

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**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**

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

JAVIER ALEXANDER MÉNDEZ PADILLA

javiermendez1992@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. JORGE AUGUSTO TOAPAXI ÁLVAREZ, MSc.

jorge.toapaxi@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: Ing. XIMENA DEL ROCÍO HIDALGO BUSTAMANTE, MSc.

ximena.hidalgob@gmail.com

Quito, Febrero 2017

DECLARACIÓN

Yo, Javier Alexander Méndez Padilla, 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.

Javier Alexander Méndez Padilla

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Javier Alexander Méndez Padilla, bajo mi supervisión.

ING. JORGE TOAPAXI, MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a Dios por permitir que día a día sus planes para mi vida se vayan convirtiendo en una realidad, otorgarme todo aquello que me hace falta para cumplir mi propósito en la vida.

A ese pilar tan fundamental que es mi madre: La Señora María Elisa Padilla Espinosa, por ser quien me inspira a superarme, porque con sus enseñanzas y testimonio de vida va logrando por si sola que mis hermanos y Yo podamos ser cada vez mejores.

A las Sras. Janeth y Josefina de Baquero quienes, aún sin conocerme me brindaron su apoyo incondicional, gracias al cual hoy estoy cerca de conseguir un gran objetivo.

A todos y cada uno de mis profesores en especial al Msc. Jorge Toapaxi y a la Msc. Ximena Hidalgo quienes con sus consejos y observaciones han permitido que este trabajo tenga los mejores resultados.

A mis Abuelos, Hermanos, Tías y a toda mi familia y amigos quienes han constituido un apoyo fundamental para la consecución de mis sueños.

A todos mis más sinceros Agradecimientos.....

JAMP

DEDICATORIA

A Dios porque me ha dado la fortaleza y la entereza para superar aquellos obstáculos que no me dejaban avanzar.

A mi madre María Elisa Padilla, ese ángel a quien amo con Toda mi Alma.

A aquellos ángeles que me acompañan desde el cielo Danilo Padilla, Francisco Baquero, Celia Gudiño, Alamiro y Franklin Méndez.

A quienes tengo ese gran orgullo de llamar hermanos Dennis, Adriana y David.

A mis segundos padres Tarquino y Rosa Elena.

A quienes han sabido ser mis segundas madres Rocío, Yhobana, y Grisela.

A mi gran inspiración y compañera en mis momentos de tristeza y alegría Fernanda Cahuasqui.

Al grupo Juvenil JUMAE quienes han sido más que amigos una familia.

A todos aquellos con quienes tuve la dicha de compartir un instante de mi vida.....

JAMP.

CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
CONTENIDO	VI
INDICE DE TABLAS	XII
INDICE DE GRÁFICOS	XIV
RESUMEN	XXV
ABSTRACT	XXVI
PRESENTACIÓN.....	XXVII
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 ALCANCE.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
CAPÍTULO II.....	4
HISTORIA Y NATURALEZA ERUPTIVA DEL VOLCÁN COTOPAXI	4
2.1 GENERALIDADES DEL VOLCÁN COTOPAXI	4
2.2 HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN COTOPAXI	5
2.2.1 PERIODO PRE-HISTÓRICO	5
2.2.2 EL PERIODO HISTÓRICO	7
2.3 FENÓMENOS VOLCÁNICOS CARACTERÍSTICOS DEL COTOPAXI.	9

2.3.1 SISMOS VOLCÁNICOS.....	9
2.3.2 GASES VOLCÁNICOS	10
2.3.3 FLUJOS DE LAVAS.....	10
2.3.4 DOMOS DE LAVA	12
2.3.5 FLUJOS PIROCÁSTICOS	12
2.3.6 LLUVIA DE CENIZA Y PIROCLASTOS.....	14
2.3.7 FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS (LAHARES).....	14
2.3.8 AVALANCHAS DE ESCOMBROS.....	15
CAPÍTULO III.....	17
DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA DEL TRAMO.....	17
3.1 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA, MODELO DIGITAL DEL TERRENO	17
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO	18
3.3 DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS ERUPTIVOS.....	18
3.3.1 ESCENARIO 1: EVENTO PEQUEÑO (V.E.I= 1-2).....	19
3.3.2 ESCENARIO 2: EVENTO MODERADO (V.E.I=2-3).....	20
3.3.3 ESCENARIO 3: EVENTO GRANDE (V.E.I.= 3-4).....	22
3.3.4 ESCENARIO 4: EVENTO MUY GRANDE (V.E.I. \geq 4).....	23
3.4 ÁREAS Y VOLÚMENES DEL CASQUETE GLACIAR ASOCIADOS AL FLANCO NORTE.....	25
3.4.1. ESTIMACIÓN DEL ÁREA DEL GLACIAR DEL COTOPAXI	26
3.4.2 DEFINICIÓN DEL HIDROGRAMA DE ENTRADA AL TRAMO	28
3.5 CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LOS LAHARES EN EL TRAMO.	37
3.5.1 TIPOS DE FLUJOS.....	37
3.5.1.2 FLUJOS DE LODO (MUD FLOW)	37

3.5.1.3 FLUJOS HIPERCONCENTRADOS GRANULARES	38
3.5.1.4 FLUJOS DE ESCOMBROS (DEBRIS FLOW).....	39
3.6.1.5 TIPOS DE FLUJOS DE ESCOMBROS SEGÚN DISTINTOS AUTORES.....	41
3.6.2 MODELOS DE FLUIDO	43
3.6.3 CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LOS LAHARES EN EL TRAMO DE ESTUDIO	47
3.7 LEVANTAMIENTO DE CAMPO DE LOS VESTIGIOS DEL EVENTO ERUPTIVO DE 1877 EN EL TRAMO	51
3.7.1 CRITERIOS UTILIZADOS PARA ESCOGER LOS SITIOS DONDE SE REALIZARON LOS PERFILES.....	52
3.7.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO	52
3.7.3 ANÁLISIS DE LOS PERFILES REALIZADOS EN EL RÍO SANTA CLARA.....	53
CAPÍTULO IV.....	55
MODELACIÓN NÚMÉRICA UNIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES PRIMARIOS EN EL DRENAJE NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI	55
4.1 JUSTIFICACIÓN.....	55
4.2 GENERALIDADES DEL MODELO HIDRÁULICO DE SIMULACIÓN HEC-RAS	56
4.2.1 REFERENCIAS HIDRÁULICAS DEL FLUJO PERMANENTE EN HEC-RAS.....	57
4.2.2 REFERENCIAS HIDRÁULICAS DEL FLUJO NO PERMANENTE EN HEC-RAS.....	60
4.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES DEL EN EL TRAMO INICIAL DEL FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI.	63
4.2.1 TRAMOS MODELADOS.....	63
4.2.2 PROCESO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN UNIDIMENSIONAL	65

CAPÍTULO V.....	78
SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI EN EL SECTOR DE SANGOLQUI UTILIZANDO EL MODELO IBER.....	78
5.1 INTRODUCCIÓN AL MODELO NUMÉRICO IBER.....	78
5.1.1 MÓDULO HIDRODINÁMICO	79
5.1.2 MÓDULO DE TURBULENCIA	81
5.1.3 ESQUEMAS NUMÉRICOS	87
5.1.4 LIMITACIONES DE IBER.....	88
5.1.5 VENTAJAS DE IBER.....	88
5.2 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y CONDICIONES DE CONTORNO....	89
5.2.1 CONDICIONES DE ENTRADA.....	89
5.2.2 CONDICIONES DE SALIDA	90
5.2.3 CONDICIONES INICIALES	90
5.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMERICO CON LOS DATOS DEL EVENTO ERUPTIVO DE 1877.	90
5.3.1 PLAN DE CORRIDAS DEL MODELO.....	90
5.3.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	91
5.3.3 DETERMINACION DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD	93
5.3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS	95
5.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LA MEZCLA AGUA SÓLIDOS EN LA ZONA CONSOLIDADA DE SANGOLQUI PARA EL ESCENARIO 3 DEL VOLCÁN COTOPAXI, CON VOLÚMENES DEL GLACIAR DEL 2011.....	95
5.4.1 PLAN DE CORRIDAS DEL MODELO.	95
5.4.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	98

5.4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	102
5.4.4	CONCLUSIONES	109
CAPÍTULO VI.....		113
ANÁLISIS COMPARATIVO CON SIMULACIONES REALIZADAS EN EL TRAMO DE ESTUDIO		113
6.1 MAPA DE AMENAZAS DEL VOLCÁN COTOPAXI ZONA NORTE		113
6.1.1.	ELABORACIÓN DEL MAPA DE AMENAZAS DEL VOLCÁN COTOPAXI 2004	114
6.1.2.	BREVE DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO EN 2015 PARA LA REEDICIÓN DEL MAPA DE AMENAZAS DEL VOLCÁN COTOPAXI	115
6.2 COMPARACIÓN ENTRE EL MAPA DE AMENAZAS DEL VOLCÁN COTOPAXI Y LA MODELACIÓN NUMERICA BIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI EN EL RÍO SANTA CLARA DENTRO DE LA ZONA CONSOLIDADA DE SANGOLQUI.....		118
6.3 VALIDACIÓN DEL MODELO IBER PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE LAHARES EN ZONAS CON EMINENTE FLUJO BIDIMENSIONAL.		122
6.3.1	UTILIDADES DEL MODELO IBER	123
CAPÍTULO VII.....		130
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN		130
7.1 CONCLUSIONES		130
7.1.1	SOBRE LA HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN COTOPAXI	130
7.1.2	SOBRE LA METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA	130
7.1.3	SOBRE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL	131
7.1.4	SOBRE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL	133
7.2 RECOMENDACIONES		136
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		140

ANEXOS	144
ANEXO No 1.....	145
A1.1 SECCIONES DE CALIBRACIÓN RÍO EL SALTO	146
A1.2 SECCIONES DE CALIBRACIÓN RÍO EL PITA 1.....	147
A1.3 SECCIONES DE CALIBRACIÓN RÍO PITA 2	148
A1.4 SECCIONES DE CALIBRACIÓN RÍO SANTA CLARA	148
A1.5 COORDENADAS DE LAS SECCIONES CARACTERÍSTICAS OCUPADAS EN LA SIMULACIÓN UNIDIMENSIONAL.....	150
ANEXO No 2.....	152
A2.1 HIDROGRAMAS DE ENTRADA Y SALIDA DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL EN CADA UNO DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO (VOLUMEN 2011).....	153
A2.2 HIDROGRAMAS DE ENTRADA Y SALIDA DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL EN CADA UNO DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO (VOLUMEN 1976).....	161
ANEXO No 3.....	169
A3.1 GENERACIÓN DE DATOS	170
A3.1.1 PASOS PARA LA GENERACIÓN DEL DEM EN FORMATO ASCII	170
A3.1.2 PREPROCESO DE IBER.....	172
ANEXO No 4.....	179
A4.1 MAPA DE COTAS MÁXIMAS DE AGUA EVENTO 1877	180

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 TABLA NO. 2.1: SÍNTESIS DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCÁN COTOPAXI EN LOS ÚLTIMOS 5000 AÑOS	16
TABLA 2 TABLA NO 3.1: SÍNTESIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CADA UNO DE LOS ESCENARIOS DEFINIDOS	25
TABLA NO 3.2: NOMBRE DE LOS GLACIARES CON LAS ÁREAS RESPECTIVAS EN M ² EN LOS AÑOS 1976, 1997, 2006 Y 2011.....	28
TABLA NO 3.3: ÁREAS APORTANTES A LOS DRENAJES DEL FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI.	30
TABLA NO 3.4: VOLÚMENES DE GLACIAR APORTANTES A LOS DRENAJES DEL FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI (ESCENARIO 3).....	31
TABLA NO 3.5: VOLÚMENES DE AGUA APORTANTES A LOS DRENAJES DEL FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI (ESCENARIO 3).....	31
TABLA NO 3.6: VOLÚMENES DE LAHAR APORTANTES A LOS DRENAJES DEL FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI (ESCENARIO 3).....	32
TABLA NO 3.7: CAUDALES PICO DE LAHAR EN LOS DRENAJES INICIALES DE LOS RÍOS PITA Y SALTO (ESCENARIO 3).....	33
TABLA NO 3.8: CAUDALES DE CALIBRACIÓN PROPUESTOS PARA LOS RÍOS QUE CONFORMAN EL DRENAJE NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI.	33
TABLA NO 3.9 A: CLASIFICACIÓN SEGÚN COSTA (1988).....	41
TABLA NO 3.9 B: CLASIFICACIÓN SEGÚN COSTA (1988) CONTINUACIÓN. .	41
TABLA NO 3.10 .MODELOS DE FLUIDO DE ACUERDO CON EL TIPO DE FLUJO FUENTE: SUÁREZ 2001.....	50

TABLA NO 3.11. CARACTERÍSTICAS DE LOS PERFILES LEVANTADOS PARA QUE EL LAHAR DE 1877 A LO LARGO DEL CURSO NATURAL DEL RÍO SANTA CLARA	54
TABLA NO 4.1. CORRECCIONES RECOMENDADAS PARA PROFUNDIDADES DE AGUA EN PENDIENTES ELEVADAS DETERMINADAS CON HEC-RAS ...	60
TABLA NO 4.2. VALORES DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD N CALIBRADOS EN LA SIMULACIÓN UNIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES EN EL RÍO SANTA CLARA	69
TABLA NO 5.1. CONDICIONES DE CONTORNO IMPLEMENTADAS EN IBER81	
TABLA NO 5.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS OBTENIDOS EN LA SECCIÓN SANGOLQUÍ - EJIDO	95
TABLA NO 5.3. PARÁMETROS SIGNIFICATIVOS DE LOS HIDROGRAMAS DE SALIDA GENERADOS EN LA MODELACIÓN BIDIMENSIONAL (PREPARACIÓN PERSONAL).....	109
TABLA NO A1.1. COORDENADAS DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES CARACTERÍSTICAS UTILIZADAS EN LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL EN SISTEMA UTM WGS84-17S.....	150

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO NO 2.1: CRÁTER DEL VOLCÁN COTOPAXI.....	4
GRÁFICO NO 2.2: FOTOGRAFÍA AÉREA DE UNA COLADA DE LAVA QUE DESCENDIÓ POR EL FLANCO NOR OESTE DEL COTOPAXI HASTA LA ZONA DE LIMPIOPUNGU.	11
GRÁFICO NO 2.3: FOTOGRAFÍA DE FLUJOS PIROCLÁSTICOS DESCENDIENDO POR LOS FLANCOS DEL VOLCÁN MAYÓN (FILIPINAS) DURANTE UNA ERUPCIÓN EN SEPTIEMBRE DE 1984.....	13
GRÁFICO NO 3.1: MODELO DIGITAL DE TERRENO CON RESOLUCIÓN ESPACIAL DE 3M.....	17
GRÁFICO NO 3.2: ESQUEMA DEL ESCENARIO 1 PARA EL CASO DE UNA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI.	20
GRAFICO NO 3.3: ESQUEMA DEL ESCENARIO 2 PARA EL CASO DE UNA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI.	22
GRÁFICO NO 3.4: ESQUEMA DEL ESCENARIO 3 PARA EL CASO DE UNA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI	23
GRÁFICO NO 3.5: ESQUEMA DEL ESCENARIO 4 PARA EL CASO DE UNA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI.	24
GRÁFICO NO 3.6: MODELO DIGITAL DE TERRENO CON LOS CONTORNOS PARA EL GLACIAR COTOPAXI.	27
GRÁFICO NO 3.7: FORMA CARACTERÍSTICA DEL HIDROGRAMA; EN LA CUAL TP= TIEMPO EN EL QUE SE ALCANZA EL CAUDAL PICO (QP)	29
GRÁFICO NO 3.8: REPRESENTACIÓN DEL VOLUMEN CONTENIDO EN UN HIDROGRAMA.....	32

GRÁFICO NO 3.9: HIDROGRAMA DE ENTRADA RÍO SALTO 1 VOLUMEN 1976 34

GRÁFICO NO 3.10: HIDROGRAMA DE ENTRADA RÍO PITA 1 VOLUMEN 1976 34

GRÁFICO NO 3.11: HIDROGRAMA DE ENTRADA RÍO SALTO 1 VOLUMEN 2011 35

GRÁFICO NO 3.12: HIDROGRAMA DE ENTRADA RÍO PITA 1 VOLUMEN 2011 35

GRÁFICO NO 3.13: ESQUEMA DE UN FLUJO HIPERCONCENTRADO 39

GRÁFICO NO 3.14: ESQUEMA DE UN FLUJO DE ESCOMBROS (DEBRIS FLOW) 40

GRÁFICO NO 3.15: CLASIFICACIÓN DE UN FLUJO DE ESCOMBROS SEGÚN COUSSOT 1988..... 42

GRÁFICO NO 3.16: CLASIFICACIÓN DE UN FLUJO DE ESCOMBROS SEGÚN SUÁREZ 2001..... 42

GRÁFICO NO 3.17: DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES PARA DIFERENTES TIPOS DE FLUIDO, APLICADO A FLUJOS Y AVALANCHAS DE TIERRA..... 46

GRÁFICO NO 3.18: COMPARACIÓN DE LOS CAUDALES OBTENIDOS PARA LAS DIFERENTES PROFUNDIDADES DE ACUERDO CON LOS MODELOS DE MANNING Y DE FLUJO DILATANTE 47

GRÁFICO NO 3.19A: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GRANO PARA LAS MUESTRAS EN LA ZONA PROXIMAL..... 48

GRÁFICO NO 3.19B: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GRANO PARA LAS MUESTRAS EN LA ZONA DISTAL..... 48

GRÁFICO NO 3.20: CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS SEGÚN EL TAMAÑO DE GRANO Y SORTEO.....	49
GRÁFICO NO 3.21: LEVANTAMIENTO DE LOS VESTIGIOS DEL LAHAR DE 1877	51
GRÁFICO NO 3.22: SUBTRAMOS EN EL CURSO NATURAL DEL RÍO SANTA CLARA	53
GRÁFICO NO 4.1: ESQUEMA DE FLUJO UNIDIMENSIONAL.....	55
GRÁFICO NO 4.2: REPRESENTACIÓN DE LOS TÉRMINOS DE LA ECUACIÓN DE ENERGÍA	58
GRÁFICO NO 4.3: VOLUMEN DE CONTROL ELEMENTAL PARA LA DERIVACION DE LA ECUACION DE CONTINUIDAD Y MOMENTO.....	61
GRÁFICO NO 4.4: VISTA EN PLANTA DE LA GEOMETRÍA UTILIZADA PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENCIONAL EN EL CAUCE DEL RÍO SANTA CLARA 3 EN ARC GIS.....	66
GRÁFICO NO 4.5: VISTA EN PLANTA DE LA GEOMETRÍA DEPURADA UTILIZADA PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENCIONAL EN EL CAUCE DEL RÍO SANTA CLARA 3 EN HEC-RAS.....	66
GRÁFICO NO 4.6: ANÁLISIS DEL FLUJO PERMANENTE	68
GRÁFICO NO 4.7: PERFIL LONGITUDINAL FLUJO PERMANANTE.....	69
GRÁFICO NO 4.8: VENTANA DE SIMULACIÓN CON RÉGIMEN NO PERMANENTE DEL FLUJO DE LAHARES DEL COTOPAXI EN EL CAUSE DEL RÍO SANTA CLARA 3	71
GRÁFICO NO 4.9: PARAMETROS RECOMENDADOS EN LA TESIS DE AHMED HAMAD PARA LA ESTABILIDAD DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA CON RÉGIMEN NO PERMANENTE UTILIZANDO EL MODELO HEC RAS.	72

GRÁFICO NO 4.10A. PERFIL LONGITUDINAL PARA FLUJO NO PERMANENTE INICIO DE LA SIMULACIÓN.....	73
GRÁFICO NO 4.10 B. PERFIL LONGITUDINAL PARA FLUJO NO PERMANENTE AL FINAL DE LA SIMULACIÓN.....	73
GRÁFICO NO 4.11A. VISTA TRIDIMENSIONAL DEL TRANSITO DEL LAHAR EN EL RÍO SANTA CLARA 3 PARA FLUJO NO PERMANENTE AL INICIO DE LA SIMULACIÓN.....	74
GRÁFICO NO 4.11B. VISTA TRIDIMENSIONAL DEL TRANSITO DEL LAHAR EN EL RÍO SANTA CLARA 3 PARA FLUJO NO PERMANENTE AL FINAL DE LA SIMULACIÓN.....	75
GRÁFICO NO 4.12. HIDROGRAMA DE SALIDA DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES PRIMARIOS DEL VOLCAN COTOPAXI VOLUMEN 2011 EN LA SECCIÓN SANGOLQUI-EJIDO.	76
GRÁFICO NO 4.13. HIDROGRAMA DE SALIDA DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES PRIMARIOS DEL VOLCAN COTOPAXI VOLUMEN 1976 EN LA SECCIÓN SANGOLQUI-EJIDO	77
GRÁFICO NO 5.1. EJEMPLO DE MALLA NO ESTRUCTURADA FORMADA POR ELEMENTOS TRIANGULARES.	88
GRÁFICO NO 5.2. VENTANA DE INGRESO DE CONDICION DE ENTRADA AL MODELO IBER EN LA SECCIÓN SANGOLQUI -EJIDO.....	89
GRÁFICO NO 5.3. MAPA DE CALADOS MÁXIMOS DEL MODELO CALIBRADO	91
GRÁFICO NO 5.4. MAPA DE VELOCIDADES DEL MODELO CALIBRADO	92
GRÁFICO NO 5.5. MAPA DE NÚMEROS DE FROUD DEL MODELO CALIBRADO	92

GRÁFICO NO 5.6. MAPA DE COTAS DE ENERGÍA DEL MODELO CALIBRADO	93
GRÁFICO NO 5.7. INGRESO DEL TAMAÑO DE SUPERFICIES DE LA MALLA PRIMERA CORRIDA	96
GRÁFICO NO 5.8 INGRESO DEL TAMAÑO DE SUPERFICIES DE LA MALLA SEGUNDA CORRIDA	97
GRÁFICO NO 5.9 ASIGNACIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA AL MODELO NUMÉRICO.....	98
GRÁFICO NO 5.10 MAPA DE CALADOS CON MALLA DE 9M*9M , SIN MODELO DE TURBULENCIA	99
GRÁFICO NO 5.11 MAPA DE VELOCIDADES CON MALLA DE 9M*9M, SIN MODELO DE TURBULENCIA.....	99
GRÁFICO NO 5.12 MAPA DE CALADOS CON MALLA DE 6M*6M, SIN MODELO DE TURBULENCIA	100
GRÁFICO NO 5.13 MAPA DE VELOCIDADES CON MALLA DE 6M*6M, SIN MODELO DE TURBULENCIA.....	100
GRÁFICO NO 5.14 MAPA DE CALADOS CON MALLA DE 6M*6M, SIN MODELO DE TURBULENCIA	101
GRÁFICO NO 5.15 MAPA DE CALADOS CON MALLA DE 6M*6M, SIN MODELO DE TURBULENCIA	101
GRÁFICO NO 5.16 PROPIEDADES DEL EQUIPO DE COMPUTO UTILIZADO	102
GRÁFICO NO 5.17 VENTANA DE INICIO CON MODO A PRUEBA DE FALLOS EN IBER.....	103

GRÁFICO NO 5.18 VENTANA DE INGRESO DE NÚMERO DE PROCESADORES CON LOS CUALES SE EJECUTARÁ EL CÁLCULO.....	104
GRÁFICO NO 5.19 HIDROGRAMA DE SALIDA GENERADO APARTIR DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL EN EL SECTOR DE SANGOLQUI CON UN MALLADO DE 9M*9M.....	107
GRÁFICO NO 5.20 HIDROGRAMA DE SALIDA GENERADO APARTIR DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL EN EL SECTOR DE SANGOLQUI CON UN MALLADO DE 6M*6M.....	107
GRÁFICO NO 5.21 HIDROGRAMA DE SALIDA GENERADO APARTIR DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL EN EL SECTOR DE SANGOLQUI CON UN MALLADO DE 6M*6M. Y MODELO DE TURBULENCIA.....	108
GRÁFICO NO 6.1 COMPARACION DE LAS ZONAS DE AMENAZA POR LAHAR ENTRE MAPAS 2004 Y 2016	116
GRÁFICO NO 6.2 MAPA DE AMENAZAS VOLCÁN COTOPAXI ZONA NORTE.	117
GRÁFICO NO 6.3. MAPA DE INUNDACIÓN GENERADO EN EL MODELO NUMÉRICO PARA EL EVENTO DE 1877	118
GRÁFICO NO 6.4. MAPA DE AMENAZAS DEL VOLCAN COTOPAXI 2016 EN LA ZONA CONSOLIDADA DE SANGOLQUÍ	119
GRÁFICO NO 6.5. COMPARACIÓN MAPA DE AMENAZAS DEL VOLCÁN COTOPAXI Y SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL EN EL SECTOR DE SAGOLQUÍ.....	120
GRÁFICO NO 6.6. VISUALIZACIÓN DE LAS VELOCIDADES EN X AL FINAL DE LA SIMULACIÓN.....	124
GRÁFICO NO 6.7. VISUALIZACIÓN DE LAS VELOCIDADES EN Y AL FINAL DE LA SIMULACIÓN.....	124

GRÁFICO NO 6.8. VELOCIDADES MEDIAS AL FINAL DE LA SIMULACIÓN..	125
GRÁFICO NO 6.9. VARIACIÓN VELOCIDADES MEDIAS EN LA SECCIÓN 1	126
GRÁFICO NO 6.10. MAPA DE COTAS DE AGUA MÁXIMAS.....	127
GRÁFICO NO 6.11. MAPA DE CAUDALES ESPECÍFICOS MÁXIMOS	127
GRÁFICO NO 6.12. VALORES DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTO EN EL FLUJO K AL FINAL DE LA SIMULACIÓN.....	128
GRÁFICO NO 6.13. VALORES DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA ϵ AL FINAL DE LA SIMULACIÓN.....	129
GRÁFICO NO 6.14. VALORES DE LA VISCOSIDAD TURBULENTO AL FINAL DE LA SIMULACIÓN.....	129
GRÁFICO NO A1.3: SECCIÓN GUARDERIA N.	146
GRÁFICO NO A1.1: SECCIÓN	146
GRÁFICO NO A1.3: SECCIÓN CASCADA.....	146
GRÁFICO NO A1.4: SECCIÓN PEDREGAL.....	146
GRÁFICO NO A1.6: SECCIÓN SIFON 2	146
GRÁFICO NO A1.5: SECCIÓN SIFON PITA	146
GRÁFICO NO A1.8 SECCIÓN	147
GRÁFICO NO A1.7: SECCIÓN	147
GRÁFICO NO A1.9: SECCIÓN	147
GRÁFICO NO A1.10:	147
GRÁFICO NO A1.11: SECCIÓN POTRERILLOS	147
GRÁFICO NO A1.12: SECCIÓN LA CALDERA EL PITA	148

GRÁFICO NO A1.13: SECCIÓN	148
GRÁFICO NO A1.14: SECCIÓN LA MOCA.....	148
GRÁFICO NO A1.16: SECCIÓN IASA-ESPE	149
GRÁFICO NO A1.15: SECCIÓN HDA. CARMELO	149
GRÁFICO NO A1.17: SECCIÓN SELVA ALEGRE	149
GRÁFICO NO A1.18: SECCIÓN SANGOLQUI-EJIDO	149
GRÁFICO NO A2.1: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO EL SALTO TRAMO1 .	153
GRÁFICO NO A2.2: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO EL SALTO TRAMO1 Y TRAMO 2 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).....	153
GRÁFICO NO A2.3: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO EL SALTO TRAMO2 Y TRAMO 3 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).....	154
GRÁFICO NO A2.4: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO EL SALTO TRAMO3 Y TRAMO 4 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).....	154
GRÁFICO NO A2.5: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO EL SALTO TRAMO 4 (VOLUMEN 2011).	155
GRÁFICO NO A2.6: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO PITA1 TRAMO 1 (VOLUMEN 2011).	155
GRÁFICO NO A2.7: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO PITA1 TRAMO 1 Y TRAMO 2 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).....	156
GRÁFICO NO A2.8: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO PITA1 TRAMO 2 Y TRAMO 3 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).....	156
GRÁFICO NO A2.9: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO PITA1 TRAMO 3 (VOLUMEN 2011).	157

GRÁFICO NO A2.10: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO PITA 2 (VOLUMEN 2011).	157
GRÁFICO NO A2.11: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO PITA 2.....	158
GRÁFICO NO A2.12: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO SANTA CLARA TRAMO 1 (VOLUMEN 2011).	158
GRÁFICO NO A2.13: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO SANTA CLARA TRAMO 1 Y TRAMO 2 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).....	159
GRÁFICO NO A2.14: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO SANTA CLARA TRAMO 2 Y TRAMO 3 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).....	159
GRÁFICO NO A2.15: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO SANTA CLARA SECCIÓN SANGOLQUÍ- EJIDO E INGRESO EN EL MODELO BIDIMENCIONAL (VOLUMEN 2011).	160
GRÁFICO NO A2.16: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO SANTA CLARA TRAMO 3 (VOLUMEN 2011).	160
GRÁFICO NO A2.17: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO EL SALTO TRAMO1 (VOLUMEN 1976).....	161
GRÁFICO NO A2.18: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO EL SALTO TRAMO1 Y TRAMO 2 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).....	161
GRÁFICO NO A2.19: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO EL SALTO TRAMO2 Y TRAMO 3 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).....	162
GRÁFICO NO A2.20: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO EL SALTO TRAMO3 Y TRAMO 4 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).....	162
GRÁFICO NO A2.21: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO EL SALTO TRAMO 4 (VOLUMEN 1976).	163

GRÁFICO NO A2.22: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO PITA1 TRAMO 1 (VOLUMEN 1976).	163
GRÁFICO NO A2.23: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO PITA1 TRAMO 1 Y TRAMO 2 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).	164
GRÁFICO NO A2.24: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO PITA1 TRAMO 2 Y TRAMO 3 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).	164
GRÁFICO NO A2.25: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO PITA1 TRAMO 3 (VOLUMEN 1976).	165
GRÁFICO NO A2.26: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO PITA 2 (VOLUMEN 1976).	165
GRÁFICO NO A2.27: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO PITA 2	166
GRÁFICO NO A2.28: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO SANTA CLARA TRAMO 1 (VOLUMEN 1976).	166
GRÁFICO NO A2.29: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO SANTA CLARA TRAMO 1 Y TRAMO 2 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).	167
GRÁFICO NO A2.30: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO SANTA CLARA TRAMO 2 Y TRAMO 3 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).	167
GRÁFICO NO A2.31: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO SANTA CLARA SECCIÓN SANGOLQUÍ- EJIDO E INGRESO EN EL MODELO BIDIMENCIONAL (VOLUMEN 1976).	168
GRÁFICO NO A2.32: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO SANTA CLARA TRAMO 3 (VOLUMEN 1976).	168
GRÁFICO NO A3.1: PANTALLA DE INGRESO DEL CORTE DEL DEM	171
GRÁFICO NO A3.2: PANTALLA DE INICIO DE IBER	172
GRÁFICO NO A3.3: PARÁMETROS DE INGRESO DEL RTIN	173

GRÁFICO NO A3.4: INGRESO DE CONDICIONES DE SALIDA	173
GRÁFICO NO A3.5: MALLA DE CÁLCULO.....	175
GRÁFICO NO A3.6: INGRESO AL POST PROCESO DE IBER.....	177
GRÁFICO NO A3.7: VENTANA DE POST PROCESO DE IBER.....	177
GRÁFICO NO A3.7: ACCESO A LA VENTANA DE RESULTADOS DE IBER ..	177

RESUMEN

El presente trabajo, tiene como objeto establecer las bondades del modelo numérico Iber, para la simulación del flujo de lahares en zonas con aparente inundación o zonas en las cuales se evidencie un flujo bidimensional.

Iber es un software libre desarrollado para la modelación del flujo de agua en zonas poco profundas, se caracteriza por la confiabilidad en sus resultados, en este tipo de flujos además de su versatilidad de uso.

Aun cuando, Iber no fue concebido para la modelación de lahares, sino más bien para el flujo de agua, se justifica su uso debido a que los lahares a modelar presentan características reológicas con un tipo de flujo hiperconcentrado y granulares, mismos que se ha demostrado, que pueden ser modelados como fluidos dilatantes que a su vez presentan resultados muy aproximados al ser modelados como fluidos newtonianos es decir como agua, mediante la manipulación del coeficiente n de Manning.

Para el caso, se modelará bidimensionalmente el flujo de lahares primarios del flanco Norte del volcán Cotopaxi, en el drenaje del Río Santa Clara, dentro de la zona consolidada de Sangolquí, para lo cual, se establecerán las condiciones de entrada con la ayuda de la modelación unidimensional con el software Hec Ras en los tramos aguas arriba de la zona de estudio, puesto que estos presentan cauces del tipo encañonados, ideales para la simulación en una dirección.

Se debe tener en cuenta que la modelación a realizarse, será bajo la consideración de tener un volumen constante a lo largo del tramo y adicionalmente se modelará para el escenario más probable establecido para el Cotopaxi. La experiencia del presente trabajo, puede considerarse para futuras modelaciones en condiciones similares, cuyo objeto final sea la generación de mapas de amenaza provocada por este tipo de fenómenos volcánicos.

ABSTRACT

The current work, has as objective to establish the goodness of the numerical model Iber, for lahar simulations in flood plains in what, two dimensional flow is evident.

Iber is a free software developed to water flow simulations in shallow zones, it is characterized by its results reliability, in that kind of flow. Also because of its use versatility.

Although, Iber was not designed for lahar simulations, but rather to water simulations, it is justified its use due to lahars that are going to be modelling, have rheological characteristics with hyper concentrated and granular flow, what have been shown, that they can be modeling as a dilating fluid, whose results are very approximated, when they are modelling as a Newtonian fluid, it seems that lahar can be modelling as well as water, by manipulating the Manning n coefficient.

For this case, are going to be two dimensional modelling the flow of primary lahars of Cotopaxi's Volcano North flank in the Santa Clara's River, specifically in the consolidated zone of Sangolqui, to that, entry conditions are going to be defined by the one dimensional simulation of the upstream reaches, it is going to be done with the software Hec-Ras, it is possible because those reaches have canyoned channels, which is ideal to the one dimensional simulation.

It should be considered that the simulation to be performed, is going to be under the consideration that the volume is constant along the reach and, it will be modeled to the Cotopaxi's more probably stage. The experience of this work, would be considered for future simulations with similar conditions, which final objective is to perform maps of the hazard caused for this kind of volcano's phenomena.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo está destinado a evaluar el modelo hidrodinámico Iber, en la simulación numérica del flujo de lahares en el flanco Norte del volcán Cotopaxi, en la zona consolidada de Sangolquí, para lo cual se ha dividido el presente proyecto de titulación de la siguiente manera:

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.- Dentro de este capítulo, se presentan las nociones generales del proyecto de titulación tales como: Antecedentes, Alcance y Objetivo del trabajo.

CAPÍTULO II: HISTORIA Y NATURALEZA ERUPTIVA DEL VOLCÁN COTOPAXI.- El capítulo II, corresponde a una reseña de la actividad eruptiva del volcán a lo largo de la historia, se describen los fenómenos volcánicos más comunes durante una erupción, así como la incidencia de estos en las zonas de influencia del volcán.

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA DEL TRAMO.- Se hace referencia a la Información técnica disponible, misma que servirá de base para la simulación numérica, de igual manera se describe de una manera detallada el proceso para la obtención de los datos y condiciones necesarios para la modelación destacándose entre otros, la elección del escenario eruptivo, la determinación de los hidrogramas de entrada, así como la caracterización reológica del tramo, misma que justificará el uso de modelos hidráulicos en la modelación del flujo de lahares. Finalmente se describe el levantamiento de campo realizado en el tramo así como la información recopilada en el mismo para las distintas secciones de calibración del modelo numérico.

CAPÍTULO IV: SIMULACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES PRIMARIOS EN EL RÍO SANTA CLARA.- Este capítulo detalla el proceso utilizado para la generación del Hidrograma de entrada de la modelación bidimensional, para lo cual es necesario simular los tramos aguas arriba a la zona de Sangolquí con un modelo Unidimensional, siendo el modelo Hec-ras el utilizado para dicho propósito, dentro del capítulo se describe a breves rasgos el modelo Hec-ras así como el proceso de calibración del mismo y su posterior simulación con

flujo no permanente. El capítulo termina con la generación de los hidrogramas de entrada al tramo de interés del proyecto de titulación, así como una serie de recomendaciones en base a la experiencia para la modelación unidimensional.

CAPÍTULO V: SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI EN EL SECTOR DE SANGOLQUI UTILIZANDO EL MODELO IBER.- El presente capítulo detalla la modelación bidimensional propiamente dicha, primero se da una introducción al modelo Iber, sus ventajas y principales características, posteriormente se describen las condiciones de contorno, así como una validación del coeficiente de Manning estimado en la modelación unidimensional, esto a partir de la simulación del evento de 1877. Finalmente, se da paso a las distintas corridas definitivas de la simulación numérica utilizando volúmenes del glaciar 2011, se evalúan distintos parámetros tales como definición de mallas de cálculo y modelos de turbulencia.

Se realiza el análisis respectivo de los resultados obtenidos y se presenta las conclusiones alrededor de la simulación numérica bidimensional del flujo de lahares utilizando el modelo Iber.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS COMPARATIVO CON SIMULACIONES REALIZADAS EN EL TRAMO.- El capítulo Vi, nos permite comparar los resultados obtenidos en el presente proyecto de titulación con el mapa de amenaza del volcán Cotopaxi, estableciéndose semejanzas y diferencias en los mismos, de igual manera se presentan las aclaraciones de aquellas singularidades, para finalmente dar un vistazo general a las bondades del programa Iber en la visualización de resultados.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.- Se generan una serie de conclusiones en base a la experiencia obtenida en el presente proyecto de titulación, de igual manera se definen recomendaciones para posibles modelaciones futuras con características similares.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El riesgo volcánico es sin duda uno de las mayores inconvenientes que afronta el Ecuador, debido a que en su historia el país ha sido afectado seriamente por las grandes erupciones de sus volcanes, convirtiéndose dichos eventos en serios obstáculos para el progreso de este. En los últimos años se ha podido comprobar la reactivación de varios volcanes como el Tungurahua, el Reventador, el Guagua Pichincha y en el 2015 el volcán Cotopaxi, generando este último gran preocupación y poniendo en alerta a los entes de Gestión de Riesgos del país, debido a la amenaza que representaría una erupción del mismo.

Para la fecha se han realizado una serie de trabajos con relación a los peligros volcánicos asociados al volcán Cotopaxi, destacándose entre otros el Estudio de Evaluación de Impactos sobre la infraestructura de la EMAAP-Q y la Factibilidad de las obras de mitigación ante una eventual erupción del volcán Cotopaxi realizado en el año 2004 (EEI 2004).

En el EEI 2004, se modeló el tránsito lahares del Cotopaxi, utilizando el flujo permanente del modelo unidimensional HEC-RAS, con base en el levantamiento de campo realizado por el equipo de trabajo del mencionado proyecto, en dicho levantamiento se determinaron las secciones de control que serán utilizadas en el presente proyecto de titulación, las secciones de calibración corresponden a levantamientos del último evento eruptivo del volcán Cotopaxi ocurrido el 26 de junio de 1877. Razón por la cual se considerará a este como el evento de calibración del modelo computacional.

Para el caso del volcán Cotopaxi, se toma especial atención en el tránsito de lahares primarios, los cuales corresponden a flujos originados por la fusión del casquete glaciar producido por el contacto de la nieve y el hielo con los flujos piroclásticos expulsados en una erupción del volcán, este flujo de lahares

primarios representa un alto índice de peligrosidad en una eventual erupción del Cotopaxi.

Los lahares son una mezcla plástica de cohesión variable conformada por agua, material sólido de varios tamaños y aire. Se estima que un lahar está compuesto por un alto porcentaje de material sólido y agua entre 60% y 90%, además que sus velocidades de flujo son muy elevadas razón por la cual poseen una gran capacidad erosiva, representando una gran amenaza para las zonas por las cuales transita.

Dada la peligrosidad que el flujo de lahares primarios representa, es evidente la importancia de su estudio, así en base al "(EEI 2004)" y la actualización de la información fundamental como son: el Modelo Digital del Terreno (DEM), el área y volumen del Glaciar del Cotopaxi; se plantea realizar la simulación numérica bidimensional del flujo de lahares primarios del río Santa Clara en la población de Sangolquí correspondiente al drenaje norte del volcán Cotopaxi utilizando el paquete computacional IBER, con el objeto de evaluar las bondades del programa en la modelación del flujo en este tipo de eventos.

1.2 ALCANCE

La gran motivación del presente trabajo está encaminada a generar recomendaciones de aplicación de modelaciones numéricas bidimensionales del flujo de lahares, que permitan a los investigadores representar adecuadamente este tipo de flujos.

Éste proyecto busca justificar la aplicabilidad de la modelación bidimensional en zonas de inundación, como es el caso de la zona de Sangolquí mediante la utilización del paquete computacional IBER, configurando una serie de sugerencias de calibración del coeficiente de rugosidad "n" de Manning, permitiendo que el fluido a modelar sea considerado en función de este parámetro como un fluido de características similares a las de un lahar.

Con base en la investigación, se podrá sustentar la factibilidad del uso de la simulación bidimensional en la modelación de flujos en zonas planas de cauces

anchos y a su vez establecer metodologías de análisis mediante la aplicación del paquete computacional IBER. De igual manera, se pretende demostrar la versatilidad y utilidad del mismo, para la modelación de zonas susceptibles a inundación.

Con los resultados de este estudio se podrán generar bases para futuros proyectos de investigación alrededor del tema y aplicarse en trabajos posteriores bajo condiciones similares.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar la aplicabilidad de la modelación bidimensional en zonas de inundación.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Conocer los patrones de inundación existentes debido a la afectación por erupciones históricas del volcán Cotopaxi.
- Actualizar la información existente referente a la influencia del flujo de lahares del volcán Cotopaxi en la zona consolidada de Sangolquí.
- Optimizar los datos de los parámetros más relevantes ante una probable inundación provocada por el flujo de lahares provenientes de una erupción del volcán Cotopaxi.
- Simular y conocer la influencia de la discretización de la malla de cálculo en la modelación numérica del flujo de lahares en el sector de Sangolquí.
- Simular y conocer la influencia de la turbulencia en la modelación numérica del flujo de lahares en zonas de inundación.
- Analizar las ventajas y desventajas en el uso del paquete computacional IBER para simular el tránsito de lahares en zonas de eminente propagación lateral del flujo.

CAPÍTULO II

HISTORIA Y NATURALEZA ERUPTIVA DEL VOLCÁN COTOPAXI

2.1 GENERALIDADES DEL VOLCÁN COTOPAXI

Conocido como uno de los volcanes activos más altos del mundo, el Cotopaxi forma parte del arco volcánico ecuatoriano. Se encuentra asentado cordillera de los Andes a una distancia aproximada de 60 km al sureste de Quito y a 45 km al norte de Latacunga, y con una altitud aproximada de 5897msnm.

El Cotopaxi a su vez es considerado como uno de los volcanes más peligrosos del mundo, esto se debe a la alta frecuencia de sus erupciones, su estilo eruptivo y al alto porcentaje de cobertura glaciaria que este posee. Se estima que en la actualidad cerca de 300.000 personas habitan cerca del volcán o en las riberas de los drenajes más importantes que nacen en sus flancos. (Ordóñez et al, 2013).

GRÁFICO NO 2.1: CRÁTER DEL VOLCÁN COTOPAXI



FUENTE: Ordoñez et al

Con base en información obtenida de las erupciones históricas del Cotopaxi (1534 DC- Presente), así como de las erupciones de volcanes con características

similares como el Monte Saint Helens (USA, 1980) y el nevado Ruiz (Colombia, 1985). Se ha demostrado que ante la erupción del Cotopaxi grandes lahares pueden afectar las poblaciones que se encuentren a su paso con millones de toneladas de escombros volcánicos. (Ordóñez et al, 2013).

Los lahares son mezclas de una matriz de agua, partículas sólidas y aire; Las cuales son producidas debido al descongelamiento del glaciar de un volcán, mismo que es provocado por el descenso de los flujos piroclásticos incandescentes a lo largo de los flancos del volcán.

2.2 HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN COTOPAXI

Es evidente que la historia eruptiva del Cotopaxi es relativamente larga, dejando como pruebas de la misma las formas y paisajes actuales del volcán. A continuación, se presenta un resumen de la historia geológica del volcán Cotopaxi, mismo que fue tomado del trabajo publicado por Andrade, et al. (2005), como resultado de 20 años de recopilación de información tanto en campo como en laboratorio, dicha información nos permite conocer la evolución del volcán en el tiempo.

2.2.1 PERIODO PRE-HISTÓRICO

2.2.1.1 Los vestigios más antiguos

2.2.1.1.1 La fase riolítica del “Cotopaxi I”

Se conoce que los depósitos más antiguos del Cotopaxi datan de alrededor de 500.000 años de edad, dichos depósitos corresponden a un complejo volcánico que ha sido nombrado como “Cotopaxi I”.

Aun cuando muchos de los depósitos originales han sido erosionados; estudios realizados sobre los remanentes permiten concluir que entre 560.000 y 420.000 años AP (Antes del Presente), las erupciones características del Cotopaxi I fueron de magmas riolíticos.

Para esta fase las características de forma del volcán fueron muy distintas a las actuales, se cree que el volcán estaba conformando una caldera similar a la del volcán Quilotoa.

2.2.1.1.2 La fase andesítica del “Cotopaxi I”

Posterior a la fase riolítica, se presentó un periodo caracterizado por la presencia de magmas andesíticos, obteniéndose así erupciones con magnitudes menores a las del periodo anterior. Sin embargo, se pudo distinguir la presencia de grandes flujos de lava y pequeñas caídas de escoria y ceniza volcánica. Se cree que dichos eventos fueron construyendo de a poco un edificio cónico en el volcán, similar al actual.

2.2.1.1.3 Un largo descanso

Después de la fase andesítica del Cotopaxi I, el volcán entro en una etapa de calma, aun así, durante este periodo existieron depósitos de dos importantes unidades geológicas, mismas que cubrieron las zonas cercanas a los Andes ecuatorianos, evidenciando así la elevada actividad volcánica del lugar.

La primera unidad geológica corresponde a la Cangahua, la cual consiste en un depósito de color café claro hasta habano, con varios metros de espesor, compuesto de capas sucesivas de cenizas finas endurecidas.

Mientras tanto la segunda capa corresponde a la unidad de la Ignimbrita Chalupas, correspondiendo a un depósito de decenas de metros de espesor, de color gris claro hasta casi blanco, compuesto por una cantidad abundante de ceniza y pómez fibrosa de color blanco o grisáceo.

2.2.1.1.4 Reactivación “el Cotopaxi II-a”

Posterior a la pausa del volcán, misma que duró alrededor de 350.000 años, el Cotopaxi se reactivó hace aproximadamente 13.200 años AP. El volcán inicio nuevamente la construcción del edificio al cual se lo nombró “Cotopaxi II-A”. La característica principal de esta etapa fue la ocurrencia de una serie de erupciones riolíticas de gran magnitud, adicionalmente se produjeron erupciones andesíticas de tamaño mucho menor, pero que contribuyeron a la formación del edificio del Cotopaxi II- A.

Durante este periodo ocurrió la última erupción riolítica la cual se estima, tuvo lugar hace 4500 años AP, dicha erupción fue de carácter catastrófico, puesto que un gran

sector del flanco noreste del volcán se derrumbó, lo que ocasionó una avalancha de escombros con un volumen estimado de $2,1 \text{ km}^3$, según reportes de Andrade, et al., 2005, la avalancha fue precedida y seguida por grandes flujos piroclásticos, mismos que contribuyeron al derretimiento de un alto porcentaje del glaciar, el cual se fundió casi instantáneamente, dando paso a la formación de un lahar de grandes proporciones, conocido como “ Lahar del Valle de los Chillos”. Posiblemente este lahar es el más grande que haya formado el Cotopaxi a lo largo de la historia, el mismo afectó sobre todo a los cauces de los ríos Pita, San Pedro y Guayllabamba hacia el norte, incluso llegó al Océano Pacífico fluyendo a través del río Esmeraldas. Se ha estimado el volumen del lahar en $3,8 \text{ km}^3$ (Mothes, et al., 1998).

Debido a la última gran erupción de carácter riolítico prácticamente la cuarta parte del edificio del Cotopaxi II-A había sido destruida.

2.2.1.2 Actividad andesítica actual: el Cotopaxi II-b

A partir del final del Cotopaxi II-A, el Cotopaxi ha tenido erupciones de carácter andesítico, con una excepción riolítica ocurrida hace 2100 años AP. Todas las erupciones permitieron la construcción del edificio actual, conocido como “Cotopaxi II B”.

En la estratigrafía del Cotopaxi II-B, se reconocen al menos 18 ciclos eruptivos, los cuales comprenden más de 43 erupciones de magnitud moderada a grande ($\text{VEI} \geq 3$). Andrade, et al., 2005. Cada uno de los ciclos mencionados anteriormente tienen un patrón en común, el cual incluye caídas plinianas de escoria o pómez, flujos piroclásticos de escoria o pómez, coladas de lava y extensos flujos de lahares.

2.2.2 EL PERIODO HISTÓRICO

Si bien es cierto, nuestros ancestros prehispánicos, fueron sin duda testigos de la actividad del Cotopaxi, estos no registraron la misma durante esta época. De tal manera que después de la llegada de los españoles en 1532, se describe con cierto detalle la historia eruptiva del Cotopaxi.

Es así que se conoce que el Cotopaxi ha tenido ciclos eruptivos de al menos una vez por siglo, durante los últimos 500 años, mismos que ocurrieron en 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1854-1855, y 1877-1880. De una manera muy sorprendente no se dio ningún ciclo eruptivo de importancia durante el siglo XX, es decir que han pasado 140 años desde la última gran erupción, la cual data del 26 de junio de 1877.

2.2.2.1 La última gran erupción del cotopaxi

A principios de 1877, la actividad del Cotopaxi se habría incrementado, llegando a presentar emisiones de ceniza y explosiones de tamaño pequeño a moderado.

En junio del mismo año se registró un evidente incremento de la actividad, es así que el 26 de junio de 1877 se produjo una fase eruptiva con una magnitud suficiente para formar flujos piroclásticos. De acuerdo a las descripciones de los hechos ocurridos se detallan en escritos de Luis Sodiro (1877) y Teodoro Wolf (1878), quienes establecen la existencia de “derrames de lavas” que se desbordaron desde el cráter del volcán. Sin embargo, el fenómeno que ambos autores describen no corresponde a una “colada de lava”, sino más bien a “flujos piroclásticos”. Andrade, et al., 2005.

Wolf escribió textualmente que: “la lava no se derramaba en una o algunas Corrientes, sino igualmente en todo el perímetro del cráter, sobre el borde más bajo, así como sobre la cúspide más alta”. Wolf indica también que las “lavas” fueron derramadas en un intervalo de tiempo entre 15-30 minutos, además enfatiza que el fenómeno tuvo lugar de forma violenta, con gran ebullición de las masas ígneas que rápidamente cubrieron todo el cono del Cotopaxi. Descripciones que permiten afirmar que los fenómenos ocurridos corresponden a flujos piroclásticos.

Sin embargo, los dos autores destacan que los fenómenos más impactantes sucedidos el 26 de junio de 1877 fueron los lahares, mismos que transitaban por los cauces de los ríos Pita, Cutuchi y Tamboyacu, remarcando la gran destrucción que estos provocaron a lo largo de los mencionados drenajes. Finalmente, ambos autores concluyeron que el origen de los lahares fue el súbito y extenso derretimiento que sufrió parte del glaciar del Cotopaxi al tomar contacto con los

“derrames de lava”, que como ya se ha explicado anteriormente correspondería a los flujos piroclásticos.

Con relación a los alcances de los lahares, se conoce que estos en su mayoría rebosaron los cauces naturales de los ríos, ocasionando así inundaciones y destrucción en las zonas aledañas a dichos ríos. Wolf detalla que las velocidades de los lahares fueron suficientes para permitir su arribo a Latacunga en un poco más de 30 minutos, y que los mismos alcanzaron el Valle de los Chillos en aproximadamente una hora, recalca además que se demoró cerca de tres horas en llegar a Baños (Tungurahua) y cerca de 18 horas en llegar a la desembocadura del río Esmeraldas en el Océano Pacífico.

La erupción del 26 de junio de 1877 puede ser considerada como la “erupción típica” del volcán Cotopaxi.” Andrade, et al., 2005. Sin embargo, los estudios geológicos y volcanológicos del Cotopaxi indican que este volcán es capaz de dar lugar a eventos de mayor magnitud.

Los depósitos del evento eruptivo del 26 de junio de 1877, pueden ser observados con cierta facilidad en diversos puntos a todo lo largo de los ríos Pita, Cutuchi, y Tamboyacu.” Andrade, et al., 2005.

Después de esta erupción, el Cotopaxi continuó con una actividad moderada a leve por varios años. El último reporte de actividad antes de su descanso durante el resto del siglo XX, fue probablemente en febrero de 1942.

A partir de agosto del 2015 el volcán Cotopaxi ha presentado una reactivación, misma que ha puesto en alerta a la población del país ante un posible evento de magnitudes similares al ocurrido el 26 de junio de 1877.

2.3 FENÓMENOS VOLCÁNICOS CARACTERÍSTICOS DEL COTOPAXI.

2.3.1 SISMOS VOLCÁNICOS

Son muy comunes en la mayoría de los volcanes, incluso cuando estos se encuentran en periodos de calma. Sin embargo, debido a sus magnitudes

leves estos no suelen ser sentidos por los habitantes de las zonas cercanas al volcán, pero pueden ser detectados mediante sismógrafos que se encuentran en el volcán, lo cual representa un gran beneficio puesto que la variación de la actividad sísmica permite a los estudiosos comprender los procesos internos del volcán, así como anticipar la ocurrencia de una erupción” Andrade, et al., 2005.

2.3.2 GASES VOLCÁNICOS

Son muy comunes antes, durante y después de un proceso eruptivo de un volcán. Sin embargo, en las descripciones de las erupciones históricas del Cotopaxi, no se hace referencia a los efectos de los gases volcánicos, lo cual no significa que durante estos procesos no hubo emisión de gases, sino que sus efectos no fueron tan graves como los provocados por otro tipo de fenómenos volcánicos.

