3671.965	2.309
3743.972	1.792
3815.966	1.617
3888.032	1.322

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Q (m3/s)</b>
3960.064	1.052
4031.945	0.959
4103.965	0.815
4176.030	0.614
4247.969	0.611
4320.064	0.559
4391.988	0.420
4464.029	0.343
4536.013	0.288
4607.996	0.227
4680.000	0.181
4751.943	0.248
4823.941	0.173
4896.037	0.174
4968.047	0.139
5040.003	0.141
5111.907	0.174
5184.040	0.125
5255.945	0.107
5327.949	0.097
5400.042	0.087
5472.056	0.083
5543.950	0.071
5616.066	0.067
5688.072	0.055
5760.025	0.031
5831.978	0.051
5904.024	0.035
5975.946	0.056

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Q (m3/s)</b>
6048.025	0.055
6119.981	0.042
6191.956	0.029
6263.926	0.035
6335.961	0.027
6407.963	0.008
6479.955	0.017
6551.981	0.026
6624.036	0.009
6695.948	0.001
6768.072	0.017
6840.040	0.028
6912.002	0.004
6983.979	0.004
7055.940	0.053
7128.002	0.003
7200.066	0.004

ELABORACION: Diana Vilaña Beltrán, 2017