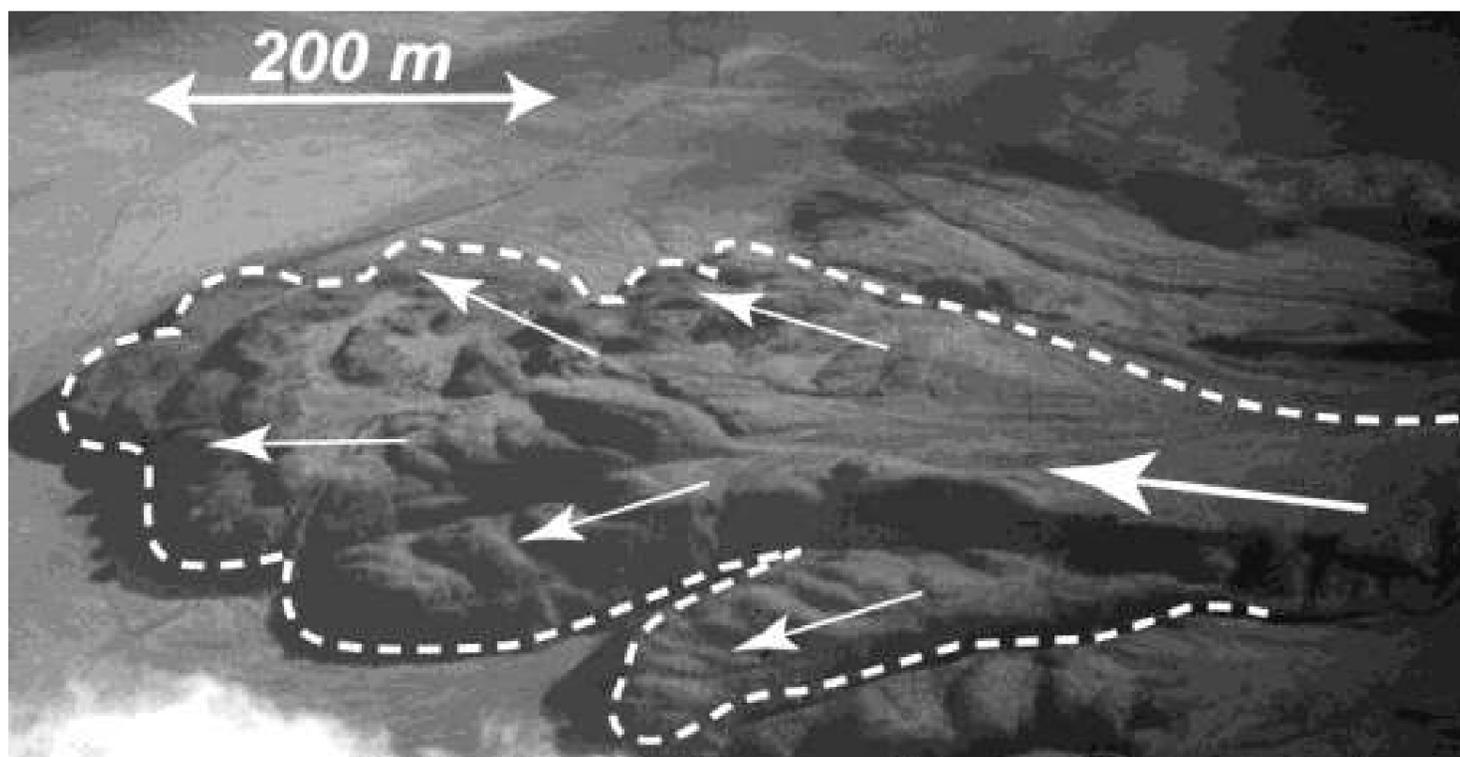
2.3.3 FLUJOS DE LAVAS

Corresponden a flujos de roca fundida o en estado líquido, mismos que son derramados desde el cráter o desde una fisura de un volcán y fluyen por los flancos de este y por las quebradas aledañas, estos flujos son muy frecuentes en erupciones poco explosivas es decir cuando el magma tiene poco contenido de gases.

Los flujos de lava son fenómenos muy comunes en la evolución geológica del Cotopaxi tanto en las épocas históricas como en las prehistóricas, siendo más comunes en estas últimas. De hecho, la sucesiva acumulación y el apilamiento de flujos de lava intercaladas con caídas de escoria y pómez han sido una de las causales de la construcción paulatina del cono del Cotopaxi a lo largo de su historia.” Andrade, et al., 2005.

Se conoce que el último flujo de lava ocurrido en el Cotopaxi fue durante el proceso eruptivo del 1853, mismo que descendió por el flanco oriental del volcán.

GRÁFICO NO 2.2: FOTOGRAFÍA AÉREA DE UNA COLADA DE LAVA QUE DESCENDIÓ POR EL FLANCO NOR OESTE DEL COTOPAXI HASTA LA ZONA DE LIMPIOPUNGU.



Esta Colada Fluyó Solamente Por ~7 Km Desde El Cráter Del Volcán Hasta Detenerse A La Base Del Cono.

FOTO: M. Hall.

En los últimos 4000 años, los flujos de lava ocurridos en el Cotopaxi son de composición andesítica, llegando a distancias de entre 6 y 8 km hasta los pies del volcán antes de detenerse y enfriarse, con excepciones como el flujo de san Agustín que alcanzó los 16 km hacia el occidente del cono actual.

Según Andrade, et al., 2005., “Una lava que hubiere llenado el cráter del Cotopaxi y que empiece a derramarse por sus bordes, lo hará por las partes más bajas del mismo. Es así que se podría prever que los flancos orientales y occidentales del Cotopaxi podrían ser afectados por estos fenómenos, mientras que su ocurrencia hacia los flancos norte o sur es mucho menos probable a no ser que sucedan a través de fracturas y no desde el cráter”.

Un flujo de lava es capaz de provocar la fusión de partes del glaciar del volcán de una manera relativamente sencilla, Sin embargo, puesto que estos flujos presentan velocidades muy bajas, además de que poseen una extensión limitada, la fusión

del glaciar sería un proceso lento y poco eficaz. Andrade, et al., 2005.

Estudios teóricos alrededor del tema demuestran que aun cuando existe un evidente contraste de temperaturas entre la lava y el hielo, existe una limitada superficie de contacto entre ambos materiales, lo que se traduce en una deficiente transferencia de calor, resultando así en una fusión lenta y limitada del glaciar, disminuyendo las probabilidades de la formación de lahares de grandes proporciones. Sin embargo, si el flujo de lava se origina en los flancos altos del volcán, su parte frontal tendería a solidificarse, y a la vez volverse inestable lo que conllevaría a su posterior derrumbe debido a los efectos de la gravedad, dando origen a un tipo especial de flujo piroclástico el cual es conocido como “flujo de bloques y ceniza”, fenómeno que si provocaría una fusión más significativa del glaciar.

2.3.4 DOMOS DE LAVA

Son producto del magma con una viscosidad tan elevada que prácticamente no puede fluir al llegar a la superficie, razón por la cual este tiende a aglutinarse y a enfriarse lentamente sobre el cráter o la fractura por la cual está saliendo.

Los domos de lava son comunes en los magmas dacíticos y riolíticos, lo que justifica por qué en los últimos 4000 años, no se ha observado la presencia o formación de domos de lava en este volcán, puesto que como ya se ha mencionado la etapa histórica del Cotopaxi, se caracteriza por la emisión de magmas andesíticos.

2.3.5 FLUJOS PIROCLÁSTICOS

Son mezclas de gases, ceniza y fragmentos de roca, cuya temperatura por lo general es superior a los 500°C, los flujos piroclásticos descienden a grandes velocidades (mismas que pueden superar los 200 kilómetros por hora) desde el cráter en forma de avalanchas por los flancos del volcán, una de las principales características es su formación súbita e impredecible durante una fase eruptiva del volcán.

Los flujos piroclásticos constan de dos partes, la primera con un componente inferior denso conformado por ceniza, fragmentos de roca y bloques de escoria, que transita por el fondo de valles y quebradas. Mientras que su segundo componente, ubicado en la parte superior, es menos denso con relación al primero,

pero con mayor volumen. Está conformado por ceniza volcánica y gases calientes, los cuales se desplazan sobre el primer componente con la opción de salir de los valles y superar relieves significativos.

**GRÁFICO NO 2.3: FOTOGRAFÍA DE FLUJOS PIROCLÁSTICOS
DESCENDIENDO POR LOS FLANCOS DEL VOLCÁN MA- YÓN (FILIPINAS)
DURANTE UNA ERUPCIÓN EN SEPTIEMBRE DE 1984.**



FOTO: C. Newhall, USGS.

Los flujos piroclásticos son fenómenos muy comunes en las erupciones del Cotopaxi, según los estudios geológicos mostrados en (Andrade, *et al.*, 2005), se conoce que este fenómeno ocurrió prácticamente en todos los ciclos eruptivos del volcán de los últimos 2000 años.

(Andrade, *et al.*, 2005) detallan también, que en el Cotopaxi existen tres formas distintas de generación de flujos piroclásticos, mismas que se detallan a continuación:

1. Desborde del material piroclástico sobre el borde del cráter (boiling over), proceso que tuvo lugar en la erupción de 1877.
2. Colapso de la columna eruptiva, misma que tiene mayor densidad que la atmósfera, razón por la cual cae por acción de su peso propio.
3. Colapso por el frente de un flujo de lava derramado sobre los flancos del cono, o por el colapso de un domo de lava formado sobre el cráter.

Si los flujos piroclásticos son ocasionados por el proceso del “boiling over”, así como aquellos producidos por el colapso de una columna eruptiva, son capaces de afectar a varios flancos del volcán de manera simultánea. Por su parte, aquellos producidos por el colapso por el frente de un flujo de lava o domo de lava, únicamente afectan a los flancos inmediatamente inferiores a dicho domo o flujo de lava.

Durante las erupciones andesíticas de los últimos 4000 años con VEI= 2 a 4,5, los flujos piroclásticos han alcanzado distancias de entre 4 y 9 km desde el cráter. Mientras que en erupciones con VEI > 4,5, se han alcanzado distancias que superan los 20km. Sin embargo, en el Cotopaxi, los flujos piroclásticos en si representan un bajo nivel de peligrosidad debido a que su alcance es menor a la distancia en la que se encuentran las zonas pobladas.

No obstante, debido a su alta temperatura, su gran movilidad y su elevado volumen, los flujos piroclásticos son los causantes de la fusión prácticamente instantánea de un gran porcentaje del glaciar del Cotopaxi, lo que da lugar a la formación de grandes volúmenes de agua en apenas minutos, y por consiguiente se constituyen en la fuente de generación de los lahares primarios.

2.3.6 LLUVIA DE CENIZA Y PIROCLASTOS

Corresponden a fenómenos muy comunes en las erupciones del Cotopaxi, estando presentes en todos los ciclos eruptivos del mismo en los últimos 2000 años. Las caídas de ceniza del Cotopaxi pueden llegar a ser muy significativas, como lo relata Sodiro con relación al evento del 1877, donde reporta que existió un depósito de ceniza en Quito con capas de 6mm de espesor.

2.3.7 FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS (LAHARES)

Corresponden a mezclas de materiales volcánicos como rocas, piedra pómez y arena, con el agua que es producida de la fusión del glaciar. Dichas mezclas se trasladan ladera abajo con velocidades que llegan hasta los 100 km/h.

Los lahares buscan los drenajes naturales que nacen del volcán, por los cuales transitan de manera similar a un río de lodo y escombros. Por lo general, los lahares transportan materiales de tamaños muy variados desde arcillas hasta bloques de varios metros de diámetro, lo que conjuntamente con su volumen y velocidad

generan grandes daños en las zonas por donde pasan.

En el Cotopaxi, existen dos mecanismos de formación de los lahares. El primer caso se da cuando los flujos piroclásticos desbordados desde el cráter provocan la fusión violenta de la nieve y el hielo en grandes sectores del casquete glaciar del volcán. Estos flujos se conocen como lahares primarios, este tipo de lahares son los más voluminosos y destructivos del Cotopaxi. Andrade, et al., 2005.

El segundo caso corresponde a los lahares secundarios, mismos que se forman por la remoción de piroclastos y cenizas que al ser depositados por la erupción, son removidos por lluvias que ocurren en el volcán, este tipo de lahares son de menor tamaño y alcance con relación a los lahares primarios. Andrade, et al., 2005.

Los lahares son fenómenos muy comunes en las erupciones del Cotopaxi, según (Hall, *et al.*, 2005) han estado presentes en todos los ciclos eruptivos de los últimos 2000 años. Se conoce por interpretación de relatos históricos, que a través del río Cutuchi han bajado alrededor de 20 lahares, mientras que por el río Pita han bajado tres lahares primarios. Los mismos relatos históricos, también detallan las catástrofes, enormes pérdidas y extensos daños provocados por los lahares que han bajado por los ríos Cutuchi y Pita, afectando los valles de Los Chillos y Latacunga al norte y al sur respectivamente.

Sin duda alguna, los lahares son los fenómenos más peligrosos que puede ocasionar una erupción del Cotopaxi como cualquiera de las ocurridas en los últimos 4000 años (Mothes, 1991; Aguilera, et al., 2004). El grado de afectación de los lahares depende del volumen disponible de agua (volumen del glaciar) y de los materiales sueltos disponibles, de las pendientes y del encañonamiento de los valles por donde fluyen.

Debido a sus elevadas densidades y velocidades, los lahares primarios son capaces de mover y arrastrar objetos de gran tamaño y peso, mismos como puentes, vehículos, árboles, etc. Es decir que pueden destrozar todo aquello que se encuentre a su paso.

2.3.8 AVALANCHAS DE ESCOMBROS

Son el producto de grandes colapsos o derrumbes de rocas como resultados de la

inestabilidad de los flancos del volcán. Dichos colapsos se dan por lo general por la combinación de varios factores, originando volúmenes de avalancha entre 0,01 a 15 kilómetros cúbicos. Se debe recalcar que este evento nunca se ha dado en los tiempos históricos.

TABLA NO. 2.1: SÍNTESIS DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCÁN COTOPAXI EN LOS ÚLTIMOS 5000 AÑOS

Edad	Emisiones de ceniza	Flujos piroclásticos	Lahares	Flujos de lava	VEI [±]
1877-80 DC	X	X	2		2-4
1854 DC	X	X	1	1	3
1853 DC	X		1	1	3
1766-68 DC	X	X	2	1	3-4
1742-44 DC	X	X	5		4
1532-34 DC	X	X	2	1	3
~ 1440 DC	X	?	?	?	?
~ 1250 DC	X	?	?	?	?
~ 1130-50 DC	X	X	2		4
~1000 DC	X	X			3
950 DC	X	X	2		>4
850 DC	X	X	1		3-4
730-770 DC	X	X	2		4
? DC	X	?	?	?	?
? DC	X	?	?	?	?
~ 150-180 DC	X	X	3	>3	>4
? DC	X	?	?	?	?
? DC	X	?	?	?	?
~ 70-100 DC	X		varios		4
50 AC	X	X			4
~ 100-360 AC	X	?	?	?	?
~ 2220 AC	X	?	?	?	?
~ 2510 AC	X	?	?	?	>4
~ 3060 AC	X	?	?	?	?

FUENTE: (Cáceres et al., 2004)

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA DEL TRAMO

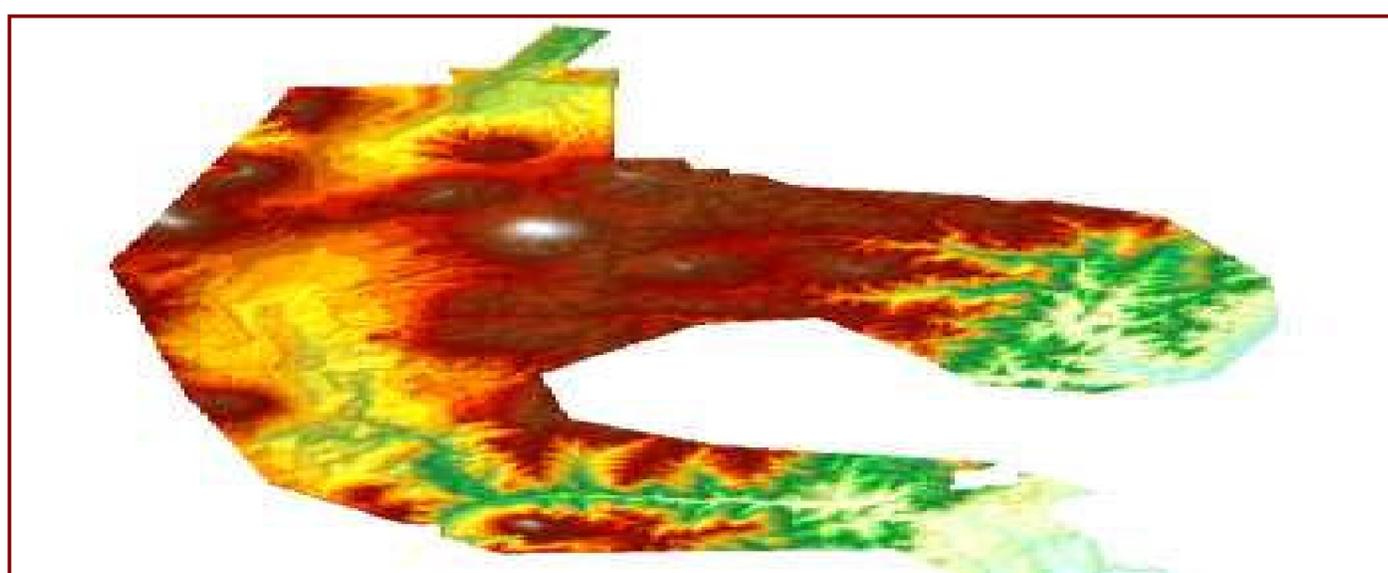
3.1 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA, MODELO DIGITAL DEL TERRENO

Se conoce como modelo digital de Elevación (DEM) a la representación matemática y visual de los valores de altitud de una zona determinada con relación al nivel medio del mar, esto permite caracterizar la forma del relieve y los elementos u objetos que existen en el mismo. (INEGI, 2016).

Los DEM, son utilizados en aplicaciones relacionadas al aprovechamiento y gestión de recursos naturales, siendo de vital importancia en campos como: geodesia y fotogrametría, ingeniería civil, planeación y manejo de recursos naturales, aplicaciones militares, cartografía militar especializada, prevención y atención a desastres de origen natural, etc.

En el presente trabajo se utilizará la información cartográfica del Instituto Geográfico Militar IGM, misma que consiste en un DEM con resolución espacial de 3 metros elaborado con el método de correlación de puntos.

GRÁFICO NO 3.1: MODELO DIGITAL DE TERRENO CON RESOLUCIÓN ESPACIAL DE 3M.



FUENTE: (IGM, 2015)

Adicionalmente, se dispone de:

- Redes hidrográficas a escala 1:50000
- Curvas de Nivel con intervalos de 5m en formato shp. y dwg.

Con esta información se esperaría una mayor precisión en la obtención de resultados con relación a aquellos obtenidos en el EEI 2004, puesto que en el mencionado proyecto se utilizó un modelo digital del terreno con un tamaño de pixel de 30 m x 30 m.

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO

El tramo de estudio del presente trabajo corresponde al tramo 6 del EEI 2004, es decir al tramo del Río Santa Clara cuyo inicio se da en el Sector de la Caldera, en el cual se produce un desbordamiento del caudal del río Pita hacia el río Santa Clara, en un aproximado del 30% del total (Mothes, 2004). El Santa Clara recorre alrededor de 17 km hasta unirse nuevamente con el Río Pita cerca del sector de la Armenia.

Las pendientes longitudinales en el tramo son relativamente altas con valores que fluctúan entre el 1% y 7%, los cauces varían de moderadamente anchos a anchos y con algunos tributarios parásitos, es decir aquellos cuyo aporte no llega a ser significativo para el flujo principal, en algunos casos las secciones transversales del Río Santa Clara llegan a abarcar hasta tres cauces, mismos que condicionan la altura y el tipo de flujo en el río.

El desborde que se presenta en el sector de la Caldera, hace que en el mismo se genere una especie de vertedero lateral, mismo que se da debido al estrechamiento que existe aguas abajo del sector de La Caldera, provocando así el embalsamiento de las aguas y a la vez cambia el régimen de flujo de supercrítico a crítico. (Galarraga, 2004).

3.3 DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS ERUPTIVOS

Existen registros geológicos de la actividad del volcán Cotopaxi, según los cuales, el mismo ha presentado erupciones de carácter andesítico durante los últimos

milenios, con eventos en los cuales el Índice de Explosividad Volcánica (VEI) varió entre 3 y 4 (Hall and Mothes, 2007).

De acuerdo al conocimiento de la historia eruptiva del volcán Cotopaxi (Mothes, 1998; Mothes et al., 2004; Hall and Mothes, 2007), se han definido cuatro posibles escenarios eruptivos, mismos que fueron propuestos por Andrade et al. (2005) y Samaniego et al. (2011). Considerando los siguientes parámetros:

- 1) El dinamismo eruptivo.
- 2) La magnitud de la Erupción.
- 3) El tamaño y grado de fusión del glaciar, y
- 4) Analogías con volcanes andesíticos similares.

Se debe tener en cuenta que los volúmenes mencionados para los escenarios eruptivos corresponden a valores aproximados (Ordóñez et al., 2013). Con esta aclaración los escenarios eruptivos más probables del volcán Cotopaxi son los siguientes:

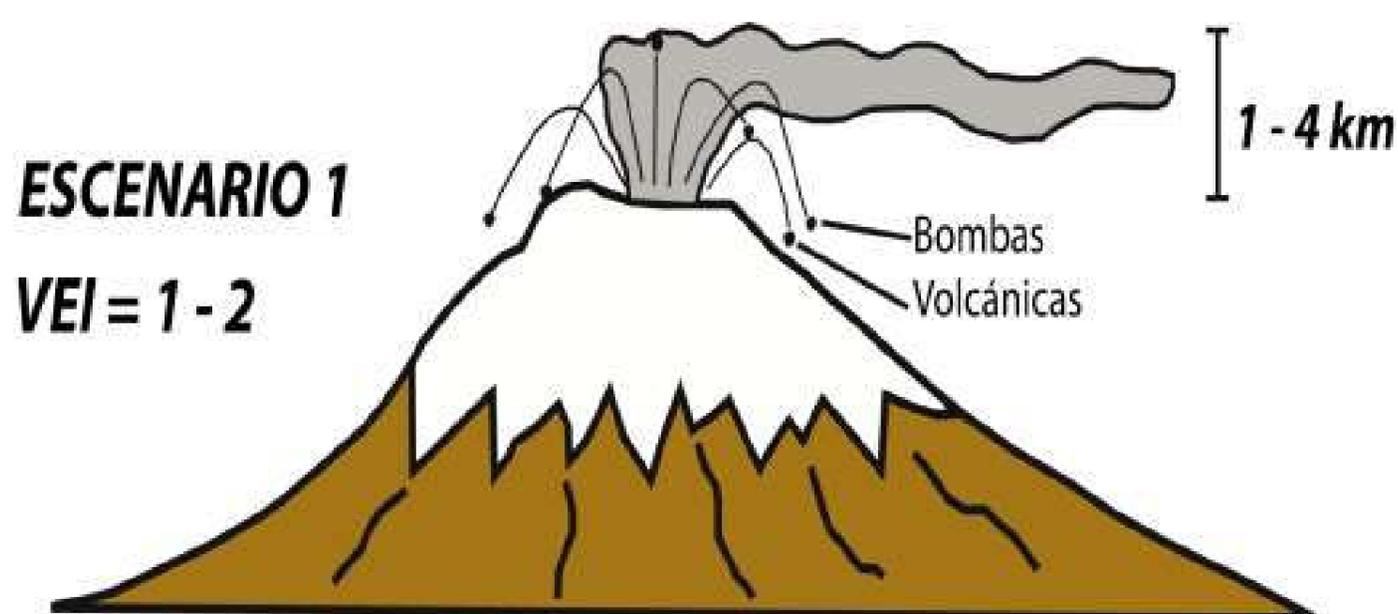
3.3.1 ESCENARIO 1: EVENTO PEQUEÑO (V.E. I= 1-2)

Corresponde a un evento poco explosivo, cuya característica es presentar una fuente de lava del tipo estromboliano en su cráter (Gráfico 3.2). De producirse una reactivación del Cotopaxi, posiblemente este tipo de actividad sería casi permanente durante todo el ciclo eruptivo, lo que correspondería a un nuevo “nivel base” de la actividad, es decir que dicho escenario correspondería al punto de partida de la evolución hacia los niveles con mayores grados de explosividad (revisar escenarios 2,3 y 4).

Aun cuando la probabilidad de ocurrencia de flujos piroclásticos o coladas de lava es de alrededor del 10%, estos podrían generarse en pequeñas magnitudes, descendiendo por los flancos altos del volcán y a su vez provocarían la producción de lahares primarios y secundarios con volúmenes de alrededor de 3 a 4 millones de metros cúbicos (Cáceres, 2011), es decir, de tamaños pequeños y moderados que afortunadamente no afectarían las zonas habitadas de los drenajes del volcán (Andrade et al, 2005).

Adicionalmente se debe destacar que el volumen estimado no se generaría inmediatamente, es decir que este se liberaría a medida que la actividad del volcán se prolongue durante varias horas, razón por la cual el hidrograma tipo para el presente escenario presentaría múltiples pulsos, los cuales se atenuarían de una manera rápida, pero la duración total del evento podría llegar a varias horas. (Samaniego, 2004).

GRÁFICO NO 3.2: ESQUEMA DEL ESCENARIO 1 PARA EL CASO DE UNA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI.



FUENTE: Andrade et al. (2005).

3.3.2 ESCENARIO 2: EVENTO MODERADO (V.E. I=2-3)

Para este escenario se considera una actividad relativamente más explosiva del volcán con relación al escenario anterior, dicha actividad sería del tipo estromboliana a vulcaniana moderada (Gráfico. 3.3). La cual estaría caracterizada por flujos piroclásticos pequeños a moderados (Escenario 2a) y por coladas de lava de poca extensión (escenario 2b).

Si se considera el caso de la erupción del Cotopaxi durante los años 1853-1854, la colada de lava tendría su centro de emisión en el cráter del volcán o en una fisura en los flancos superiores. Lo que provocaría que, al descender por los flancos del volcán, la interacción lava-hielo este focalizada en dicho flanco. Según se menciona en Andrade et al. (2005), estudios recientes demostrarían que “a pesar del evidente contraste de temperaturas entre la lava y el hielo, la superficie de contacto entre

ambos es tan limitada que se tiene una deficiente transferencia de calor y por lo tanto una fusión limitada del glaciar”. De lo anterior se deduce que los lahares generados por este proceso tenderían a ser de pequeños a moderados teniendo alcances relativamente restringidos.

Por otro lado, en caso de formarse flujos piroclásticos los lahares producidos generarían volúmenes importantes. Sin embargo, los mismos serían menores a los de la erupción de junio del 1877. En definitiva, de ser el caso se presentarían peligros considerables para la infraestructura y poblaciones ubicadas a lo largo del cauce de los drenajes más importantes del Cotopaxi como son los ríos Pita, Cutuchi y Tamboyacu.

Se ha llegado a establecer que, las probabilidades de que el Cotopaxi una vez iniciado un proceso eruptivo llegue hasta un Escenario de este tipo son de alrededor del 30%. (Samaniego, et al., 2004). Mientras que el volumen estimado del lahar es del orden de 12 a 30 millones de metros cúbicos.

En lo que respecta al volumen de agua, este se iría liberando durante varias horas en función del avance del flujo pendiente hacia abajo del glaciar, razón por la cual el hidrograma tipo para el escenario 2b, tendría un inicio lento con varios pulsos y una duración total probable de horas. Mientras tanto que para el escenario 2a, el hidrograma tipo mantendría una forma similar a la del escenario 1, con la diferencia de que para este caso el inicio sería más abrupto (Samaniego, et al., 2004).

GRAFICO NO 3.3: ESQUEMA DEL ESCENARIO 2 PARA EL CASO DE UNA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI.



FUENTE: Andrade et al. (2005).

3.3.3 ESCENARIO 3: EVENTO GRANDE (V.E.I.= 3-4)

Corresponde a un evento de características similares a las de la última gran erupción del volcán Cotopaxi, misma que tuvo lugar en junio de 1877, la cual a la vez es considerada como el “evento típico”. Se trata de una erupción volcánica explosiva, caracterizada por tener una actividad del tipo vulcaniana a sub-pliniana (Gráfico. 3.4). Debido al desbordamiento del magma en el cráter con dicha erupción se generarían flujos piro-clásticos, a este proceso se lo conoce como “boiling over”.

Los flujos piro-clásticos descenderían de manera simultánea por varios o por todos los flancos del volcán, y a la vez darían lugar a la formación de lahares de gran volumen, se estima que el mismo sería del orden de 48 a 60 millones de metros cúbicos. Volumen que, al transitar por los cauces de los drenajes del Cotopaxi, representa grandes peligros para las zonas pobladas que se encuentran en las cercanías del coloso, además de las poblaciones ubicadas a lo largo de los ríos Pita, Cutuchi y Tambo-yacu, hasta cientos de kilómetros aguas abajo (Andrade et al, 2005).

De acuerdo a la historia geológica del volcán se estima que este escenario ocurre con una frecuencia elevada, habiéndose producido en un mínimo de 10 ocasiones en los últimos 2000 años, correspondiendo las últimas cuatro a los años 1742, 1744, 1768 y 1877. Se ha llegado a determinar que las probabilidades de

ocurrencia del escenario 3 son de alrededor del 60% (Samaniego, et al., 2004).

El volumen de agua generado en este escenario sería liberado de una manera prácticamente inmediata, razón por la cual el hidrograma tipo del mismo sería triangular, con un pico dominante y una atenuación lenta. Según reportes de testigos de la erupción de 1877, la duración del evento fue de entre 40 y 45 minutos y el caudal pico se logró en el primer tercio de la misma (Samaniego, et al., 2004).

GRÁFICO NO 3.4: ESQUEMA DEL ESCENARIO 3 PARA EL CASO DE UNA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI



FUENTE: Andrade et al. (2005).

3.3.4 ESCENARIO 4: EVENTO MUY GRANDE (V.E.I. ≥ 4)

Corresponde a una erupción pliniana, misma que se caracteriza por ser altamente explosiva (Gráfico. 3.5), para este escenario los flujos piroclásticos serían el producto del colapso de la columna eruptiva y a su vez estos se desplazarían de manera simultánea en varios o todos los flancos del volcán, llegando a distancias de alrededor de 20-25 km, medidos desde el cráter del Cotopaxi (Andrade et al, 2005).

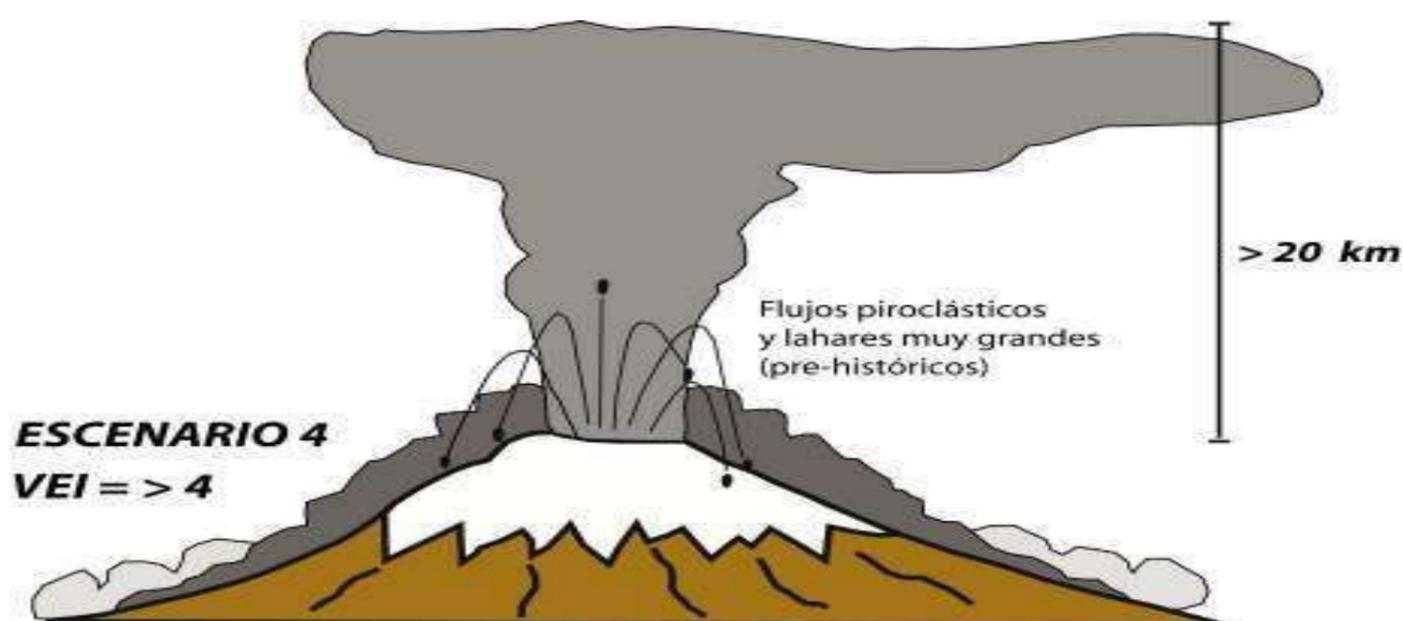
Dentro del escenario 4, se maneja la posibilidad de obtenerse un magma riolítico como producto de la erupción (Andrade et al, 2005), lo que representaría la

formación de flujos piroclásticos mayores, en cualquiera de las posibilidades planteadas los lahares producidos serían mayores que aquellos ocurridos en tiempos históricos. Sin embargo, ambas posibilidades son poco comunes en el coloso puesto que la primera se ha producido únicamente por dos veces en los últimos 2000 años, mientras que las erupciones con magmas riolíticos han tenido lugar en el Cotopaxi en intervalos de miles de años.

Se estima que, la probabilidad de ocurrencia de este escenario está en el orden del 10% (Samaniego, et al., 2004). Además de que el volumen del lahar estimado sería de alrededor de 96-120 millones de metros cúbicos.

Como en el caso del escenario 3, el hidrograma tipo para este evento tendría un inicio muy abrupto, con la diferencia de que los caudales pico serían mucho mayores, razón por la cual la atenuación sería más lenta del orden de horas (Samaniego, et al., 2004).

GRÁFICO NO 3.5: ESQUEMA DEL ESCENARIO 4 PARA EL CASO DE UNA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI.



FUENTE: Andrade et al. (2005).

TABLA NO 3.1: SÍNTESIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CADA UNO DE LOS ESCENARIOS DEFINIDOS

Escenario	VEI	Tipo de Actividad	Espesor promedio afectado (m)	Volumen de agua disponible (m ³ *10 ⁶)	Volumen del lahar (m ³ *10 ⁶)	Forma del Hidrograma	Probabilidad de Ocurrencia (%)
1 (pequeño)	1-2	-Fuente de lava - Estromboliana	0.3	1-1.3 0.8-1	3-4 2-3	-múltiples pulsos -atenuación rápida	10
2 (moderado)	2-3	- Estromboliana -Vulcaniana	1-2	4-4.5 8-9	12-15 24-30	-inicio moderado -atenuación lenta -múltiples pulsos	30
3 (grande)	3-4	- Vulcaniana a pliniana	4	16-18	48-60	-Inicio abrupto -atenuación lenta -triangular	60
4 (muy grande)	≥ 4	-Pliniana	8	32-36	96-120	-Inicio abrupto -atenuación lenta	10

FUENTE: Andrade et al. (2005), Samaniego (2004).

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

3.4 ÁREAS Y VOLÚMENES DEL CASQUETE GLACIAR ASOCIADOS AL FLANCO NORTE

Debido a la actividad que presenta el volcán Cotopaxi, se hace necesario el estudio de los glaciares que cubren dicho volcán, puesto que representarían un potencial riesgo en caso de una eventual erupción de mediana o gran magnitud, ya que el derretimiento repentino del casquete del Cotopaxi, generaría grandes avenidas de agua, rocas y bloques de hielo mejor conocidas como lahares, mismos que por referencias históricas, se conoce que son los causantes de grandes daños en las zonas de influencia del volcán, afectando a poblaciones e infraestructura cercanas y distantes del lugar en donde se generaron. (Andrade et al., 1985)

Durante las últimas décadas se ha observado un retroceso significativo en los glaciares ecuatorianos, se considera que este proceso está relacionado con los fenómenos climáticos que ocurren en la región, tal es el caso del fenómeno ENOS, mismo que se considera tiene una influencia considerable en las coberturas glaciares del país (Francou et al, 2004). Se estima que existe una gran probabilidad de que el retroceso de los glaciares está influenciado también por el calentamiento global que experimenta el planeta (IPCC, 2007).

Se conoce que el origen de los lahares relacionados a una eventual erupción del Cotopaxi, así como su tamaño, alcance y grado de afectación son función de:

- El tipo de erupción del volcán, la cual establecerá la magnitud, intensidad y volumen del magma expulsado.
- Volumen de agua generado en la erupción, mismo que tiene relación directa con el tamaño del casquete glaciar.

Esta última justifica la importancia del estudio detallado tanto de la cobertura del glaciar, así como la de su espesor, con el objeto de prever de una manera más exacta los volúmenes lahárticos que se generarían en una erupción (Mothes et al., 1998).

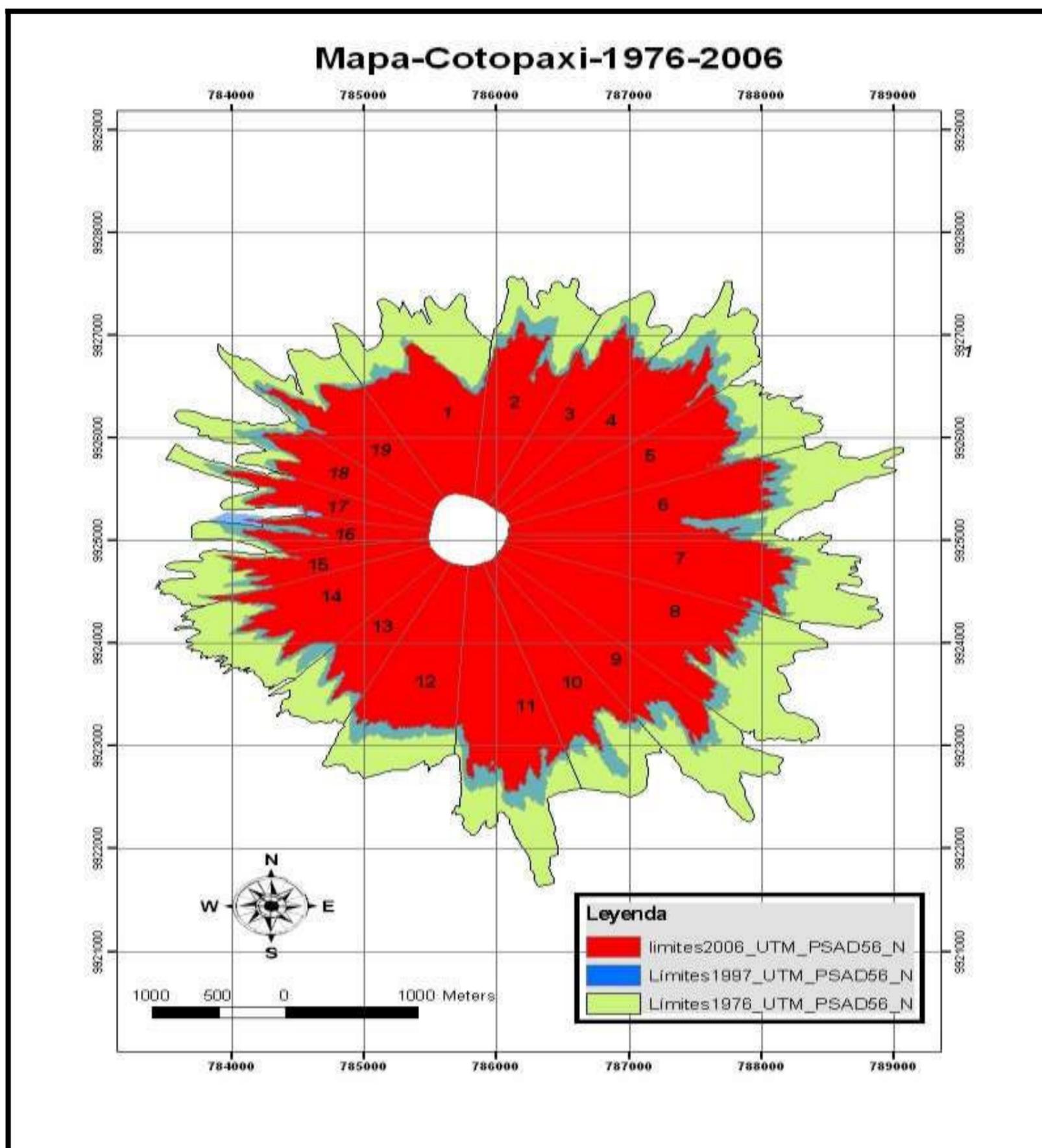
3.4.1. ESTIMACIÓN DEL ÁREA DEL GLACIAR DEL COTOPAXI

Los primeros estudios relacionados a la cuantificación del tamaño del glaciar del Cotopaxi datan del 1976, mismos que fueron realizados por Jordan, quien realizó un inventario de 19 glaciares (Gráfico 3.6) que conforman el cono volcánico del Cotopaxi.

Por su parte los glaciares que alimentan el drenaje norte del volcán corresponden al intervalo entre el 1 y 6. (Tabla 3.2).

Con base a fotografías aéreas tomadas por el IGM en el año 1976, así como a un trabajo de campo, Jordan determinó el alcance de los 19 glaciares, lo que posteriormente permitió determinar el área de cada uno de los mismos.

GRÁFICO NO 3.6: MODELO DIGITAL DE TERRENO CON LOS CONTORNOS PARA EL GLACIAR COTOPAXI.



FUENTE: Cáceres, 2005; Jordan et. al., 2005, Cáceres 2008.

TABLA NO 3.2: NOMBRE DE LOS GLACIARES CON LAS ÁREAS RESPECTIVAS EN M² EN LOS AÑOS 1976,1997, 2006 Y 2011.

Glaciares del flanco Norte Desarrollo del 1 al 6					
No	Nombre	Área 1976 (m²)	Área 1997 (m²)	Área 2006 (m²)	Área 2011 (m²)
1	Sindipamba	1437000	865288	751789	738831
2	Carero Machay	975100	770737	580208	570208
3	Potrerosillos	982800	772697	531162	522008
4	Pucahuayco Norte	1203800	889490	674696	663067
5	Mudadero	1170900	725944	721445	709011
6	Cajas	1362500	934392	765086	751900
Área Total		7132100	4958548	4024386	3955025

FUENTE: Bolivar Cáceres

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

3.4.2 DEFINICIÓN DEL HIDROGRAMA DE ENTRADA A LOS RÍOS PITA 1 Y SALTO

Definir los hidrogramas de entrada es de vital importancia para la realización de la modelación numérica del flujo de lahares, puesto que los hidrogramas permiten la comparación de los tiempos de descarga y caudales pico que fluyen por una determinada corriente, esto a su vez nos permitirá conocer la capacidad de respuesta de dichas corrientes ante el tránsito de crecientes o avenidas.

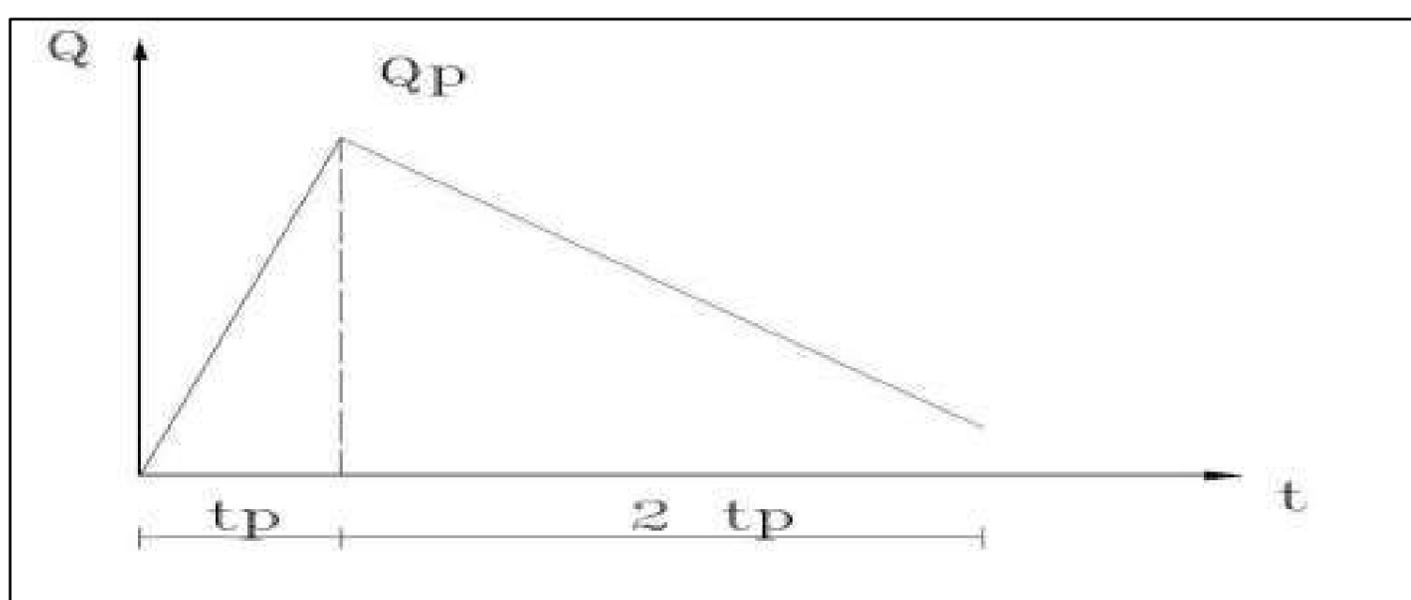
Al analizar los hidrogramas de entrada en la modelación numérica, se debe tener en cuenta que el principal mecanismo de transporte de los lahares es la escorrentía superficial, para el presente estudio no se tomará en cuenta el incremento de volumen en la zona de transporte debido a la adición de sólidos, tampoco se considerará la pérdida de volumen en las zonas de depósito a lo largo del cauce.

Si bien es cierto, las características físicas de la cuenca permanecen relativamente constantes, también existen otras características como la duración del evento, la relación intensidad tiempo, la distribución espacial de la esorrentía y el volumen de esorrentía, mismas que para ser cubiertas requerirían de la existencia de un número infinito de hidrogramas, razón por la cual es erróneo inferir que un hidrograma típico bastaría para una sección de entrada (Lima ,2007).

En la simulación de lahares el hidrograma de entrada es función de la intensidad eruptiva del volcán, por consiguiente, en el presente proyecto titulación se utiliza el escenario eruptivo 3 del volcán Cotopaxi (VEI= 3-4), mismo que se caracteriza por ser el de mayor probabilidad de ocurrencia (60%), además de que resultaría ser un evento similar al ocurrido el 26 de Junio de 1877(Evento de Calibración), razón por la cual el hidrograma característico del tramo tendría un inicio abrupto con una atenuación lenta, cuya forma tendería a ser triangular (ver tabla 3.1).

Debido a que el caudal pico, el tiempo de duración y el tiempo de llegada al caudal pico son las partes más relevantes de un hidrograma, con la finalidad de determinar de una manera más sencilla dichos parámetros se considera un hidrograma de forma triangular (Gráfico. 3,7), adicionalmente se conoce que es justificable para fines de la modelación numérica que el ramal ascendente sea más violento que el descendente, lo que significa que el caudal pico se encuentra al final del primer tercio de la duración total.

GRÁFICO NO 3.7: FORMA CARACTERÍSTICA DEL HIDROGRAMA; EN LA CUAL t_p = TIEMPO EN EL QUE SE ALCANZA EL CAUDAL PICO (QP)



FUENTE: Lima, 2007.

Con la finalidad de obtener el hidrograma de entrada en el tramo de estudio es necesario estimar los hidrogramas correspondientes al drenaje norte aguas arriba de este, los cuales serán transitados hasta llegar al Sector de Sangolquí en el cauce del río Santa Clara, con base en lo anterior se hace necesario determinar los caudales de calibración e hidrogramas de entrada en los ríos El Salto y Pita, en sus secciones de inicio de la simulación.

A continuación se detalla el proceso para la determinación del hidrograma y caudales de calibración de los ríos a estudiarse, teniendo en cuenta que el hidrograma será determinado en función de los volúmenes del 2011, el caudal de calibración en función de los volúmenes del 1976 y dichos volúmenes serán establecidos únicamente para el escenario 3, el cual corresponde al evento de calibración y simulación debido a su alta probabilidad de ocurrencia con relación a los demás escenarios, con estas premisas se tiene:

1. Determinación de Glaciares aportantes a Cada Río: Se conoce que los glaciares que aportan al drenaje del río El Salto son los números 1 y 2 (Sindipamba y Carero Machay), mientras que los restantes (Potrerillos, Pucahuycu Norte, Mudadero y Cajas) aportan al drenaje del Río Pita. De lo cual se tiene las áreas de glaciar aportantes a cada río son las que se detallan en la tabla 3.3.

TABLA NO 3.3: ÁREAS APORTANTES A LOS DRENAJES DEL FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI.

APORTACIÓN DE GLACIARES FLANCO NORTE COTOPAXI					
RÍO	GLACIAR APORTANTE	ÁREA 1976(m2)	ÁREA 2011(m2)	ÁREA TOTAL 1976(m2)	ÁREA TOTAL 2011(m2)
Salto	Sindipamba	1,437,000	738,831	2,412,100	1,309,039
	Carero Machay	975,100	570,208		
Pita	Potrerillos	982,800	522,008	4,720,000	2,645,986
	Pucahuycu Norte	1,203,800	663,067		
	Mudadero	1,170,900	709,011		
	Cajas	1,362,500	751,900		

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

2. Determinación del Volumen del Glaciar: Corresponde al volumen generado por el derretimiento de la capa de hielo del cono volcánico, mismo que está directamente relacionado con el área del casquete glaciar sobre la cual transitan los materiales incandescentes.

$$V = \text{Área de los casquetes de aportación} \times \text{espesor derretido}$$

Al hablar del escenario 3 se tiene un derretimiento promedio de la capa de hielo de 4m. Así se tiene que:

TABLA NO 3.4: VOLÚMENES DE GLACIAR APORTANTES A LOS DRENAJES DEL FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI (ESCENARIO 3).

VOLUMEN DE GLACIARES FLANCO NORTE COTOPAXI		
RÍO	Volumen 1976(m3)	Volumen 2011(m3)
Salto	9648400	5236156
Pita	18880000	10583944

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

3. Volumen de Agua: Se estima que el volumen de agua que efectivamente transita por las corrientes, corresponde al 90%(factor de transformación hielo a agua) del volumen derretido en el glaciar (Robalino E., 2006). Así se tiene que:

TABLA NO 3.5: VOLÚMENES DE AGUA APORTANTES A LOS DRENAJES DEL FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI (ESCENARIO 3).

VOLUMEN DE AGUA FLANCO NORTE COTOPAXI		
RÍO	Volumen 1976(m3)	Volumen 2011(m3)
Salto	8683560	4712540.4
Pita	16992000	9525549.6

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

4. Volumen lahar: Se considera que un lahar tiene 2/3 en volumen de partículas sólidas y 1/3 en volumen de agua, es decir que el volumen del lahar aproximadamente corresponde a tres veces el volumen del agua.

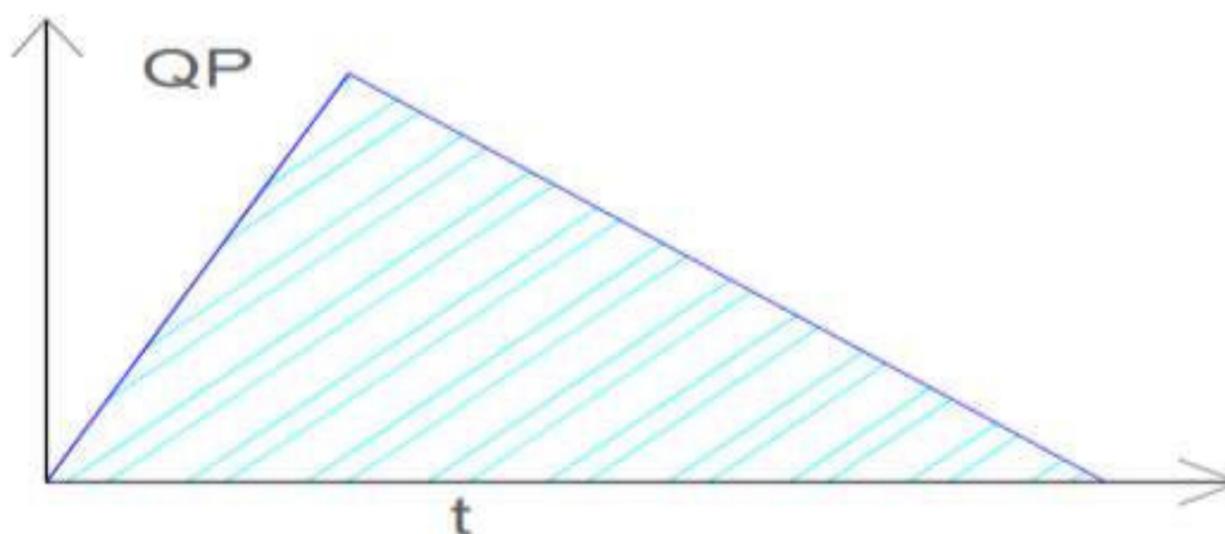
TABLA NO 3.6: VOLÚMENES DE LAHAR APORTANTES A LOS DRENAJES DEL FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI (ESCENARIO 3).

VOLUMEN DE LAHAR FLANCO NORTE COTOPAXI		
RÍO	Volumen 1976(m3)	Volumen 2011(m3)
Salto	26050680	14137621.2
Pita	50976000	28576648.8

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

4. Caudal Pico:

GRÁFICO NO 3.8: REPRESENTACIÓN DEL VOLUMEN CONTENIDO EN UN HIDROGRAMA



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

En la figura anterior el Volumen es igual al área contenida bajo el hidrograma. donde:

$$V = Qp * \frac{t}{2} \quad (3.1)$$

$$Qp = \frac{2V}{t} \quad (3.2)$$

QP= Caudal pico (m3/s)

t= tiempo de duración

Si se adoptan los tiempos de duración usados en el EEI 2004, es decir 40 minutos río Pita y 30 minutos río Salto, se tiene los siguientes Caudales Pico en los tramos iniciales de estos ríos.

TABLA NO 3.7: CAUDALES PICO DE LAHAR EN LOS DRENAJES INICIALES DE LOS RÍOS PITA Y SALTO (ESCENARIO 3).

CAUDAL PICO		
RÍO	Caudal 1976(m3/s)	Caudal 2011(m3/s)
Salto	28945.20	15708.47
Pita	42480.00	23813.87

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

5. Caudales de Calibración: Corresponden a los caudales pico de cada tramo tomando en cuenta que en el caso del río Pita 2, el caudal corresponde a la suma de los caudales de los ríos Pita1 y Salto, por otro lado se considera como criterio de separación estimado en el EEI 2004 para la división de caudales en el sector de la caldera, mismo que se estima en un 30% del caudal del Pita 2 para el río Santa Clara, mientras que el 70 % restante correspondería al río Pita 3 , retomándose la suma de ambos caudales en el río San Pedro (Ver tabla 3.8).

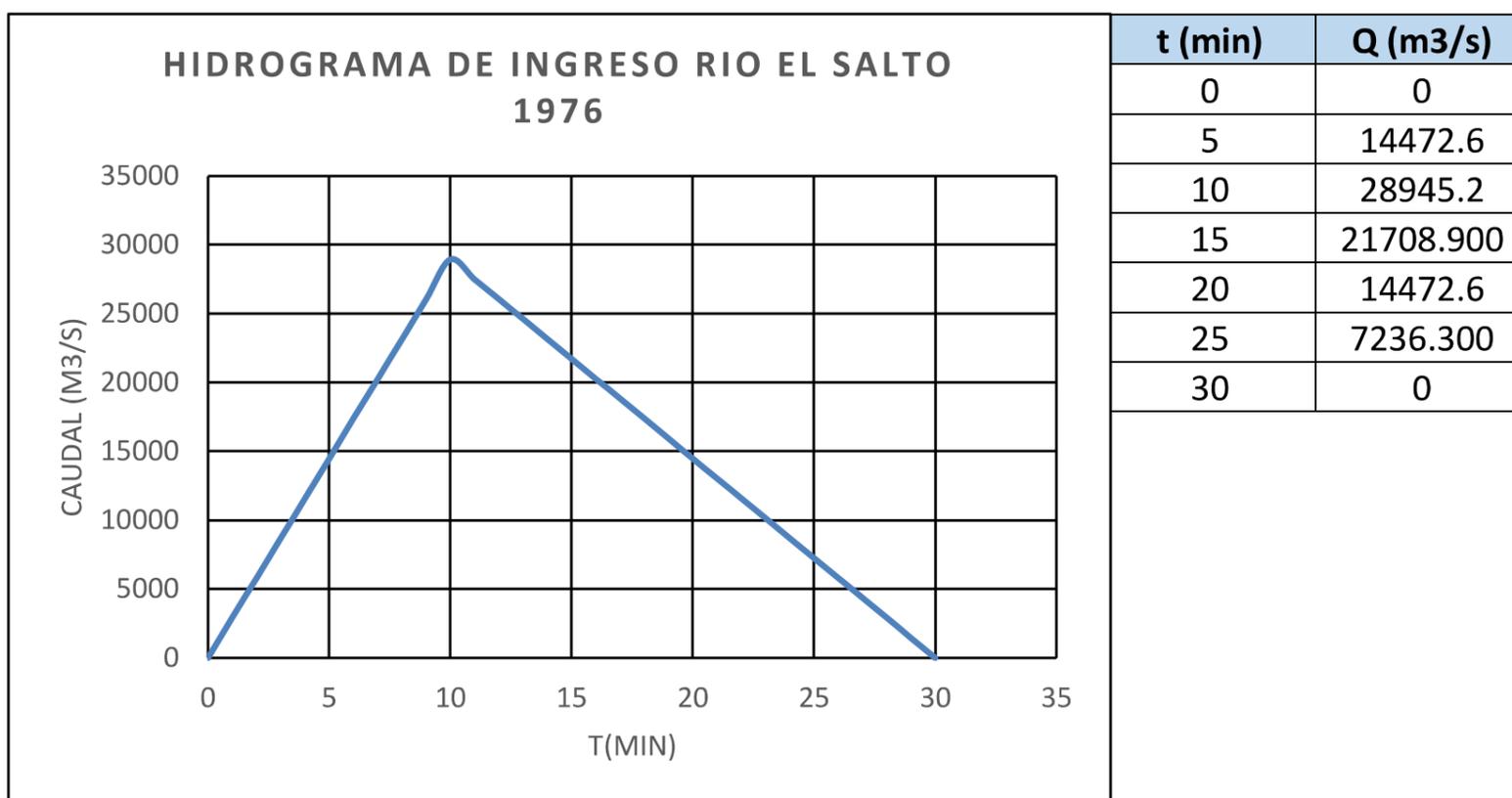
TABLA NO 3.8: CAUDALES DE CALIBRACIÓN PROPUESTOS PARA LOS RÍOS QUE CONFORMAN EL DRENAJE NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI.

CAUDALES DE CALIBRACIÓN	
RÍO	Caudal (m3/s)
Salto	28945.20
Pita 1	42480.00
Santa Clara	21427.56

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

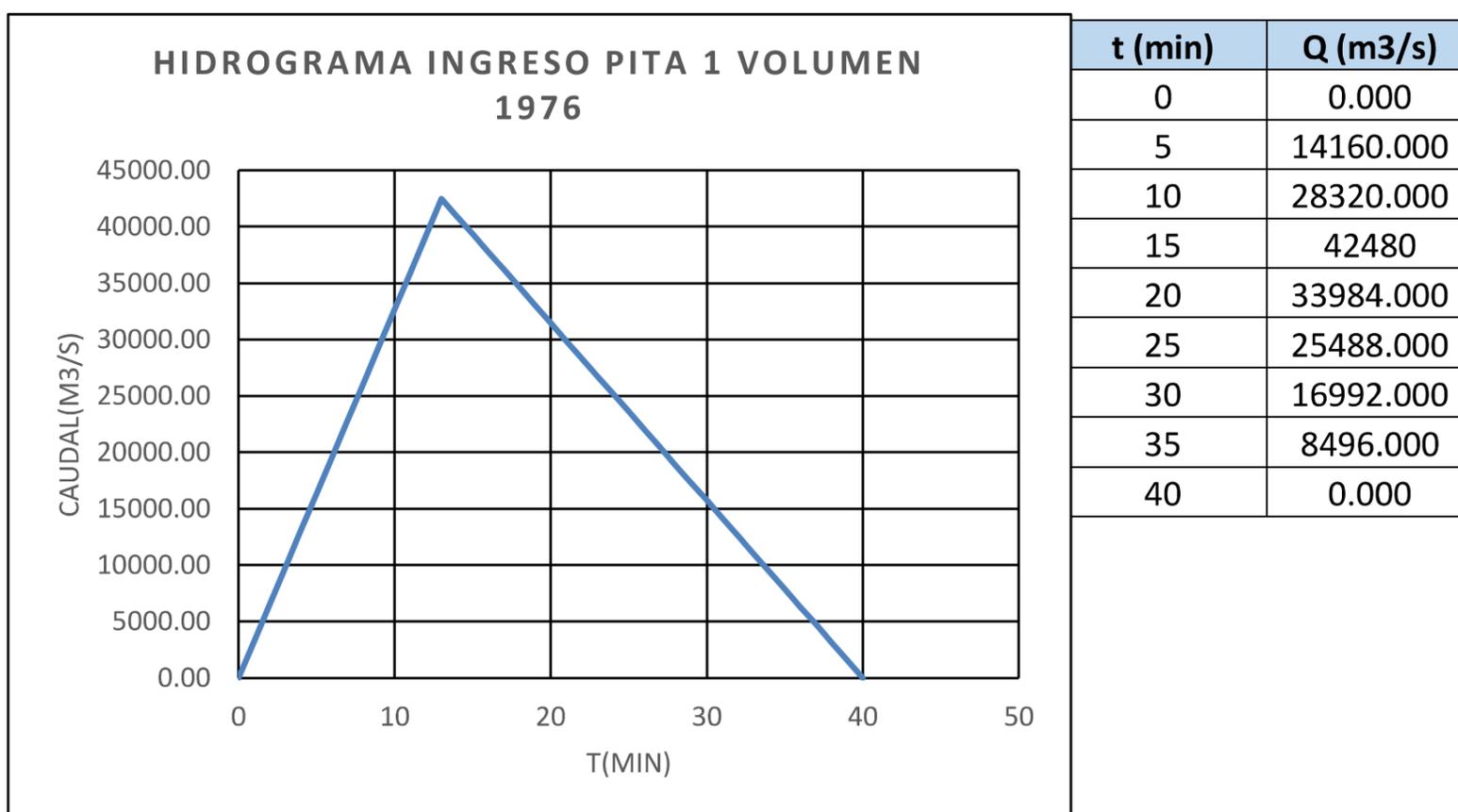
6. Hidrogramas de Entrada: Teniendo en cuenta los puntos anteriores, se define los hidrogramas de entrada que servirán para la simulación numérica del Flujo de Lahares en el drenaje norte del volcán Cotopaxi.

GRÁFICO NO 3.9: HIDROGRAMA DE ENTRADA RÍO SALTO 1 VOLUMEN 1976



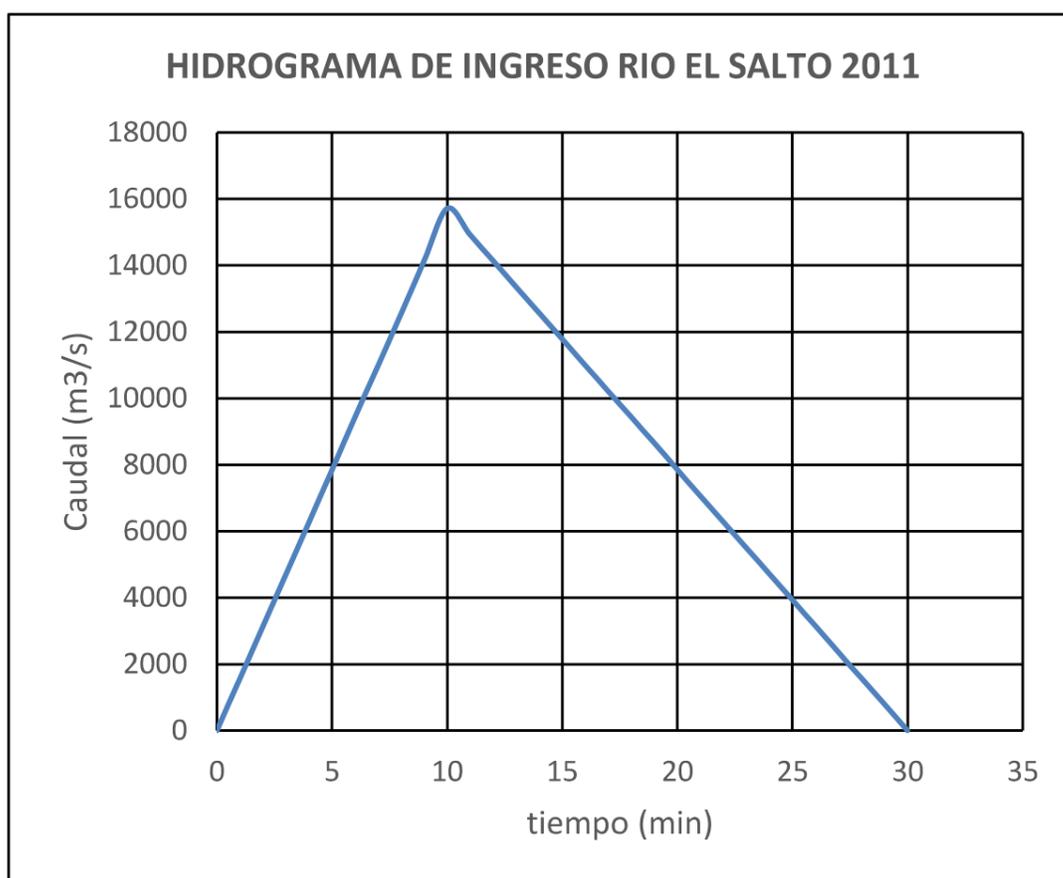
ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

GRÁFICO NO 3.10: HIDROGRAMA DE ENTRADA RÍO PITA 1 VOLUMEN 1976



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

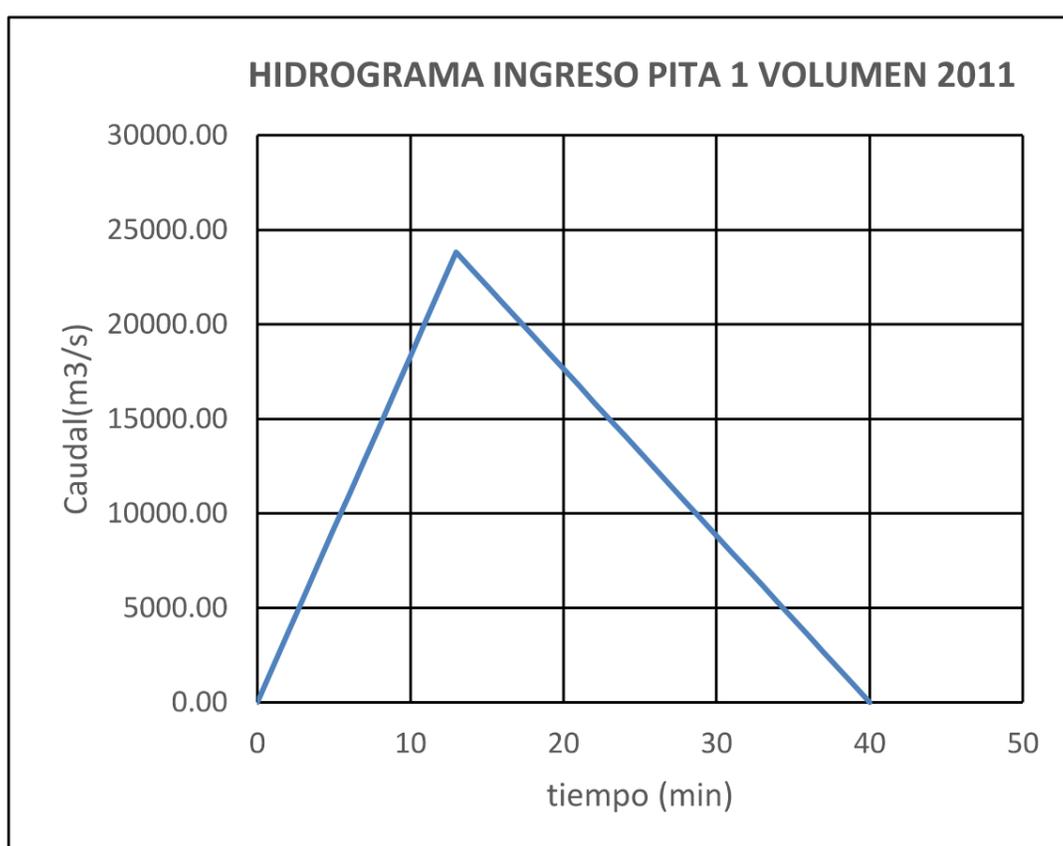
GRÁFICO NO 3.11: HIDROGRAMA DE ENTRADA RÍO SALTO 1 VOLUMEN 2011



t (min)	Q (m³/s)
0	0
5	7854.235
10	15708.47
15	11781.3525
20	7854.235
25	3927.1175
30	0

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

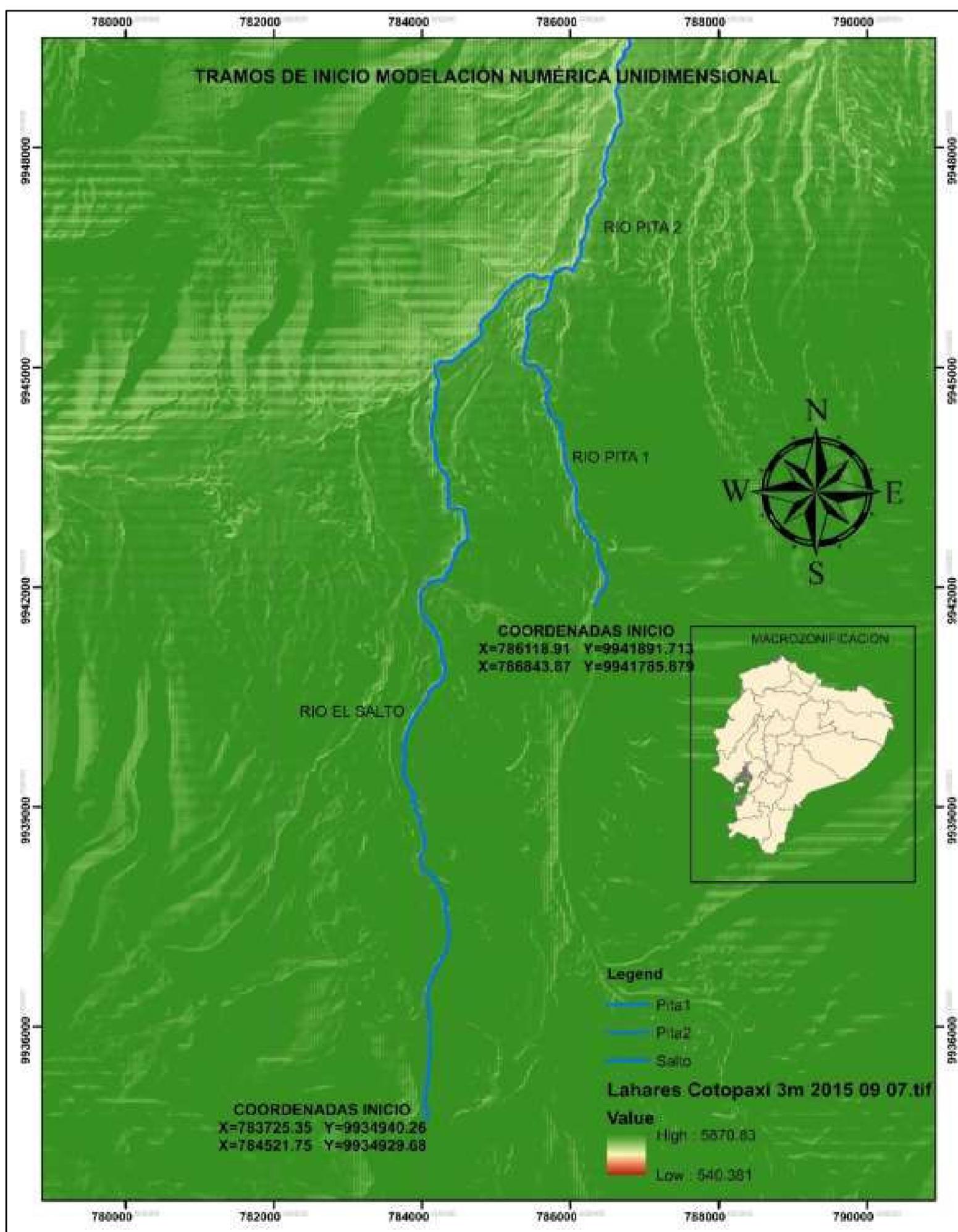
GRÁFICO NO 3.12: HIDROGRAMA DE ENTRADA RÍO PITA 1 VOLUMEN 2011



t (min)	Q (m³/s)
0	0
5	9159.23077
10	18318.4615
15	22050
20	17640
25	13230
30	8820
35	4410
40	0

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

GRÁFICO NO 3.13: COORDENADAS DE INGRESO DE HIDROGRAMAS PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

3.5 CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LOS LAHARES EN EL TRAMO.

Los lahares son flujos de mezclas de lodo, rocas y escombros, que se movilizan a grandes velocidades pendiente abajo sobre corrientes naturales, con la finalidad estudiar este y otros casos de fluidos en movimiento Bingham (1929) introducen el concepto de reología.

La reología se define como el estudio de los principales fenómenos físicos que regulan el movimiento de los fluidos, en otras palabras, se conoce como reología a la ciencia que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos, es decir que la reología estudia la viscosidad, plasticidad y elasticidad de los fluidos.

3.5.1 TIPOS DE FLUJOS

En función de las características de la mezcla, la pendiente y forma del drenaje, se pueden considerar los siguientes tipos de flujo.

3.5.1.1 Flujos de agua

Un flujo de agua o inundación corresponde a una descarga extraordinaria de agua con una concentración de sedimentos igual o menor al 5% en volumen, se debe tener en cuenta que para este tipo de flujo el tamaño de los sedimentos es función principalmente de la pendiente del cauce. Así, en cauces con pendientes elevadas existirá el transporte y depósito de bloques y gravas, mientras que, en cauces con baja pendiente, existe un dominio de arenas y limos.

3.5.1.2 Flujos de lodo (mud flow)

Se generan cuando la tierra y la vegetación son debilitadas debido a la saturación del suelo y posterior licuación del mismo como producto de lluvias de gran intensidad y duración. Generalmente los flujos de lodo están compuestos de elevadas concentraciones de finos (limos y arcillas), aunque también transportan grandes bloques y cantos de roca. (Suárez, 2001).

Su comportamiento es función de la velocidad, en cañones de pendientes elevadas pueden alcanzar grandes velocidades, lo que representa grandes riesgos para las zonas por los que estos transitan.

3.5.1.3 Flujos hiperconcentrados granulares

Consisten en flujos con concentraciones de más del 5% de sedimentos en volumen. En este tipo de flujos su comportamiento está controlado por el agua, razón por la cual se comportan de una manera muy similar a un flujo de agua o inundación. (Suárez, 2001).

Al estar formados por mezclas de agua y partículas granulares, siendo estas últimas las de predominio, los flujos hiperconcentrados carecen de cohesión. Si la concentración del volumen sólido fluctúa entre el 20% y 60%, se considera que el flujo es hiperconcentrado, mismo que contiene un peso específico de 2 ton/m³ aproximadamente.

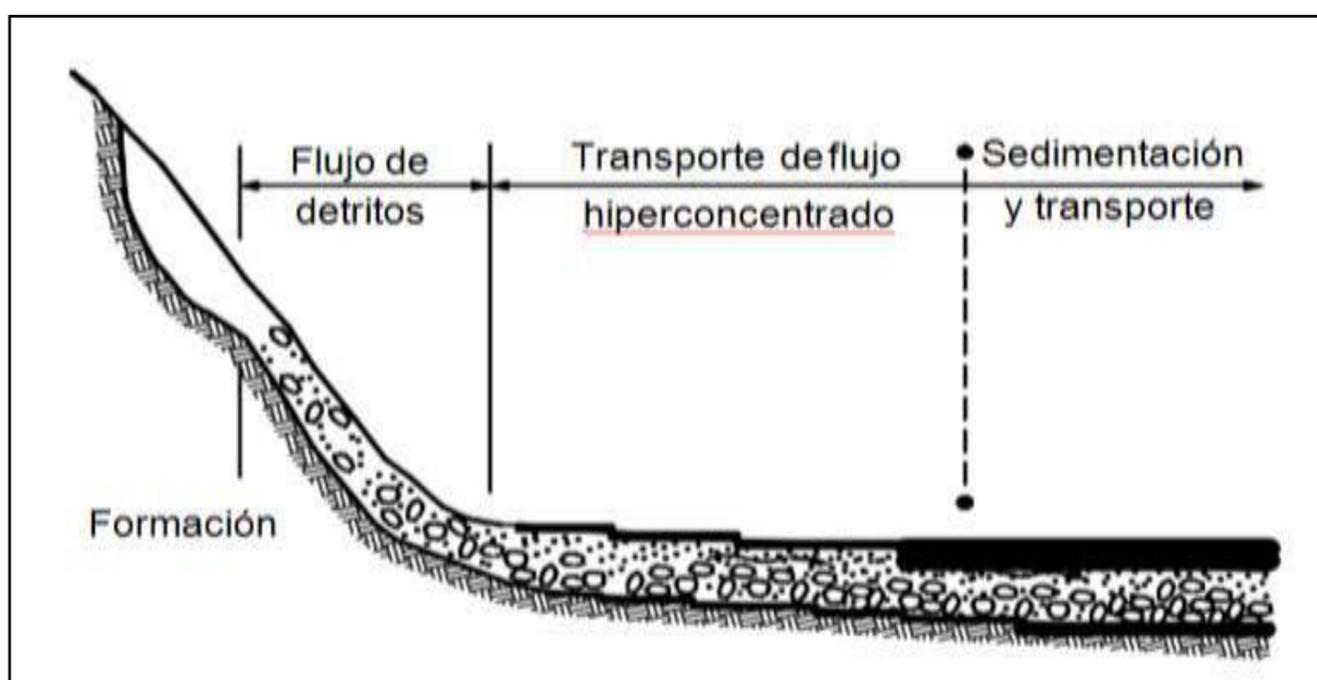
Por lo general la intensidad de turbulencia en este tipo de flujos es débil y la turbulencia a pequeña escala prácticamente es nula, el fluido entonces se comporta como Newtoniano siempre y cuando la concentración de sólidos sea menor que el 60% en volumen. De ser así, puede aplicarse el modelo de Manning de la hidráulica tradicional.

Con respecto a la mecánica del movimiento se ajustan a los patrones generales de la mecánica tradicional de transporte de sedimentos en agua, destacándose dos fases en el flujo ya que las partículas se mueven como carga de fondo y como carga suspendida a la vez. Aun cuando la velocidad de flujo es elevada, la superficie de corriente se muestra suave y calmada. Este tipo de flujo contiene un grado de plasticidad formándose patrones del flujo similares a las nubes, patrones que llegan a deformarse.

En los flujos hiperconcentrados es característico que a medida que la concentración aumenta, la turbulencia por su parte disminuye, lo que hace que el flujo turbulento llegue a ser laminar ocasionando que la fuerza dispersiva sea

quien soporte el peso de las partículas de los sedimentos, y a la vez la distribución vertical de la concentración de sólidos tiende a ser uniforme.

GRÁFICO NO 3.14: ESQUEMA DE UN FLUJO HIPERCONCENTRADO



FUENTE: SUÁREZ, 2001.

3.5.1.4 Flujos de escombros (debris flow)

Corresponden a flujos no viscosos, turbulentos actuando en dos fases: líquida y sólida, la primera está constituida de partículas finas saturadas, mientras que la fase sólida, que por lo general se presenta en mayores cantidades, está compuesta por material grueso. (Gaibor, 2012).

En los flujos de escombros la interacción directa entre los granos no tiene mayor relevancia, debido a que estos son soportados por fuerzas generadas por la matriz. Lo que permite afirmar que la viscosidad del fluido intersticial determina las características del comportamiento hidráulico.

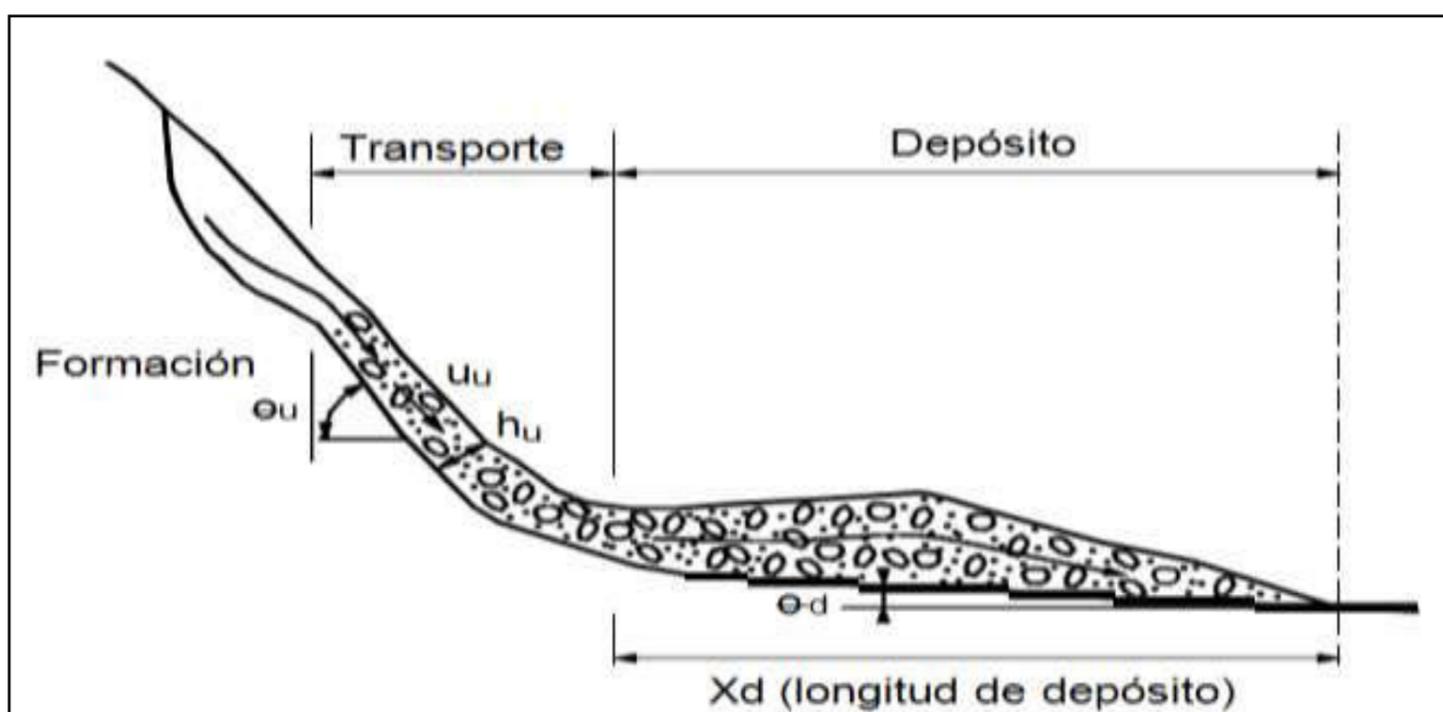
Los componentes principales son: agua, matriz fina (partículas de arcilla) y los materiales más gruesos. En este tipo de flujo los sedimentos controlan el flujo por completo, mientras que el agua tiene una importancia menor. Con base en lo anterior, el movimiento se da por la transferencia de momentum entre las partículas debido al choque de las mismas mientras se mueven.

Su comportamiento es totalmente distinto al descrito por el modelo hidráulico común, los flujos no son viscosos y por lo general presentan condiciones turbulentas de dos fases, una líquida (agua y partículas finas) y la fase sólida (partículas gruesas).

Con respecto a la mecánica del movimiento del flujo de escombros, por lo general se presenta en zonas de alta pendiente e involucra concentraciones elevadas de material sólido, en especial partículas gruesas, mismas que son transportadas con cierta facilidad y con altas velocidades que alcanzan los 20m/s. (Suárez, 2001). La velocidad aumenta con el incremento de la pendiente y disminuye con el aumento de la concentración de sólidos.

Por lo general los flujos de escombros fluyen a lo largo de drenajes encañonados y al llegar a zonas más amplias tratan de detenerse, formando abanicos de depósito, los cuales pueden llegar a sepultar áreas relativamente extensas.

GRÁFICO NO 3.15: ESQUEMA DE UN FLUJO DE ESCOMBROS (DEBRIS FLOW)



FUENTE: SUÁREZ, 2001.

3.6.1.5 Tipos de flujos de escombros según distintos autores

Dentro de la literatura especializada existen distintos criterios para la clasificación de los flujos de escombros, en el presente trabajo se citarán los criterios de Costa, Coussot y Suárez.

3.6.1.5.1 Costa (1988)

Define tres tipos de flujo: avenidas de agua (water flood), flujos hiperconcentrados y flujos de detritos (debris flow).

TABLA NO 3.9 A: CLASIFICACIÓN SEGÚN COSTA (1988)

Flujo	Concentración de sedimentos	Densidad de los sólidos (g/cm ³)	τ_c (dn/cm ²)	Tipo de Fluido
Avenida de Agua	1-40% en peso 0.4-20% en volumen	1.01-1.33	0-100	Newtoniano
Flujo Hiperconcentrado	40-70% en peso 20-47% en volumen	1.33-1.80	100-400	No Newtoniano
Flujo de escombros	70-90% en peso 47-775 en volumen	1.80-2.30	>400	Viscoplástico

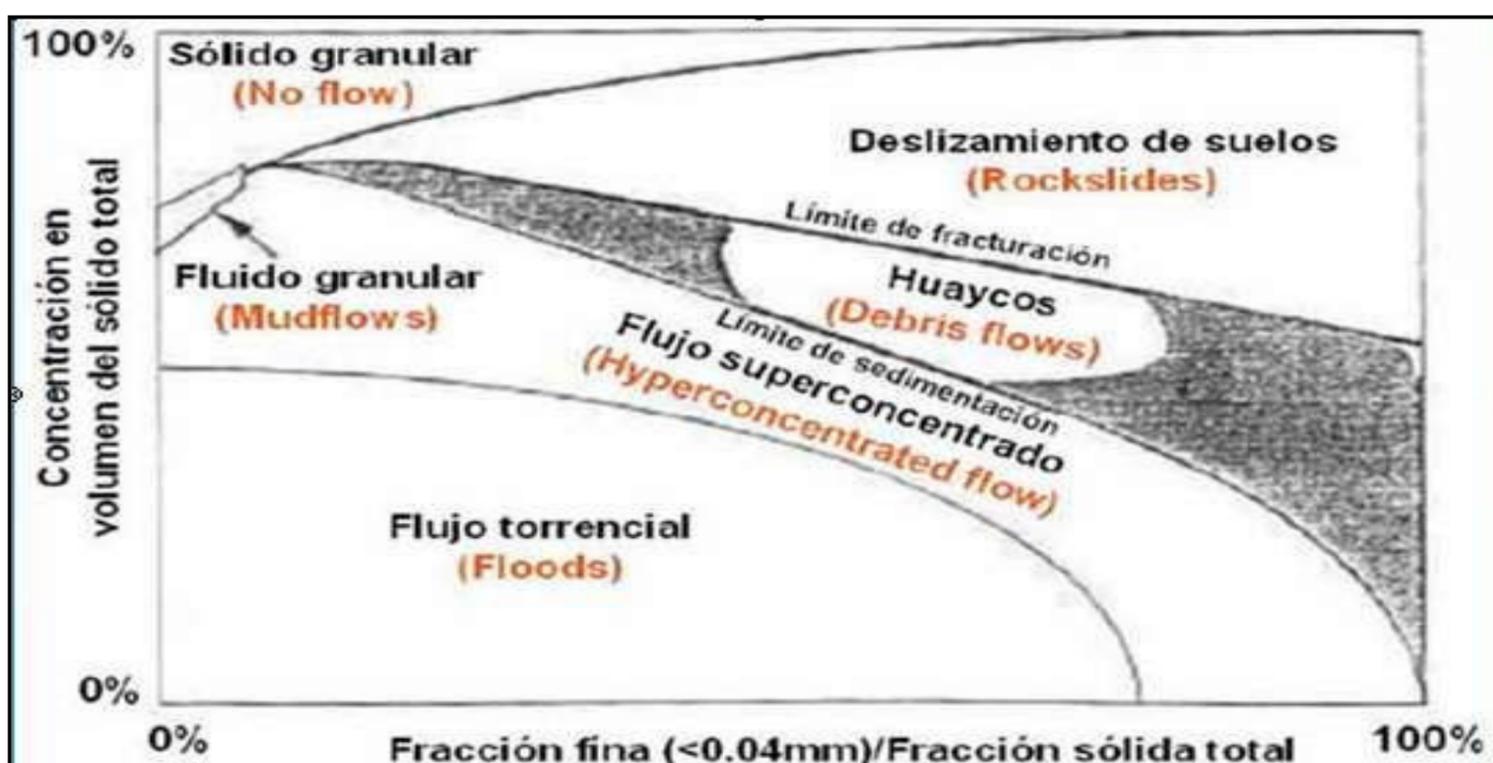
TABLA NO 3.9 B: CLASIFICACIÓN SEGÚN COSTA (1988) CONTINUACIÓN.

Flujo	Mayor mecanismo de soporte de los sedimentos	Viscosidad (poise)	Perfil de concentración de sedimentos	Tipo de flujo predominante
Avenida de agua	Fuerzas electrostática, turbulencia	0.01-20	No uniforme	Turbulento
Flujo Hiperconcentrado	Empuje, esfuerzo dispersivo, turbulencia	20-200	No uniforme a uniforme	Turbulento a Laminar
Flujo de escombros	Cohesión, empuje, esfuerzo dispersivo, soporte estructural	>>200	Uniforme	Laminar

3.6.1.5.2 Coussot (1988)

El francés clasifica los flujos considerando la concentración y granulometría del material sólido.

GRÁFICO NO 3.16: CLASIFICACIÓN DE UN FLUJO DE ESCOMBROS SEGÚN COUSSOT 1988.

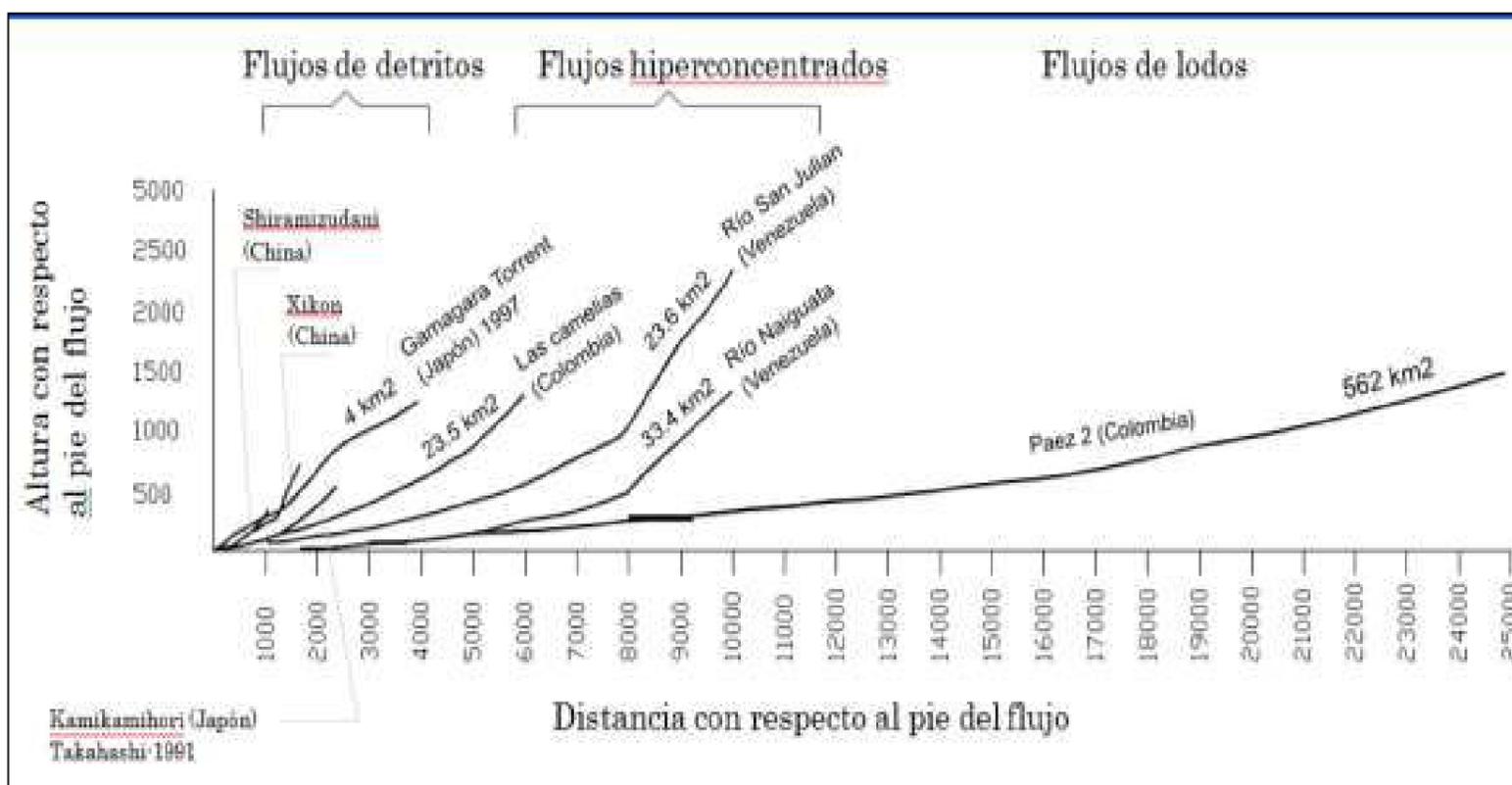


FUENTE: COUSSOT, 1997

3.6.1.5.3 JAIME SUÁREZ DÍAZ (2001)

Muestra una clasificación en función del perfil característico de cada tipo de flujo

GRÁFICO NO 3.17: CLASIFICACIÓN DE UN FLUJO DE ESCOMBROS SEGÚN SUÁREZ 2001.



FUENTE: SUÁREZ, 2001.

3.6.2 MODELOS DE FLUIDO

3.6.2.1 fluido newtoniano (modelo de Manning)

Un fluido newtoniano es aquel que cumple la ley de Newton, es decir que presenta una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, lo cual se debe a que la viscosidad es constante y no es función del esfuerzo cortante aplicado.

Por lo general, la representación hidráulica del flujo de agua (fluido Newtoniano), se realiza con el modelo de Manning, de igual manera los flujos con altas concentraciones de agua como son los flujos de lodos y los flujos hiperconcentrados con características newtonianas viscosas y turbulentas, suelen ser modelados con este modelo puesto que es el que más se ajusta a la realidad del flujo, sumada a la disponibilidad de modelos matemáticos y softwares de computadores que utilizan el modelo del fluido newtoniano.

El modelo de Manning establece que:

$$q_T = \frac{1}{n} h^{5/3} \text{sen}^{1/2} \theta \quad (3.3)$$

Siendo:

qt: caudal unitario

n: Coeficiente de rugosidad de Manning

θ : Pendiente del canal.

h: altura del flujo

Con relación al perfil de velocidades, en el flujo turbulento hiperconcentrado, la distribución de velocidad sigue la ley logarítmica conocida en la hidráulica tradicional (Gráfico. 3,18 b). Lo cual significa que los caudales serán mayores con la profundidad a medida que la profundidad del flujo. (Gráfico. 3,19).

3.6.2.2 Fluido Bingham

El modelo de Bingham es uno de los modelos de mayor uso en relación al flujo del lodos con granulometría fina, los parámetros que se relacionan en el mismo corresponden al esfuerzo de cedencia (esfuerzo mínimo de corte que debe aplicarse a un fluido para que este se desplace) y a la viscosidad (propiedad de los fluidos para resistirse al movimientos), la ecuación que representa a este tipo de fluido es la siguiente:

$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi + \eta_c \left(\frac{dV}{dy} \right) \quad (3.4)$$

Donde:

T = Resistencia al cortante en la base del flujo

C = Cohesión.

ϕ = Ángulo de fricción interna

η = Coeficiente de viscosidad.

El perfil de velocidades de este tipo de fluido (Gráfico. 3, 18a), muestra la no existencia de movimiento relativo considerable, a la vez se puede asimilar la forma del perfil como la de un tapón.

Si se toma en cuenta una serie de estudios realizados en China, los cuales concluyen que los perfiles de velocidades tienden a ser más uniformes en los flujos plásticos. Entonces, el flujo hiperconcentrado turbulento newtoniano, tiende a comportarse como flujo laminar, debido a su alto porcentaje de hiperconcentración.

3.6.2.3 Fluido Dilatante

Con base en los trabajos de Bagnold, Takahashi (1991) desarrolla un modelo tal que cumpla con las condiciones del flujo de escombros (Debris Flows), mismas que no podían ser cumplidas con los modelos anteriormente mencionados.

Takahashi demostró que en los flujos de piedras o no viscosos, en los cuales predomina el efecto de colisión entre partículas, es apropiado el modelo de fluido dilatante. (Suárez, 2001). El cual se representa con la siguiente ecuación:

$$\tau = \eta_c (dV / dy)^2 \quad (3.5)$$

$$q_\tau = \frac{2}{5} R h^{5/2} \text{sen}^{1/2} \theta \quad (3.6)$$

R es función de la concentración de sólidos, el diámetro de las partículas entre otros factores.

El perfil de velocidades (Gráfico 3,18 c) relaciona la concentración de sedimentos y la constante de Karman, Takahashi comprobó experimentalmente la siguiente expresión para la distribución de velocidades en flujos de escombros para flujos no viscosos:

$$\frac{u_z - u}{u_s} = \left(\frac{h - z}{h} \right)^{3/2} \quad (3.7)$$

donde:

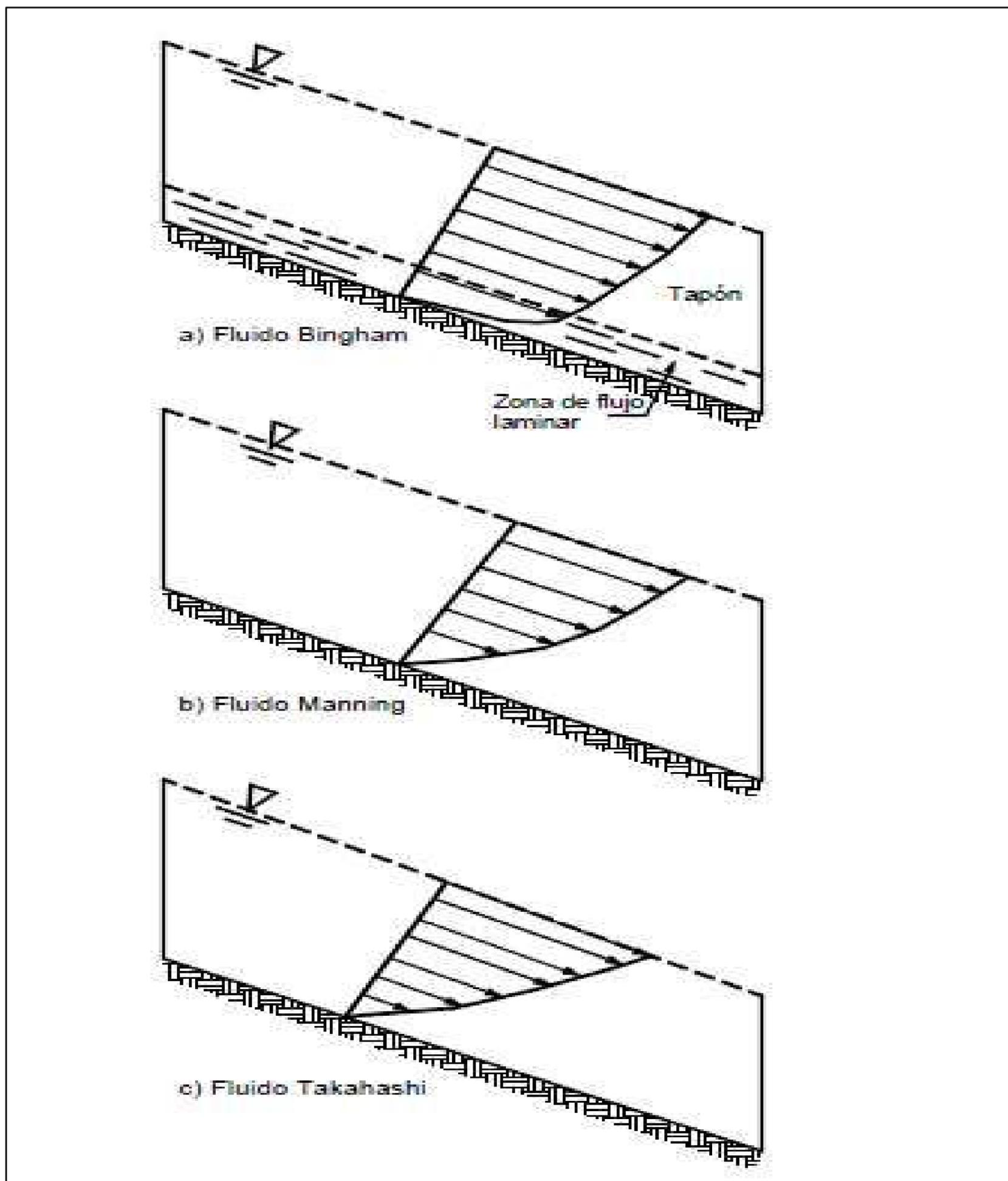
u = velocidad

u_s = Velocidad en la superficie del flujo

h = Altura del flujo

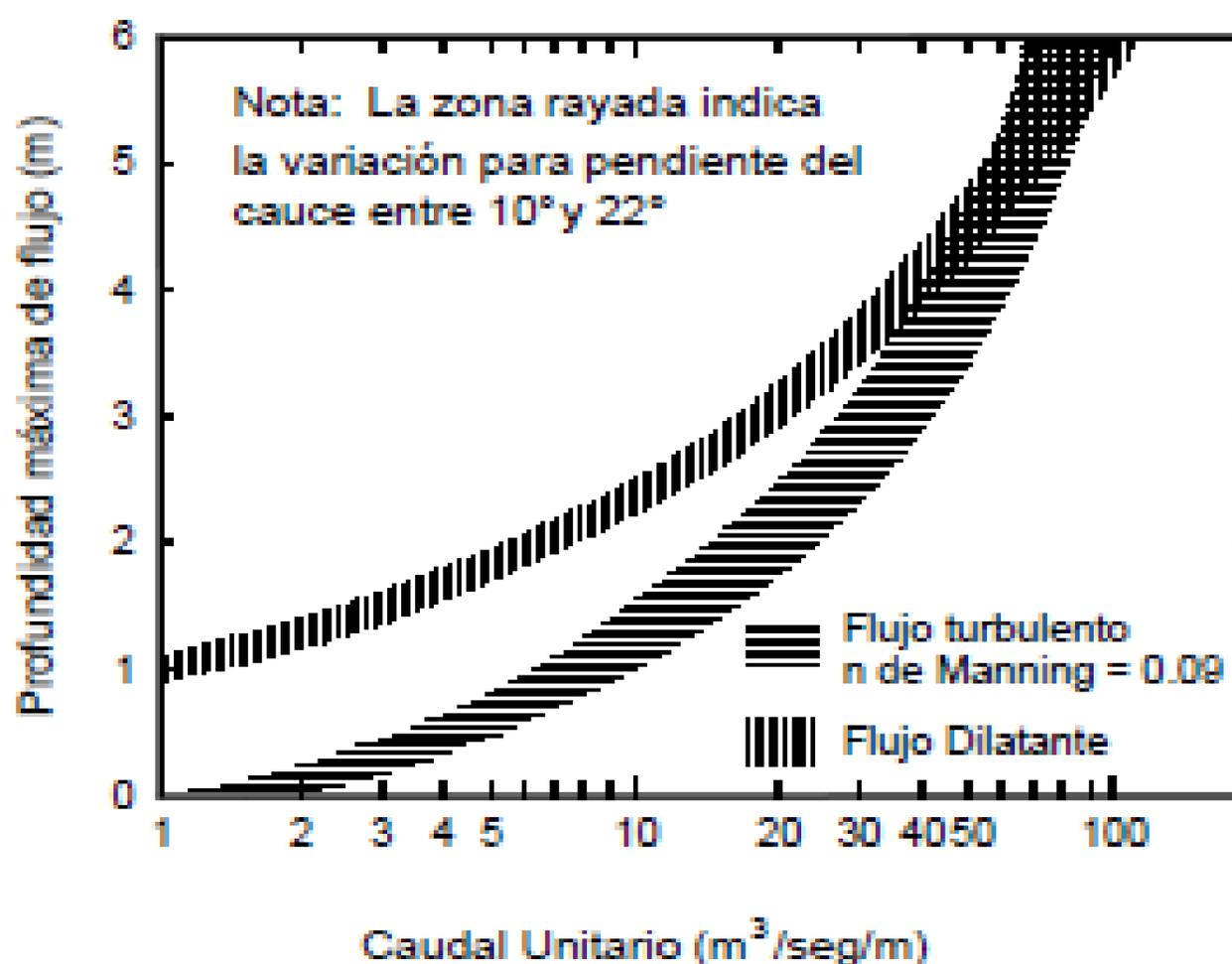
z = Altura de cada punto con respecto al fondo del canal.

GRÁFICO NO 3.18: DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES PARA DIFERENTES TIPOS DE FLUIDO, APLICADO A FLUJOS Y AVALANCHAS DE TIERRA.



FUENTE: Suárez 2001.

GRÁFICO NO 3.19: COMPARACIÓN DE LOS CAUDALES OBTENIDOS PARA LAS DIFERENTES PROFUNDIDADES DE ACUERDO CON LOS MODELOS DE MANNING Y DE FLUJO DILATANTE

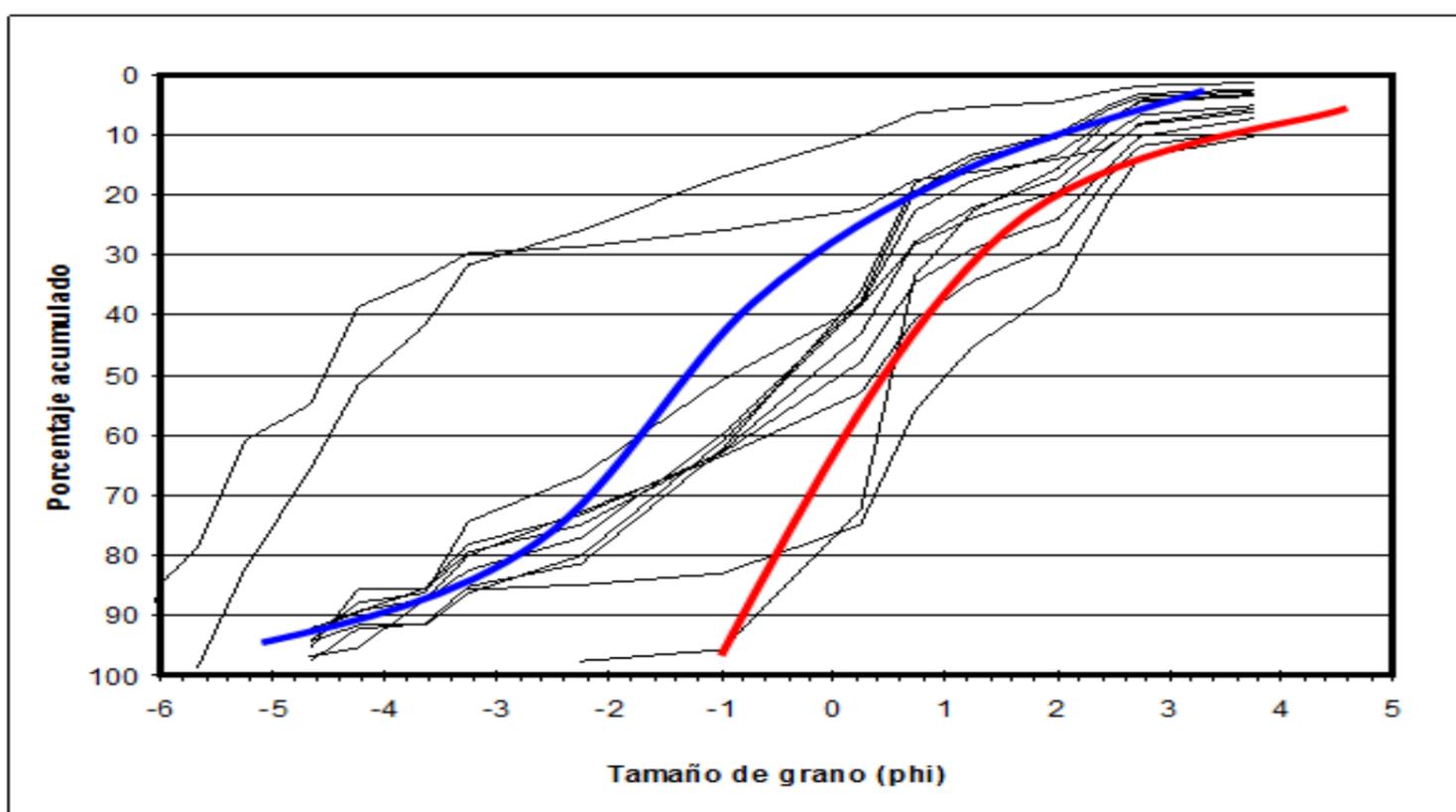


FUENTE: Takahashi 1991.

3.6.3 CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LOS LAHARES EN EL TRAMO DE ESTUDIO

De acuerdo al EEI 2004, los lahares correspondientes al volcán Cotopaxi tanto para sus depósitos proximales como para aquellos distales clasificarían en su mayoría como “flujos de escombros granulares”, llegando en contados casos a ser “flujos hiperconcentrados” Gráfico 3.20. Dicho análisis se hizo en base a la escala de tamaño de grano estándar PHI.

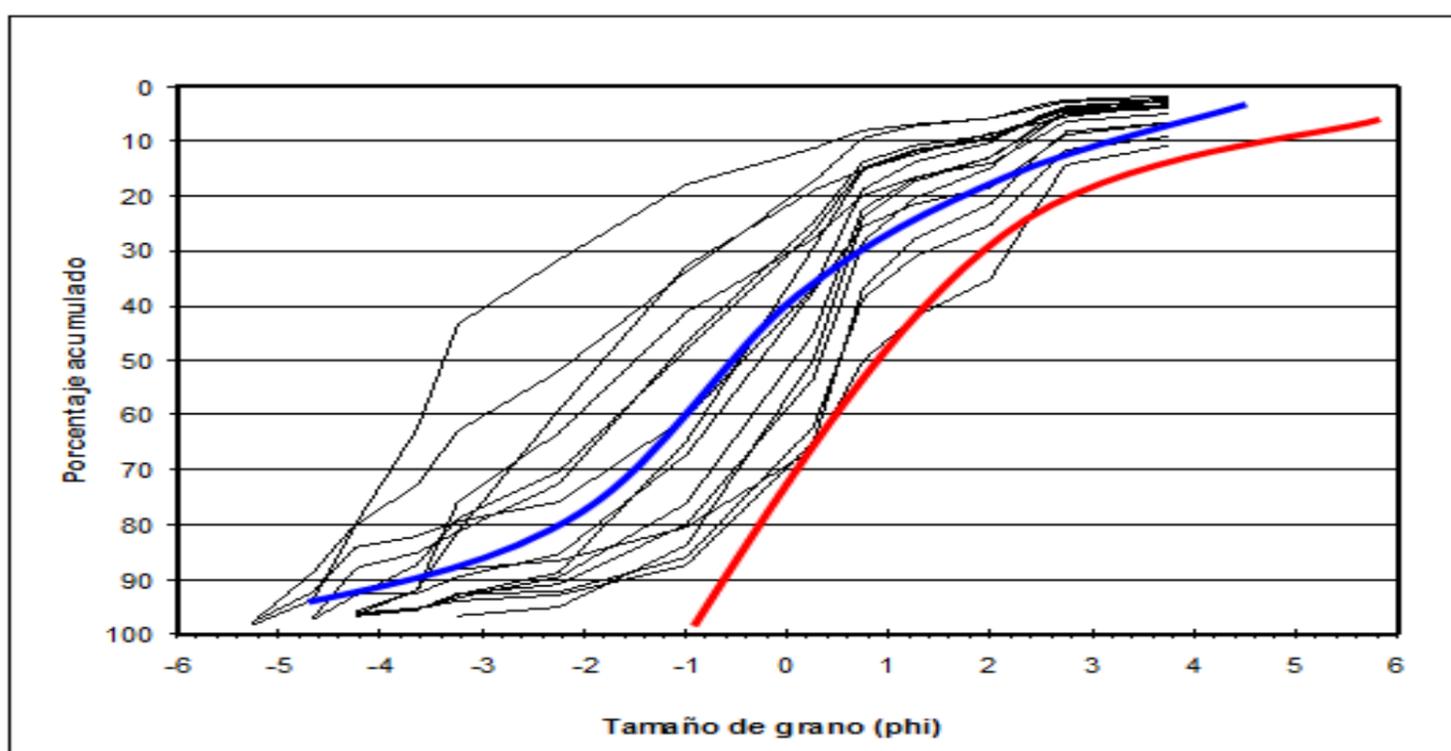
GRÁFICO NO 3.20A: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GRANO PARA LAS MUESTRAS EN LA ZONA PROXIMAL.



Las líneas azul y roja corresponderían a flujos “granular” e “hiperconcentrado” típicos, respectivamente

FUENTE: MOTHESES, P. 2004.

GRÁFICO NO 3.20B: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GRANO PARA LAS MUESTRAS EN LA ZONA DISTAL.

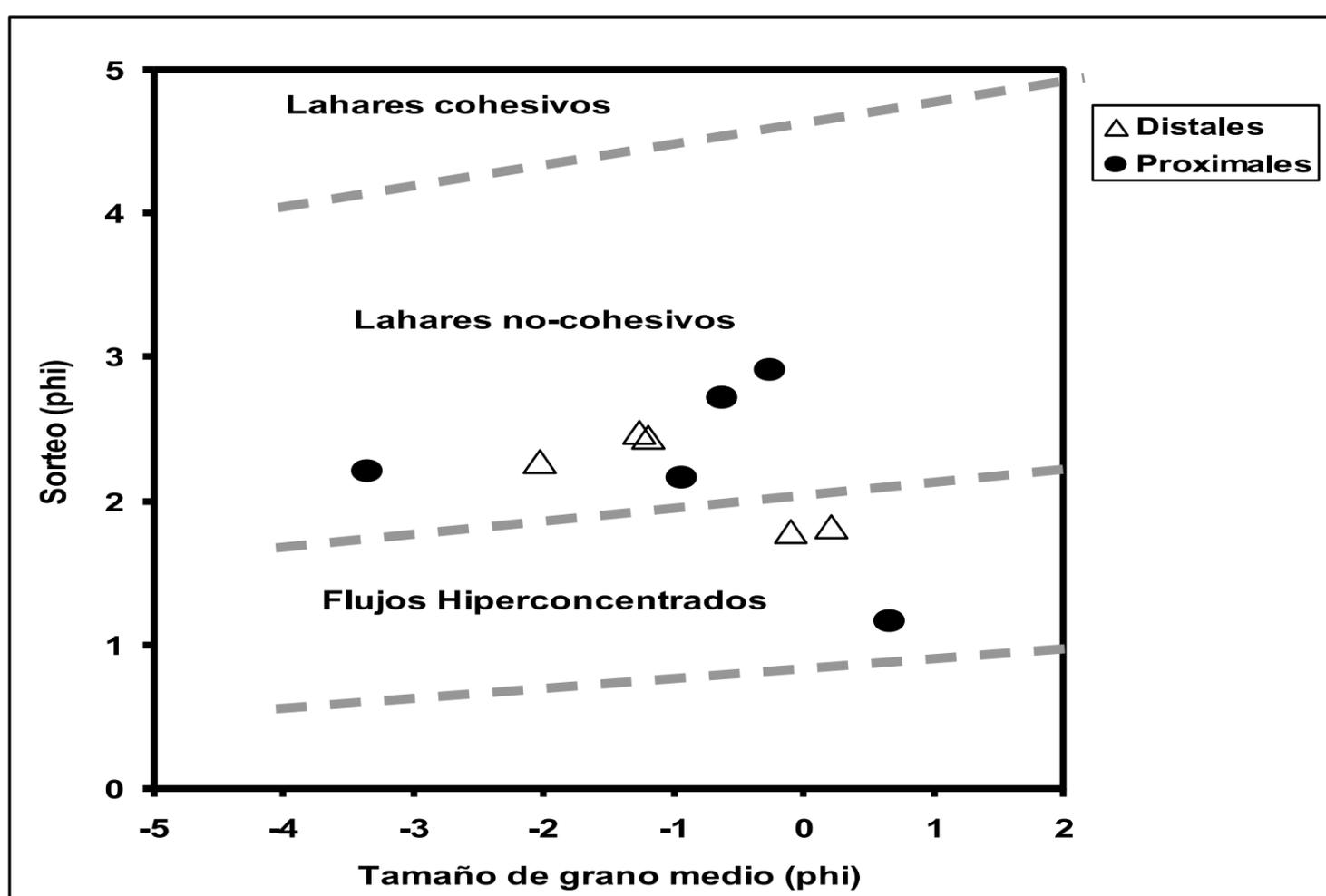


Las líneas azul y roja corresponderían a flujos “granular” e “hiperconcentrado” típicos, respectivamente

FUENTE: Mothes, P. 2004.

En el EEI 2004 se menciona que los valores de “sorteo” de las muestras analizadas en dicho estudio, corresponderían a una clasificación de “sorteo malo”, lo cual es normal dentro del flujo de escombros, con dicho antecedente se concluye que los lahares del drenaje norte del Cotopaxi se clasifican como “no cohesivos” e “hiperconcentrados”, tal como se muestra en el gráfico 3.21.

GRÁFICO NO 3.21: CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS SEGÚN EL TAMAÑO DE GRANO Y SORTEO



FUENTE: Mothes, P. 2004

Robalino 2006, afirma que el flujo del lahar de 1877 puede ser analizado como flujo newtoniano o como un flujo dilatante, a la vez afirma que en base a varios estudios realizados el flujo de escombros granular presenta características semejantes a un flujo dilatante, en base a su investigación, la misma autora menciona: “De la distribución de velocidades verticales se puede ver que para el modelo dilatante las velocidades son siempre menores para una misma profundidad. Pero la diferencia no es tan importante por lo cual, si se utiliza el modelo Newtoniano (como en la mayoría de los programas

computacionales) para modelar este tipo de flujo las velocidades que se obtengan no van a diferir de las del modelo más adecuado para este tipo de flujos”.

Es decir que el modelar un fluido dilatante como fluido newtoniano no representa una variación significativa en los resultados obtenidos, razón por la cual puede utilizarse el modelo de Manning para su simulación matemática del flujo de lahares del volcán Cotopaxi, modelo que cabe mencionar es el que utiliza el paquete computacional IBER v2.3.2 para evaluar la fricción de fondo del flujo modelado. (Bladé et al., 2014).

Con este antecedente se justificaría en principio la utilización del programa IBER v 2.3.2, para la modelación numérica del flujo de lahares del drenaje norte del volcán Cotopaxi.

A continuación, se presenta una tabla en la cual se recomiendan los modelos de fluido a utilizar en función de la tipología del flujo.

TABLA NO 3.10. MODELOS DE FLUIDO DE ACUERDO CON EL TIPO DE FLUJO FUENTE: SUÁREZ 2001.

Flujo	Característica	Fluido	Porosidad	Concentración en volumen	Peso unitario
De lodos	Viscoso	Bingham	0.3- 0.8	> 20%	1.0 – 1.6
Hiper-concentrado granular	Viscoso	Bingham o Manning	0.6- 1.0	0-40%	1.0 – 1.8
	No viscoso	Manning	0.7 – 1.0	0- 30%	1.0 – 1.7
Turbulento de residuos	Inercial (No viscoso)	Manning o Bagnold/ Takahashi	0.25 – 0.7	> 30%	1.6 – 2.0
	Viscoso	Bagnold/ Takahashi	0.1- 0.6	>40%	1.7 – 2.2
Laminar de residuos		Bingham	< 0.1		

3.7 LEVANTAMIENTO DE CAMPO DE LOS VESTIGIOS DEL EVENTO ERUPTIVO DE 1877 EN EL TRAMO

El año 2004 especialistas del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional desarrollaron un levantamiento de campo, con la finalidad de conocer en el desarrollo de los drenajes del flanco norte del Cotopaxi, secciones de Control, morfología del terreno y calados máximos de afectación del lahar producido durante el evento eruptivo del 26 de junio de 1877.

En el mencionado trabajo se escogieron los rasgos topográficos de este evento para ser medidos con detalle y de esta manera obtener datos confiables sobre las particularidades del mismo, estos datos posteriormente serán utilizados para la calibración del modelo numérico a ser utilizado en la simulación del presente trabajo.

GRÁFICO NO 3.22: LEVANTAMIENTO DE LOS VESTIGIOS DEL LAHAR DE 1877



FUENTE: Mothes, P. 2004

3.7.1 CRITERIOS UTILIZADOS PARA ESCOGER LOS SITIOS DONDE SE REALIZARON LOS PERFILES

Los sitios elegidos debieron cumplir con las siguientes condiciones y en este orden de prioridad.

1. Mostrar rasgos del lahar de 1877.
2. Presentar una topografía homogénea.
3. Presentar pendientes similares en ambas márgenes del río.
4. Ser representativos del tramo.
5. Estar en la confluencia de dos cauces.
6. Ser accesibles.

3.7.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Las medidas topográficas fueron realizadas con una metodología simple, utilizando inclinómetro de mano y cinta métrica de fibra de vidrio de 30 metros de longitud para medir las distancias. Se estima que el rango de precisión está entre 1-2 % en sentido horizontal y entre 2-3% en sentido vertical (Mothes et al., 2004).

Las mediciones de los perfiles iniciaron con la identificación de los límites de los depósitos del lahar de 1877 y del siguiente lahar más grande observado en el sitio. Se utilizó GPS de mano para ubicar los límites antes mencionados, mientras que las coordenadas fueron anotadas en UTM de longitud, latitud y altura sobre el nivel del mar. Posteriormente se midió la topografía del perfil perpendicular al curso del río. Por lo general las distancias medidas entre dos puntos consecutivos de un perfil no superaron los 20 metros. Se estima que las medidas del GPS de mano alcanzaron errores de hasta 15 metros en la vertical.

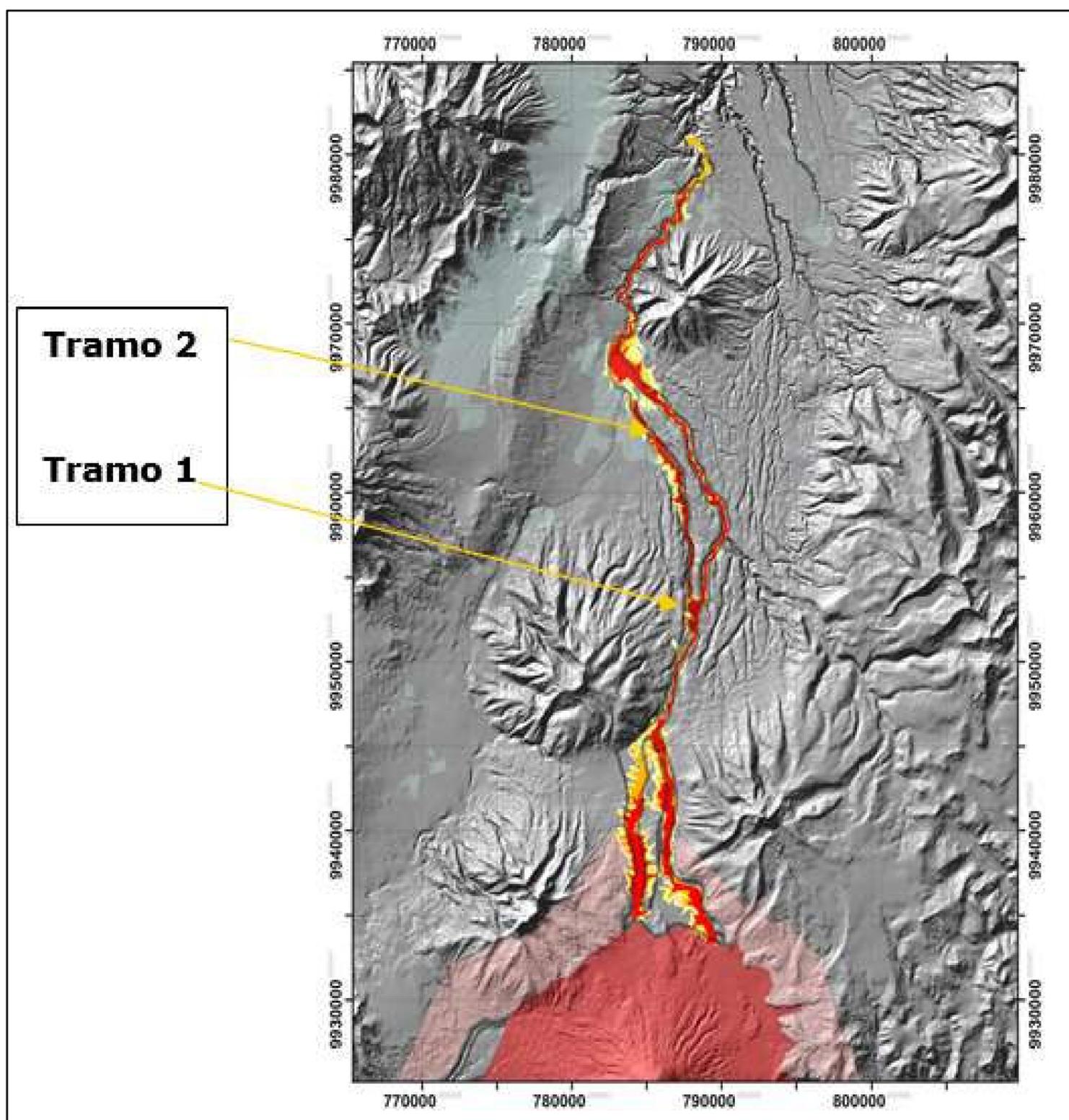
Se debe mencionar que todos los datos fueron anotados manualmente en un cuaderno, para posteriormente ser procesados en un trabajo de oficina con el respaldo fotográfico pertinente.

En el cauce del río Santa Clara se determinaron los siguientes perfiles de control: La Caldera, Rumipamba, La Moca, Mica Sur Xing- El Palyon, Hda. Carmelo Barrio San Fernando, IASA (ESPE), Selva Alegre, Sangolquí- Ejido.

3.7.3 ANÁLISIS DE LOS PERFILES REALIZADOS EN EL RÍO SANTA CLARA.

26

GRÁFICO NO 3.23: SUBTRAMOS EN EL CURSO NATURAL DEL RÍO SANTA CLARA



FUENTE: Mothes, P. 2004

3.7.2.1 Tramo 1 en el río santa clara

Con una longitud aproximada de 10 km, resulta demasiado complicado encontrar depósitos del lahar de 1877, debido a las velocidades elevadas y geometría del tramo.

Sin embargo, se pudo observar que en el sector del camino que conduce a la Urbanización los Cerros se pudo encontrar depósitos jóvenes, mismos que permiten estimar un nivel alcanzado de alrededor de 8 m sobre el fondo del Cauce (2004).

3.7.2.2 Tramo 2 en el río santa clara

Tramo que se desarrolla desde el perfil No 7 del EEI, 2004. (Chillo y Compañía) hasta el Ejido de Sangolquí. En dicho sector se encuentran rasgos significativos de depósitos lahártico, a lo largo de la planicie de alrededor de 2 km de longitud hasta el sector de Sangolquí.

El tramo se caracteriza por la presencia de pendientes relativamente bajas que varían entre 1-2 %.

TABLA NO 3.11. CARACTERÍSTICAS DE LOS PERFILES LEVANTADOS PARA QUE EL LAHAR DE 1877 A LO LARGO DEL CURSO NATURAL DEL RÍO SANTA CLARA

No	Distancia Aproximada del Cráter Km	Nombre	UTM Longitud	UTM Latitud	Ancho Maximo Limite 1877 m	Calado Máximo m	Perimetro Mojado m2	Velocidad (Run up) m/s	Caudal pico m3	Carácter Cauce	Comentarios, Pendiente
1	28.7	La Caldera	(07)872	(99)501	190	9	875	15-18	13100-16000	Pendiente moderada	Depósitos ,Semi-plana 1%
2	30.6	Rumipamba	(07)877	(99)515	275	5	685	15-18	10300/12300	pendiente Incrementa ndo	lavas lisas 4,2%
3	31.8	La Moca	(07)878	(99)544	85	15	675	15-18	10100-13000	Lahares Viejos consolidados	Pendiente Fuerte, 7%
4	32.8	Mica Sur Xing- El Playón	(07)876	(99)550	70	16	650	15-18	10000-13000	Cangagua, recto	Estrecho pocos Depósitos 4,2 %
5	33.4	Hda. Carmelo Barrio San Fernando	(07)880	(99)561	110	8	700	12	7000-10500	El valle se abre recto	Mayor Dpósitos 3.4 %
6	35.8	IASA (ESPE)	(07)877	(99)584	165	20	1000	10	10000	Pendiente Reducida	Planicies 3,4%
7	39.5	Chillo Compañía-Selva Alegre	(07)857	(99)619	140	8	725	15	10800	Encausado desde IASA	Lavas y aluviales compactados 3,2 %
8	42.1	Sangolquí-Ejido	(07)850	(99)638	110	8	400	6	2000-2800	Semi encausado desde el Choclo	estrecho este tramo 1,6 %

Nota: Coordenadas en Sistema en sistema de Referencia UTM, PSAD56 zona 17S.

FUENTE: (Mothes et al., 2004).

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

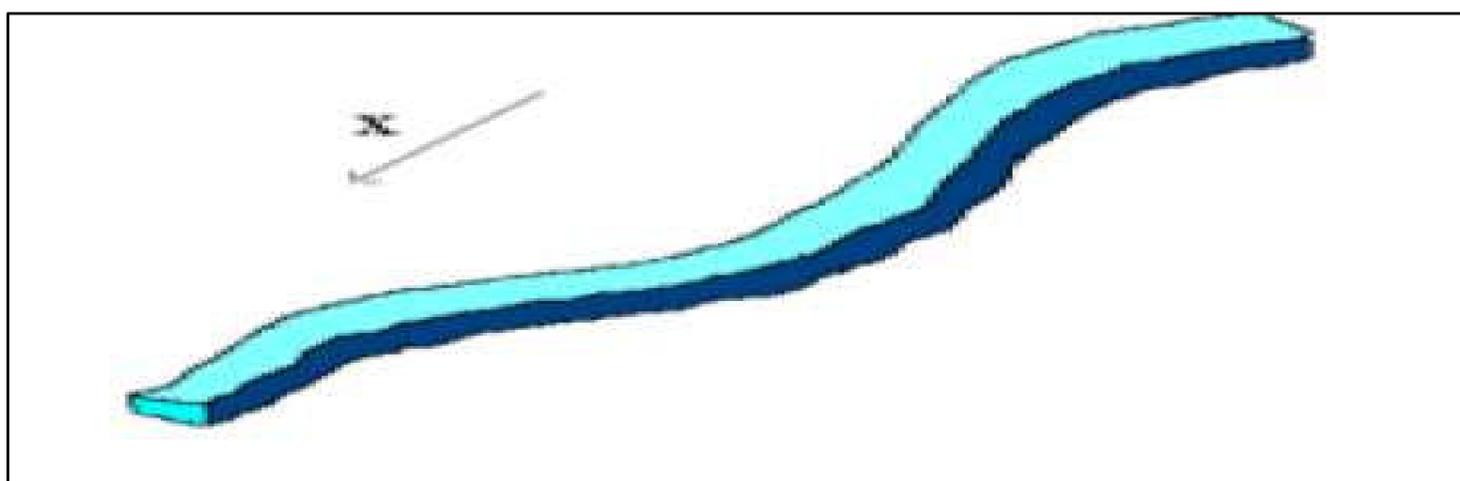
CAPÍTULO IV

MODELACIÓN NÚMÉRICA UNIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES PRIMARIOS EN EL DRENAJE NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

4.1 JUSTIFICACIÓN

Con el objeto de obtener el hidrograma de entrada para la modelación bidimensional y debido a que el tramo inicial del flujo en flanco Norte del Volcán Cotopaxi (Ríos El Salto, Pita antes de la Caldera y Santa Clara en su tramo inicial), presenta un cauce bien definido con una forma encañonada, con secciones transversales en forma de V, pendientes relativamente elevadas y con zonas de inundación prácticamente nulas, donde el flujo que predomina en el cauce es de tipo unidimensional, es decir, las características hidráulicas varían principalmente a lo largo del eje del río. Gráfico 4.1; se considera conveniente realizar la modelación numérica unidimensional de los tramos mencionados.

GRÁFICO NO 4.1: ESQUEMA DE FLUJO UNIDIMENSIONAL



FUENTE: Vasquez,J. 2003

Como se muestra en la figura anterior la dirección principal del flujo se orienta a lo largo del cauce, por lo que resulta factible realizar una aproximación exacta a

este campo del flujo bidimensional mediante una representación unidimensional, para lo cual se utiliza el software Hec-Ras, de amplio uso en la modelación hidráulica, consideración que permitirá reducir el tiempo de ejecución del proyecto sin afectar la confiabilidad de los resultados por las razones anteriormente descritas.

4.2 GENERALIDADES DEL MODELO HIDRÁULICO DE SIMULACIÓN HEC- RAS

Desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de ingenieros de la Armada estadounidense, HEC- RAS permite realizar un análisis de flujo permanente y no permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre. Entre las principales características del modelo se tienen:

- Cálculo hidráulico de estructuras tales como puentes, vertederos, alcantarillas etc.
- Visualización gráfica de datos y resultados
- Edición gráfica de secciones transversales.
- Cálculo en régimen variable y resuelve las ecuaciones de Saint-Venan completas utilizando diferencias finitas implícitas mediante un esquema de Preissmann.
- Simulación del flujo en régimen crítico y sub-crítico en la misma modelación, mediante el uso del método LPI (Local Partial Inertia).
- Considera diferentes coeficientes de Rugosidad n de Manning en una misma sección, con la posibilidad de variar los mismos en función del calado.

El modelo numérico Hec- RAS está constituido por estos cuatro componentes para análisis unidimensional de un río: Flujo permanente, Flujo No permanente, Transporte de Sedimentos, Análisis de calidad del Agua. Siendo los módulos de flujo permanente y no permanente aquellos a utilizarse dentro del presente trabajo.

4.2.1 REFERENCIAS HIDRÁULICAS DEL FLUJO PERMANENTE EN HEC-RAS

El procedimiento básico radica en la solución de la ecuación de energía en una dimensión. Se evalúan las pérdidas por fricción mediante la ecuación de Manning y adicionalmente se utilizan coeficientes de contracción y expansión, mismos que son multiplicados por el cambio de la carga de velocidad.

4.2.1.1 Ecuación para el cálculo del perfil de agua

El perfil de agua de una determinada sección transversal es evaluado mediante la resolución de la ecuación de energía (Ecuación 4.1) utilizando un proceso iterativo denominado como método de paso estándar “standard step método”.

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (4.1)$$

Donde:

Z1, Z2= Cotas de los puntos inicial y final.

Y1, Y2= Calado del agua en los puntos inicial y final.

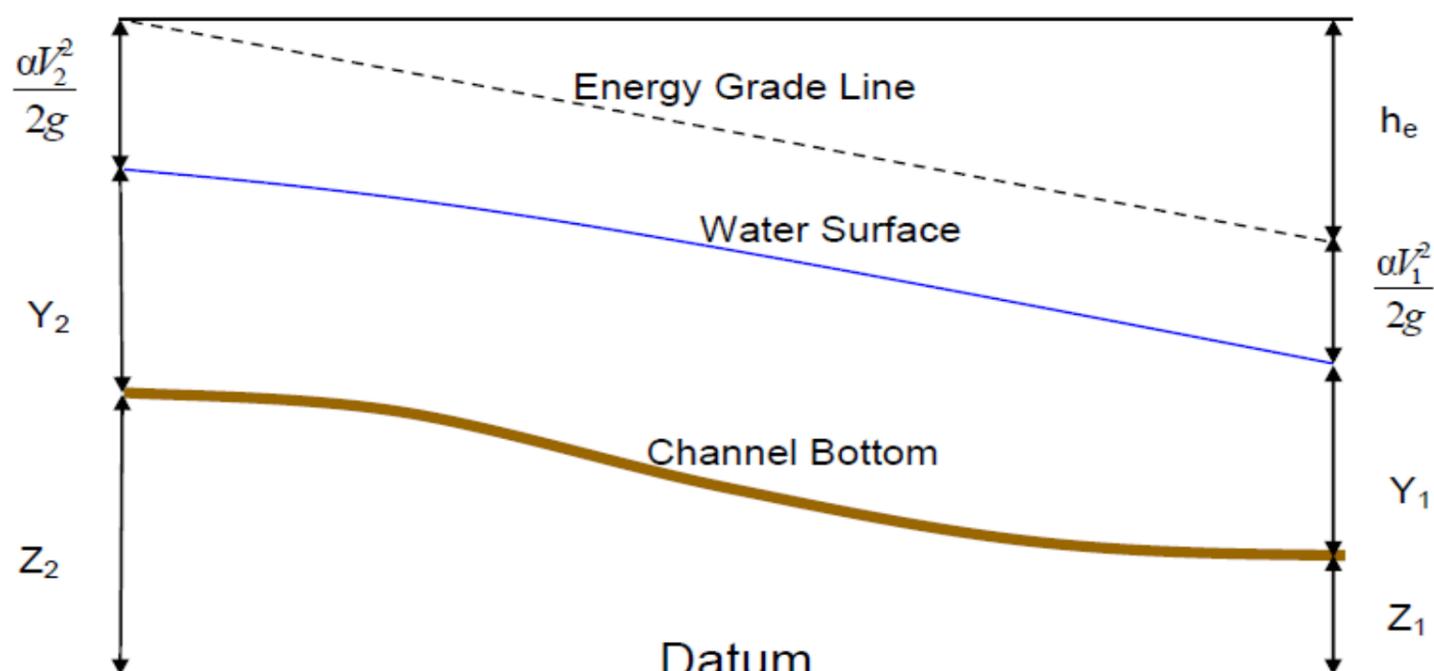
V1, V2= Velocidades promedio de flujo.

α_1 y α_2 = coeficientes de carga de velocidad.

g= aceleración de la gravedad.

he= Pérdida de energía.

GRÁFICO NO 4.2: REPRESENTACIÓN DE LOS TÉRMINOS DE LA ECUACIÓN DE ENERGÍA



La pérdida de energía “ h_e ”, compuesta por las pérdidas longitudinales o de fricción y las pérdidas localizadas de expansión y contracción, se evalúa con la siguiente ecuación.

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (4.2)$$

Siendo:

L: Longitud del tramo.

S_f : Pendiente representativa del rozamiento.

C: Coeficiente de pérdida por expansión y contracción.

4.2.1.2 Procedimiento de cálculo

La elevación de la superficie de agua en una sección transversal del flujo es determinada mediante un proceso iterativo de resolución de las ecuaciones 4.1 y 4.2. El proceso utilizado por el programa se detalla a continuación:

1. Se asume una elevación de la superficie del agua en una sección aguas arriba o en caso de que el perfil a determinarse sea supercrítico la

asunción se realizará en una sección aguas abajo.

2. Con base en la asunción anteriormente descrita, se determina las correspondientes tazas de velocidad y de transporte.
3. Con estos valores se determina la pendiente de rozamiento, y se resuelve la ecuación 4.2.
4. Se resuelve la ecuación 4.1 para determinar una nueva superficie de agua.
5. Finalmente se compara el valor calculado con el asumido, en caso de que los mismos no cumplan con la tolerancia de error de 0,003 m que por defecto asume el programa, se repite la iteración hasta cumplir con este requerimiento.

4.2.1.3 Limitaciones del programa en flujo permanente

A continuación, una serie de asunciones que al ser utilizadas pueden variar las condiciones de flujo con respecto a la realidad.

1. Flujo permanente: Puesto que no se incluyen los términos dependientes del tiempo en la ecuación de energía.
2. Flujo gradualmente variado: Debido a que la ecuación de la energía se basa en la premisa de que existe una distribución de la presión hidrostática en cada sección transversal, en caso de existir flujo rápidamente variado el programa cambia a la ecuación de momento u otras ecuaciones empíricas.
3. Flujo Unidimensional: Puesto que se considera que la energía total es la misma en todos los puntos de la sección transversal.
4. Los cauces tienen pendientes pequeñas (menores a 1:10), puesto que con pendientes de este orden o menores el error en el cálculo de la elevación bordea el 0,5%. En caso de tener pendientes más pronunciadas, se debe corregir el valor de la profundidad calculada dividiendo la misma para el coseno del ángulo de inclinación de dicha pendiente, además se debe tener en cuenta que pendientes muy pronunciadas pueden generar el ingreso de aire u otros factores que no son considerados por el programa.

TABLA NO 4.1. CORRECCIONES RECOMENDADAS PARA PROFUNDIDADES DE AGUA EN PENDIENTES ELEVADAS DETERMINADAS CON HEC-RAS

pendiente	ángulo de inclinación	coseno
1:10	5.71	0.995
2:10	11.31	0.981
3:10	16.7	0.958
4:10	21.8	0.929
5:10	26.57	0.894

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

4.2.2 REFERENCIAS HIDRÁULICAS DEL FLUJO NO PERMANENTE EN HEC-RAS

Este componente permite la simulación unidimensional de un flujo no permanente mediante una red de canales abiertos.

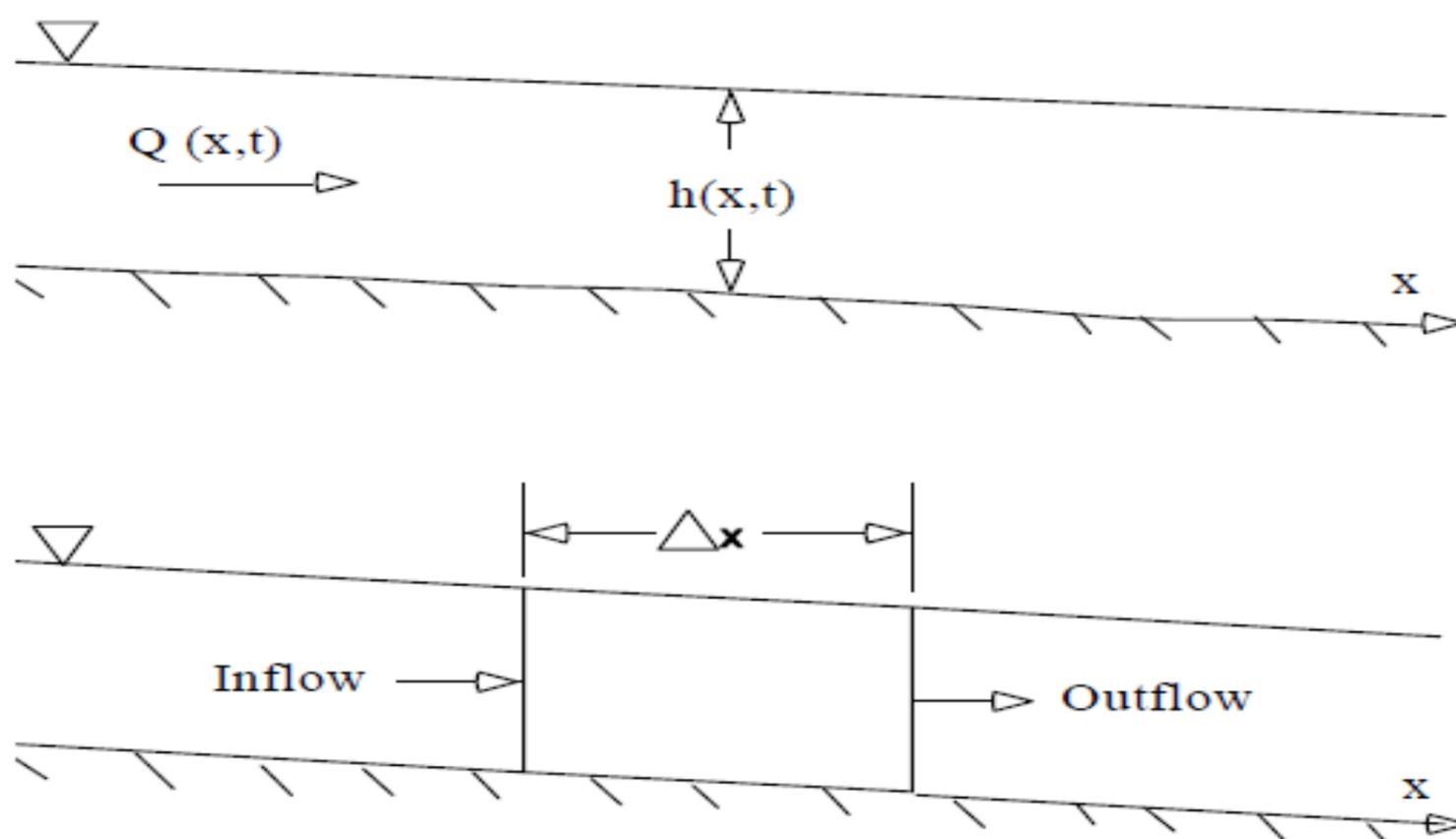
Las leyes de la física que gobiernan el flujo de agua en una corriente son: 1) El principio de conservación de masa (continuidad), y 2) el principio de conservación del momento.

4.2.2.1 Ecuación de continuidad

La conservación de la masa en un volumen de control es tal, que la tasa neta de flujo en el volumen sea igual a la variación del almacenamiento en el interior de dicho volumen.

La tasa de ingreso del flujo en el volumen del control (Gráfico. 4.3), la tasa de salida y la tasa de cambio en almacenamiento se la definen de la siguiente manera:

GRÁFICO NO 4.3: VOLUMEN DE CONTROL ELEMENTAL PARA LA DERIVACION DE LA ECUACION DE CONTINUIDAD Y MOMENTO



Tasa de ingreso

$$Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (4.3)$$

Tasa de salida

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (4.4)$$

Tasa de cambio de almacenamiento

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} \Delta x \quad (4.5)$$

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (4.6)$$

En la cual q_1 representa al flujo de ingreso lateral por unidad de longitud.

4.2.2.2 Ecuación de momentum

La conservación del momentum para un volumen de control establece que el momentum que ingresa al volumen de control sumado a todas las fuerzas externas que actúan en el volumen es igual a la tasa de acumulación del momentum. Se consideran tres fuerzas distintas 1) Presión, 2) gravedad 3) fricción

Se expresa mediante la segunda ley de Newton

$$\sum F_x = \frac{dM}{dt} \quad (4.7)$$

Fuerzas de Presión

$$F_p = \int_0^h \rho g (h-y) T(y) dy \quad (4.8)$$

Donde:

h = Profundidad (m)

y =distancia sobre el canal invertido

$T(y)$ = Función que relaciona la sección transversal con la distancia sobre el canal invertido

Fuerza Gravitacional

$$F_g = \rho g A \sin\theta \Delta x \quad (4.9)$$

Siendo:

θ = Ángulo del canal invertido con la horizontal para ríos naturales este ángulo tiende a ser demasiado pequeño.

Fuerza de Fricción

Las fuerzas de fricción entre el canal y el fluido pueden ser escritas como:

$$F_f = -\tau_o P \Delta x \quad (4.10)$$

Flujo del Momentum

El flujo que ingresa al volumen de control es descrito como sigue:

$$\rho \left[QV - \frac{\partial QV}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \quad (4.11)$$

De lo anterior, la ecuación del momentum neto se define como:

$$\rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} = -\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial z_0}{\partial x} \Delta x - \rho g A S_f \Delta x \quad (4.12)$$

De esta manera la elevación de la superficie de agua es igual a z_0+h . Es decir:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (4.13)$$

Con esta consideración la forma final de la ecuación del momentum es:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (4.14)$$

4.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES DEL EN EL TRAMO INICIAL DEL FLANCO NORTE DEL VOLCÁN COTOPAXI.

4.2.1 TRAMOS MODELADOS

La modelación numérica Unidimensional se realizará en la red de drenaje inicial del flanco norte del Volcán Cotopaxi, misma que debido a su topografía y por facilidad de modelación se ha dividido de la siguiente manera:

4.2.1.1 Río el salto

Con una longitud de aproximadamente 12km de talweg entre los sectores de la Hostería Tambopaxi y su confluencia con el Río Pita, debido a su variación en su perfil longitudinal principalmente provocada por la presencia de cascadas que al ser

modelado en un todo, generan grandes errores en el cálculo del perfil de agua además de que su simulación en flujo no permanente produce inestabilidad en la generación de los hidrogramas de salida se ha dividido a este río en 4 tramos, adoptándose la denominación de Salto 1, Salto 2, Salto 3, Salto 4 respectivamente.

El criterio de adopción de los tramos anteriores radica en la no consideración de las cascadas o altos desniveles dentro de un mismo tramo por las razones anteriormente descritas, es así que por ejemplo el Salto 1 termina antes de la presencia de un desnivel considerable, mientras que el salto 2 inicia después del mencionado desnivel.

De acuerdo al levantamiento de Campo realizado en el 2004 se tienen 6 secciones de calibración dentro del río El Salto.

4.2.1.2 Río pita 1

Corresponde al drenaje inicial del Río Pita comprendido desde el sector de San Rafael hasta antes de la Unión con el Río El Salto en el sector de Potrerillos, la extensión aproximada en el talweg es de 4,5 km aproximadamente. Por razones similares a las descritas en el río El Salto se dividió al río Pita 1 en 3 Tramos, que para este estudio se denominan Pita 1 Tramo1, Tramo2 y Tramo 3 respectivamente. Encontrándose 5 secciones de Calibración a lo largo de los mismos.

4.2.1.3 Río pita 2

Se ha denominado así a la continuación del río Pita, después de su confluencia con el río el Salto, este tramo avanza hasta el sector denominado como la Caldera, comprendiendo una longitud aproximada en el talweg de 3,7 km, encontrándose una sección de calibración.

4.2.1.4 Río santa clara

Corresponde al río de interés del presente trabajo de titulación el mismo fluye desde el sector de La Caldera hasta su confluencia con el río Pita, teniendo una longitud aproximada en el talweg de 22km. Debido al evidente cambio de pendiente y a su variación en planta se ha dividido al río en 3 tramos, mismos que serán

denominados como Santa Clara 1, 2 y 3 respectivamente, repartiéndose 6 secciones de calibración dentro de los mismos.

Este río tiene una particularidad especial con relación a los anteriores, ya que en el mismo se encuentran zonas de eminente flujo lateral o zonas de inundación, razón por la cual se decidirá en función de los resultados obtenidos el lugar de inicio de la simulación bidimensional.

4.2.2 PROCESO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN UNIDIMENSIONAL

A continuación, se describe brevemente el proceso utilizado para la modelación numérica unidimensional, tomando como ejemplo el tramo 3 del río Santa Clara, proceso que se replica en el resto de ríos y tramos mencionados anteriormente.

4.2.2.1 Ingreso de la geometría

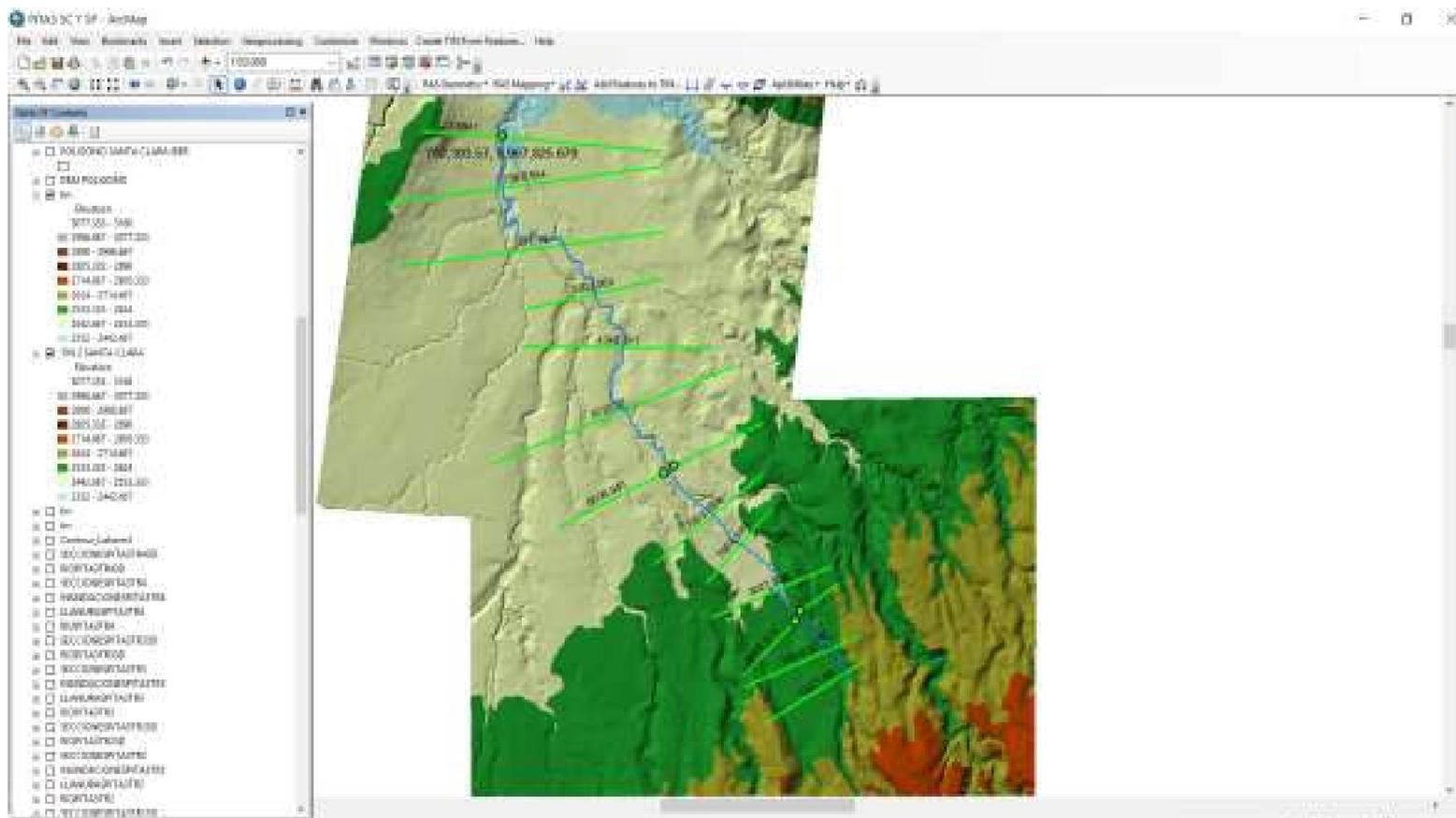
Para el ingreso de la geometría se procedió de la siguiente manera:

A partir de la información técnica disponible, misma que fue descrita en el capítulo 3, y con la ayuda del Software Hec-Geo Ras, (el cual es una extensión para Arc Gis de Hec Ras), se define tanto el trazado del río, bancos, zonas de inundación y secciones transversales georreferenciadas, definidas de tal manera que estas permitan representar la morfología del río tanto en planta como en perfil.

Posteriormente se procede a intersecar los mismos con el DEM para poder exportar la geometría al Hec Ras, adicionalmente se colocó diques o levees en aquellas secciones en las cuales el flujo tendía a desviarse del cauce principal, con la finalidad de obtener las condiciones de flujo más reales.

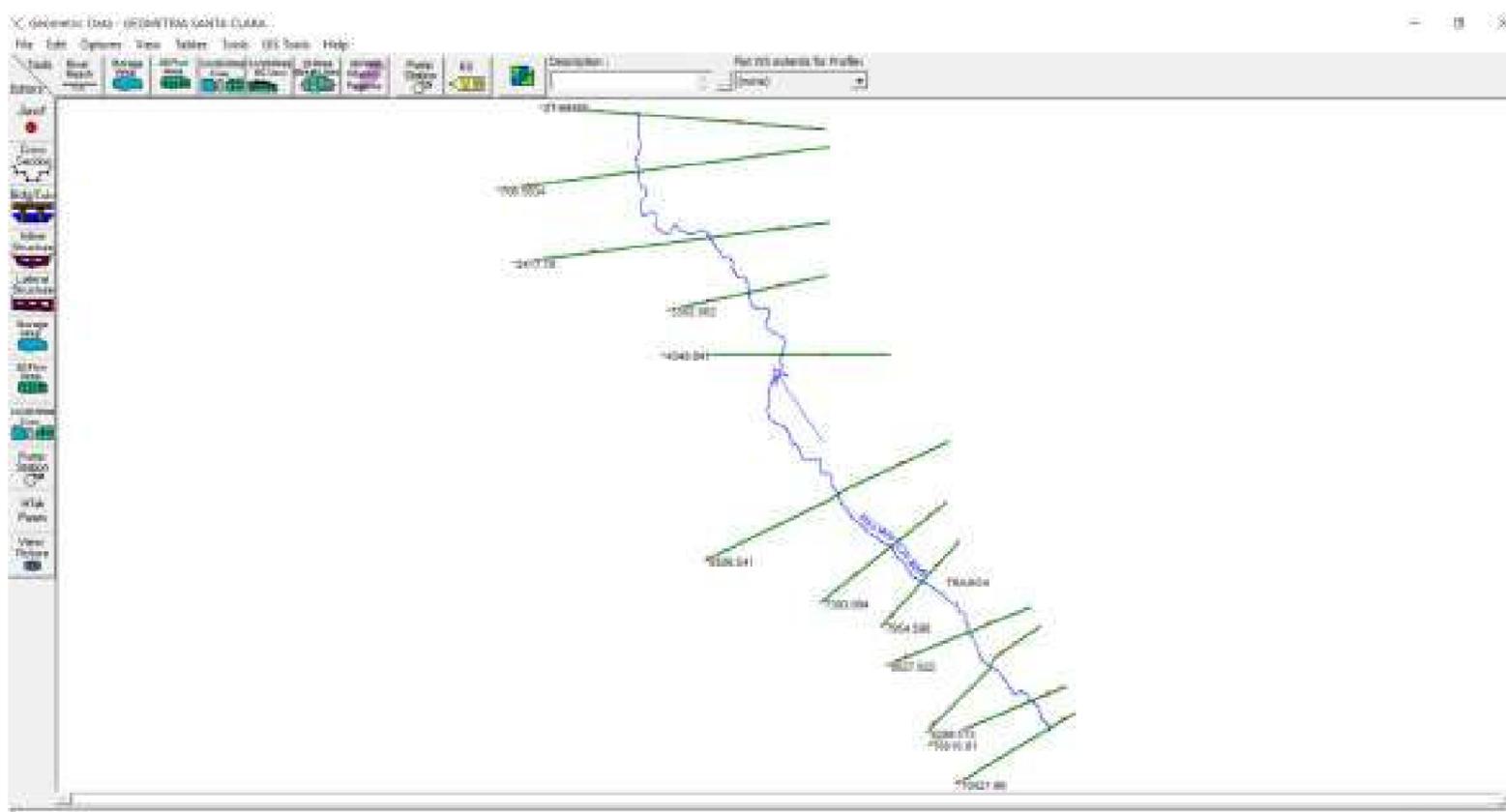
En cuanto al coeficiente de Manning inicial se consideró los parámetros estimados en el EEI 2004, valores que serán actualizados o validados en la etapa de calibración del modelo.

GRÁFICO NO 4.4: VISTA EN PLANTA DE LA GEOMETRÍA UTILIZADA PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENCIONAL EN EL CAUCE DEL RÍO SANTA CLARA 3 EN ARC GIS



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

GRÁFICO NO 4.5: VISTA EN PLANTA DE LA GEOMETRÍA DEPURADA UTILIZADA PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENCIONAL EN EL CAUCE DEL RÍO SANTA CLARA 3 EN HEC-RAS



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

4.2.2.2 Calibración del modelo numérico con flujo permanente

Con base en el levantamiento de Campo realizado en el 2004 se conoce los calados de calibración, y en función de los caudales estimados en el capítulo 3 del presente trabajo, se procede a calibrar el modelo numérico utilizando el flujo permanente del Hec-RAS.

La calibración consiste básicamente en conseguir los calados estimados en campo para el evento eruptivo de 1877 (Evento de Calibración), considerando los caudales estimados para dicho evento, la topografía del cauce y el Coeficiente de rugosidad n de Manning. Al ser tanto la topografía como el caudal valores fijos, la calibración dependerá únicamente del coeficiente de rugosidad de Manning que será la variable que permita calibrar el modelo numérico.

4.2.2.2.1 Datos de ingreso y condiciones de borde para la calibración.

Se tiene como dato el caudal de calibración mismo que para el caso del río Santa Clara se estima en 21427.56 m³/s.

Con respecto a las condiciones de borde se consideró que en la sección aguas arriba existe calado normal, cuya pendiente está definida por la pendiente promedio del tramo que para este caso se estima en 0,014, puesto que al considerar flujo uniforme la pendiente de la superficie de agua tiende a ser igual a la del fondo del cauce.

Mientras tanto que aguas abajo se consideró calado crítico, debido a que esta resulta ser una buena aproximación cuando no se dispone de información suficiente para considerar las otras opciones presentadas por el programa.

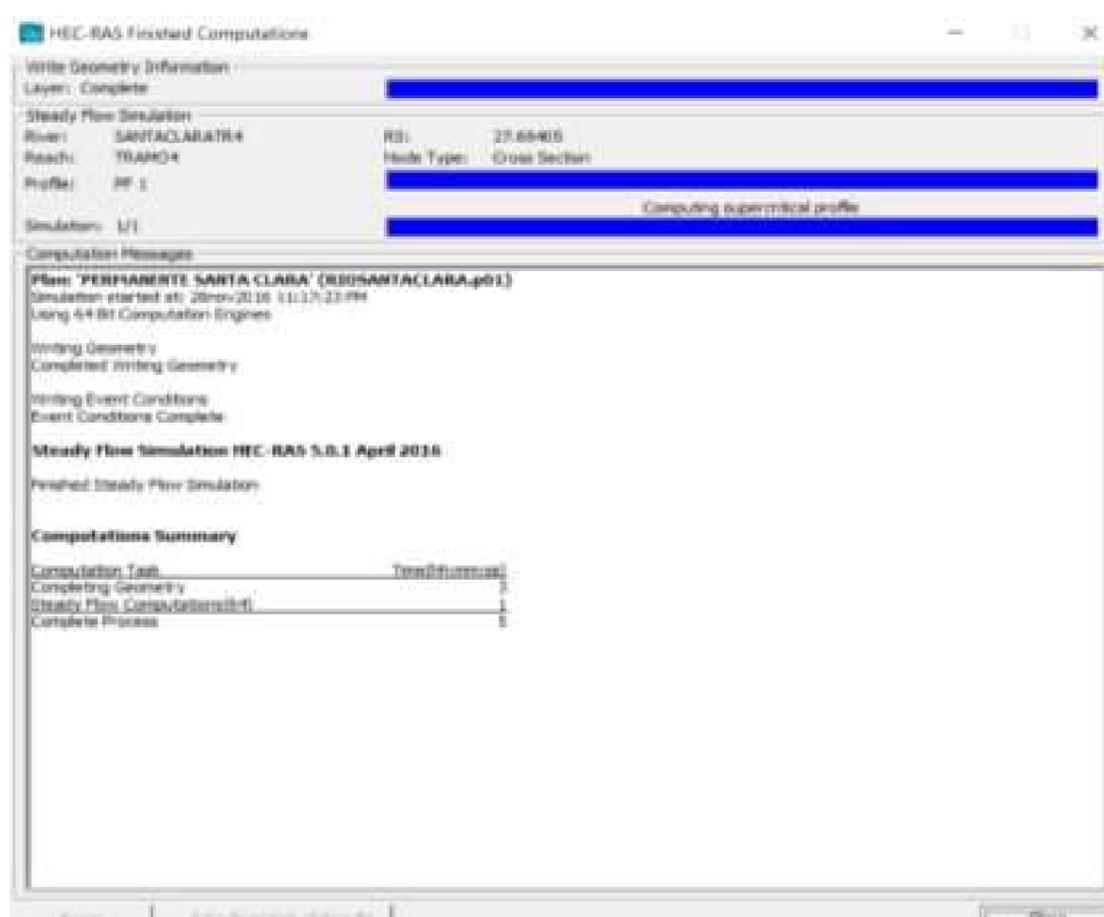
4.2.2.2.2 Análisis

Para el análisis se consideró la existencia de un flujo mixto lo cual permite conocer las zonas en las cuales existe flujo su crítico o supercrítico de ser el caso, se debe notar que debido a las fuertes pendientes se esperaría que el flujo tienda a ser crítico y/o supercrítico, razón por la cual es conveniente analizar como flujo mixto

ya que al considerarse únicamente flujo supercrítico no se tendría en cuenta las zonas de flujo crítico.

El análisis realizado toma un tiempo demasiado corto, 1s (Gráfico 4.6), lo cual implica una gran ventaja de los modelos unidimensionales con respecto a modelos bidimensionales o tridimensionales.

GRÁFICO NO 4.6: ANÁLISIS DEL FLUJO PERMANENTE



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

4.2.2.2.3 Resultados de la simulación con régimen permanente

Posterior una serie de corridas del modelo numérico se estimaron los valores n de Manning que se ajustan de una mejor manera a los valores obtenidos en campo, vale destacar que los mismos que representan un aglutinamiento de todas las características de los flujos de lodo y escombros que circulan, no solo de la resistencia de las fronteras sólidas, sino de la interacción interna de los componentes del flujo, y de las condiciones físicas de los canales por los cuales fluye el flujo (Lorenzini y Mazza, 2004).

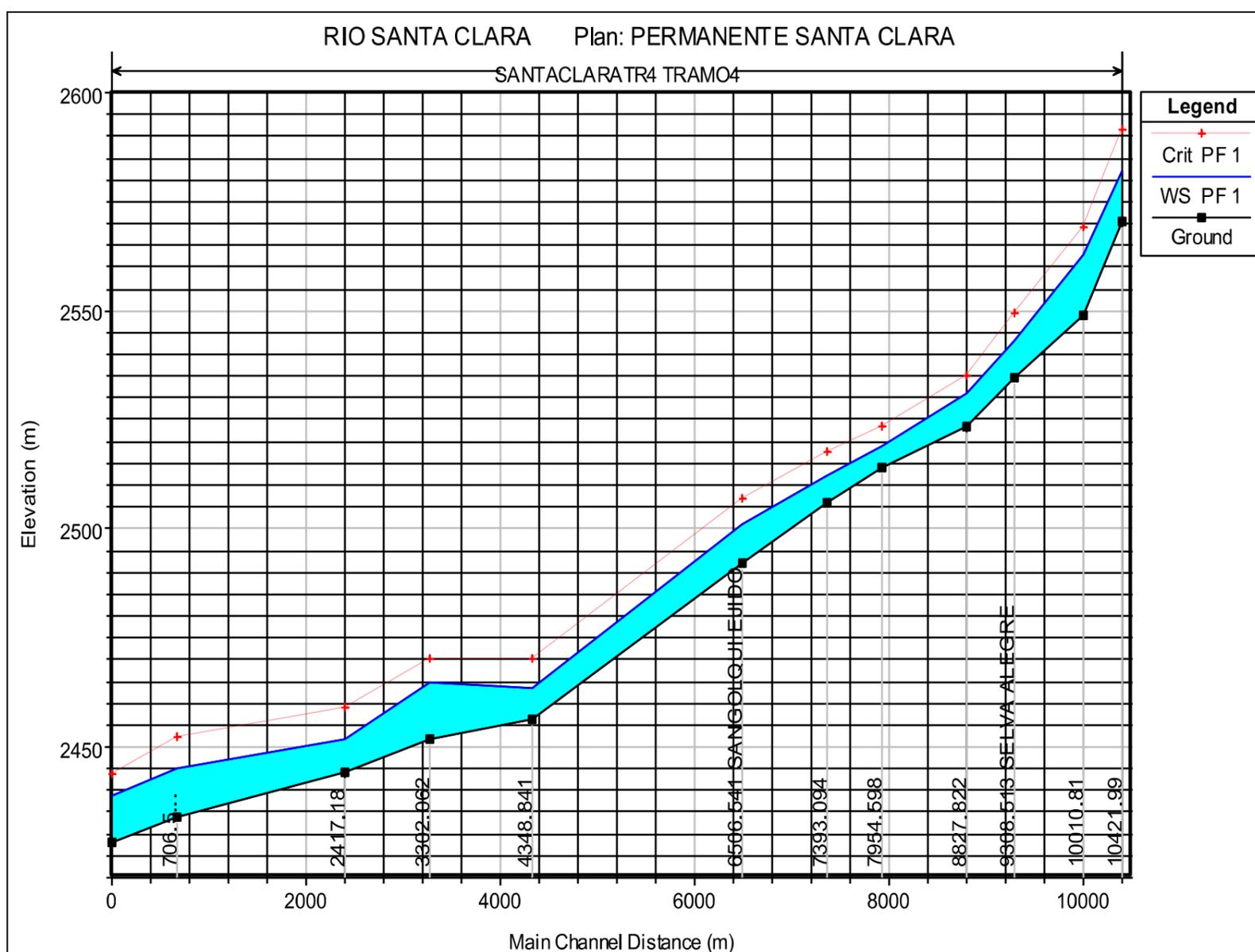
TABLA NO 4.2. VALORES DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD n CALIBRADOS EN LA SIMULACIÓN UNIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES EN EL RÍO SANTA CLARA

N°	NOTACION HECRAS	SECCION DE CALIBRACION	CAUDAL (m ³ /s)	CALADO DE CAMPO (m)	MANNING CENTRAL	MANNING MARGEN	CALADO CALCULADO(m)
1	6816	LA CALDERA	21427.56	9	0.023	0.023	8.97
2	1919	LA MOCA	21427.56	15	0.088	0.088	15.02
3	7.87	HDA. CARMELO	21427.56	9	0.015	0.015	9.81
4	2744	IASA-ESPE	21427.56	20	0.067	0.067	19.89
5	9308.0.0	SELVA ALEGRE	21427.56	8	0.025	0.025	8.13
6	6506	SANGOLQUI-EJIDO	21427.56	8	0.015	0.015	8.89

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

Con los valores anteriores se puede observar que el flujo en el tramo corresponde a un régimen supercrítico. (Gráfico 4.7).

GRÁFICO NO 4.7: PERFIL LONGITUDINAL FLUJO PERMANENTE



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

Como se observa en la figura anterior el perfil tiende a ser continuo y liso con profundidades menores a la profundidad crítica. Sin embargo debido a la cercanía de dichas profundidades de flujo con respecto al calado crítico se puede aducir que las condiciones de energía específica son cercanas a las mínimas. Es decir que en el tramo analizado el flujo de lahares optimiza su movimiento con el mayor grado de eficiencia lo que hace que este sea controlado por la geometría del cauce.

4.2.2.3 Simulación numérica unidimensional con flujo no permanente del flujo de lahares del volcán Cotopaxi en el río santa clara.

4.2.2.3.1 Datos de ingreso y condiciones de borde

Una vez que ha sido calibrado el modelo numérico con flujo permanente, el paso a seguir es la simulación numérica con flujo no permanente con la geometría anteriormente calibrada, para lo cual se considera como condiciones de borde en la sección aguas arriba los hidrogramas con los volúmenes del glaciar del 2011 y 1976 planteados en el capítulo 3. En lo que respecta a la condición de borde aguas abajo se considera calado normal bajo una pendiente de 0,014, misma que corresponde a la pendiente promedio del talweg del río, la cual cumple con la suposición de que la pendiente de la superficie de agua es igual a la pendiente del fondo del cauce cuando se estudia flujo uniforme, ratificando el alto grado de confiabilidad de la aproximación.

Adicionalmente se consideró como condición inicial del flujo un caudal de 300 m³/s.

4.2.2.3.2 Análisis

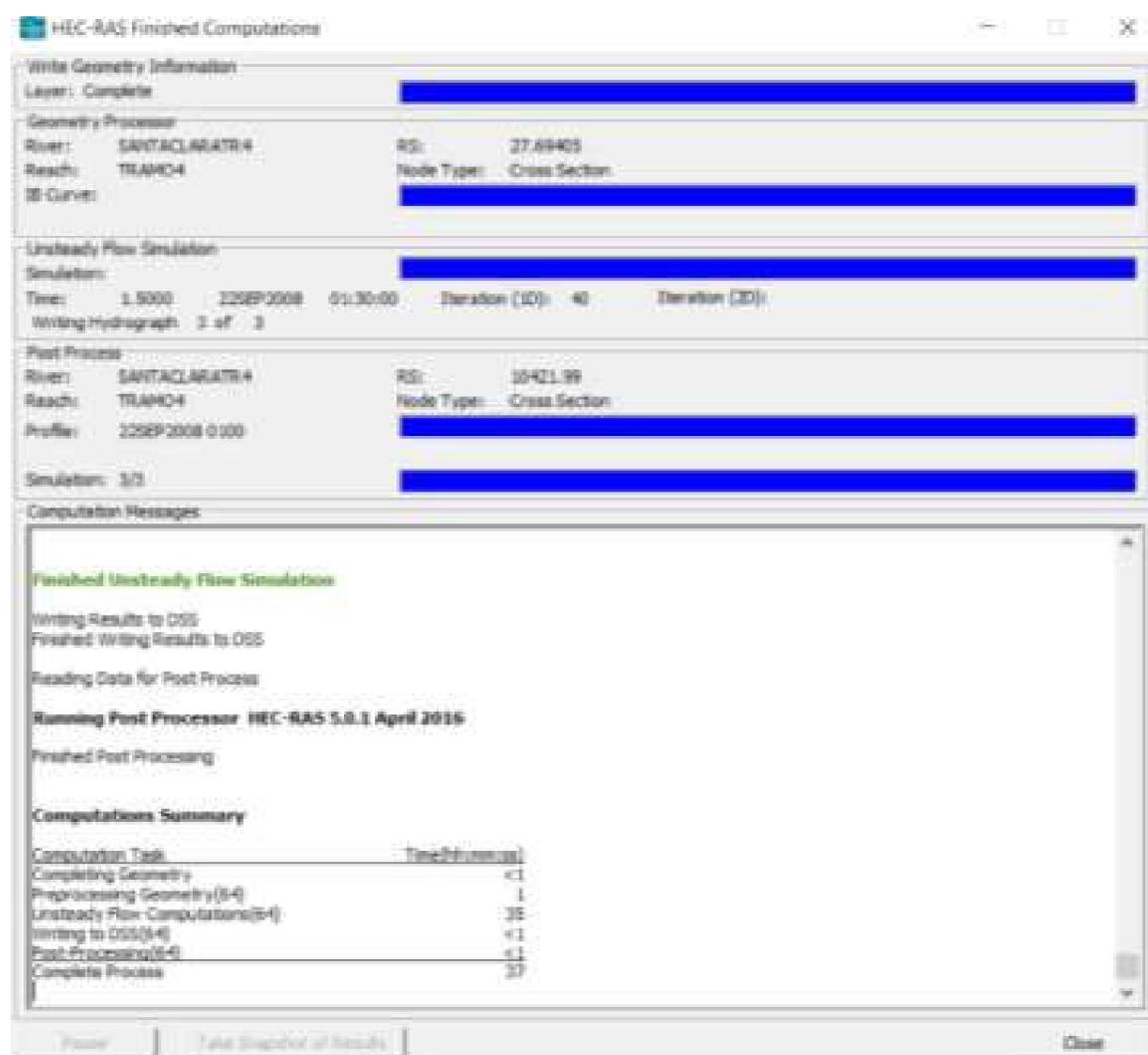
En el análisis se tuvo las siguientes consideraciones:

- Intervalo de Computo: 0.5 segundos.
- Intervalos del hidrograma de salida: 1 minuto.
- Intervalo detallado de salida: 1 hora.
- Régimen de flujo: Flujo mixto

Bajo estas consideraciones el tiempo de simulación a pesar de tratarse de un flujo no permanente es demasiado bajo con respecto a los modelos

bidimensionales, además de que no se evidencian mensajes de inestabilidad en la corrida del programa (Gráfico 4.8). Problema que por lo general se presenta en el modelo HEC-Ras al analizar un flujo no permanente.

GRÁFICO NO 4.8: VENTANA DE SIMULACIÓN CON RÉGIMEN NO PERMANENTE DEL FLUJO DE LAHARES DEL COTOPAXI EN EL CAUSE DEL RÍO SANTA CLARA 3



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

Es importante mencionar que inicialmente se tuvieron problemas de estabilidad al simular con flujo no permanente, sin embargo, se solucionó los mismos con las recomendaciones realizadas por Ahmed, 2008.

En casos particulares las recomendaciones anteriormente citadas no fueron suficientes para lograr el objetivo. Sin embargo, se logró corregir el modelo disminuyendo el intervalo de computo, mismo que las versiones actuales de Hec ras permiten tener un mínimo de 0.1s, valores que corrigieron los errores de estabilidad del modelo numérico.

GRÁFICO NO 4.9: PARAMETROS RECOMENDADOS EN LA TESIS DE AHMED HAMAD PARA LA ESTABILIDAD DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA CON RÉGIMEN NO PERMANENTE UTILIZANDO EL MODELO HEC RAS.

HEC-RAS Unsteady Computation Options and Tolerances

General (1D Options) | 2D Flow Options | 1D/2D Options

Unsteady Flow Options

Theta [implicit weighting factor] (0.6-1.0):	1	Number of warm up time steps (0 - 100,000):	200
Theta for warm up [implicit weighting factor] (0.6-1.0):	1	Time step during warm up period (hrs):	0.01
Water surface calculation tolerance (m):	1	Minimum time step for time slicing (hrs):	0
Storage Area elevation tolerance (m):	0.015	Maximum number of time slices:	20
Flow calculation tolerance [optional] (m ³ /s):	10	Lateral Structure flow stability factor (1.0-3.0):	2
Max error in water surface solution (Abort Tolerance)(m):	30	Inline Structure flow stability factor (1.0-3.0):	1
Maximum number of iterations (0-40):	40	Weir flow submergence decay exponent (1.0-3.0):	3
Maximum iterations without improvement (0-40):		Gate flow submergence decay exponent (1.0-3.0):	1
<input type="checkbox"/> Compute energy losses over junctions		DSS Messaging Level (1 to 10, Default = 4)	4

Geometry Preprocessor Options

Family of Rating Curves for Internal Boundaries

- Use existing internal boundary tables when possible.
- Recompute at all internal boundaries

1D Equation Solver

- Skyline/Gaussian (Default: Faster for dendritic systems)
- Pardiso (Optional: May be faster for large interconnected systems)

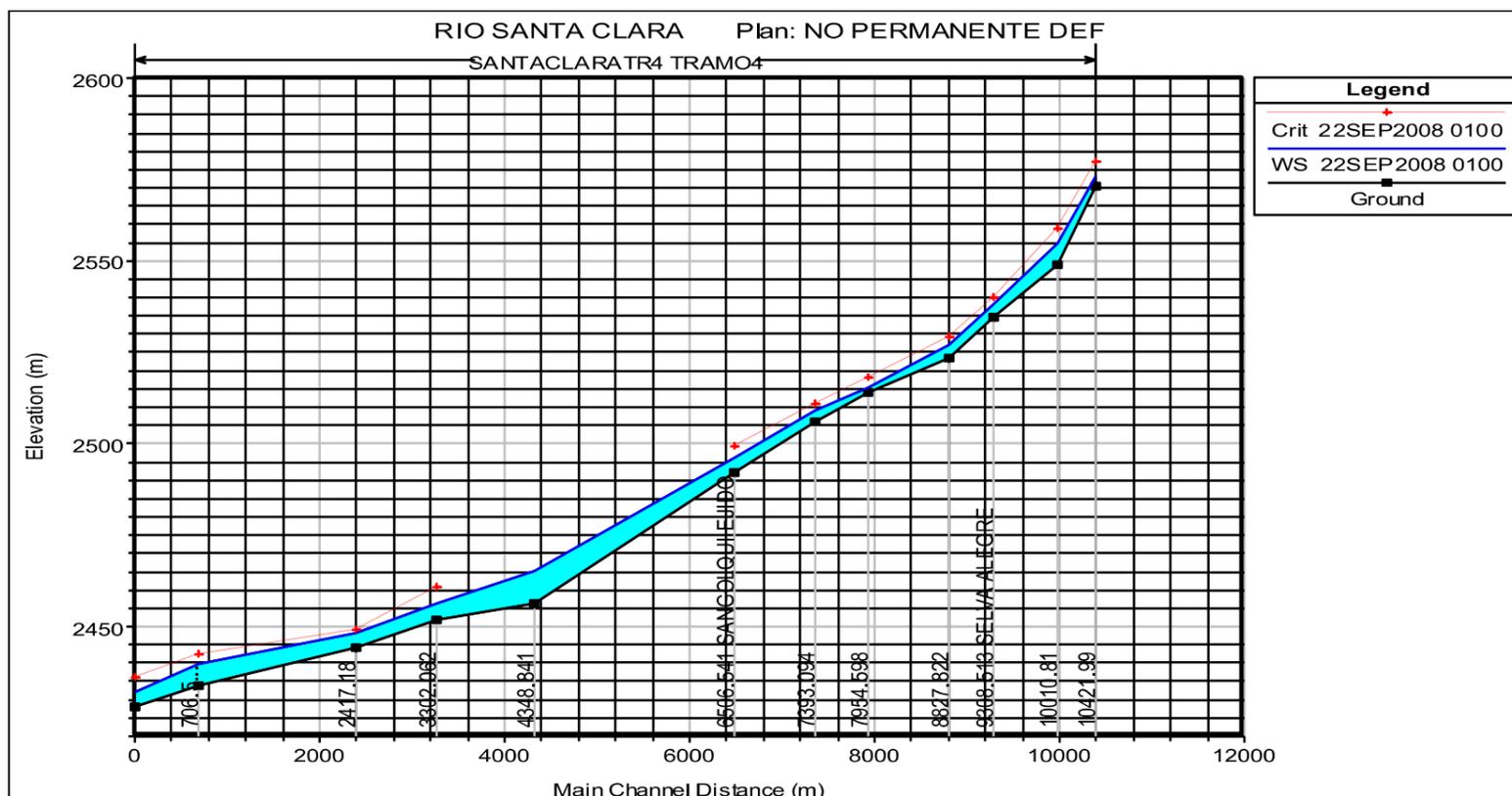
Number of cores to use with Pardiso solver: All Available

OK Cancel Defaults ...

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

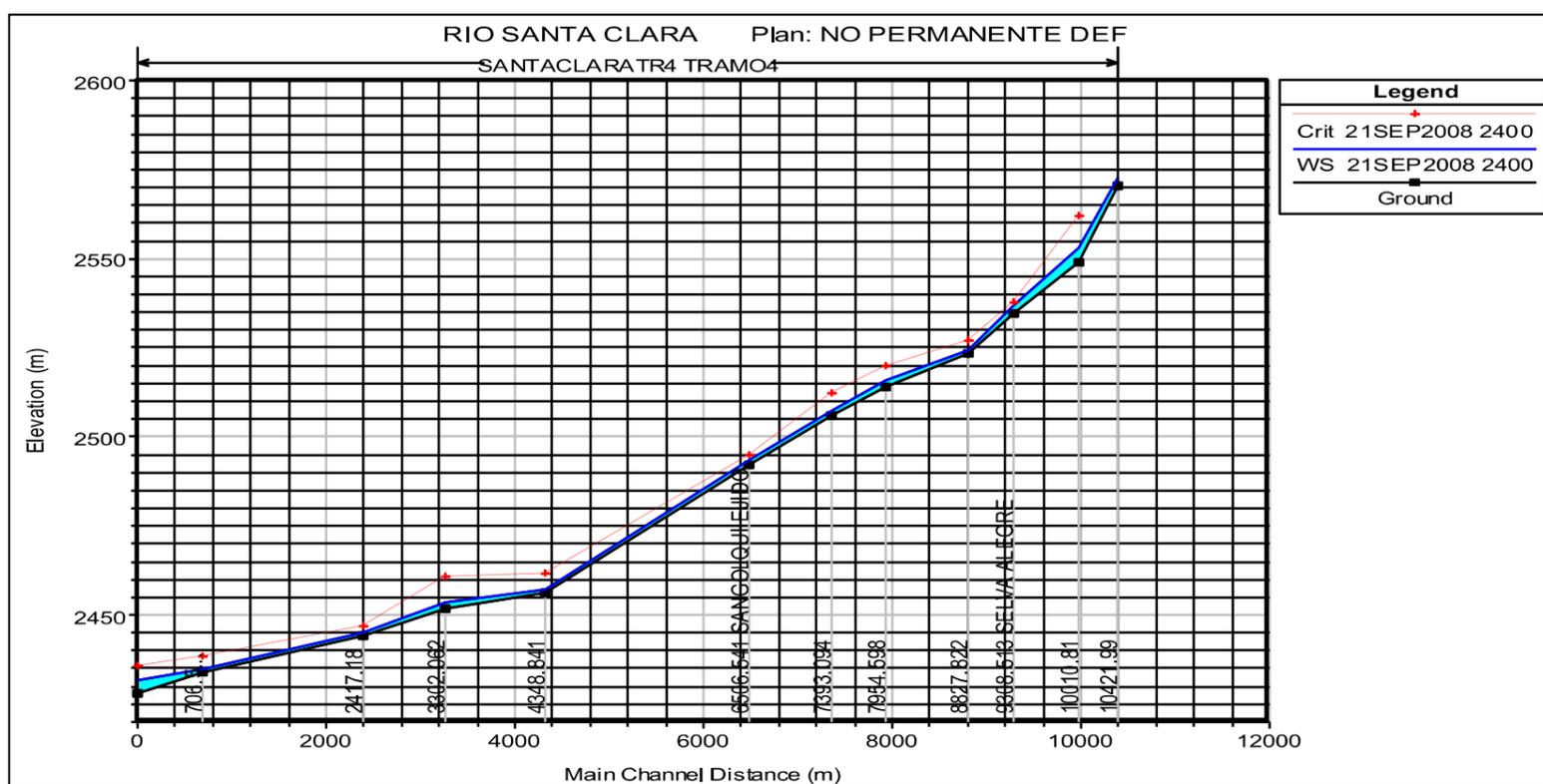
4.2.2.3.3 resultados de la simulación con regimen no permanente

GRÁFICO NO 4.10A. PERFIL LONGITUDINAL PARA FLUJO NO PERMANENTE INICIO DE LA SIMULACIÓN



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

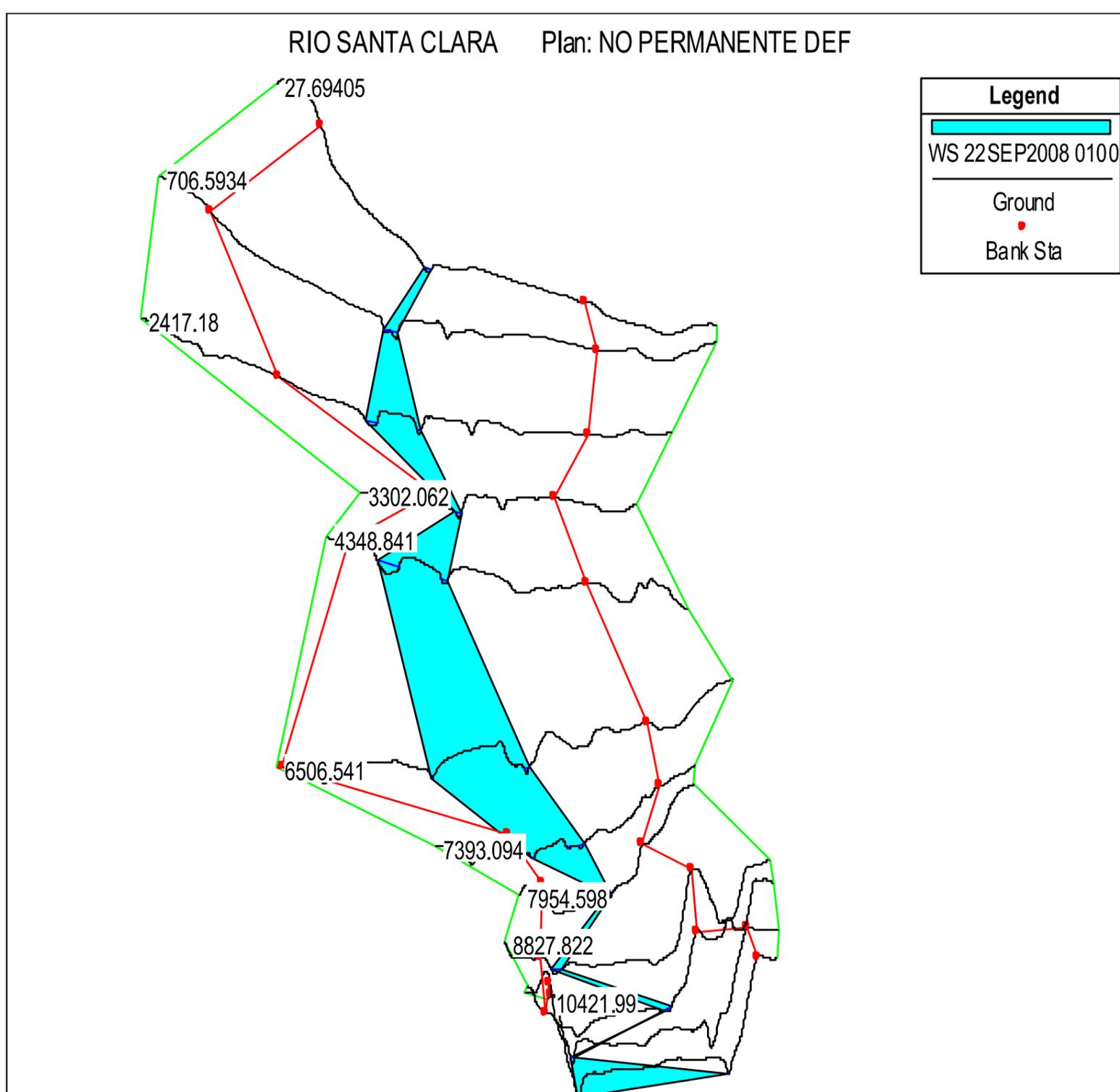
GRÁFICO NO 4.10 B. PERFIL LONGITUDINAL PARA FLUJO NO PERMANENTE AL FINAL DE LA SIMULACIÓN



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

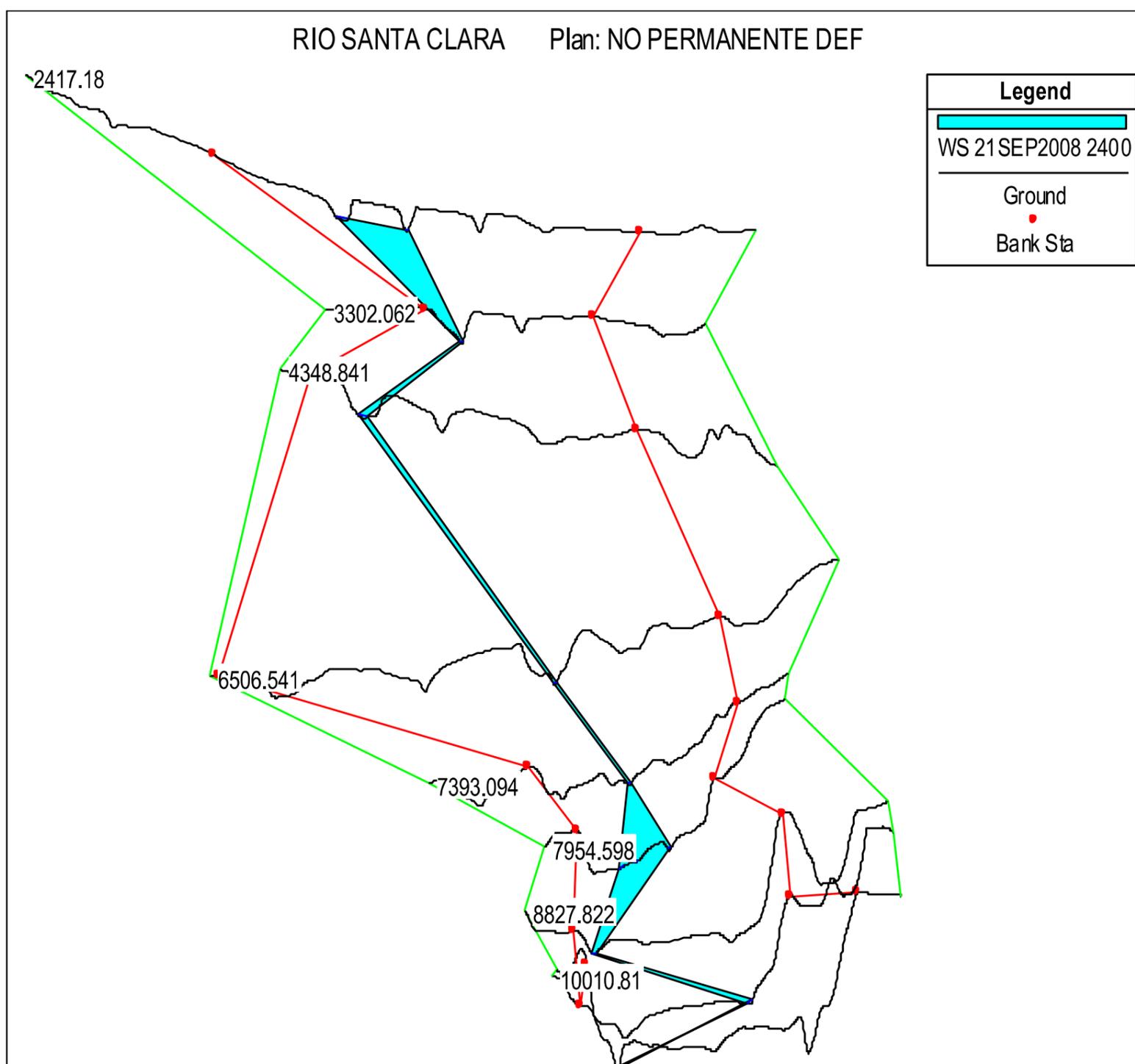
Como se observa en las figuras anteriores se muestra un flujo supercrítico en todo el tramo salvo pequeñas excepciones en las cuales este tiende a ser crítico, además se puede diferenciar el descenso del nivel de la superficie de flujo en el lahar con relación al inicio del tránsito. Esta aseveración puede ser apreciada de una mejor manera en la Gráfico 4.11, en la cual se distingue en planta y una manera más clara la diferencia del flujo del lahar entre el inicio y final del tránsito del flujo en el tramo.

GRÁFICO NO 4.11A. VISTA TRIDIMENSIONAL DEL TRANSITO DEL LAHAR EN EL RÍO SANTA CLARA 3 PARA FLUJO NO PERMANENTE AL INICIO DE LA SIMULACIÓN



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

GRÁFICO NO 4.11B. VISTA TRIDIMENSIONAL DEL TRANSITO DEL LAHAR EN EL RÍO SANTA CLARA 3 PARA FLUJO NO PERMANENTE AL FINAL DE LA SIMULACIÓN

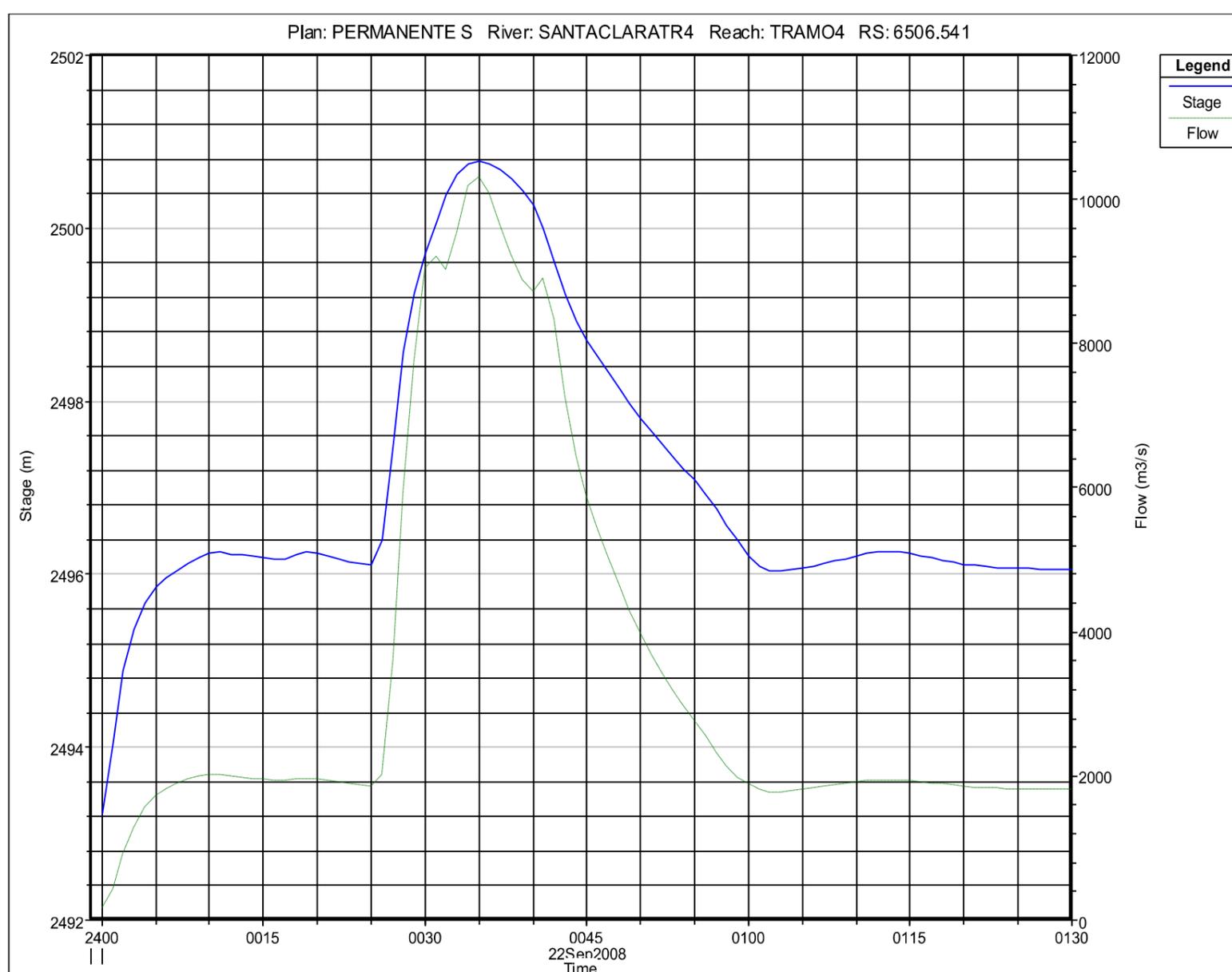


ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

Como ya se ha mencionado anteriormente, el propósito de la simulación unidimensional, es el obtener el hidrograma de salida del tramo, puesto que será el dato de ingreso hacia el nuevo tramo en cual se evidencia un flujo eminentemente lateral, es decir bidimensional, tema que es objeto del presente proyecto de titulación.

Así se tiene como hidrograma de salida de la modelación unidimensional en la sección Sangolquí- Ejido Gráfico 4.12, lugar en el cual iniciaría la modelación bidimensional teniendo en cuenta la existencia de zonas de inundación en el sector que a su vez está altamente poblado, razón por la cual se requiere un análisis más detallado del flujo de lahares y su posible afectación en la zona.

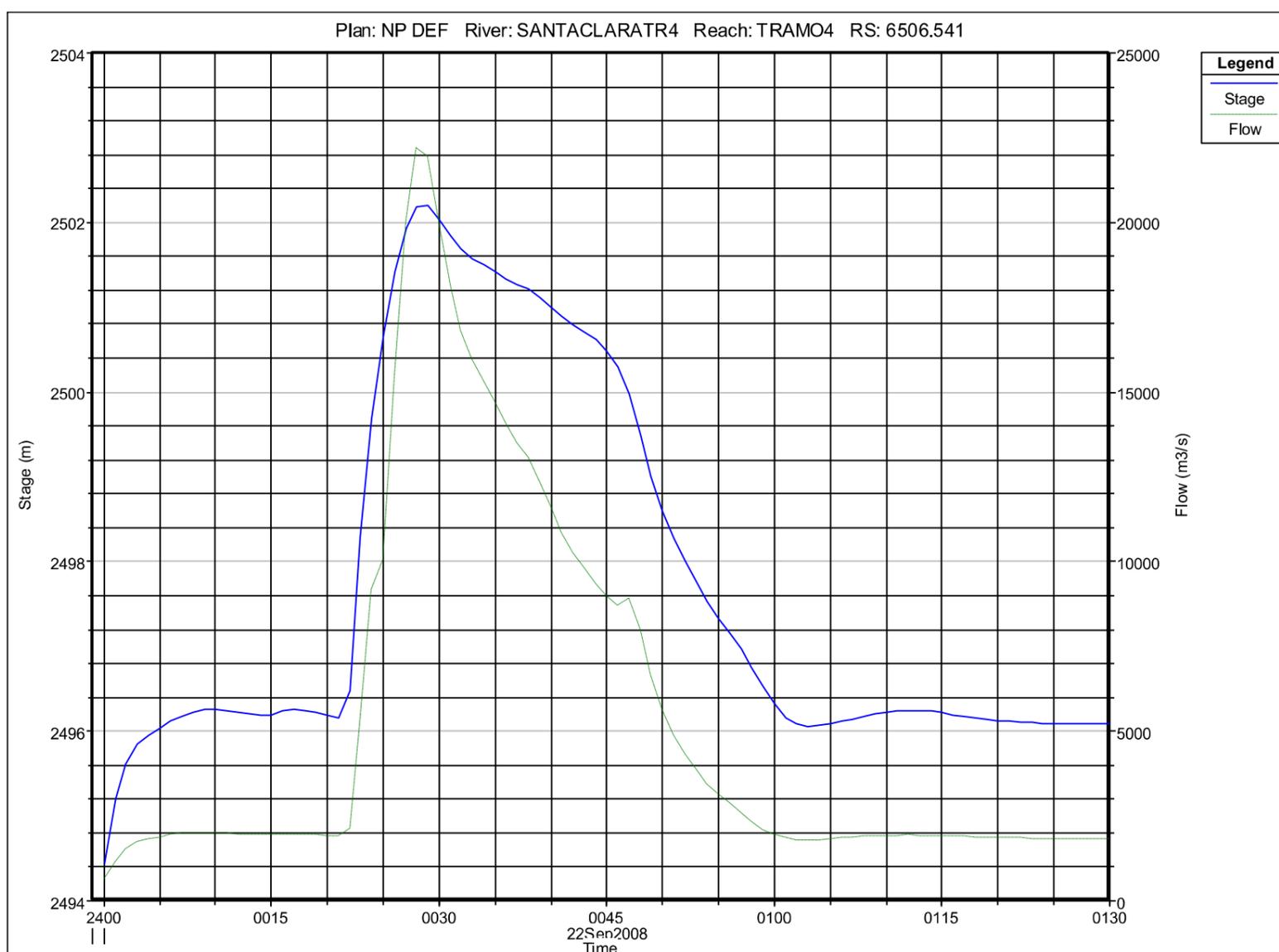
GRÁFICO NO 4.12. HIDROGRAMA DE SALIDA DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES PRIMARIOS DEL VOLCAN COTOPAXI VOLUMEN 2011 EN LA SECCIÓN SANGOLQUI-EJIDO



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

Adicionalmente y bajo el mismo proceso se obtuvo el hidrograma de calibración (volumen 1976) del modelo bidimensional (Gráfico 4.13).

GRÁFICO NO 4.13. HIDROGRAMA DE SALIDA DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES PRIMARIOS DEL VOLCAN COTOPAXI VOLUMEN 1976 EN LA SECCIÓN SANGOLQUI-EJIDO



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

CAPÍTULO V

SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI EN EL SECTOR DE SANGOLQUI UTILIZANDO EL MODELO IBER

5.1 INTRODUCCIÓN AL MODELO NUMÉRICO IBER

El paquete computacional Iber, corresponde a un modelo numérico que simula el flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente. Tiene aplicaciones en campos como: Hidrodinámica fluvial, simulación de rotura de presas, evaluación de zonas inundables, etc.

Las versiones actuales de Iber constan de tres módulos principales, mismos que trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos que pueden ser triangulares o cuadrangulares.

Los módulos principales del programa Iber son los siguientes:

- **Módulo Hidrodinámico:** Resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D).
- **Módulo de Turbulencia:** Permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico.
- **Módulo de Transporte de sedimentos:** resuelve las ecuaciones de transporte de fondo y transporte turbulento en suspensión.

En el presente proyecto se utilizará únicamente los dos primeros módulos, es decir el módulo hidrodinámico con la finalidad de determinar los parámetros de calibración del modelo numérico, así como la estimación de resultados como calados y velocidades, mientras que el módulo de turbulencia nos permitirá corroborar la influencia de la misma en la simulación del flujo de lahares. Con base a lo anterior se hará un estudio más detallado de ambos módulos.

5.1.1 MÓDULO HIDRODINÁMICO

Como se mencionó anteriormente el módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones bidimensionales de St Venant o 2D Shallow Water Equations (2D- SWE). Estas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática, así como una distribución uniforme de la velocidad, mismas que se cumplen razonablemente en el flujo de los ríos. (Blade et al, 2014). Lo anterior justificaría el hecho de que actualmente los modelos basados en estas ecuaciones son los más utilizados en estudios de la dinámica fluvial y litoral, evaluación de zonas inundables etc. Que es el caso de la zona consolidada de Sangolquí.

5.1.1.1 Ecuaciones hidrodinámicas

Iber dentro de su módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de conservación de la masa y momento en el plano horizontal.

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} &= M_z \\ \frac{\partial hU_x}{\partial t} + \frac{\partial hU_x^2}{\partial x} + \frac{\partial hU_xU_y}{\partial y} &= -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial hr_{sx}^*}{\partial x} + \frac{\partial hr_{sy}^*}{\partial y} + M_x \\ \frac{\partial hU_y}{\partial t} + \frac{\partial hU_xU_y}{\partial x} + \frac{\partial hU_y^2}{\partial y} &= -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial p}{\partial y} - 2 \Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial hr_{sx}^*}{\partial x} + \frac{\partial hr_{sy}^*}{\partial y} + M_y \end{aligned} \quad (5.1)$$

donde:

h: Calado

U_x, U_y: Velocidades horizontales promediadas en profundidad.

g: gravedad

Z_s: elevación de la lámina libre

T_s: Fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento

T_b: Tensión debido al rozamiento de fondo.

ρ: densidad del agua

Ω: Velocidad angular de rotación de la tierra

λ: Latitud del punto considerado.

$\tau^{e_{xx}}, \tau^{e_{xy}}, \tau^{e_{yy}}$: Tensiones tangenciales efectivas

M_s, M_x, M_y : Términos fuente y de Momento.

5.1.1.2 Fricción de fondo.

En Iber la fricción de fondo es evaluada mediante la fórmula de Manning, teniendo como parámetro el coeficiente n de Manning así:

$$C_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}} \quad (5.2)$$

Es importante mencionar que, a diferencia de los modelos unidimensionales, en los bidimensionales el radio hidráulico no es definido como la relación entre el área y perímetro mojado de una sección, puesto que en los modelos bidimensionales no tiene sentido alguno definir secciones transversales (Blade et al, 2014); Es decir que, si se toma una columna del fluido de ancho Δx y calado h , el radio hidráulico en un modelo bidimensional se define de la siguiente manera:

$$R_h = \frac{A}{P_m} = \frac{h \Delta x}{\Delta x} = h \quad (5.3)$$

Como se observa en la ecuación anterior, en los modelos bidimensionales da lo mismo hablar de radio hidráulico y calado.

5.1.1.3 Condiciones de contorno

Es necesario imponer condiciones de contorno con la finalidad de poder solucionar las ecuaciones desde el punto de vista matemático. Dentro de los contornos abiertos el número de condiciones que se deben imponer dependen de factores como:

- Si la condición es de entrada o salida del flujo
- Tipo de régimen del flujo

En caso de que se impongan menos condiciones de contorno de las necesarias se generaría una indeterminación en las ecuaciones, lo que origina errores en las soluciones.

Dentro de Iber existen distintas consideraciones para imponer las condiciones de contorno, mismas que se detallan en la tabla 5.1.

TABLA NO 5.1. CONDICIONES DE CONTORNO IMPLEMENTADAS EN IBER

Contorno	Régimen	Condiciones impuestas	
Entrada	Caudal total	Subcrítico / Crítico	Caudal total en dirección normal al contorno
		Supercrítico	Caudal total en dirección normal al contorno y velocidad media
	Caudal específico	Subcrítico / Crítico	Caudal específico en dirección normal al contorno
		Supercrítico	a) Caudal específico en dirección normal al contorno y calado b) Caudal específico en dirección normal al contorno y cota de agua
Salida	Subcrítico	a) Calado b) Cota de agua c) Vertedero (cota y coeficiente de descarga) d) Curva de gasto	
	Supercrítico / Crítico	No es necesario imponer ninguna condición	

FUENTE: Blade et al, 2014

5.1.2 MÓDULO DE TURBULENCIA

Aun cuando prácticamente todos los flujos en la hidráulica son turbulentos, en muchos de estos casos la magnitud de la turbulencia no es suficiente como para

tener una influencia representativa dentro del campo de velocidad media. Destacan entre otros, el flujo en ríos, estuarios y en general zonas costeras, los tres casos con geometrías relativamente suaves como para que se produzcan zonas de recirculación en planta. Sin embargo, incluso en este tipo de situaciones, se hace importante realizar una correcta modelación de la turbulencia con la finalidad de establecer si esta influye o no de una manera significativa dentro del flujo.

Una de las principales Características de Iber es la inclusión de modelos de turbulencia tipo RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes Equations), mismos que se resuelven dentro del módulo de turbulencia para aguas poco profundas.

En Iber se cuenta con los siguientes modelos en orden de complejidad:

- Viscosidad turbulenta Constante
- Modelo Parabólico
- Modelo de Longitud de Mescla
- Modelo k- ϵ de Rastogi y Rodi (Rastogi y Rodi, 1978).

La selección del modelo de turbulencia que mejor se adecúe a un caso determinado de estudio dependerá de la experiencia de la persona que realiza la simulación además de las distintas experiencias que se hayan tenido en problemas con características similares al caso que se esté modelando. Se debe tener en cuenta que mientras más complejo sea el modelo de turbulencia mayor será el costo computacional y el tiempo de simulación del modelo, puesto que se dificultará más la resolución de las ecuaciones (Blade et al, 2014).

Los modelos de turbulencia tienen como finalidad la determinación de las tensiones de Reynolds. En los modelos basados en la hipótesis de Boussinesq (los cuatro modelos usados en Iber), las tensiones de reynolds son evaluadas con la siguiente ecuación.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (5.4)$$

Los modelos de turbulencia proporcionan la viscosidad turbulenta a utilizarse en la expresión de Boussinesq.

5.1.2.1 Modelo de viscosidad turbulenta constante

Permite fijar el orden de magnitud de la viscosidad turbulenta en función del flujo considerado. Aun cuando existen publicaciones en las cuales se recomiendan valores aproximados de la viscosidad turbulenta en función de un determinado tipo de flujo, no se puede considerar como un modelo de turbulencia debido a que no se toma en cuenta la variación de la viscosidad turbulenta entre dos puntos.

Se debe mencionar que el campo de velocidad media está determinado tanto del valor de la viscosidad turbulenta, así como de la variación espacial de esta, otro punto a tomar en cuenta es el hecho de que las tablas existentes proporcionan únicamente valores aproximados. Razón por la cual no es recomendable utilizar este método puesto que la confiabilidad en los resultados es muy baja. (Blade et al, 2014).

5.1.2.2 Modelo parabólico

Asume una distribución parabólica en profundidad de la viscosidad turbulenta, de tal manera que se calcula a partir de dicha distribución una viscosidad turbulenta promediada en profundidad, misma que se calcula con la siguiente ecuación:

$$v_t = 0.068 u_f h \quad (5.5)$$

donde:

h: Calado

uf: Velocidad de fricción de fondo

La velocidad de la fricción de fondo a su vez, se determina a partir de la tensión tangencial de fondo, misma que se define como:

$$u_r = \sqrt{\frac{\tau_r}{\rho}} \quad (5.6)$$

Si se determina el rozamiento de fondo a partir de la fórmula de Manning se tiene la siguiente expresión para la viscosidad turbulenta:

$$v_t = 0.068 \sqrt{g n} |U| h^{5/6} \quad (5.7)$$

De la ecuación 5.7 se puede decir que, la viscosidad turbulenta depende localmente del calado, del módulo de velocidad promediado en la profundidad y del coeficiente de Manning. Por la sencillez del modelo en ocasiones se utiliza un coeficiente multiplicador con la finalidad de ajustar el valor de la viscosidad turbulenta. Coeficiente que es fijado por la persona que realiza el modelo.

Es así que, con la inclusión del coeficiente de ajuste, la expresión para la viscosidad turbulenta estaría definida de la siguiente manera.

$$v_t = C_m 0.068 \sqrt{g n} |U| h^{5/6} \quad (5.8)$$

5.1.2.3 Modelo de longitud de mezcla

La viscosidad se calcula en función de las características locales del flujo con la siguiente expresión:

$$v_t = [\min(0.267 \kappa h, \kappa d_{\text{canal}})]^2 \sqrt{2S_v S_b + \left(2.34 \frac{u_r}{\kappa h}\right)^2} \quad (5.9)$$

donde:

K: Constante de Von Karman =0.41

El modelo de longitud de Mezcla corresponde a un modelo algebraico con relativa sencillez que permite tener resultados confiables en flujos en los cuales la turbulencia esta generada localmente y principalmente por el rozamiento de fondo. (Blade et al, 2014).

Este modelo considera la producción turbulenta debido a gradientes horizontales de velocidad, Sin embargo, no toma en cuenta el transporte convectivo ni la disipación de turbulencia. En caso de haber flujos con zonas de recirculación fuerte los resultados del modelo son absolutamente errados (Blade et al, 2014).

5.1.2.4 Modelo k- ε de Rastogi y Rodi (Rastogi y Rodi, 1978).

Resuelve la ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta k, así como para la disipación de energía turbulenta ε . Adicionalmente, considera la producción debido al rozamiento del fondo, la producción por gradientes de velocidad, la disipación y el transporte convectivo.

Las ecuaciones del modelo se escriben a continuación:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_x k}{\partial x} + \frac{\partial U_y k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2v_t S_x S_y + c_k \frac{u_t^3}{h} - \varepsilon \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_x \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_y \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_\varepsilon \frac{\varepsilon}{k} 2v_t S_x S_y + c_\varepsilon \frac{u_t^3}{h^2} - c_\varepsilon \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.11)$$

De donde:

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.12)$$

$$c_k = c_\Gamma^{-1/2} \quad (5.13)$$

$$c_{\epsilon} = 3.6c_k^{3/2}c_{\epsilon 2}c_{\mu}^{1/2} \quad (5.14)$$

$$c_f = \frac{\tau_b}{\rho} \frac{1}{|U|^2} \quad (5.15)$$

Teniendo como constantes

$$Cu = 0.09$$

$$C\epsilon l = 1.44$$

$$C\epsilon 2 = 1.92$$

$$\sigma k = 1$$

$$\sigma \epsilon = 1.31$$

Siendo;

K: Energía Cinética Turbulenta

ϵ : Tasa de Disipación de Turbulencia

Sij: Tensor de Deformación

Los términos en los cuales se encuentra la velocidad de fricción de fondo u_f son los encargados de modelar la generación de la turbulencia por rozamiento de fondo.

Se puede decir que el modelo k- ϵ , corresponde a un modelo relativamente sofisticado. Además de que en los flujos turbulentos poco profundos los resultados resultan ser muy aceptables, lo que ha hecho que este sea un modelo de amplio uso en este campo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que aun cuando este sea un modelo de relativa complejidad, sus resultados no tienen la garantía de ser correctos en cualquier tipo de flujo. Razón por la cual los resultados deberán ser analizados con un criterio elevado, y para esto se hace indispensable la

experiencia en la modelación en flujos turbulentos.

5.1.3 ESQUEMAS NUMÉRICOS

Las ecuaciones planteadas en los módulos de hidrodinámica y de turbulencia, son resueltas en Iber con el método de volúmenes finitos, el cual es uno de los más completos y utilizados en el campo de la dinámica de fluidos computacional.

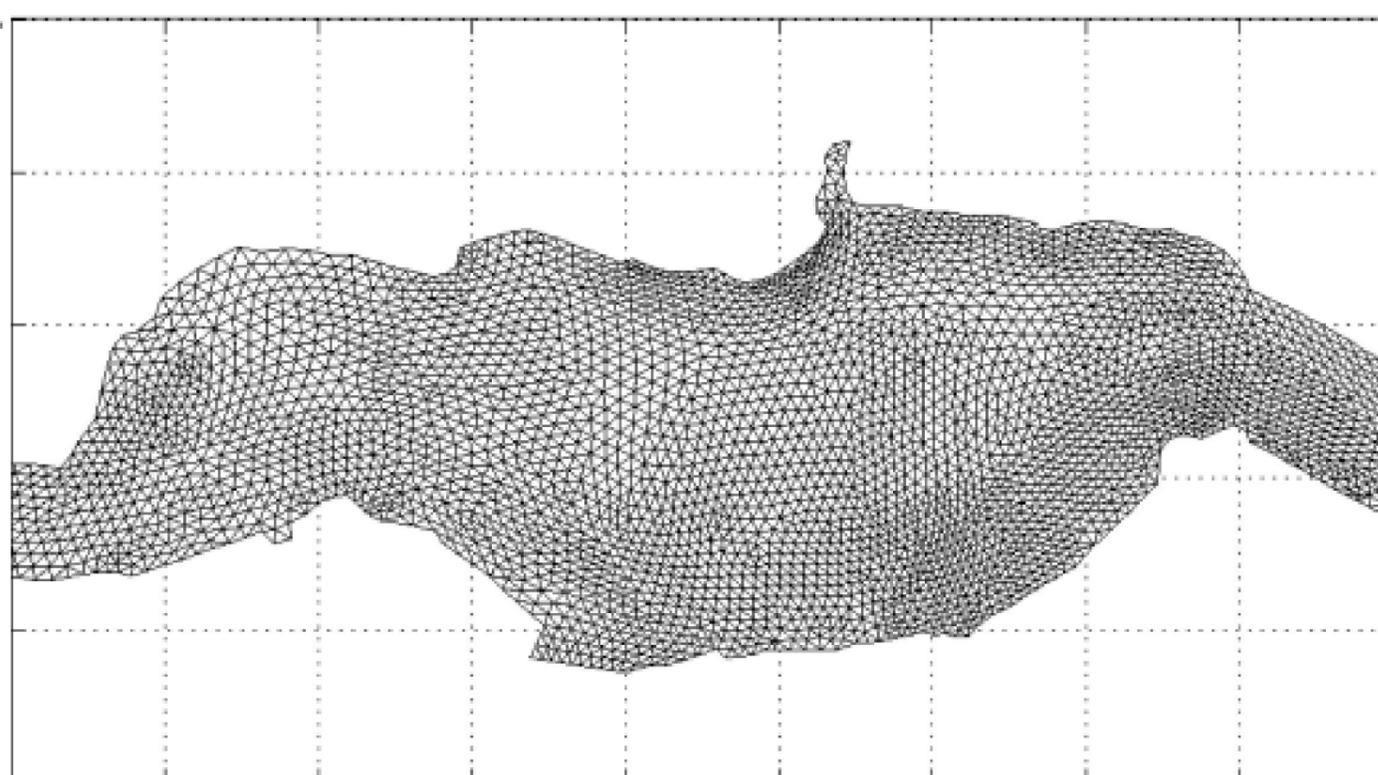
Entre las principales características de los esquemas numéricos utilizados en Iber constan las siguientes:

- Esquemas en volúmenes finitos, planteados en forma integral y conservativa
- Mallado no-estructurado, cuyas mallas son formadas con triángulos y cuadriláteros.
- Resuelven flujo rápidamente variado con régimen subcrítico, supercrítico y cambios de régimen.
- Capacidad de resolver flujo rápidamente variable (resaltos móviles, ondas de choque no estacionarias, etc.).
- Resolución de las ecuaciones hidrodinámicas mediante esquemas descentrados tipo Roe de alta resolución (orden superior a 1 y no oscilatorios).
- Tratamiento descentrado del término fuente pendiente del fondo.
- Tratamiento centrado del resto de términos fuente.
- Esquemas de orden 1 y orden 2 por líneas de precisión en espacio.
- Esquemas explícitos en tiempo.
- Tratamiento de frentes seco-mojado no estacionarios mediante esquemas estables y conservativos (sin pérdida de masa).

5.1.3.1 Malla de cálculo corresponde a la división del dominio de estudio en celdas de tamaño relativamente pequeño, para poder resolver las ecuaciones diferenciales mediante volúmenes finitos.

Las mallas usadas en Iber corresponden a mallas no estructuradas con elementos triangulares y cuadrangulares, este tipo de mallas permiten una mejor adaptabilidad a la geometría en estudio, puesto que no se requiere ningún tipo de organización o estructura interna. Característica que hace que este tipo de malla sea el indicado para trabajar en dinámica fluvial.

GRÁFICO NO 5.1. EJEMPLO DE MALLA NO ESTRUCTURADA FORMADA POR ELEMENTOS TRIANGULARES.



FUENTE: Blade et al, 2014.

5.1.4 LIMITACIONES DE IBER

El costo computacional llega a ser demasiado elevado al usar una malla demasiado fina, lo cual a su vez se ve reflejado en el tiempo de cálculo del modelo.

Requiere de información de calidad, para la obtención de resultados confiables, misma que en ocasiones resulta demasiado compleja su obtención.

5.1.5 VENTAJAS DE IBER

Iber al ser un modelo bidimensional garantiza una mayor precisión en la simulación del flujo en zonas inundables con respecto a los modelos unidimensionales. A

continuación, se presenta una serie de ventajas de Iber con relación a los modelos unidimensionales según Palavecino 2015:

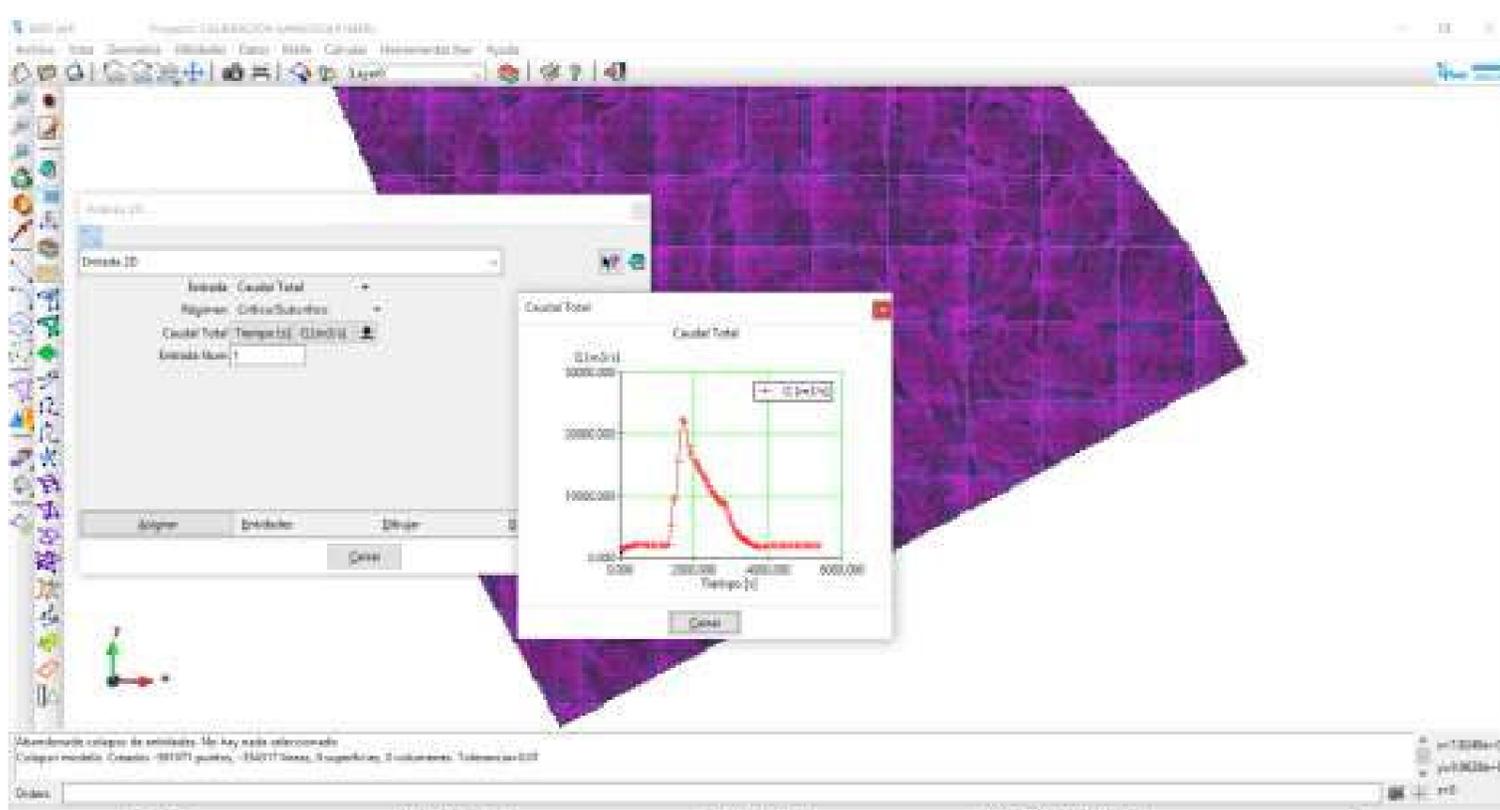
- Esquema de trabajo de alta resolución
- Mayor precisión en cambios de régimen
- Presencia de mallas irregulares que se adaptan de mejor manera a la topografía del terreno a estudiar.
- Mayor precisión en la apreciación de inundaciones
- Generación de resultados en el plano horizontal
- Interfaz agradable y amigable con el usuario.

5.2 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y CONDICIONES DE CONTORNO

5.2.1 CONDICIONES DE ENTRADA

Como se hace mención en el capítulo 4, se tiene como condición de entrada a este tramo, el hidrograma generado a partir de la modelación unidimensional de los tramos aguas arriba al sector de Sangolquí (Gráfico 5.2).

GRÁFICO NO 5.2. VENTANA DE INGRESO DE CONDICION DE ENTRADA AL MODELO IBER EN LA SECCIÓN SANGOLQUI -EJIDO.



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

5.2.2 CONDICIONES DE SALIDA

Debido a que se carece de datos como calados, curvas de descarga etc. A la salida del tramo y en base a los resultados obtenidos en la modelación unidimensional se tiene como condición de salida en el tramo un régimen Supercrítico, en este caso no requiere de información adicional a la salida del tramo como se revisó en el numeral 5.1 del presente proyecto de titulación.

5.2.3 CONDICIONES INICIALES

Al ser relativamente despreciable el calado normal del río Santa Clara, con relación a los calados que se tendrían en caso de un flujo de lahares en el tramo, se considera nulo este valor para la modelación numérica. Por lo tanto, el calado inicial en el tramo tiene un valor de 0 m.

5.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMERICO CON LOS DATOS DEL EVENTO ERUPTIVO DE 1877.

5.3.1 PLAN DE CORRIDAS DEL MODELO

Una vez obtenidos los resultados de la modelación unidimensional y sobre todo el hidrograma de salida en la sección Sangolquí- Ejido (Gráfico 4.13), mismo que fue determinado teniendo en cuenta los volúmenes del glaciar de 1976 parámetros que fundamentales para la calibración del modelo numérico para el evento eruptivo de 1877. Se plantea realizar una corrida de calibración del modelo bidimensional con la finalidad de validar el coeficiente n de Manning estimado en el Capítulo 4 del presente trabajo. Para lo cual se tiene las siguientes consideraciones:

- Se utiliza geometría con metodología RTIN con polígonos cuyos lados varían entre 9m y 15 m, con una tolerancia de 0.1.
- Se genera una malla no estructurada de 9m x 9m.
- Se considera las condiciones de contorno detalladas en el numeral 5.2.
- El tiempo máximo de simulaciones de 7500s con un intervalo de resultados cada 60 s.
- Se busca comprobar que los parámetros en la sección Sangolquí- Ejido estén dentro del rango de variación aceptable con relación a las

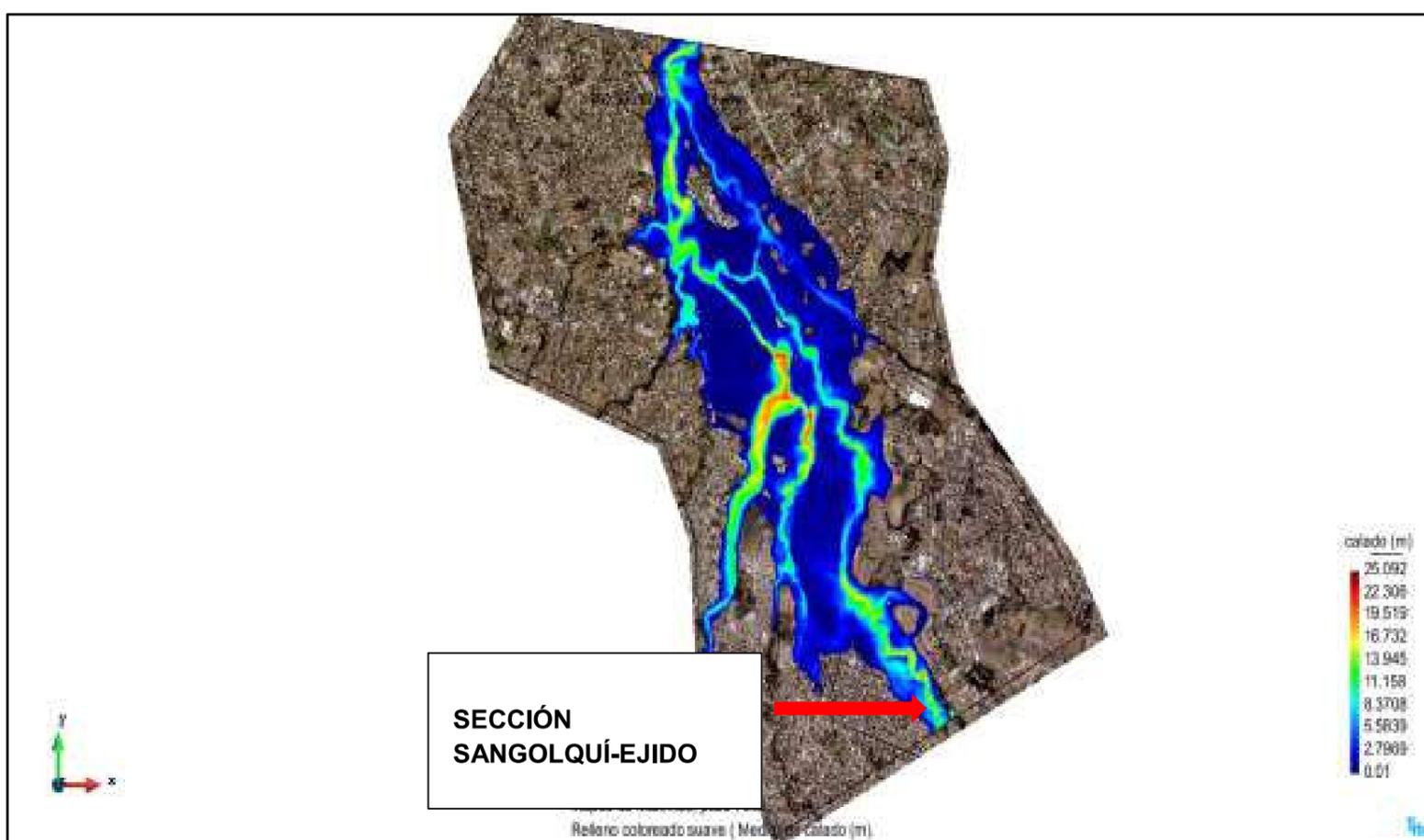
estimaciones de campo.

5.3.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

La Etapa del Post proceso del modelo Iber nos permite conocer de una manera visual mediante escala de colores los resultados de la simulación numérica bidimensional para el evento de calibración, dichos resultados corresponden principalmente a calados, velocidades, número de Froud y Cotas de la línea de energía en todo el tramo. Sin embargo, se toma especial atención a los valores obtenidos en la sección Sangolquí-Ejido, puesto que de estos depende la validación o no de la fase de calibración del modelo numérico, teniendo siempre como punto de comparación el evento histórico de 1877.

A continuación, los resultados del modelo calibrado:

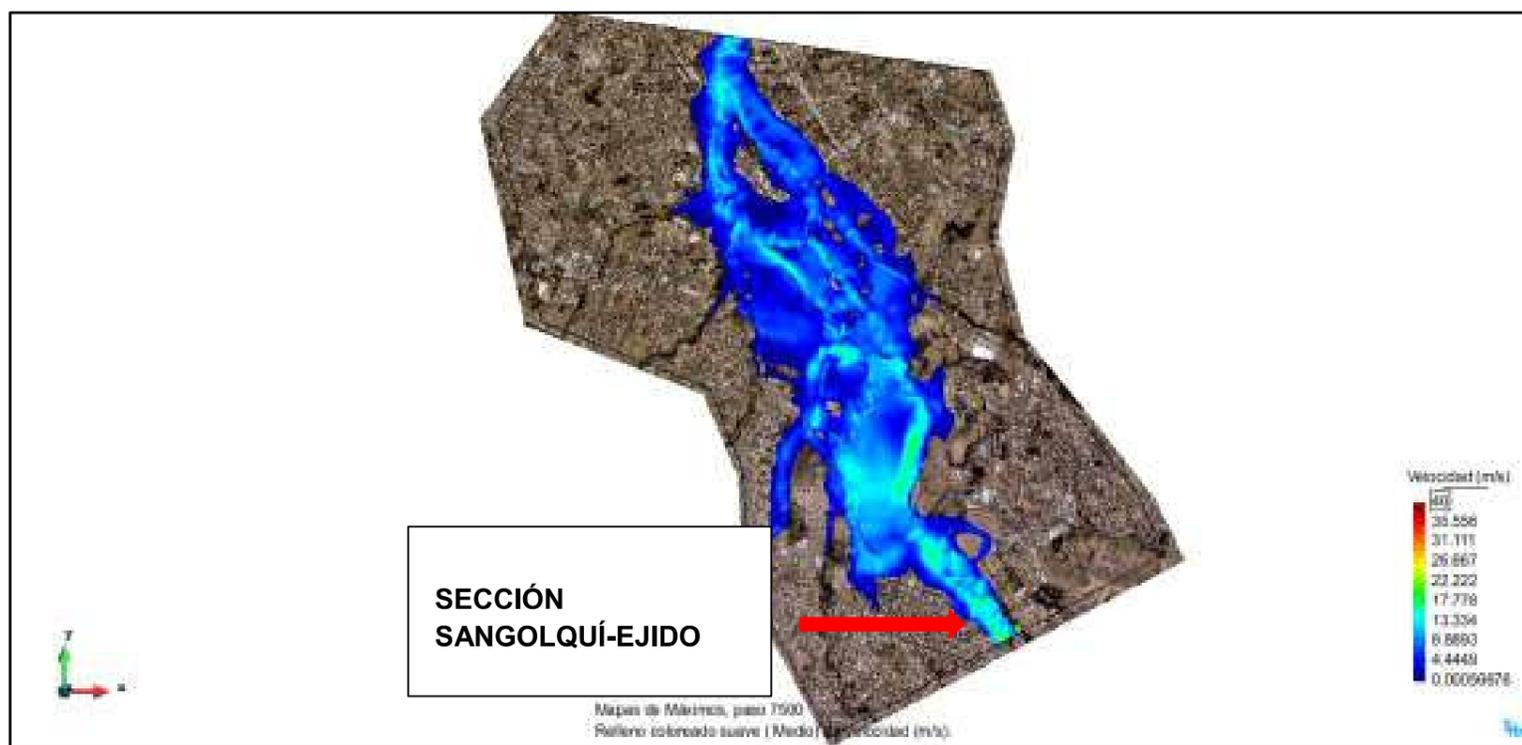
GRÁFICO NO 5.3. MAPA DE CALADOS MÁXIMOS DEL MODELO CALIBRADO



,Se observan valores entre los 0.01m y 25m, mientras que en la sección de Sangolquí-Ejido se tiene un valor estimado en 10m.

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

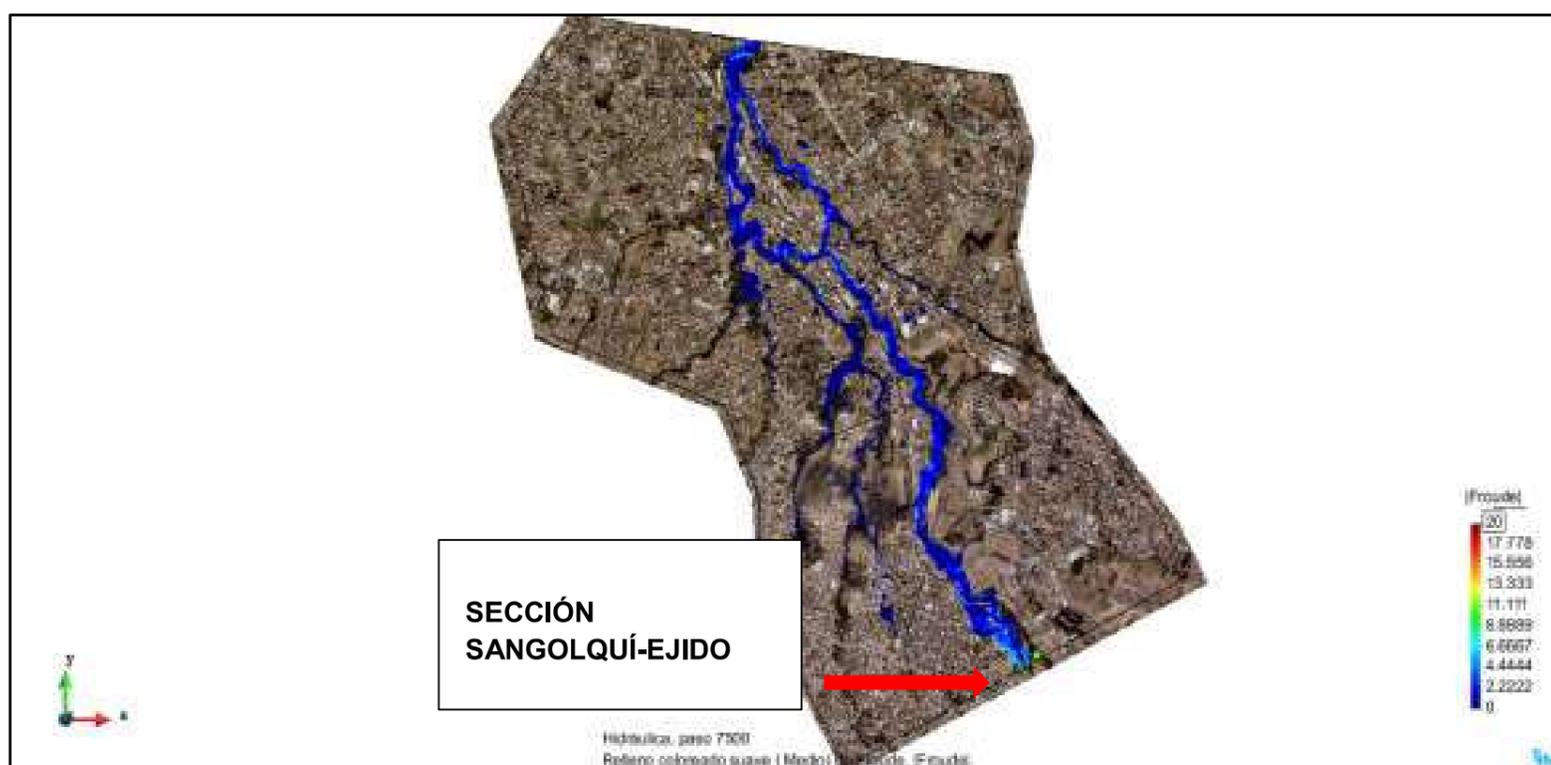
GRÁFICO NO 5.4. MAPA DE VELOCIDADES DEL MODELO CALIBRADO



Se tienen valores que fluctúan entre los 0 y 15 m/s, mientras que en la Sección Sangolquí-Ejido se estima un valor de 10.5 m/s.

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

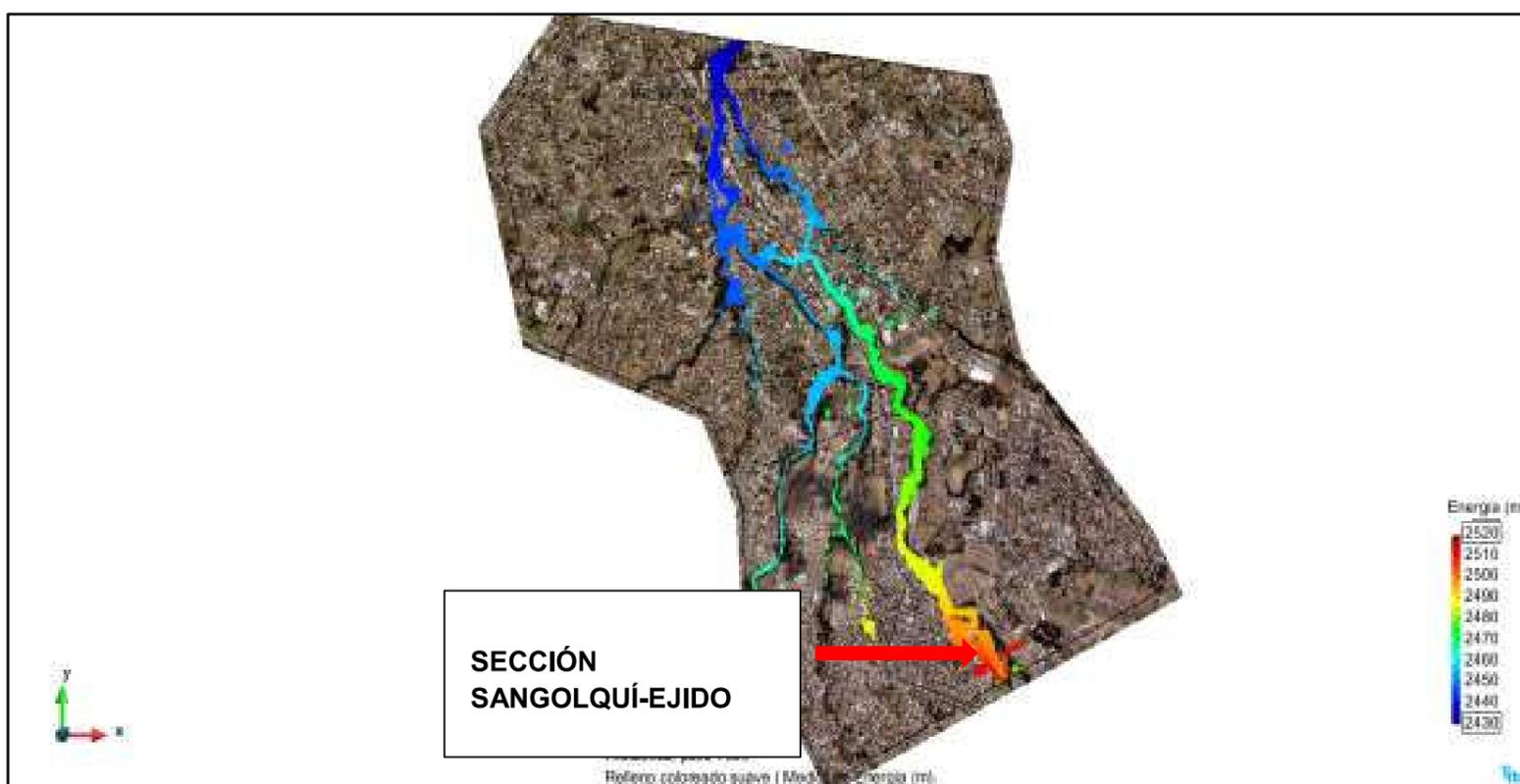
GRÁFICO NO 5.5. MAPA DE NÚMEROS DE FROUD DEL MODELO CALIBRADO



Se tienen valores que fluctúan entre 0 y 2, mientras que en la Sección Sangolquí-Ejido se estima un valor de 1.2.

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

GRÁFICO NO 5.6. MAPA DE COTAS DE ENERGÍA DEL MODELO CALIBRADO



Se tienen valores que fluctúan entre los 2430 msnm y 2520 msnm, mientras que en la Sección Sangolquí-Ejido se estima un valor de 2510 msnm.

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

5.3.3 DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD

En los fluidos con baja concentración de sedimentos la disipación de energía debido a los efectos de viscosidad es representada mediante la ecuación de Manning, misma que relaciona la pendiente de la línea de energía con la velocidad media, el radio hidráulico y las características de superficie o rugosidad de las fronteras.

Sin embargo, para el flujo de lahares han existido varias investigaciones que buscan comprobar la aplicabilidad del coeficiente n de Manning en flujos hiperconcentrados y granulares, que como se trató en el capítulo 3, correspondería al tipo de flujo encontrado en el flanco Norte del Volcán Cotopaxi, lo cual significa que los flujos están controlados estrictamente por el estado de fondo del cauce.

Macedonio y Parechi (1992) reportan los estudios realizados por Laenen y Hansen en 1988 en el caso del lahar en el río North Fork de 1982. Además, reportan el trabajo experimental realizado por Takahashi en 1985, en el cual experimenta con

flujos lodosos con concentraciones volumétricas que fluctúan entre 0.1 y 0.35, concluyendo que mientras la relación diámetro de las partículas y calado disminuye, la velocidad se relaciona asintóticamente con la fórmula de Manning.

Con estas consideraciones Macedonio y Parechi (1992) reportan valores de n entre 0.015 y 0.06 para lahares que fluyen en corrientes de baja pendiente (Zona Consolidada de Sangolquí). Mientras que, para zonas con pendientes elevadas en base a los valores dados por Jarret en 1994, reportan valores de n que fluctúan entre 0.03 y 0.095.

Se puede decir entonces que bajo la consideración de que los flujos a ser simulados mantienen una baja concentración de sedimentos finos, tipo arcillas, las cuales disminuyen el efecto de la turbulencia, pero sin llegar a eliminarlos, en el tránsito de estos flujos, se justifica el uso de la Ecuación de Manning, en vista de que la turbulencia es uno de los principales mecanismos de pérdida de energía durante el tránsito (Parechi, 1996).

Con el justificativo anterior, Se utiliza el modelo Iber mismo que trabaja con la ecuación de Manning para la determinación de los coeficientes de resistencia al movimiento en base a los datos históricos del levantamiento de campo realizado en el año 2004 para el lahar histórico de 1877, mismo que ha sido considerado como el evento de calibración.

En el presente trabajo se plantea estimar el coeficiente n de Manning mediante la modelación bidimensional del flujo de lahares en el sector de Sangolquí, usando los volúmenes del lahar e hidrogramas de entrada estimados con la modelación unidimensional (Gráfico 4,13), teniendo como punto de partida el coeficiente estimado en el capítulo 4 para la sección Sangolquí- Ejido.

De esta manera se valida el coeficiente de resistencia al movimiento en el sector de Sangolquí $n=0.015$ valor con el cual se tienen parámetros similares a aquellos estimados en el campo. El valor obtenido, ratifica además lo reportado por Macedonio y Parechi 1992. Puesto que este se encuentra dentro del rango estimado para zonas con baja pendiente, caso de la zona consolidada de Sangolquí.

5.3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS

Se plantea comparar los resultados obtenidos para la calibración del modelo numérico bidimensional generados en el presente trabajo con los resultados del proyecto EEI 2004, para posteriormente validarlos con los datos del levantamiento de Campo para el evento eruptivo de 1877.

A continuación se presenta una tabla de resumen con los resultados de los trabajos anteriormente citados en la Sección Sangolquí-Ejido.

TABLA NO 5.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS OBTENIDOS EN LA SECCIÓN SANGOLQUÍ - EJIDO

Escenario	Velocidad (m/s)	Calado máximo (m)	Froude	Línea de Energía(m)
Levantamiento de Campo	7.00	8.00	1.00	2511.10
EEI 2004	6.10	6.35	0.99	2508.24
Iber 2016	10.5	10	1.2	2510.00

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

Como se observa en la tabla anterior los resultados obtenidos para la calibración están dentro de un rango aceptable de error con respecto a los resultados estimados en Campo, razón que ratifica la fiabilidad del modelo y de las consideraciones realizadas para la implementación del mismo, con base a lo anterior se recomienda continuar con las corridas definitivas del estudio.

5.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LA MEZCLA AGUA SÓLIDOS EN LA ZONA CONSOLIDADA DE SANGOLQUI PARA EL ESCENARIO 3 DEL VOLCÁN COTOPAXI, CON VOLÚMENES DEL GLACIAR DEL 2011.

5.4.1 PLAN DE CORRIDAS DEL MODELO.

Para las simulaciones definitivas del modelo se plantean 3 corridas con el propósito de evaluar y reconocer la influencia de distintos parámetros como el tamaño de malla y el modelo de turbulencia en los resultados y el tiempo empleado para la

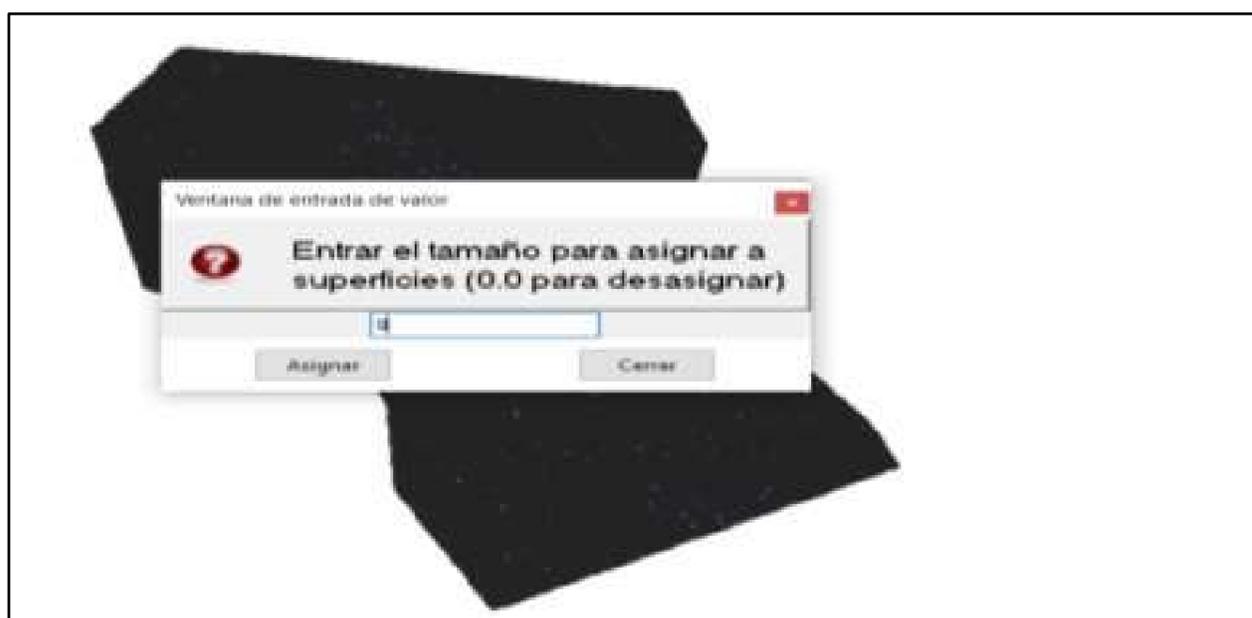
simulación numérica. A continuación se detallan cada una de las corridas efectuadas.

5.4.1.1 Simulación numérica con malla de 9 m* 9m sin modelo de turbulencia

Se plantea una simulación numérica, utilizando una geometría importada mediante la metodología RTIN con polígonos combinados entre triangulares y cuadriláteros, cuyos lados máximo y mínimo son de 15 m y 9 m respectivamente, y una tolerancia entre la geometría y el DEM de 0.1m. Con respecto a la malla generada, esta corresponde a una malla no estructurada con superficies de 9m *9m.

El hidrograma de entrada corresponde a aquel determinado en la modelación unidimensional para la sección Sangolquí- Ejido (Gráfico 4.12). Mientras que se mantienen como condiciones de contorno aquellas utilizadas para la calibración del modelo numérico.

GRÁFICO NO 5.7. INGRESO DEL TAMAÑO DE SUPERFICIES DE LA MALLA PRIMERA CORRIDA

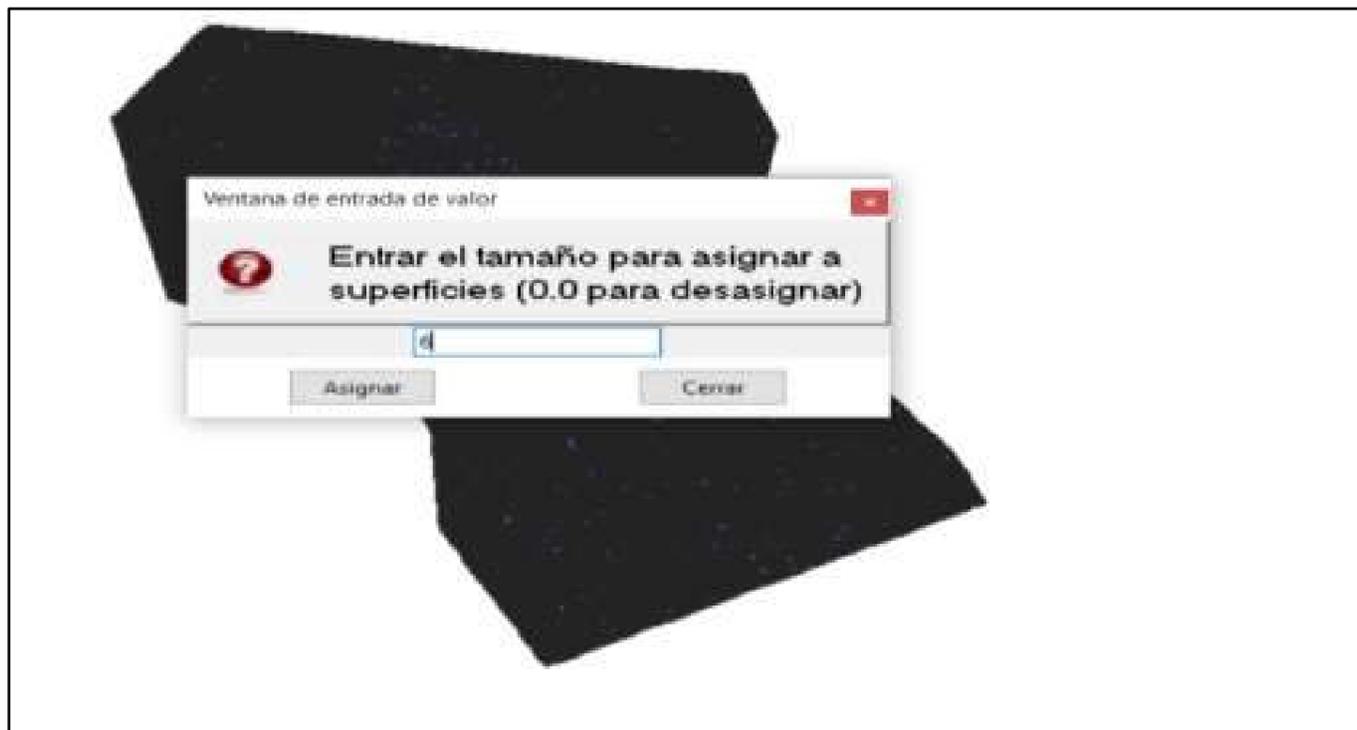


ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

5.4.1.2 Simulación numérica con malla de 6 m* 6m sin modelo de turbulencia

La segunda corrida planteada tiene características similares a aquella del numeral anterior, variando para este caso el tamaño de las superficies correspondientes a la malla no estructurada. Es decir, 6m *6m con la finalidad de conocer la influencia en los resultados al tener un mallado más fino.

GRÁFICO NO 5.8 INGRESO DEL TAMAÑO DE SUPERFICIES DE LA MALLA SEGUNDA CORRIDA

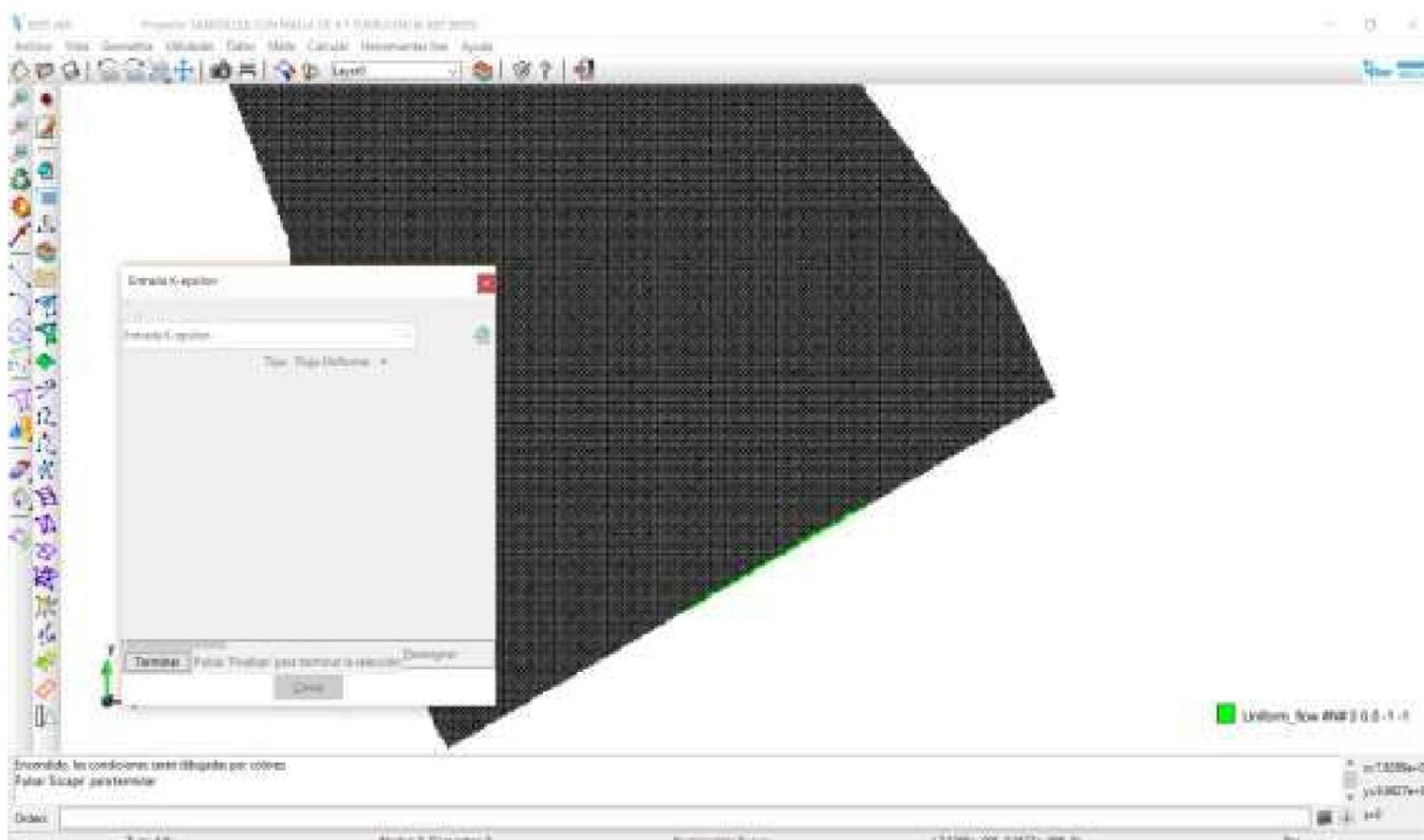


ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

5.4.1.3 Simulación numérica con malla de 6m* 6m utilizando modelo de turbulencia

La tercera y última corrida consiste en la aplicación del modelo de turbulencia a la corrida del numeral 5.4.1.2. El modelo analizado corresponde al modelo k- ϵ de Rastogi y Rodi. El cual corresponde al de mayor fiabilidad y uso de los modelos planteados en IBER. Además de que se cuenta con experiencias anteriores en las que dicho modelo ha tenido resultados aceptables.

GRÁFICO NO 5.9 ASIGNACIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA AL MODELO NUMÉRICO



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

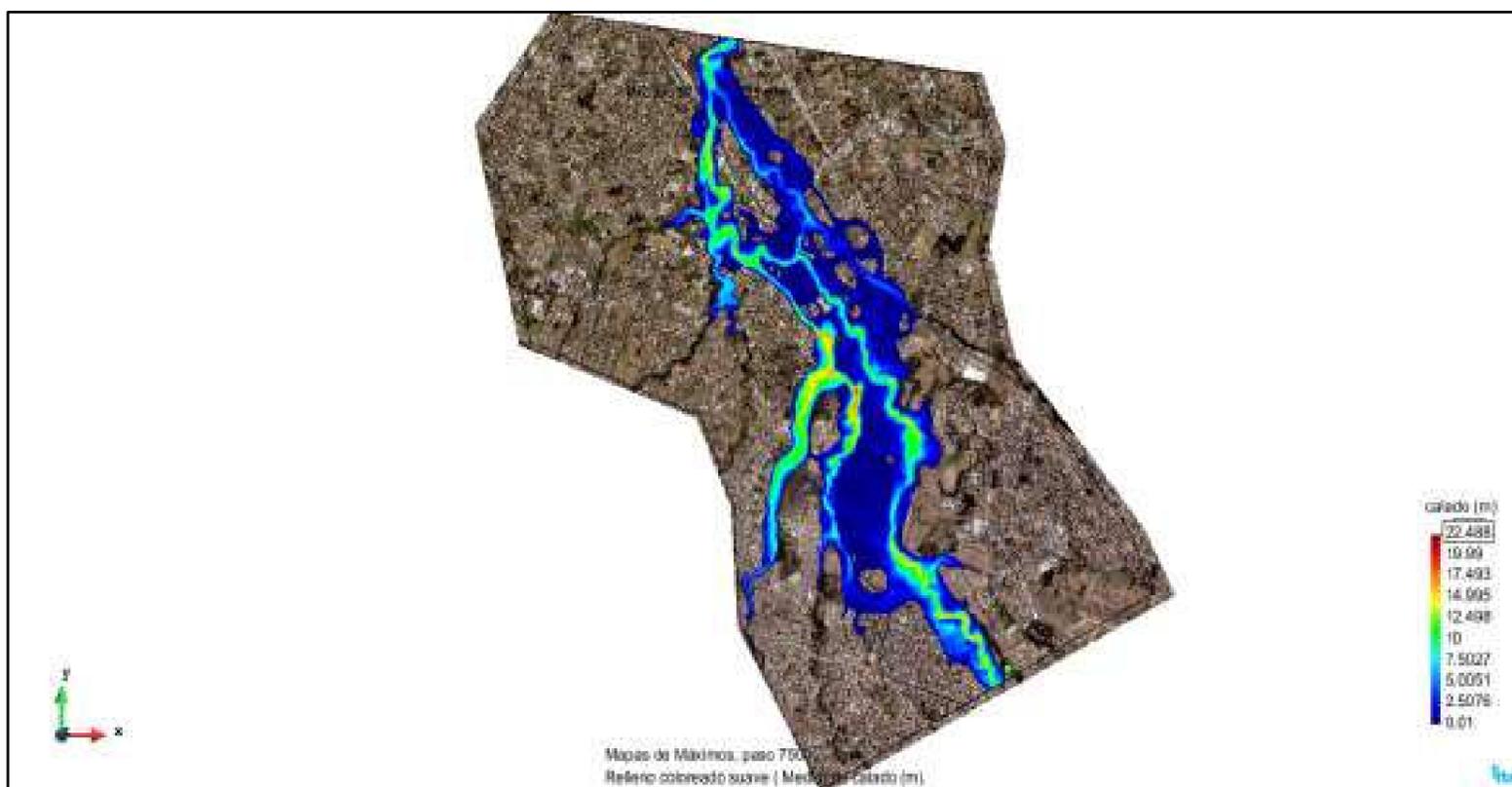
5.4.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las corridas del modelo numérico para su posterior análisis y comparación con otros estudios realizados en el sector.

Se hará énfasis únicamente en los parámetros más representativos como velocidades medias y calados dentro del tramo.

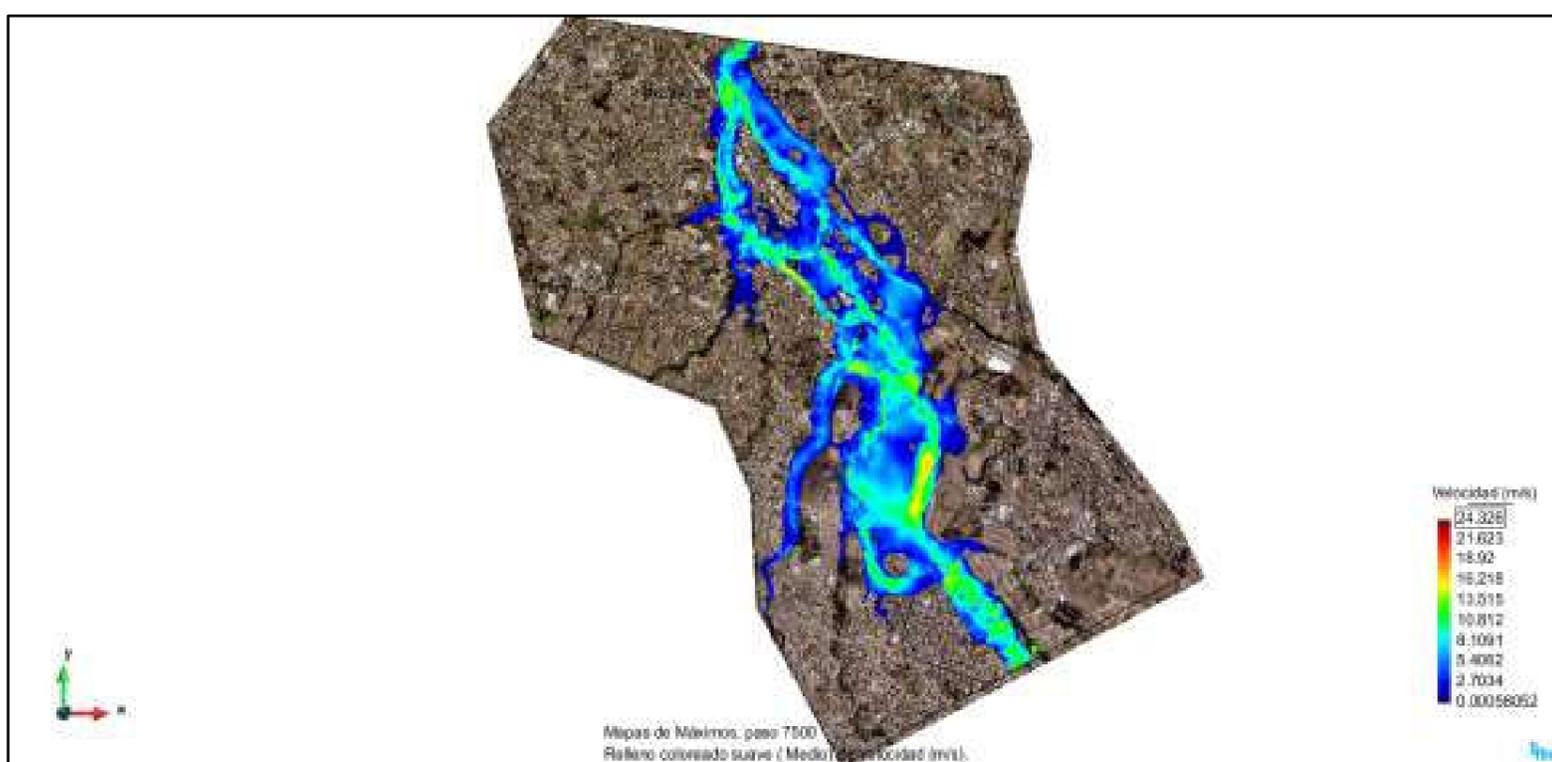
5.4.2.1 Resultados obtenidos de la simulación numérica con mallado de 9m* 9m sin modelo de turbulencia (volumen 2011).

GRÁFICO NO 5.10 MAPA DE CALADOS MÁXIMOS CON MALLA DE 9M*9M, SIN MODELO DE TURBULENCIA



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

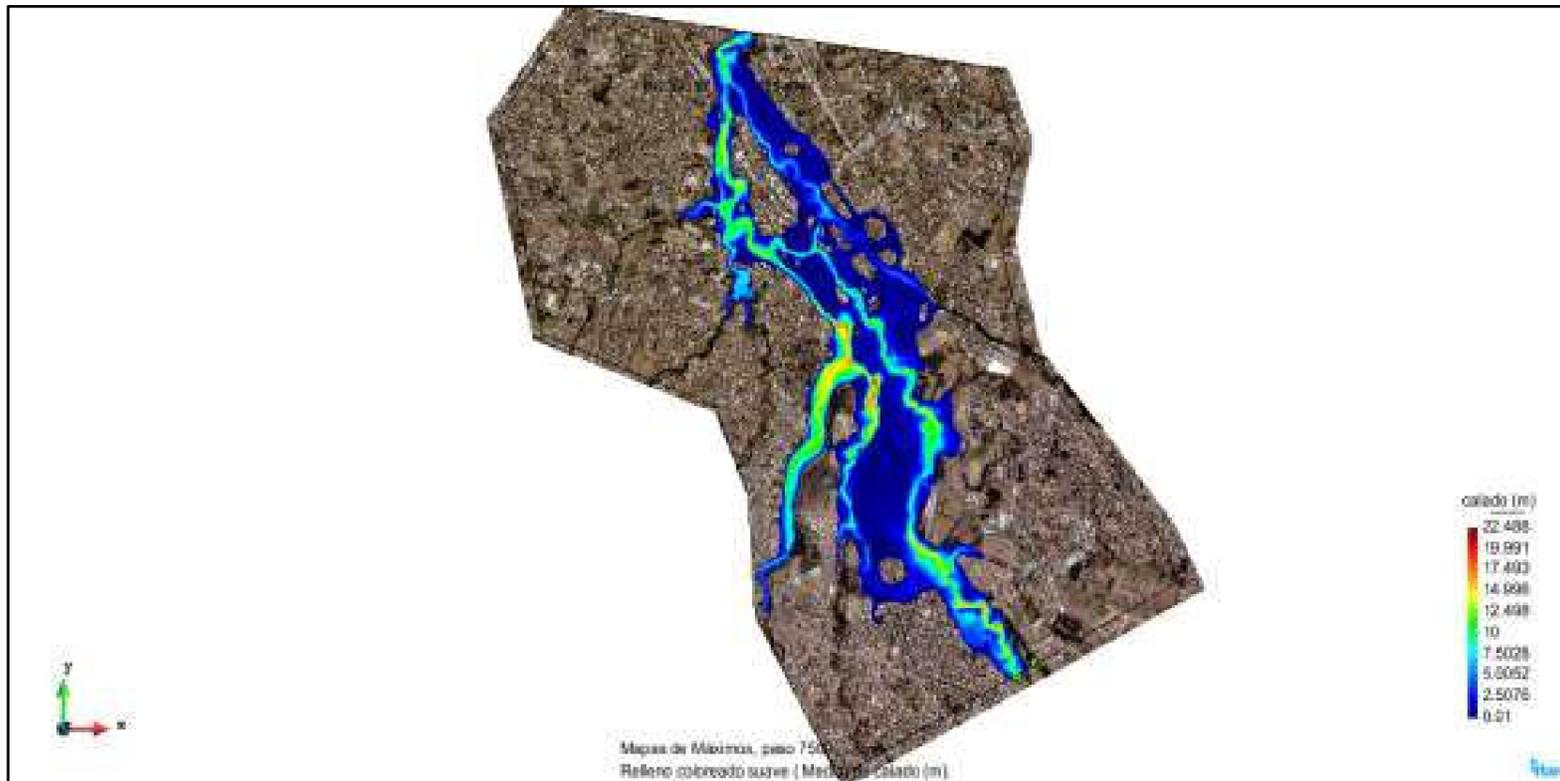
GRÁFICO NO 5.11 MAPA DE VELOCIDADES MÁXIMAS CON MALLA DE 9M*9M, SIN MODELO DE TURBULENCIA



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

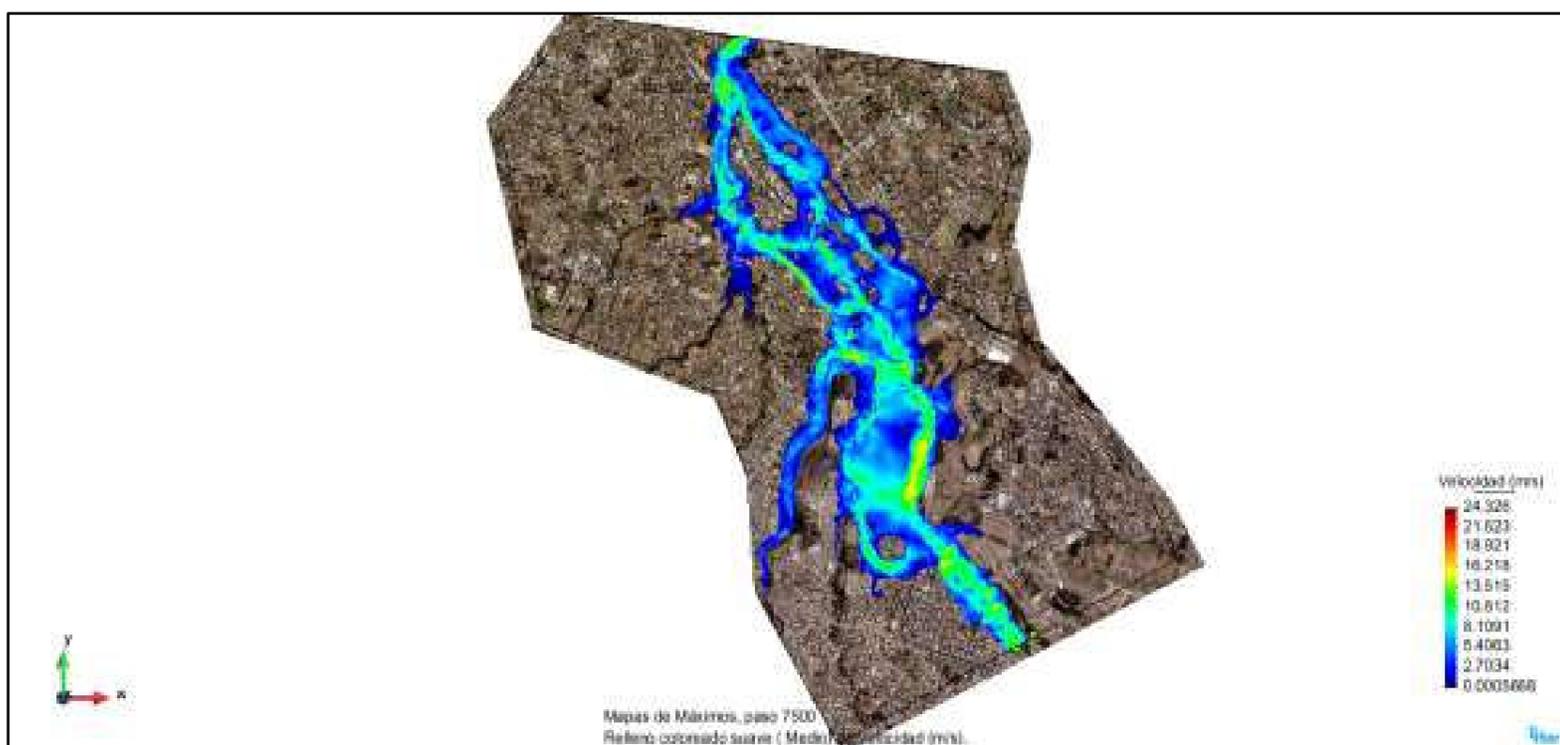
5.4.2.2 Resultados obtenidos de la simulación numérica con mallado de 6m* 6m sin modelo de turbulencia (volumen 2011).

GRÁFICO NO 5.12 MAPA DE CALADOS MÁXIMOS CON MALLA DE 6M*6M, SIN MODELO DE TURBULENCIA



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

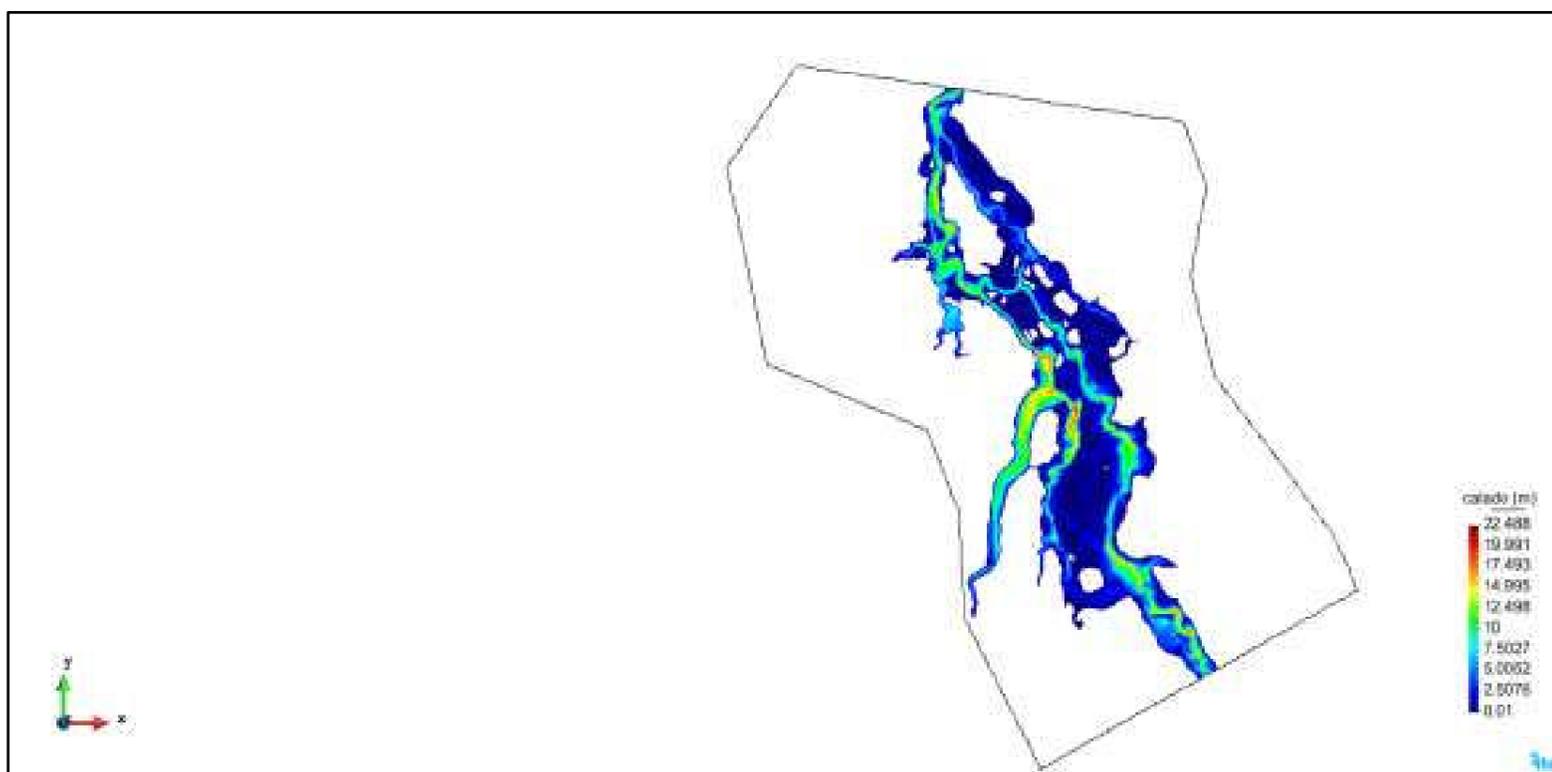
GRÁFICO NO 5.13 MAPA DE VELOCIDADES MÁXIMAS CON MALLA DE 6M*6M, SIN MODELO DE TURBULENCIA



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

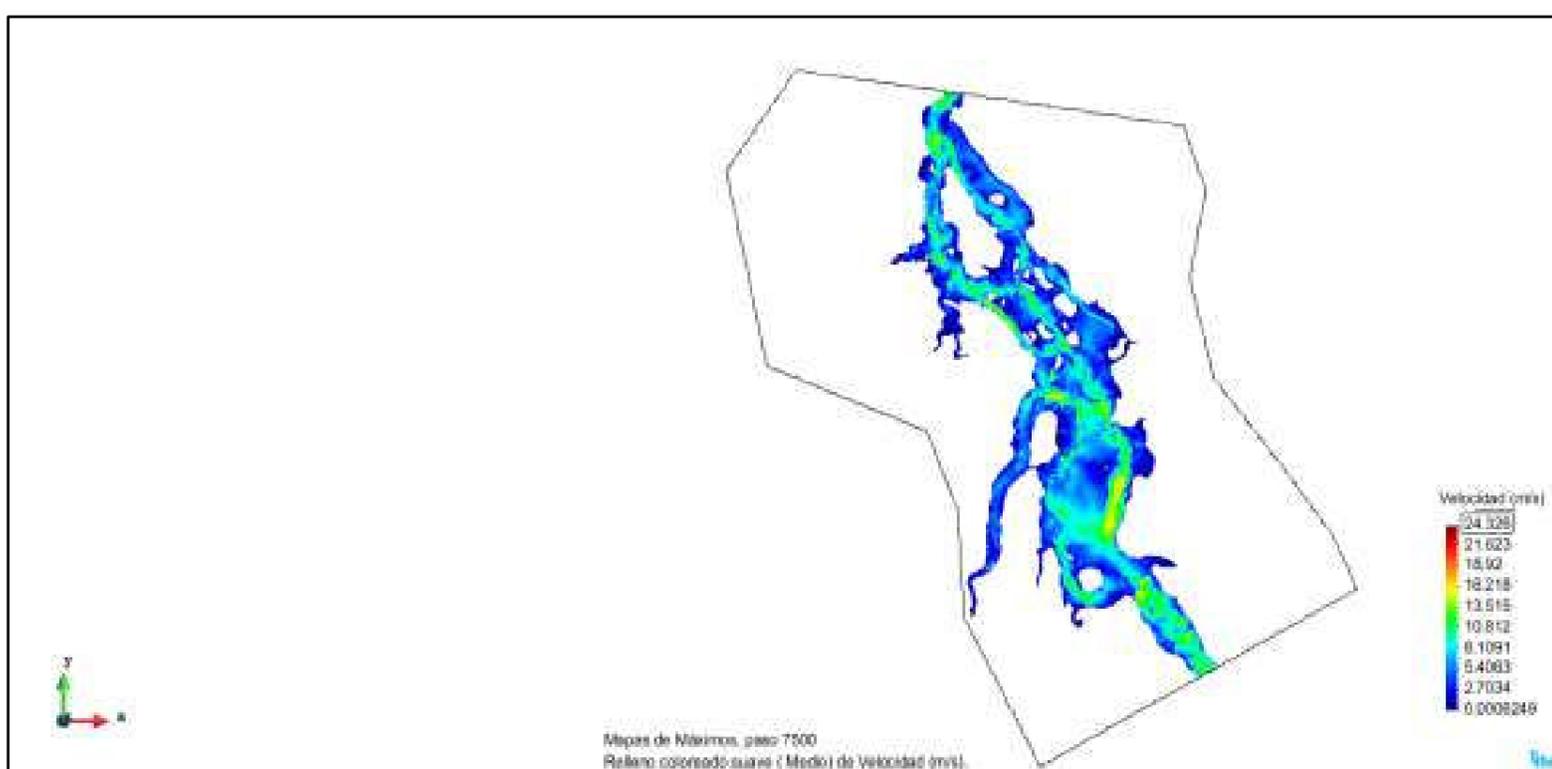
5.4.2.3 Resultados obtenidos de la simulación numérica con mallado de 6m* 6m con modelo de turbulencia (volumen 2011).

GRÁFICO NO 5.14 MAPA DE CALADOS MÁXIMOS CON MALLA DE 6M*6M, CON MODELO DE TURBULENCIA



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

GRÁFICO NO 5.15 MAPA DE VELOCIDADES MÁXIMAS CON MALLA DE 6M*6M, CON MODELO DE TURBULENCIA



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

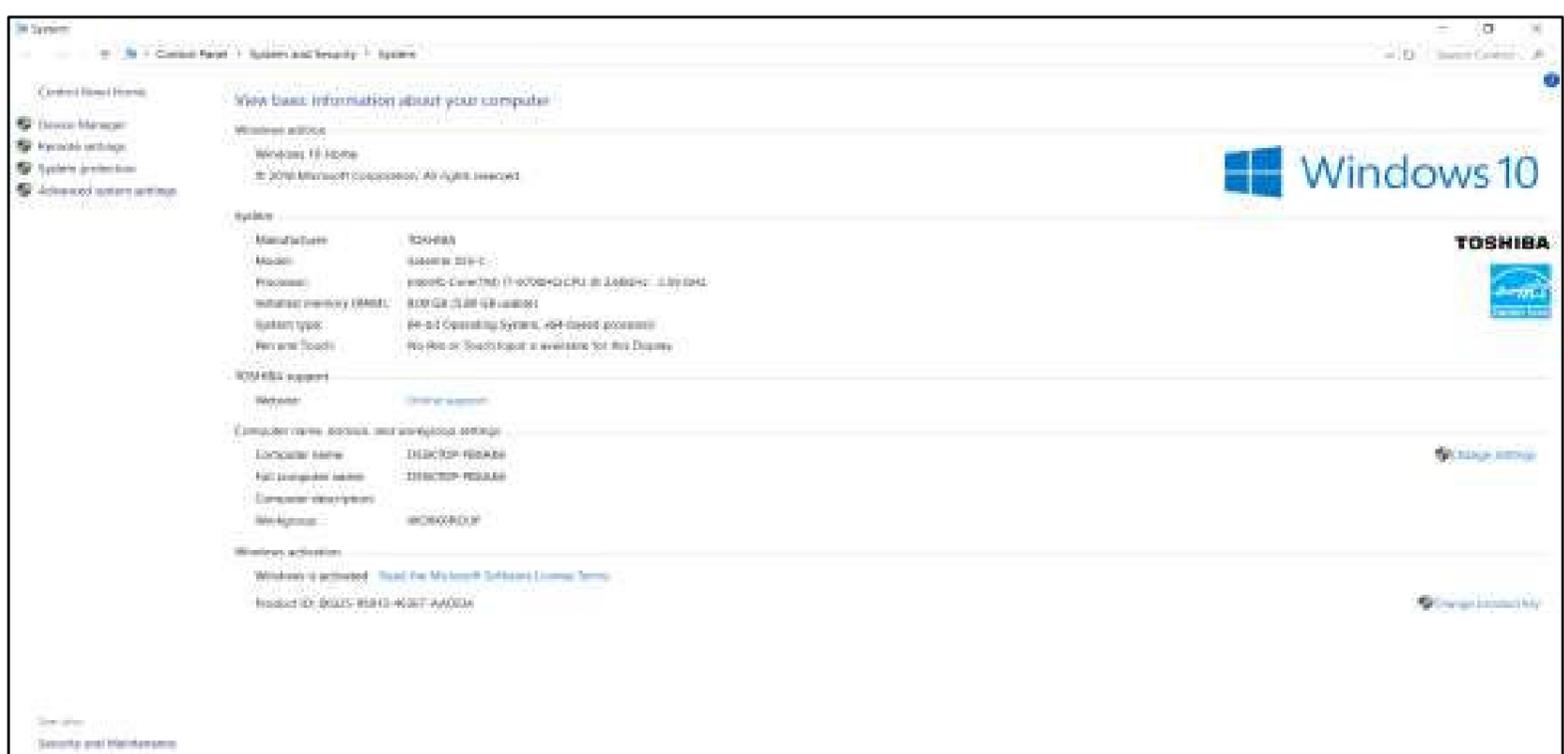
5.4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En el caso de las modelaciones numéricas bidimensionales, el equipo computacional utilizado es de gran importancia, sobre todo si se trata de dominios extensos, puesto que de este dependerá el tiempo de simulación así como el alcance en lo que a discretización de parámetros como la malla de cálculo y modelos de turbulencia se refiere, es por eso resulta necesario indicar las características generales del computador utilizado en las modelaciones y a partir de esto generar recomendaciones de uso.

A continuación se detallan las características del equipo de computación utilizado:

- Sistema Operativo: Windows 10
- Procesador: Intel® Core™ i7-6700 HQ CPU@ 2.60 GHZ 2.59 GHZ (sexta generación).
- Memoria RAM 8GB
- Tarjeta de Video Instalada Intel R HD graphics
- Tarjeta de Video Externa Nvidia GeForce GTX (4gb)
- Número de Procesadores= 8.

GRÁFICO NO 5.16 PROPIEDADES DEL EQUIPO DE COMPUTO UTILIZADO

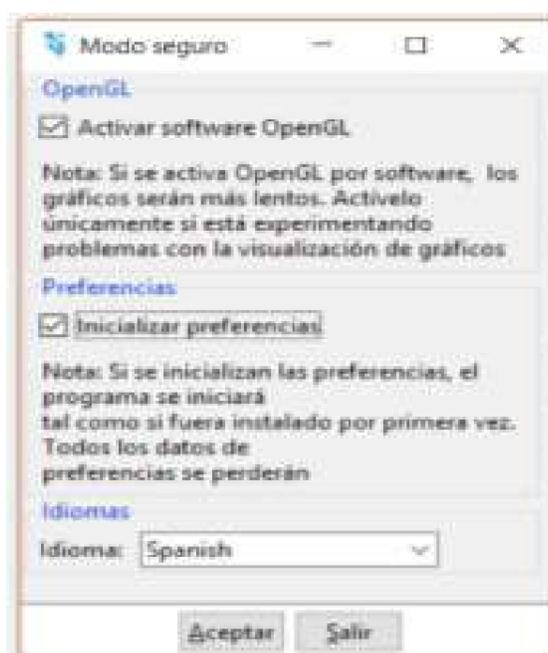


ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

De los parámetros anteriormente citados tres cobran una mayor relevancia cuando se trata del rendimiento en el cálculo y visualización de resultados en IBER, los mismos que corresponden a:

- Memoria RAM: La memoria RAM es fundamental en el preproceso, para una mayor rapidez en la generación de parámetros de cálculo y generación de resultados, así mismo de la cantidad de memoria RAM depende la versatilidad en la visualización de Resultados. Por lo tanto entre mayor memoria RAM tenga un computador mejor rendimiento se podrá tener en la modelación numérica usando el modelo IBER.
- Tarjeta de Video: La tarjeta de video es un factor que cobra importancia sobre todo en la etapa del post proceso, puesto que de esta depende la visualización de resultados. Un factor importante a tratar es la compatibilidad de la tarjeta de video con el programa puesto que de no serlo podrían generarse problemas al intentar usar IBER. Ventajosamente, el modelo tiene una solución para este tipo de problemas y es el modo a prueba de fallos de IBER, al abrir el programa bajo esta modalidad permite trabajar con cualquier tarjeta de video bajo la afectación del rendimiento.

GRÁFICO NO 5.17 VENTANA DE INICIO CON MODO A PRUEBA DE FALLOS EN IBER

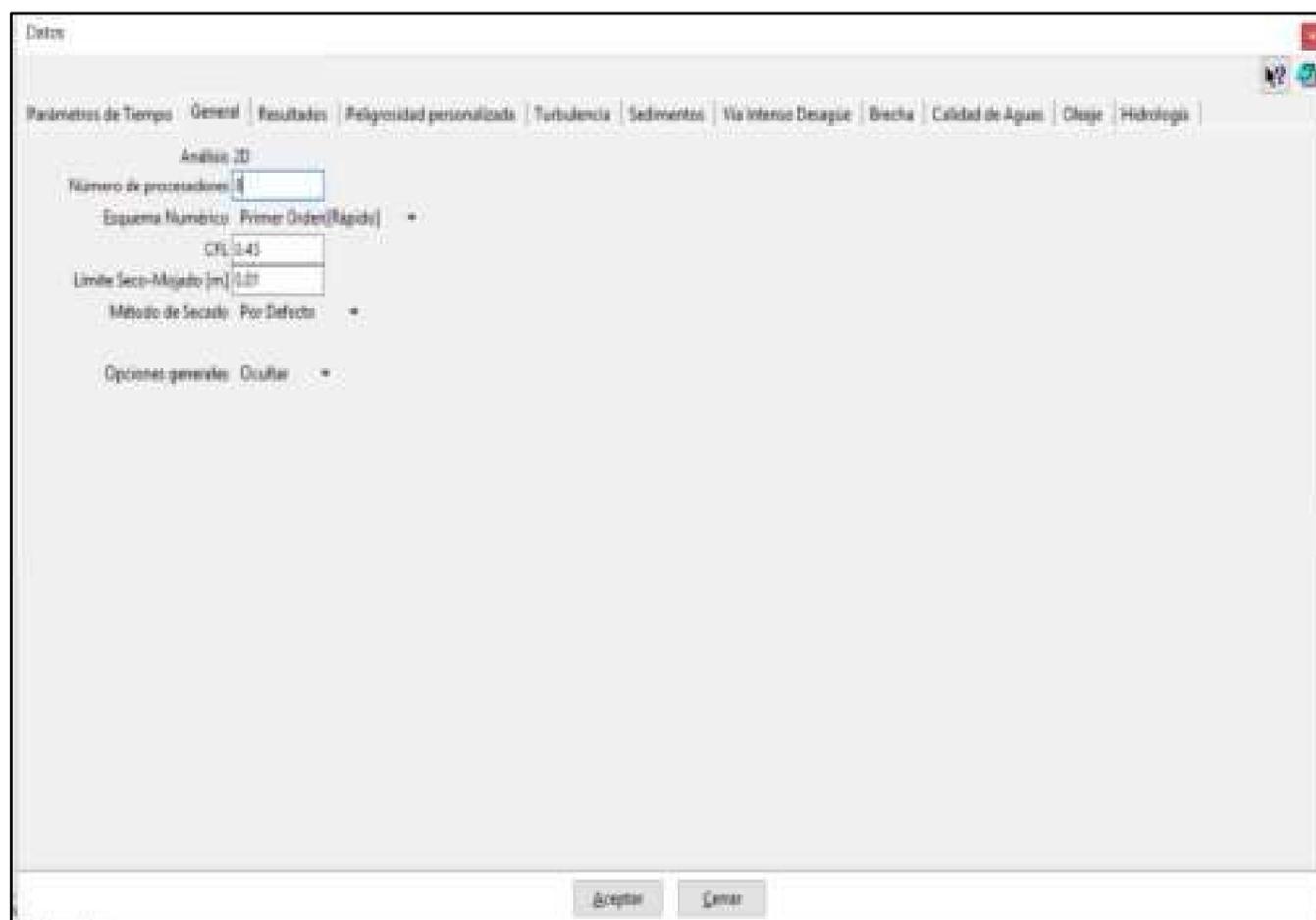


ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

Es importante señalar que en el presente trabajo se utilizó este proceso puesto que la tarjeta de video anteriormente citada no es compatible con el programa.

- Número de Procesadores: Se recomienda utilizar la capacidad máxima del computador durante la etapa de cálculo, para esto IBER permite cambiar el número de procesadores con el cual se va a correr el modelo a fin de disminuir el tiempo de ejecución del mismo.

GRÁFICO NO 5.18 VENTANA DE INGRESO DE NÚMERO DE PROCESADORES CON LOS CUALES SE EJECUTARÁ EL CÁLCULO



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

Una vez que se ha considerado los parámetros computacionales más relevantes e influyentes en la modelación, se realizará un análisis detallado de los resultados obtenidos con el objeto de tener en cuenta la influencia de parámetros de mallado, aplicación de modelos de turbulencia entre otras en los resultados numéricos y así generar conclusiones que pueden ser de gran utilidad para modelaciones futuras.

5.4.3.1 Análisis de resultados numéricos obtenidos en las distintas corridas del modelo.

5.4.3.1.1 Primera corrida.

En lo que respecta a los resultados obtenidos con la modelación utilizando malla de 9m * 9m y con volúmenes de glaciar del 2011, se nota en efecto la variación y evidente disminución del área de influencia del lahar con respecto a los resultados obtenidos con los volúmenes de glaciar del 1976. Lo anterior confirma que debido a la disminución que ha sufrido el área del casquete glaciar, la influencia de los lahares producidos por el mismo a la vez disminuye. Sin embargo se hace notable que en ambos casos existe un desborde del río lo que conlleva a una potencial inundación de zonas pobladas.

Se evidencia además, la disminución de las velocidades de tránsito dentro de la zona lo que a la vez permite inferir que el flujo se demoraría un mayor tiempo en transitar por los cauces, con respecto a eventos como el generado en la última erupción del volcán.

Es necesario mencionar que el tiempo total de la simulación para la presente corrida es de una hora y 4 minutos.

5.4.3.1.1 Segunda corrida.

Con el propósito de conocer la influencia del mallado dentro de los resultados obtenidos para la modelación numérica bidimensional del flujo de lahares en el sector de Sangolquí, se planteó realizar una malla más fina que aquella planteada en la primera corrida, es decir para este caso la malla corresponde a elementos de 6m*6m. Con lo cual se obtuvo lo siguiente:

- Los resultados obtenidos con relación al mapa de calados máximos son prácticamente los mismos que aquellos encontrados dentro de la primera corrida, podría decirse que ambos mapas obtenidos son una copia exacta.
- Se repite la similitud de resultados entre ambas corridas en el caso de la velocidad del flujo.
- El tiempo de simulación se alarga a tres horas, es decir que prácticamente se triplicó el tiempo de análisis. Sin embargo los resultados son

prácticamente los mismos.

5.4.3.1.1 Tercera corrida.

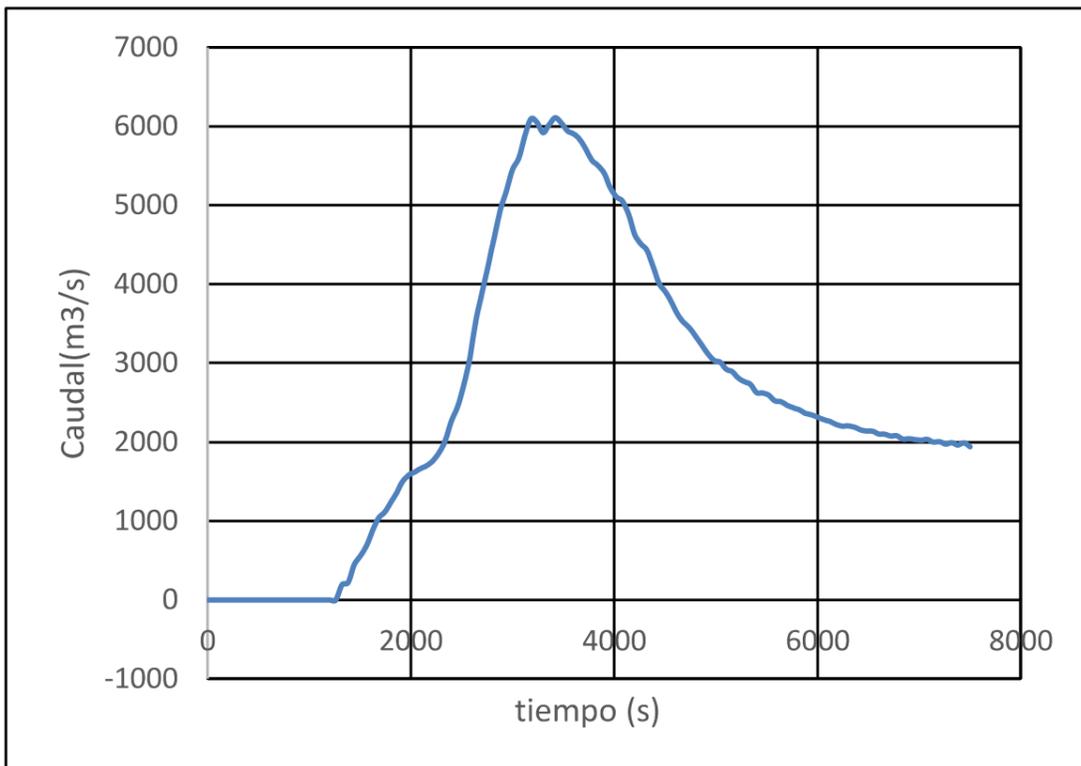
Finalmente con el propósito de conocer la influencia de la turbulencia en la modelación, se planteó ingresar el modelo de turbulencia a la segunda corrida llegando a observarse lo siguiente:

- No se evidencia influencia alguna de la turbulencia en los resultados obtenidos, puesto que nuevamente el mapa de calados máximos coincide con los mapas obtenidos en las corridas anteriores.
- En cuanto a las velocidades, estas son también similares en los tres casos evidenciando la no influencia (para este caso) de la definición de la malla de cálculo y la inclusión del modelo de turbulencia.
- El tiempo de simulación para este caso es de casi tres días, lo cual nos permite conocer el costo computacional que tiene la inclusión del modelo de turbulencia. Adicionalmente, como se ve en los resultados en este caso debido al alto costo computacional fue imposible incluir la orto foto de la zona como fondo, puesto que el post proceso del mismo ocasionó fallos en el computador.

5.4.3.1.1 Hidrogramas de salida

Al ser los hidrogramas de salida del tramo el dato que se entrega en la etapa de cálculo de IBER, lo cual a la vez nos permite conocer el avance de la simulación, es importante determinar las variaciones o similitudes de los mismos en cada una de las corridas realizadas, puesto que dichos hidrogramas corresponderán a los valores de entrada para modelaciones en tramos aguas abajo del tramo analizado en el presente trabajo. Es así que en base a los resultados obtenidos se tiene:

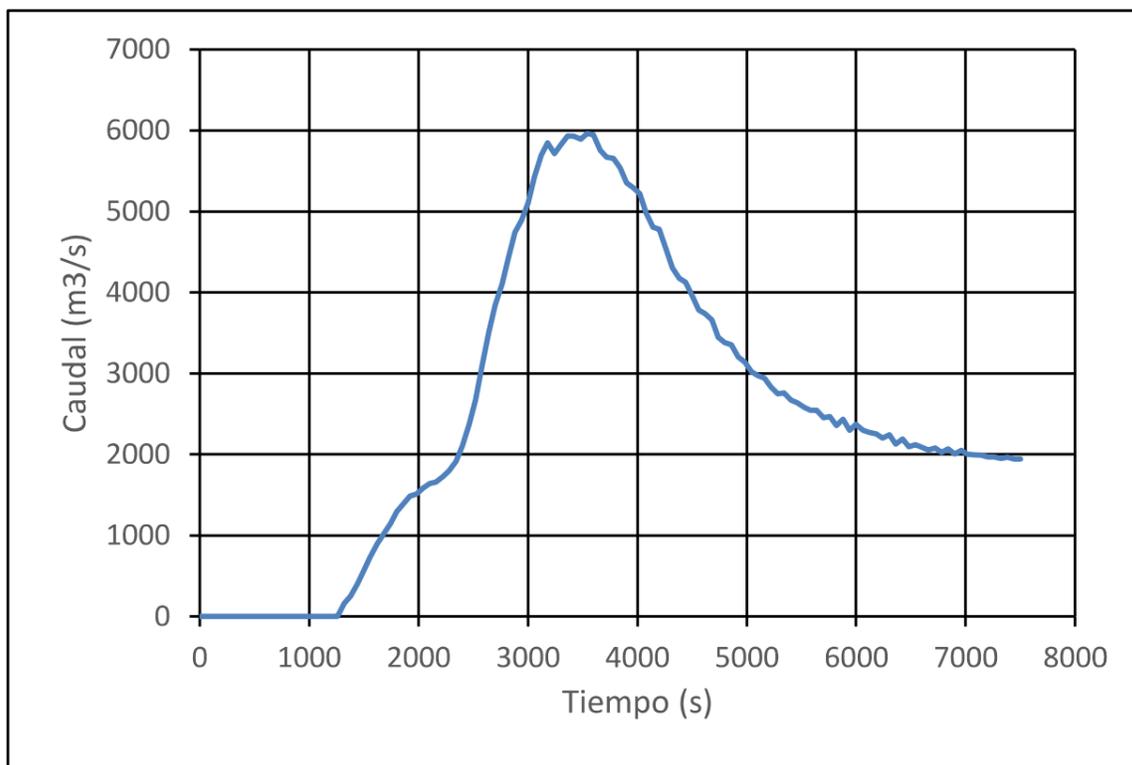
GRÁFICO NO 5.19 HIDROGRAMA DE SALIDA GENERADO APARTIR DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL EN EL SECTOR DE SANGOLQUI CON UN MALLADO DE 9M*9M.



tiempo(s)	Q(m3/s)
0	0
1200	0
2400	2271.979
3420	6108.185
4200	4636.01
5400	2624.343
6600	2102.933
7500	1939.417

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

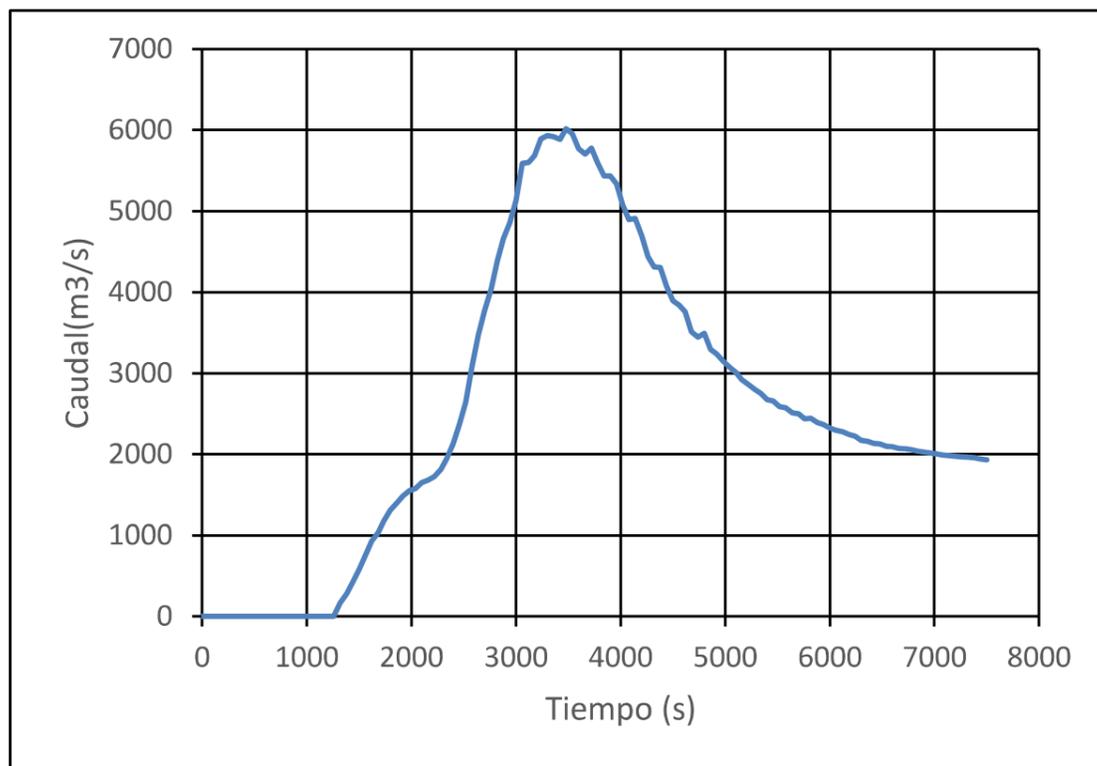
GRÁFICO NO 5.20 HIDROGRAMA DE SALIDA GENERADO APARTIR DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL EN EL SECTOR DE SANGOLQUI CON UN MALLADO DE 6M*6M.



tiempo (s)	Q(m3/s)
0	0
1200	0
2400	2099.797
3540	5960.878
3600	5943.387
4800	3379.593
6000	2374.116
7200	1971.253
7500	1943.284

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

GRÁFICO NO 5.21 HIDROGRAMA DE SALIDA GENERADO APARTIR DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL EN EL SECTOR DE SANGOLQUI CON UN MALLADO DE 6M*6M. Y MODELO DE TURBULENCIA



tiempo(s)	Q(m³/s)
0	0
1200	0
2400	2129.284
3480	6015.963
3600	5769.379
4800	3491.768
6000	2325.099
7200	1973.378
7500	1929.228

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

Como se observa en las figuras anteriores los hidrogramas generados conservan una forma similar a la de un triángulo, llegando a obtener su pico dentro del primer tercio del tiempo para después atenuarse en un mayor tiempo con respecto a aquel en el que alcanza el caudal máximo, se evidencia además que después de cierto tiempo el hidrograma tiende a ser uniforme es decir prácticamente tiende a tener un flujo permanente.

Si se comparan los tres hidrogramas generados en las distintas corridas se notará la similitud en valores y forma del hidrograma al final del tramo, es más, el tiempo de inicio del hidrograma es el mismo (1320 s), lo que significa que este es el tiempo que se demoraría el lahar en transitar dentro del tramo.

A continuación se presenta una tabla comparativa entre los principales parámetros encontrados en los hidrogramas generados en cada una de las corridas del modelo.

TABLA NO 5.3. PARÁMETROS SIGNIFICATIVOS DE LOS HIDROGRAMAS DE SALIDA GENERADOS EN LA MODELACIÓN BIDIMENSIONAL

CORRIDA	TIEMPO DE INICIO DEL HIDROGRAMA (S)	TIEMPO PICO (S)	CAUDAL PICO (m ³ /S)	CAUDAL ESTABLE(m ³ /S)
CON MALLA DE 9m*9m	1320	3420	6108.19	1940
CON MALLA DE 6m*6m	1320	3540	5960.88	1943
CON MALLA DE 6m*6m (con turbulencia)	1320	3480	6015.96	1929

ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

Si se considera los valores reportados en la tabla 5.3, se observa la similitud de resultados en las tres corridas del modelo, lo cual ratifica las afirmaciones realizadas acerca de que las velocidades y calados son similares, puesto que como se observan los tiempos de inicio del hidrograma, es decir el tiempo de transito del lahar desde la entrada a la salida es el mismo, indicando así que las velocidades también son similares, además de que los caudales máximos se encuentran dentro del mismo orden de magnitud, sin que existiera una diferencia significativa entre las tres corridas, lo cual se traduce en calados similares.

Se debe notar también que en casos como el tiempo pico y caudal pico los valores obtenidos con malla de 9m*9m sin turbulencia corresponden a los valores más conservadores y por ende más críticos, mientras que aquellos obtenidos con malla de 6m*6m sin turbulencia corresponden a los menos cautelosos, dejando así a como valores intermedios a aquellos generados al aplicar el modelo de turbulencia.

5.4.4 CONCLUSIONES

- En el presente capítulo se realizó la modelación numérica del flujo de lahares para el escenario 3 del volcán Cotopaxi en el río Santa Clara, específicamente en la zona consolidada de Sangolquí, correspondiente al drenaje norte del mismo, para lo cual se utilizó el software IBERv2.3.2, mismo que dentro de su módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones bidimensionales de St Venant, las cuales consideran una distribución de

presión hidrostática así como, una distribución de velocidad uniforme, características que se cumplen de una manera razonable en el flujo de Ríos como es el Caso del Río Santa Clara.

- A diferencia de los modelos Unidimensionales, en los modelos bidimensionales y en consecuencia en Iber no es necesario definir secciones transversales puesto que en estos últimos no se maneja el concepto de radio hidráulico, ya que resulta igual hablar de radio hidráulico y calado.
- Dentro de zonas con geometrías suaves (Sin cambios bruscos en su geometría) como es el caso de la zona consolidada de Sangolquí, la magnitud de la turbulencia no es suficiente como para tener una influencia significativa dentro del campo de la velocidad media.
- Dentro de los modelos de turbulencia disponibles en Iber, el modelo k- ϵ representa el de mayor sofisticación, adicionalmente dentro de flujos turbulentos poco profundos como es el caso de la zona de estudio, los resultados generados son muy aceptables, razón por la cual se utilizó este modelo dentro de las simulaciones realizadas.
- Debido a que permiten una mejor adaptabilidad y por ende mejor representación de la geometría en estudio, se utilizó mallas no estructuradas con elementos triangulares y cuadrangulares con tamaños de 9m*9m y 6m*6m; con el propósito de conocer la influencia de un mallado más fino en la modelación.
- Se tomó los hidrogramas generados en la modelación unidimensional en la sección Sangolquí- Ejido, tanto para la calibración del modelo bidimensional como para las corridas definitivas del mismo.
- Se estimó un coeficiente de n de Manning promedio para la zona de estudio de 0.015, valor que se encuentra dentro del rango de variación recomendado por Macedonio y Parechi (0.015-0.06) para zonas con pendientes bajas,

como es el caso del sector de Sangolquí.

- Dentro de las modelaciones bidimensionales, específicamente en el modelo Iber, las características del computador a utilizar toma una relativa importancia puesto que debido a la complejidad de las ecuaciones y en consecuencia la dificultad en la resolución de las mismas, se debe utilizar máquinas de última generación con el objeto de optimizar factores como el rendimiento de cálculo, visualización de resultados y tiempos de ejecución del programa.
- Se trabajó con la opción de Iber a prueba de fallos, debido a que se presentaron incompatibilidad entre el programa y la tarjeta de video del computador utilizado, por lo que se esperaría una mayor eficiencia en parámetros como el tiempo de ejecución del programa si se utilizan computadores con características tales que permita utilizar la opción normal de trabajo del programa.
- Al comparar los resultados obtenidos con los volúmenes del lahar de 1976 y 2011, es evidente la disminución de la zona de inundación del segundo con respecto al primero, así mismo se constató que la velocidad de tránsito del lahar en el tramo también disminuye, lo anterior está altamente ligado a la disminución del área del glaciar. Sin embargo, en ambos caso es notable el desbordamiento del flujo afectando a zonas altamente pobladas.
- Se constató que para el caso de estudio una malla de 9m *9m es suficiente puesto que al disminuir el tamaño de la malla no se observaron cambios significativos dentro de los resultados obtenidos.
- De igual manera se verifica que la influencia de la turbulencia dentro de este tipo de flujos y bajo las condiciones topográficas presentadas en el tramo de estudio no es representativo y considerando que la inclusión de un modelo de turbulencia demanda un mayor rendimiento computacional, es preferible no considerar dicho parámetro para simulaciones con características similares.
- De acuerdo a los resultados generados el tiempo de transito del lahar dentro

del tramo es de aproximadamente 22 minutos, adicionalmente se generaron hidrogramas que servirían de base para simulaciones en tramos posteriores.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS COMPARATIVO CON SIMULACIONES

REALIZADAS EN EL TRAMO DE ESTUDIO

6.1 MAPA DE AMENAZAS DEL VOLCÁN COTOPAXI ZONA NORTE

Debido a la reactivación del volcán Cotopaxi en Mayo del 2015, y ante la declaratoria de estado de excepción en el país por la creciente actividad del coloso, en agosto del mismo año se decide conformar un equipo técnico interinstitucional conformado por: IG-EPN, SGR, ESPE, IGM, IEE, ECU 911 e INIGEMM, con el objeto de generar información más a detalle de la delimitación geográfica de la amenaza del volcán Cotopaxi, además de rutas de evacuación en caso de una erupción del volcán.

Es así que con base a la información facilitada por el IGM, la cual consta de: cartografía base de vías, ríos, Modelos de elevación, Ortofotos etc. Se acordó como solución provisional ante la premura del tiempo, ajustar el mapa de peligros volcánicos asociados al volcán Cotopaxi tanto en su zona Norte y sur (publicado en 2004 a escala 1:50000) a una escala actual de 1:5000. Este ajuste a su vez implica tener un mayor detalle en los mapas de amenaza del volcán, teniendo en cuenta que esto no representa una actualización en si del mapa publicado en 2004. (IG-EPN et al., 2015).

Se conoce que el Mapa de Peligros volcánicos publicado en 2004 está considerado en función del evento eruptivo de 1877. Aclarándose esta afirmación dentro de la leyenda del mapa misma que cita:

“FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS (LAHARES). Zona de mayor peligro: Esta zona, de color gris oscuro, tiene una alta probabilidad de ser afectada por flujos de lodo y escombros, en caso de que ocurra una erupción moderada a grande (VEI=2-4). Esta zona ha sido definida en base de los depósitos dejados por el flujo lahárico del 26 de Junio de 1877 y otros flujos ocurridos durante la época histórica. En

cuanto al volumen, extensión y alcance vertical de los lahares, futuras erupciones podrían generar lahares tanto de menor (caso más probable) como de mayor tamaño (caso menos probable). Sin embargo, se debe destacar que ante cualquier erupción futura es imposible indicar con anterioridad los límites precisos del alcance de cualquier flujo lahático, dado el gran número de variables que pueden controlar el rumbo y la fuerza del flujo al momento de la erupción. (Hall, M. et al 2004).

Bajo esta aclaración se puede decir que el mapa de peligros volcánicos del volcán Cotopaxi del año 2004, corresponde a un escenario considerado como el máximo probable (Evento de 1877), elaborado en base a un mapeo geológico de la zona y debido a su escala puede ser usado para una planificación en el ámbito regional.

Adicionalmente se afirma que el mapa publicado en 2016 no corresponde a una actualización del mapa generado en 2004 y mucho menos corresponde a un nuevo mapa, sino que este es el resultado de un ajuste de escalas de 1:50000 a 1:5000.

6.1.1. ELABORACIÓN DEL MAPA DE AMENAZAS DEL VOLCÁN COTOPAXI 2004

El mapa de amenazas fue generado a partir del evento de 1877 y el uso de modelos de simulación hidráulicos unidimensionales (Hec-Ras y FLDWAV) y el modelo bidimensional FLO-2D. Durante la generación del mapa se procesó los resultados de los modelos numéricos convirtiéndolos en capas espaciales con sistemas de información geográfica SIG. Teniendo en cuenta lo siguiente:

1. Del modelo Hec-RAS se tomaron datos de calados correspondientes a cada sección transversal de ingreso, para generarse un SIG de puntos.
2. Del modelo FLD-WAV se tomaron los datos del nivel y ancho máximo correspondientes a cada sección transversal de ingreso.
3. Del modelo FLO-2D, se tomaron los datos de las zonas de inundación, realizando un refinamiento del borde de inundación en base a la tendencia de las curvas de nivel, debido a las limitaciones del modelo, mismo que permite ingresar los datos como GRID con tamaño de celda de 50m. Para los modelos anteriores y sus secciones transversales con GRID de 5m. (Galarraga, 2005).

4. Finalmente se generaron las zonas de amenaza a partir de las capas de puntos de los resultados de las modelaciones, para lo cual se trazaron líneas que unieron los puntos más extensos considerando la tendencia de las curvas de nivel cada 5m. Finalmente se unieron las capas para obtener una sola capa de amenazas.

6.1.2. BREVE DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO EN 2015 PARA LA REEDICIÓN DEL MAPA DE AMENAZAS DEL VOLCÁN COTOPAXI

6.1.2.1. Antecedentes

Se cuenta con aproximadamente 20 años de datos recogidos tanto en campo como en laboratorio, teniendo como fruto de este trabajo la generación de diversos mapas entre los cuales destacan:

- Mapa de reconocimiento de Riesgos Volcánicos Potenciales del volcán Cotopaxi, Ecuador.- Desarrollado por Dan Miller, Donal Mullineaux y Minard Hall en 1978 con una escala de 1:100000.
- Mapa de los Peligros Volcánicos Potenciales Asociados con el Volcán Cotopaxi.- Este segundo mapa fue generado en 1988 por Minard Hall y Christa von Hillebrandt a una escala de 1:50000.
- Mapa Regional de Peligros Volcánicos Potenciales del Volcán Cotopaxi, un trabajo de Minard Hall, Patricia Mothes, Pablo Samaniego, Hugo Yepes y Daniel Andrade en 2004, conservando una escala de 1:50000.

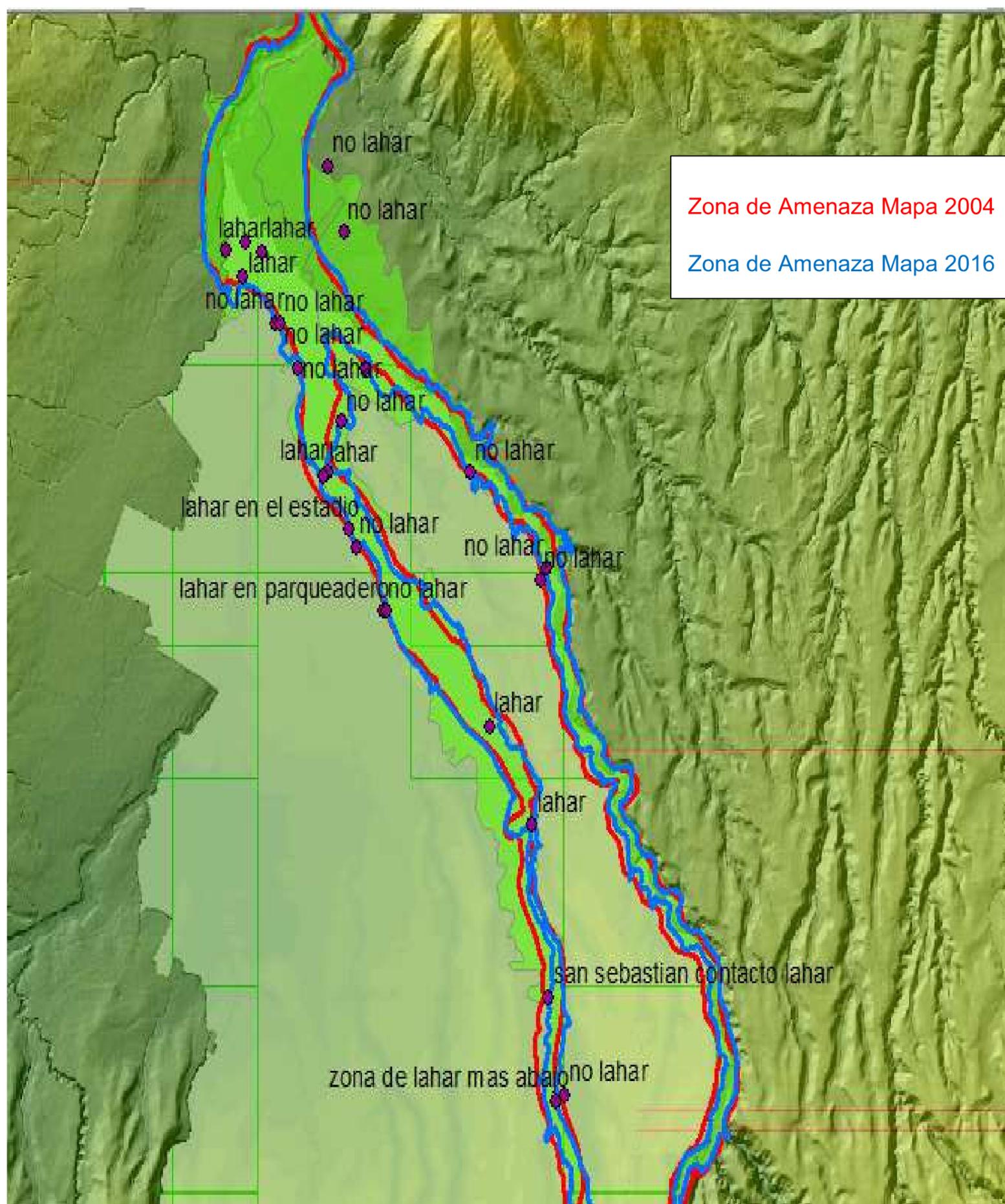
6.1.2.2. Reedición del mapa del 2004.

En función de la información técnica disponible actualizada se reeditó el mapa generado en el año 2004, considerando lo siguiente:

- Base de vías y ríos actualizada otorgada por el IGM.
- Cambio del sistema de coordenadas al WGS84.
- Escala más amplia de 1:5000.
- Modelo Digital de Elevación (DEM) mejorado de 3 pixeles.

- Nuevo Diseño de escenarios volcánicos.
- Nuevos Levantamientos de Campo.

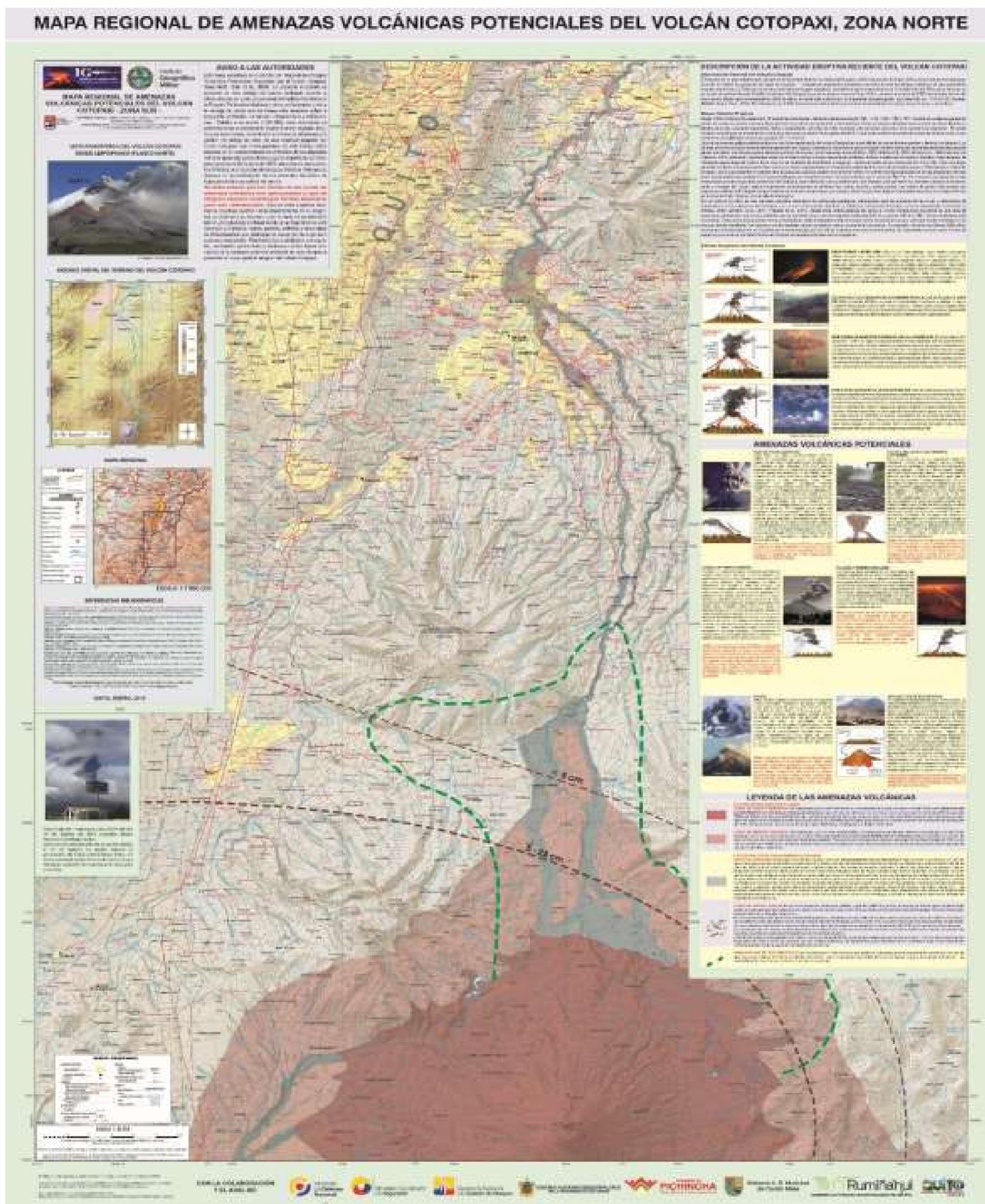
GRÁFICO NO 6.1 COMPARACION DE LAS ZONAS DE AMENAZA POR LAHAR ENTRE MAPAS 2004 Y 2016



FUENTE: Mothes et al, 2016

6.1.1.3. RESULTADO

GRÁFICO NO 6.2 MAPA DE AMENAZAS VOLCÁN COTOPAXI ZONA NORTE.



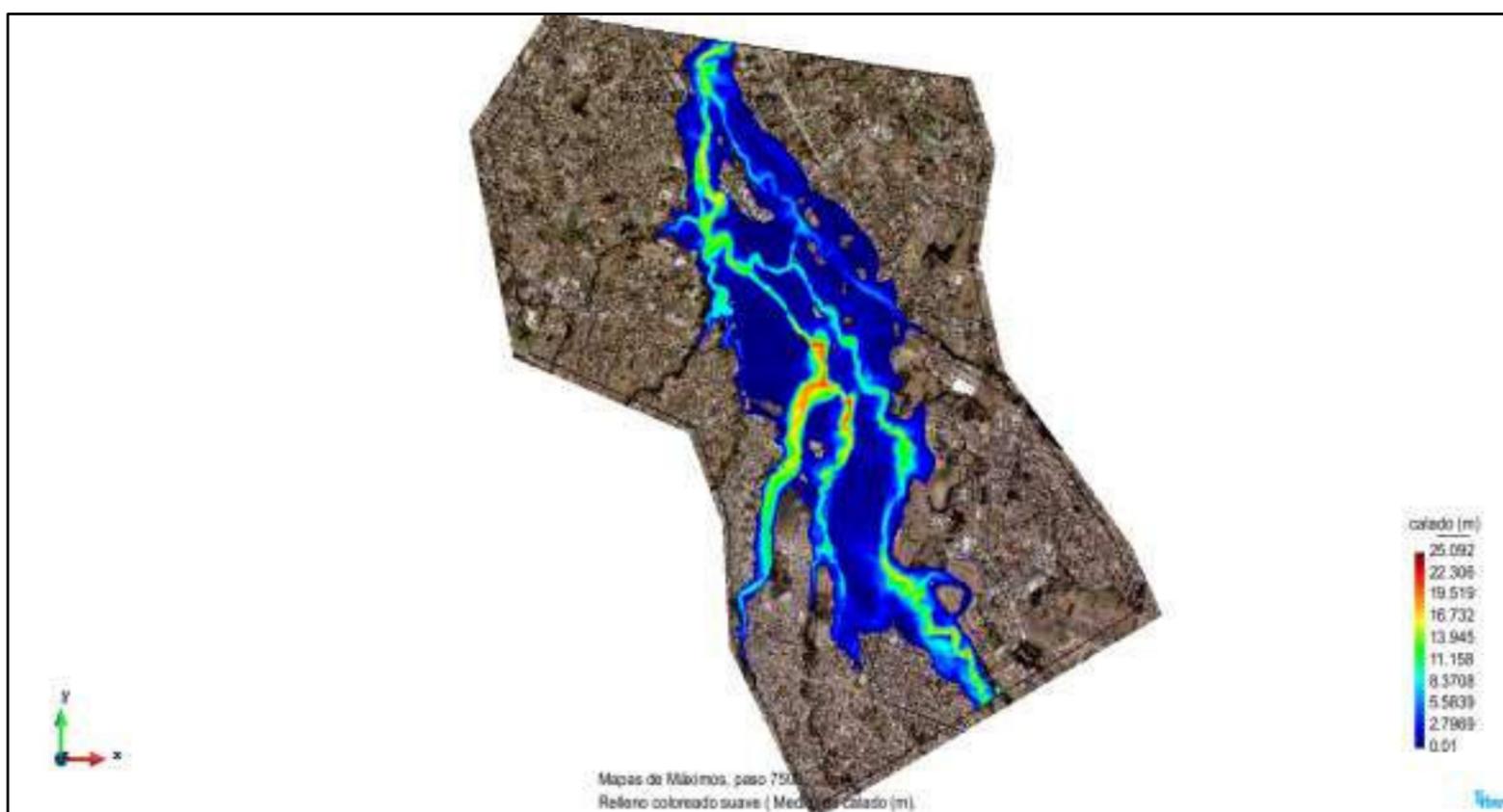
FUENTE: Mothes et al, 2016

6.2 COMPARACIÓN ENTRE EL MAPA DE AMENAZAS DEL VOLCÁN COTOPAXI Y LA MODELACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI EN EL RÍO SANTA CLARA DENTRO DE LA ZONA CONSOLIDADA DE SANGOLQUI.

Con la finalidad de conocer las bondades del programa Iber, mismo que ha sido evaluado en el trabajo realizado en el presente Proyecto de titulación, se plantea comparar los resultados obtenidos con el mapa de Amenazas del volcán Cotopaxi dentro de la zona de estudio, puesto que este último es considerado el mapa oficial y por ende el punto de comparación de cualquier estudio realizado sobre el tema.

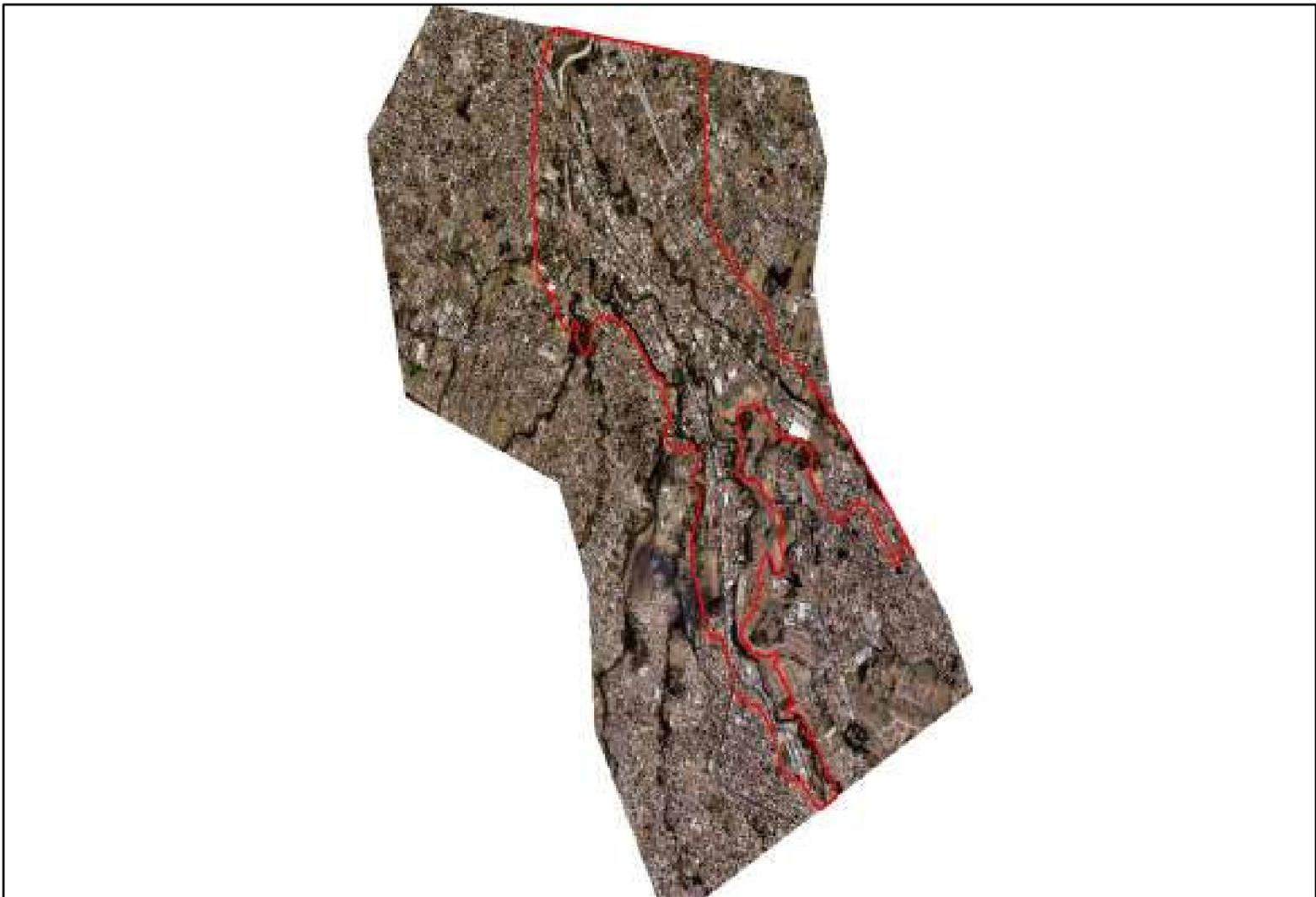
Como se ha mencionado anteriormente el mapa de Amenazas está desarrollado para el evento del 26 de Junio de 1877, considerado como evento máximo, es por eso y debido a que dicho evento corresponde a la vez al evento de calibración del modelo numérico es evidente que la comparación deba realizarse con los resultados obtenidos en el punto 5.3 del presente trabajo.

GRÁFICO NO 6.3. MAPA DE INUNDACIÓN GENERADO EN EL MODELO NUMÉRICO PARA EL EVENTO DE 1877



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

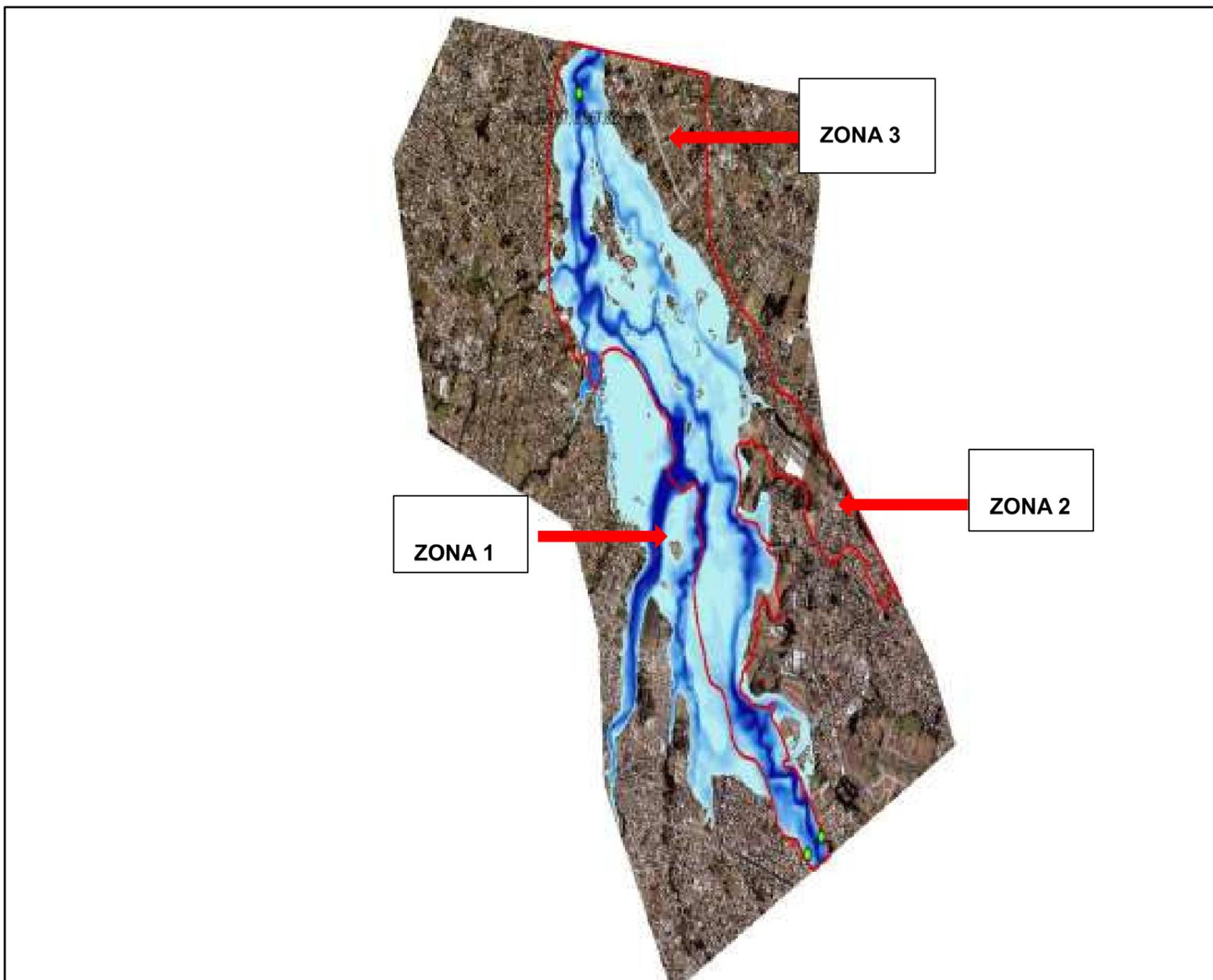
**GRÁFICO NO 6.4. MAPA DE AMENAZAS DEL VOLCAN COTOPAXI 2016
EN LA ZONA CONSOLIDADA DE SANGOLQUÍ**



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

Al comparar los gráficos 6.3 y 6.4 se puede notar una similitud en lo que respecta al alcance de las áreas de inundación representadas en las mismas, de igual manera es notable la diferencia que existe en la presentación de ambos mapas, puesto que en los resultados generados en Iber se evidencia la diferenciación de calados presentes dentro de la zona de influencia mediante una escala de colores, mientras que en el mapa de amenazas no se hace dicha distinción. Por otro lado existe una incertidumbre con respecto a tres zonas en las cuales parecería que la influencia de la inundación en ambos casos es totalmente distinta. Con el objeto de analizar a detalle lo anterior se hará uso del gráfico 6.5 en el cual se muestra el montaje de ambos mapas lo cual permitirá tener una mejor apreciación de las similitudes y diferencias obtenidas en ambos casos.

GRÁFICO NO 6.5. COMPARACIÓN MAPA DE AMENAZAS DEL VOLCÁN COTOPAXI Y SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL EN EL SECTOR DE SAGOLQUÍ



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

Al observar la figura anterior se pueden distinguir 3 zonas en las cuales se nota una discrepancia en las áreas de inundación entre ambos trabajos, para lo cual se procede a analizar las posibles causas de las mismas.

Zona 1: En esta zona es notable la diferencia entre ambos trabajos, puesto que en el mapa de amenazas no existe influencia del flujo del lahar dentro de la misma. Sin embargo en el mapa generado a partir de la modelación numérica con el programa Iber, se evidencia. La expansión lateral del flujo además de una zona de circulación del flujo a través del tramo final del río San Pedro previo a su confluencia con el río Santa Clara, se pudo observar en las animaciones de los resultados que existe una especie de retroceso del lahar en esta zona debido a la diferencia de

cotas, este retroceso se da hasta el sector del puente Agustín Miranda lo que evidencia precisamente una de las ventajas del modelo Iber, puesto que este muestra las zonas en las cuales existe flujo lateral, factor que posiblemente no fue considerado en la realización del mapa en el 2004 puesto que al ser en su mayoría generado con modelos unidimensionales, los cuales únicamente consideran el flujo longitudinal mediante la colmatación del volumen en secciones transversales, además de que únicamente se unieron los puntos de las secciones transversales para generar la zona de inundación, lo anterior implica la no consideración del flujo en sentido transversal.

En resumen las diferencias encontradas en la zona 1 se deben posiblemente a que en la generación del mapa de amenazas no se consideró el flujo lateral en las zonas de inundación, lo cual se evidencia como una de las ventajas del programa representando una gran ayuda para posibles afinaciones del mapa en zonas de aparente flujo lateral, como es el caso de la zona consolidada de Sangolquí. Para esto sería conveniente ampliar el trabajo de campo especialmente en la zona del puente Agustín Miranda en el río San Pedro lugar en el que se evidencia la presencia del flujo de lahares.

Zona 2: En la zona 2 ocurre lo contrario a lo acontecido en la zona 1, en este caso no existe influencia de la simulación Numérica, mientras que en el mapa de amenazas se nota una influencia en el área de afectación. La explicación para esta diferencia está dada en que el mapa de amenazas considera un todo, es decir se toma en cuenta a todos los aportantes aguas arriba de esta zona, que para el caso son los ríos Pita y Santa Clara, mientras que en el presente trabajo se considera únicamente la aportación del Río Santa Clara, esto debido a que como se ha explicado en capítulos anteriores el objetivo del presente trabajo es evaluar el programa Iber para la modelación numérica del flujo de lahares en zonas con eminente flujo lateral, como es el caso de la zona consolidada de Sangolquí, esta condición se da únicamente en el cauce del río Santa Clara.

De lo anterior se puede decir que debido a que el objetivo del presente trabajo no es generar mapas de inundación o amenaza por el flujo de lahares, sino más bien evaluar el modelo Iber como una herramienta para la generación de estos mapas

en zonas con llanuras de inundación en las cuales el flujo es eminentemente bidimensional y en vista de que dentro del tramo en análisis únicamente el cauce del río Santa Clara presenta dichas condiciones, se justifica la consideración única del aporte de este río para la modelación numérica realizada en el presente trabajo, y a la vez confirma la no existencia de flujo debido a la modelación bidimensional dentro de la zona 2.

Zona 3: Se evidencia un área de flujo dentro de la simulación numérica menor a la reportada en el mapa de amenazas, lo cual es debido a que esta zona se encuentra aguas abajo de la confluencia de los ríos Pita y Santa Clara y por las razones expuestas dentro del análisis de la zona 2 es justificable la existencia de esta diferencia de área de influencia dentro de la zona 3.

6.3 VALIDACIÓN DEL MODELO IBER PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE LAHARES EN ZONAS CON EMINENTE FLUJO BIDIMENSIONAL.

Aun cuando el modelo numérico Iber fue desarrollado para la simulación hidráulica, en el presente trabajo se ha podido observar que el mismo reporta resultados aceptables para la simulación del flujo de lahares en tramos en los cuales se aprecia una eminente inundación. Dichos resultados han sido comparados con mapas oficiales y se ha observado mucha similitud entre ambos, además de que se ha evidenciado una serie de ventajas del modelo Iber, mismas que pueden ser de gran ayuda para afinar y mejorar el mapa de amenazas en zonas de inundación. Por tal motivo se puede decir que Iber constituye una herramienta que puede resultar de gran ayuda para el posterior desarrollo de Mapas de Amenaza debido al flujo de lahares primarios en zonas de inundación.

Sin embargo debe ser claro que aun cuando el modelo represente una gran ventaja desde el punto de vista tecnológico, es fundamental la experiencia y el criterio del profesional que desarrolla la modelación y el posterior procesamiento de resultados para la generación de los Mapas de Amenaza, puesto que como se ha visto a lo largo del presente trabajo de titulación, debido a la falta de información existe una serie de incertidumbres alrededor del tema mismas que deben ser solventadas con

una serie de asunciones, las cuales deben tener un fundamento que únicamente un profesional con criterio y experiencia en el ámbito puede garantizar su confiabilidad.

Es importante tener en cuenta que los valores y resultados obtenidos no son absolutos, puesto que debido a la gran incertidumbre que existe alrededor del estudio del comportamiento de los volcanes no se puede tener valores exactos, pero si valores con cierto grado de confiabilidad mismos que se fundamentan en experiencias anteriores alrededor del tema.

6.3.1 UTILIDADES DEL MODELO IBER

Dentro del Post proceso de Iber se puede destacar varias utilidades que este presta para un análisis más a fondo de resultados los cuales ayudan al usuario a conocer de una mejor manera el comportamiento del flujo y algunas de sus propiedades.

A continuación se presenta algunas de las utilidades o ventajas del modelo:

6.3.1.1 Resultados en las dos dimensiones del plano horizontal

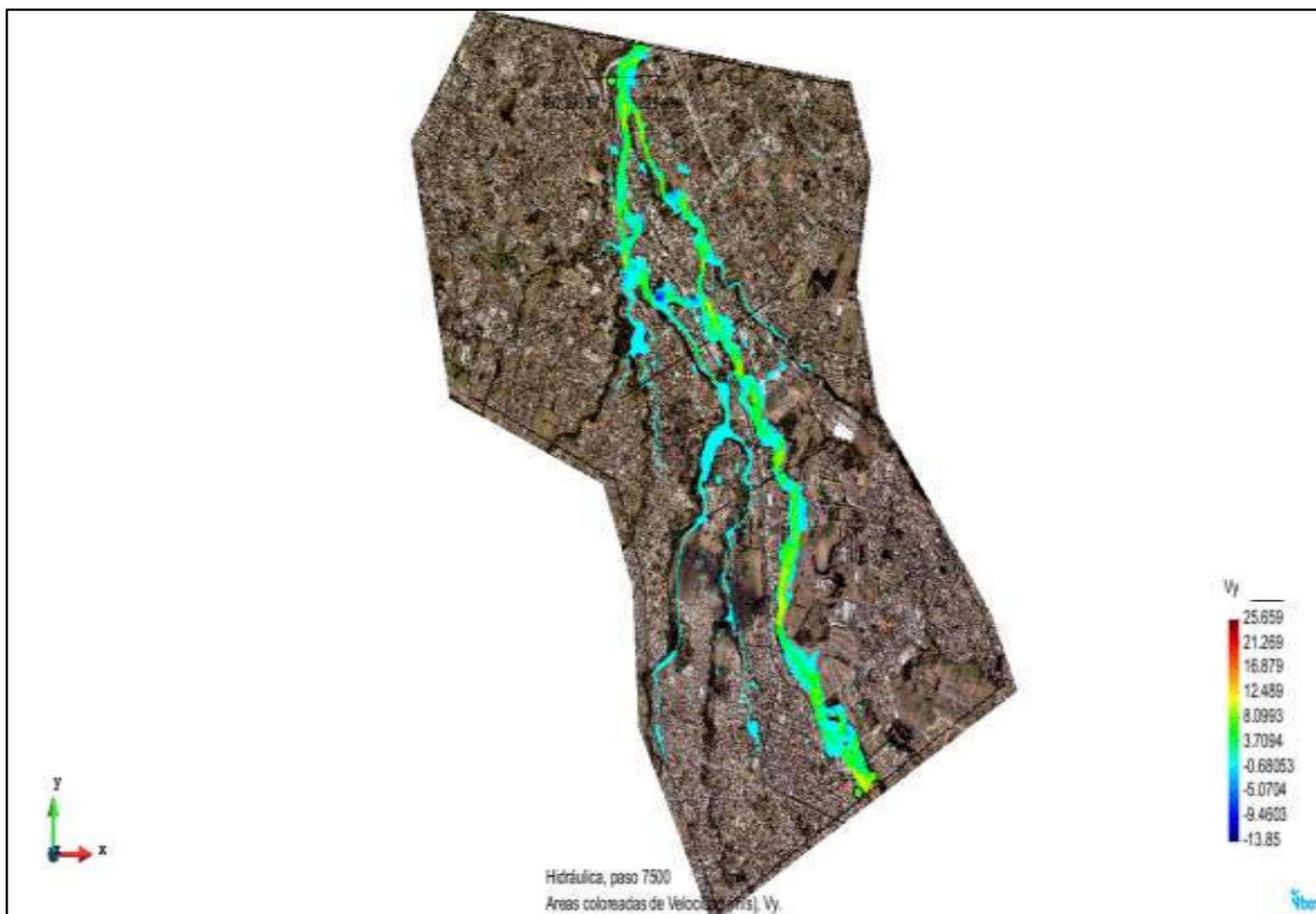
El post proceso de Iber permite visualizar los resultados de distintas variables del flujo modelado tanto en dirección X como en Y dentro del plano horizontal, permitiendo además observar mediante una escala de colores como la variable cambia en función de la posición en un instante determinado. Esta característica permite al usuario tener una visión más detallada de la evolución del fenómeno.

GRÁFICO NO 6.6. VISUALIZACIÓN DE LAS VELOCIDADES EN X AL FINAL DE LA SIMULACIÓN



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

GRÁFICO NO 6.7. VISUALIZACIÓN DE LAS VELOCIDADES EN Y AL FINAL DE LA SIMULACIÓN

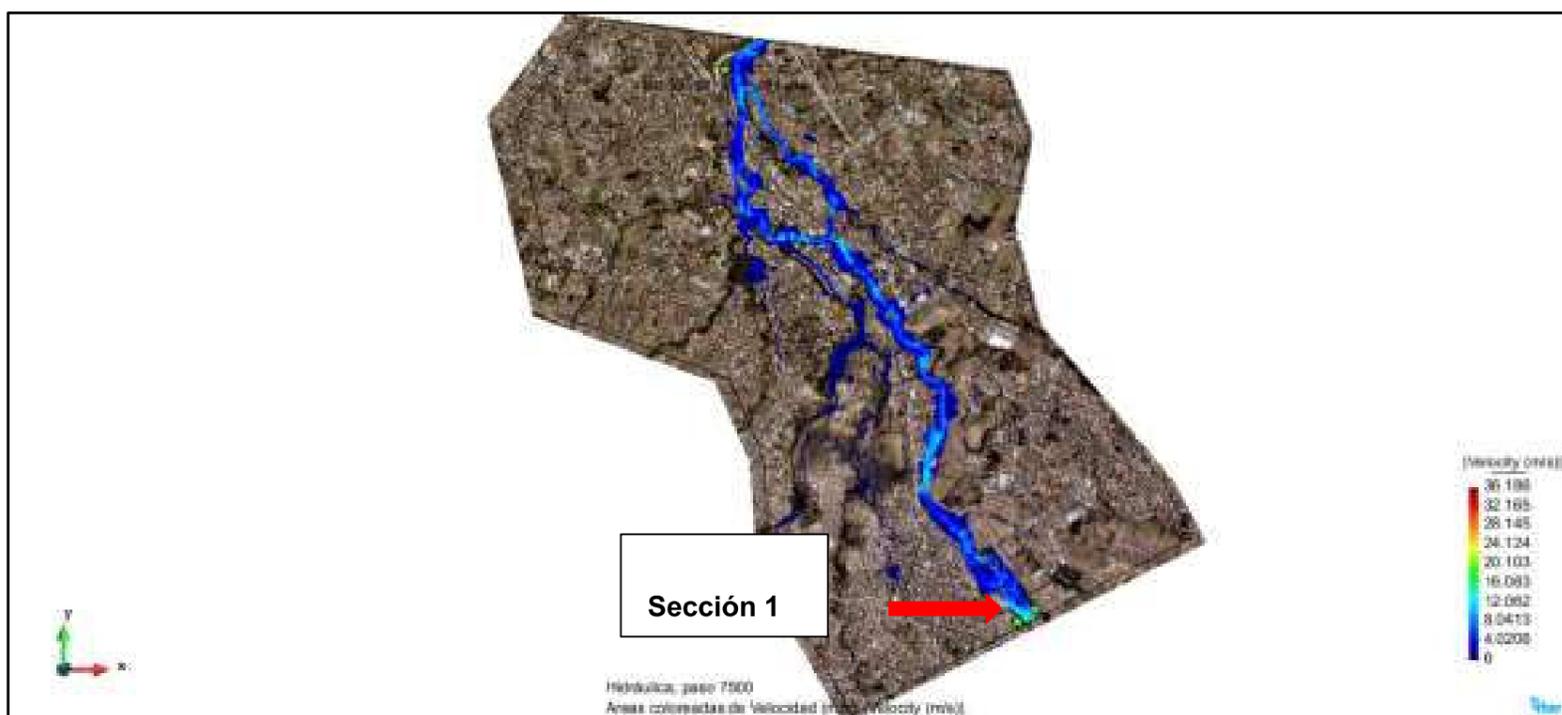


ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

6.3.1.2 Resultados medios

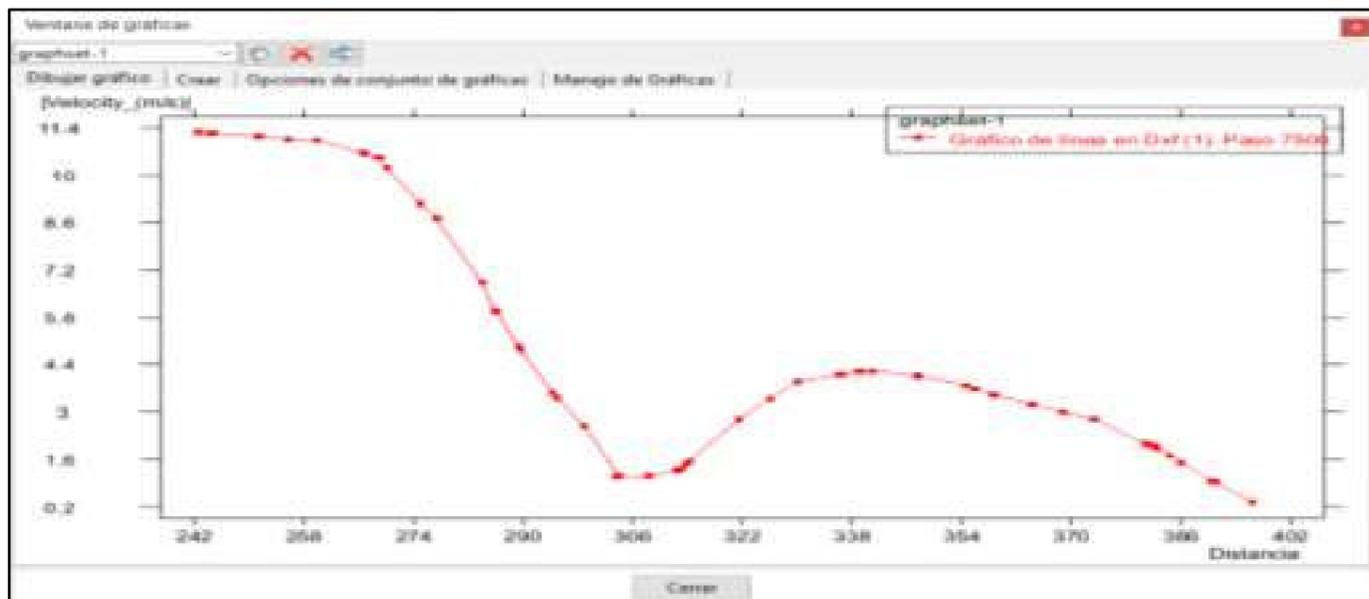
En caso de que el usuario requiera tener valores medios de las variables hidráulicas Iber permite tener dichos resultados en cualquier instante de tiempo. Algo importante a mencionar, es que a diferencia de los modelos unidimensionales los valores reportados en Iber no son constantes para una sección dada, es decir si tomamos el caso de los gráficos 6.8 y 6.9 el valor de velocidad no es el mismo a lo largo de una sección, es decir que se diferencia las velocidades en las márgenes y en el centro del cauce, una ventaja del modelo Iber de gran utilidad para un análisis más eficiente de los resultados obtenidos.

GRÁFICO NO 6.8. VELOCIDADES MEDIAS AL FINAL DE LA SIMULACIÓN



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

GRÁFICO NO 6.9. VARIACIÓN VELOCIDADES MEDIAS EN LA SECCIÓN 1

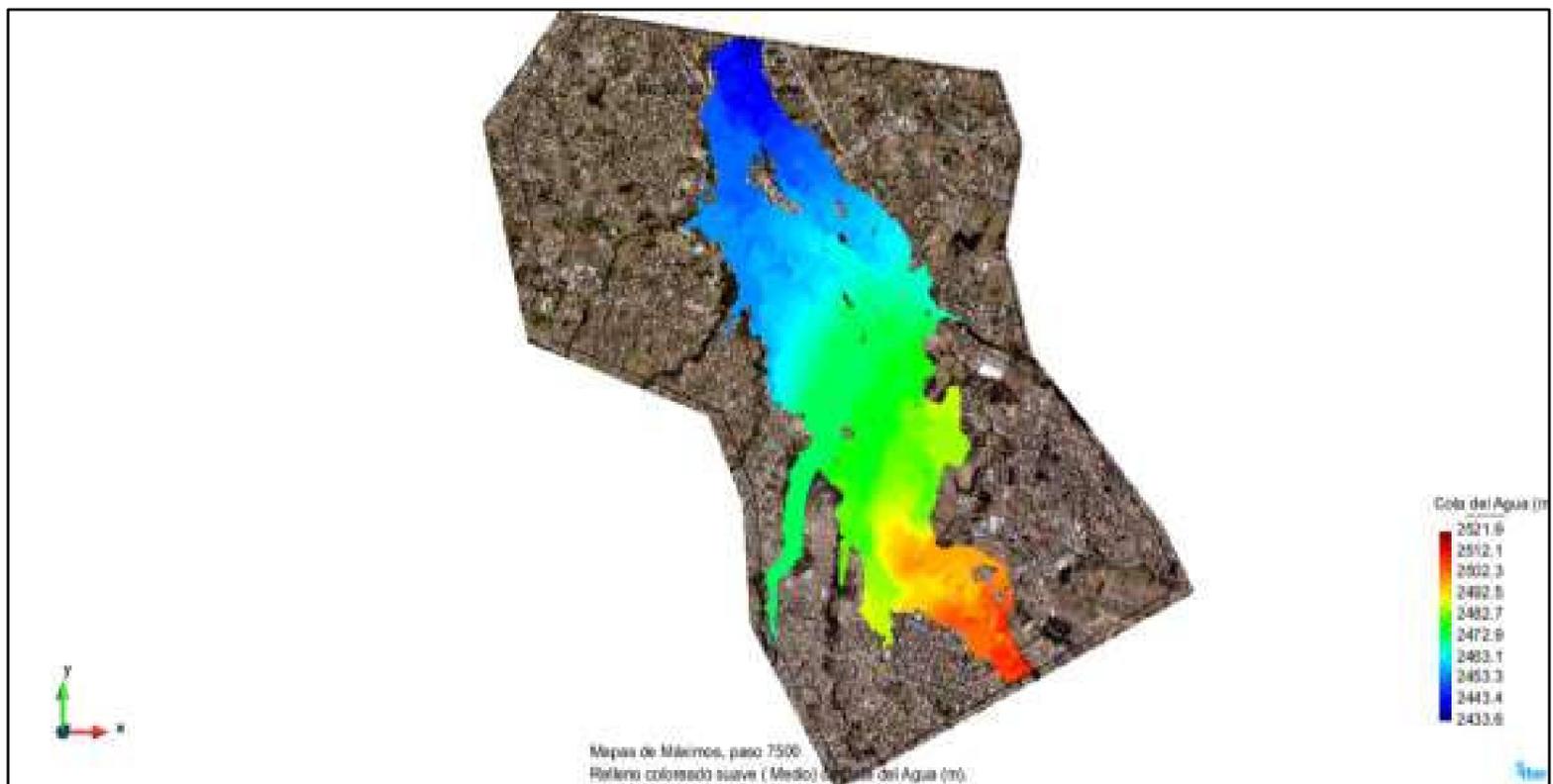


ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

6.3.1.3 Valores máximos

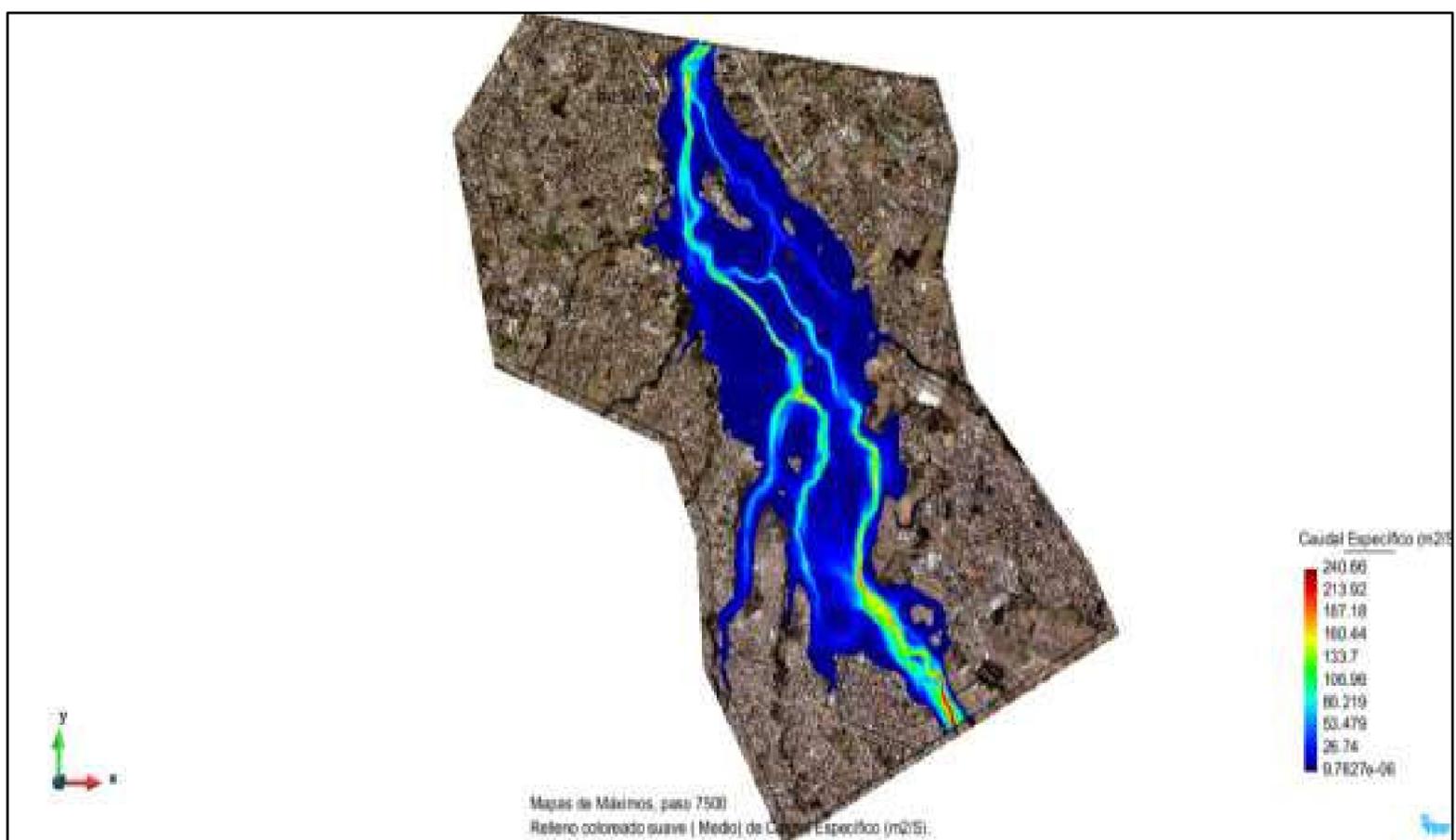
Con el objeto de evaluar las condiciones más críticas durante el tránsito del flujo en un tramo determinado Iber permite al usuario visualizar los valores máximos obtenidos durante la simulación dentro de un mismo mapa de variables como calados, caudales específicos, cotas de agua y velocidades. Esta herramienta permite posteriormente evaluar peligros o amenazas ocasionadas por el tránsito del flujo dentro de una zona determinada para posteriormente generar recomendaciones de mitigación o de ser posible prevención del efecto provocado por dichos peligros.

GRÁFICO NO 6.10. MAPA DE COTAS DE AGUA MÁXIMAS



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

GRÁFICO NO 6.11. MAPA DE CAUDALES ESPECÍFICOS MÁXIMOS

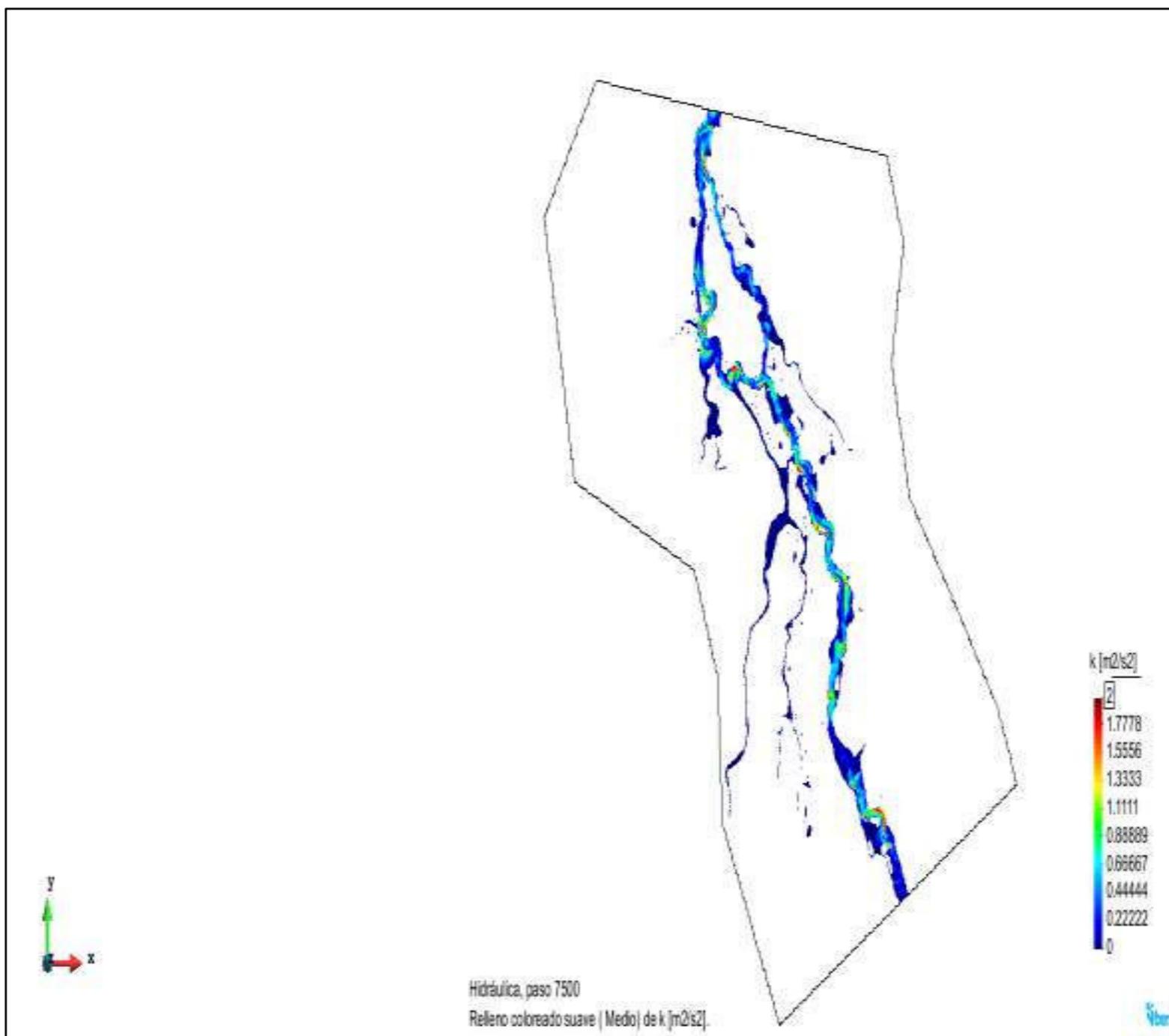


ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

6.3.1.4 Parámetros de turbulencia

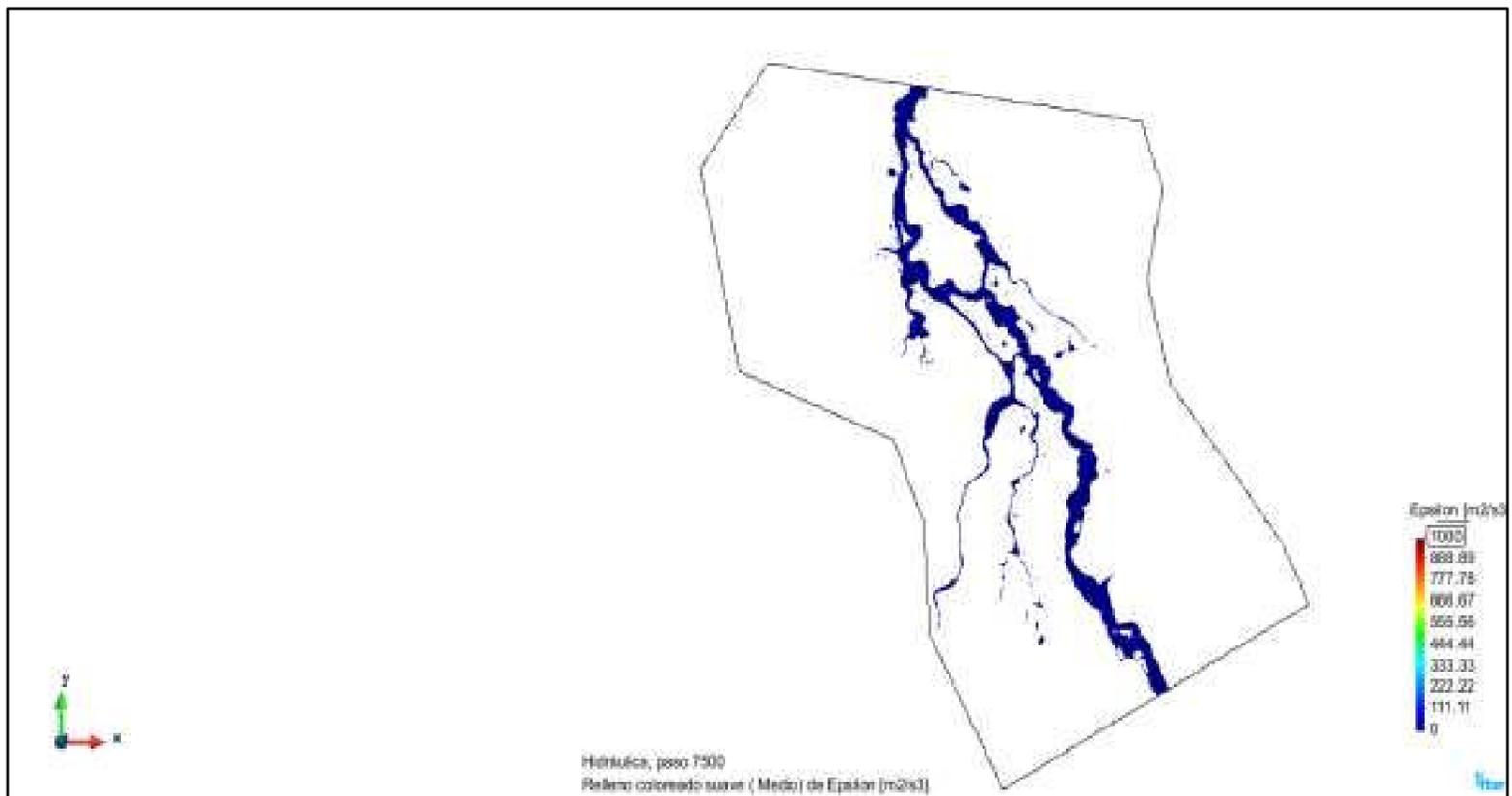
Finalmente una de las principales ventajas del modelo Iber es que este analiza la turbulencia del flujo, ya que este parámetro puede llegar a ser muy importante en algunos tránsitos del fluido, sobre todo con presencia de recirculación. Iber permite conocer valores como la Energía Cinética Turbulenta y la Disipación de Energía dentro del modelo k- ϵ . Y sobre todo la viscosidad turbulenta que como se ha mencionado anteriormente representa la incógnita a resolver al aplicar un modelo de turbulencia.

GRÁFICO NO 6.12. VALORES DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA EN EL FLUJO k AL FINAL DE LA SIMULACIÓN



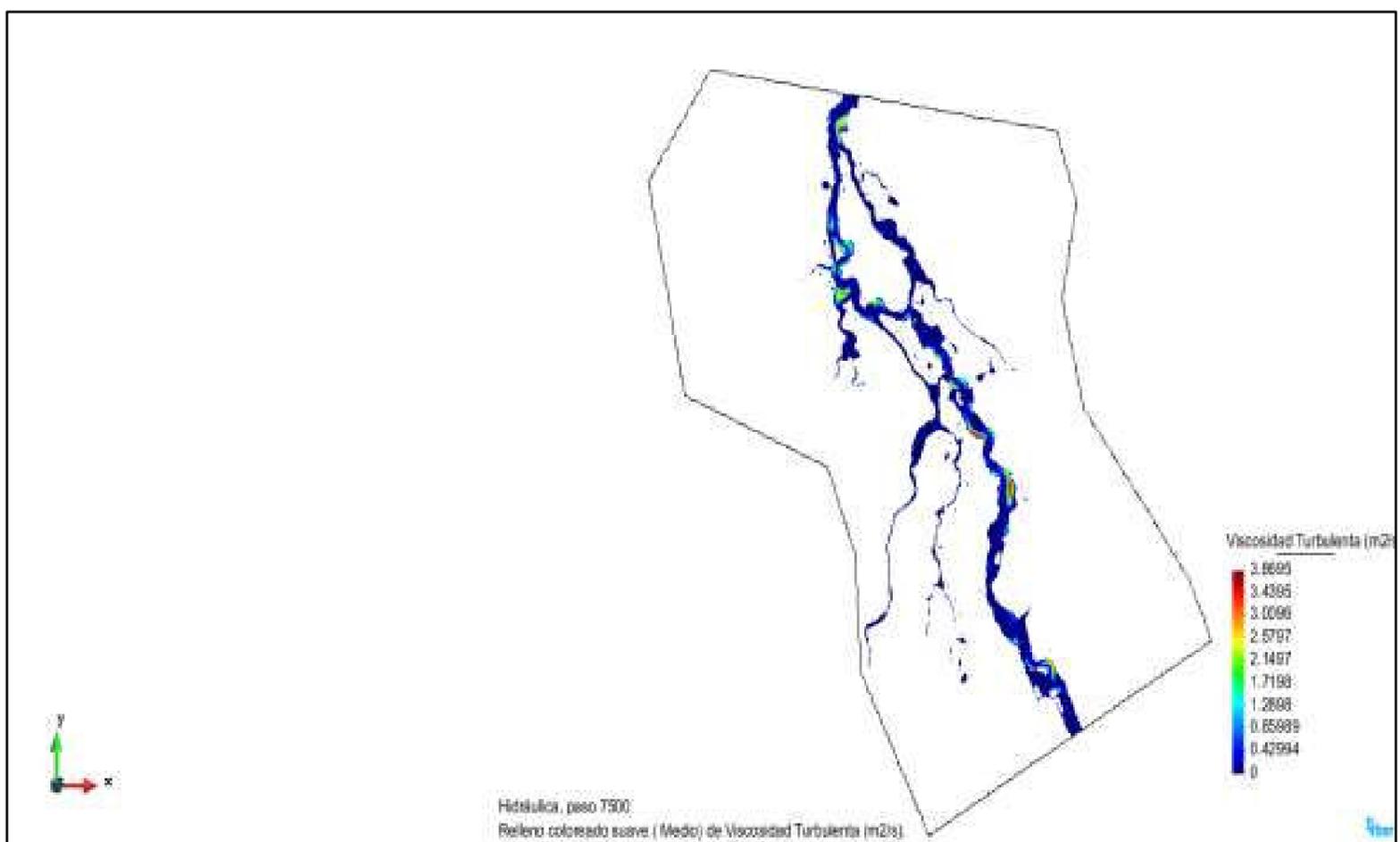
ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

GRÁFICO NO 6.13. VALORES DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA ϵ AL FINAL DE LA SIMULACIÓN



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

GRÁFICO NO 6.14. VALORES DE LA VISCOSIDAD TURBULENTO AL FINAL DE LA SIMULACIÓN



ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

7.1 CONCLUSIONES

7.1.1 SOBRE LA HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCAN COTOPAXI

- Aun cuando durante su etapa prehistórica el Volcán Cotopaxi presento erupciones de carácter riolítico, se esperaría que la próxima erupción conserve los patrones de vigentes durante la etapa histórica, es decir que en caso de una eventual erupción del volcán Cotopaxi esta podría ser del tipo andesítica destacándose fenómenos como la caída de cenizas, flujos piroclásticos y formación de lahares primarios en los drenajes próximos a los flancos del volcán.
- Se realizó la modelación numérica del flujo de lahares del volcán Cotopaxi considerando el escenario 3, puesto a que este escenario representa aquel con una mayor probabilidad de ocurrencia (60%), además de que es muy parecido al último evento registrado en 1877 del cual se tiene mayor disponibilidad de información.
- Se considera al evento de Junio de 1877 como el evento de calibración para la modelación numérica, por lo que se trabajó en función de los vestigios levantados en campo para dicho proceso eruptivo.

7.1.2 SOBRE LA METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

- Con la actualización de la información técnica disponible tales como mayor escala en las redes hidrográficas y viales , mayor precisión en el modelo digital de elevación DEM, además de avances de los propios modelos numéricos así como de los paquetes computacionales se esperarían resultados más cercanos a la realidad que aquellos obtenidos en el EEI 2004.

- Al realizar el análisis de los hidrogramas de entrada a un tramo en una modelación numérica, es importante tener en cuenta que el principal mecanismo para el transporte de los lahares es la escorrentía superficial, por tal motivo en el presente trabajo de titulación no se toma en cuenta el incremento de volumen por erosión del cauce y tampoco la disminución del mismo por depósito a lo largo del cauce.
- Se considera un hidrograma de forma triangular puesto que esta representa la forma del hidrograma característico para el escenario 3, adicionalmente es conocido que para fines de modelación se justifica el hecho de que el ramal ascendente sea más abrupto que el descendente, razón por la cual se considera que el caudal pico del hidrograma se encuentra dentro del primer tercio del tiempo de duración total.
- Se consideró conveniente realizar una modelación numérica desde el inicio del tránsito del lahar, por lo que se estimó los hidrogramas de entrada en los ríos Pita y Salto, en sus tramos iniciales, con el propósito de realizar una modelación unidimensional del tramo aguas arriba a la zona consolidada de Sangolquí. Dicha simulación unidimensional se realizó en una longitud aproximada de 42.71 km, longitud resultante de la suma de los drenajes de los ríos Salto, Pita 1, Pita 2 y Santa Clara.
- Debido a que la caracterización reológica de los lahares en el flanco norte del volcán Cotopaxi presentan las condiciones de un flujo de escombros granular llegando en algunos casos a ser hiperconcentrado, y que estos pueden ser modelados como fluidos dilatantes, mismos que presentan un comportamiento similar al de un fluido newtoniano (agua), es justificable el uso de modelos computacionales que originalmente fueron desarrollados para la modelación hidráulica (Iber y Hec Ras) como alternativas para la simulación numérica del flujo de lahares en el drenaje norte del volcán Cotopaxi.

7.1.3 SOBRE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL

- La simulación numérica unidimensional es recomendable para cauces con

pendientes elevadas y con secciones transversales tipo V (encañonados), puesto que al tener estas características es notable el predominio del sentido longitudinal con respecto a los sentidos transversal y de elevación, lo cual implica que el flujo tiende a moverse en un solo sentido es decir unidimensionalmente, por tal motivo basta representar el flujo con un modelo unidimensional para este tipo de cauces, ya que al usar modelos bidimensionales o peor aún tridimensionales, el costo computacional es altamente elevado, esfuerzo que no es justificable para este caso, ya que los modelos en una dimensión satisfacen las necesidades a un costo computacional y tiempo de simulación mucho menores que en los otros dos casos.

- Se realizó la modelación numérica unidimensional en los tramos aguas arriba al sector de Sangolquí, debido a que estos presentan condiciones ideales para este tipo de simulación y con el objeto de obtener el hidrograma de entrada para la modelación bidimensional específicamente en la sección de Sangolquí-Ejido.
- La modelación unidimensional sirvió como base para obtener parámetros de calibración del modelo bidimensional en especial el coeficiente de Manning, mismo que resulta ser el factor más sensible al momento de simular un flujo de lahares, de tal manera que se debió tener una atención diferenciada para dicho parámetro.
- El modelo Hec-Ras genera resultados erróneos en cauces con pendientes relativamente baja, lo cual confirma que en zonas con flujo lateral y con zonas de inundación, los modelos unidimensionales no son recomendables debido a que no consideran la bidimensionalidad del flujo en cauces que presentan las características anteriormente mencionadas.
- La calibración del modelo numérico se realiza con flujo permanente, lo cual implica que se tiene un caudal constante dentro de un tramo determinado y puesto que la topografía también es constante, el parámetro que controla la calibración del modelo es el coeficiente de Manning valor que debe ser ajustado dentro de los rangos recomendados, de tal manera que la simulación se ajuste a los valores observados en campo.

- La presencia de cambios bruscos en el perfil longitudinal del cauce, como son cascadas, altos desniveles o accidentes topográficos, generan resultados erróneos dentro de la modelación unidimensional, dificultando la calibración del modelo numérico, por tal motivo, se dividió a los ríos en los sitios donde se identificó estas características topográficas, excluyendo de las simulaciones estas irregularidades.
- Se realizó la simulación numérica con flujo no permanente en base a los hidrogramas obtenidos con el volumen del glaciar del 2011 y con la base del modelo calibrado con el flujo permanente.
- La modelación numérica con flujo no permanente de Hec Ras genera una serie de inestabilidades, mismas que fueron solucionadas con las recomendaciones de la tesis de Hammad Khaled, las cuales demostraron tener excelentes resultados, adicionalmente se comprobó que con fines de estabilidad de resultados es conveniente utilizar intervalos de tiempo de simulación pequeños puesto que la calidad de los resultados obtenidos será mejor, esta resulta ser una gran ventaja de las versiones 5 del Hec Ras, ya que en la mismas se tiene tiempos de simulación con intervalos de hasta 0.1s mejorando notablemente lo disponible en las versiones anteriores, en las cuales el valor mínimo es de 1s.

7.1.4 SOBRE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL

- Debido a que los flujos de lahares en el flanco norte del volcán Cotopaxi son hiperconcentrados y granulares los cuales pueden ser representados como un fluido dilatante, que a la vez presentan características similares a los fluidos newtonianos, se concluye este tipo de flujos puede ser modelado con la ecuación empírica de Manning para flujo turbulento del agua. Dicha ecuación es la utilizada por el modelo hidrodinámico Iber lo cual significa que en un principio Iber puede ser utilizado para modelar flujo de lahares.
- Las ecuaciones planteadas en el presente trabajo de titulación no consideran fenómenos de arrastre o depósito de sedimentos, de tal manera que la cantidad del material generado aguas arriba se mantiene en todo el tramo modelado.

- Se generó mallas de cálculo no estructuradas debido a que las mismas se ajustan de mejor manera a geometrías irregulares como aquellas presentes en el análisis.
- Se planteó una corrida de calibración con malla de 9m x 9m, con el objeto de validar el coeficiente n de Manning estimado en la modelación unidimensional obteniéndose resultados satisfactorios con relación a las observaciones de campo, por lo cual se procedió a las corridas definitivas del modelo numérico.
- El coeficiente de Manning estimado en la modelación numérica del presente trabajo (0,015), ratifica lo reportado por Macedonio y Parechi 1992, quienes indican que dicho valor debe fluctuar entre 0.015 y 0.06 en cauces con pendientes bajas, caso de la zona Consolidada de Sangolquí. De lo anterior se puede decir que las estimaciones del coeficiente de rugosidad n de Manning están dentro de los valores esperados, puesto que los mismos se encuentran dentro de los valores recomendados por la bibliografía existente confirmando la validez de las simulaciones numéricas realizadas en el presente proyecto de titulación.
- Se planteó realizar tres corridas del modelo utilizando los hidrogramas generados en la modelación unidimensional con volúmenes de glaciar del año 2011, Dichas corridas se efectuaron con el propósito de evaluar la variación en resultados y de costo computacional entre distintas mallas y la aplicación o no de modelos de turbulencia.
- Se utilizó el modelo de turbulencia K- ϵ , debido a que este es, el de mayor sofisticación entre los modelos planteados en Iber, adicionalmente se tiene experiencias en los cuales ha tenido resultados exitosos para condiciones de flujo similares a las del presente proyecto de titulación.
- Es importante considerar los parámetros del computador a ser utilizado dentro de la simulación numérica, entre los cuales se puede mencionar la memoria RAM, Tarjeta Gráfica y Número de procesadores, puesto que del correcto uso de los mismos se puede obtener una mayor eficiencia en la obtención de resultados en lo que a tiempo de simulación y versatilidad en

el manejo del programa respecta.

- El modo a prueba de fallos de Iber es una herramienta muy útil para computadores que cuentan con tarjetas gráficas que no son compatibles con el programa, debido a que en estos casos es la única forma de trabajar con el modelo Iber.
- Se comprobó que los resultados obtenidos en las tres corridas son muy similares llegando en muchos casos a ser prácticamente los mismos. Sin embargo, la diferencia de los tiempos de simulación y el costo computacional entre las tres corridas es muy notable, ya que en promedio se notó que el tiempo de simulación aumenta exponencialmente al tener una malla más fina y sobre todo se tienen valores relativamente elevados al incluir el modelo de turbulencia en el cálculo.
- Se comprobó la influencia del tamaño del glaciar en el área de afectación del flujo de lahares producidos por la fundición del mismo, puesto que se evidenció que la afectación generada por un lahar producido con el volumen de glaciar de 1976 es mucho mayor que aquella producida con el volumen estimado para el año 2011, por lo cual se podría decir que a pesar de que se estima un evento similar a aquel ocurrido en 1877, debido a la notable reducción del casquete glaciar la afectación de los lahares eventuales sería menor que aquella registrada en el evento de hace más de 100 años, lo anterior desde el punto de vista de amenaza más no de vulnerabilidad y riesgo.
- Se evidenció mucha similitud entre la simulación numérica realizada en el presente trabajo y el mapa de amenazas de las fuentes oficiales, sin embargo, es necesario tener en cuenta que un mapa de amenazas considera criterios de riesgo para su elaboración, mientras que la modelación numérica es eminentemente un tema hidráulico, razón por la cual, esta última es una herramienta para la evaluación de la amenaza, lo cual representa el objetivo final de un trabajo de este tipo.
- Se evaluó las características del modelo Iber en cuanto a la modelación numérica, evidenciándose las ventajas que este presenta con relación a modelos unidimensionales, debido a su versatilidad de uso, la generación de

resultados en ambas direcciones del plano horizontal, la distinción de los valores obtenidos en las márgenes de una sección y la evolución de parámetros hidráulicos de gran importancia en el flujo como velocidades, energía, cotas de agua, calados, números de Froud y parámetros de turbulencia.

- Aun cuando el modelo hidrodinámico Iber fue desarrollado para la simulación de agua, en el presente proyecto de titulación se ha podido observar que Iber reporta resultados aceptables para la simulación del flujo de lahares en tramos con zonas de evidente flujo lateral o llanuras de inundación. Dichos resultados además resultan ser muy semejantes a mapas de amenaza de fuentes oficiales. Por tal motivo se puede decir que, Iber constituye una herramienta que puede ser considerada dentro la simulación del tránsito de lahares en tramos de baja pendiente, y con la presencia de llanuras de inundación similares a la zona consolidada de Sangolquí.
- Es importante aclarar que a pesar de que los modelos numéricos representan una gran ventaja desde el punto tecnológico, la experiencia y criterios del profesional que realiza el modelo es fundamental, puesto que como se ha visto, existe una serie de incertidumbres debido a la falta de información relacionada al flujo de lahares, dichas incertidumbres representan a la vez una serie de asunciones las cuales deben tener cierto fundamento que únicamente un profesional calificado puede garantizar el éxito de las mismas.
- Se debe tener en cuenta que los valores y resultados obtenidos son referenciales, puesto que debido a la gran incertidumbre que representa el comportamiento de los volcanes es imposible predecir la forma y magnitud de un fenómeno como el flujo de lahares. Sin embargo se puede decir que las consideraciones realizadas garantizan en un alto porcentaje la fiabilidad de los resultados reportados.

7.2 RECOMENDACIONES

- En tramos en los cuales se tenga pendientes de fondo relativamente elevadas, secciones transversales eminentemente encañonadas y en los

cuales se evidencia el predominio de la dirección longitudinal, se recomienda realizar modelaciones unidimensionales del flujo en dichos tramos, puesto que estos representan de una manera satisfactoria el fenómeno y con un bajo costo computacional.

- Para fines de calibración es recomendable utilizar un plan de corridas con flujo permanente puesto que permite una mejor estabilidad del modelo numérico además de que permite tener una mayor versatilidad en el proceso.
- Al usar modelos unidimensionales en cauces en los cuales se evidencien irregularidades considerables tanto en planta como en perfil del cauce, se recomienda dividir el río en subtramos que cuenten con características similares, de tal manera que permitan tener mejores resultados en la modelación numérica.
- Si existe la presencia de cascadas dentro del río resulta conveniente dividir a este en tramos, terminando un tramo antes de la cascada y dando inicio del tramo siguiente después de la cascada, puesto que la presencia de las mismas genera problemas en la modelación numérica unidimensional del flujo.
- Al intersecar las secciones transversales y el cauce del río usando la extensión Hec Geo Ras, es preferible hacerlo directamente con el DEM original, más no con DEMs cortados o TINs, puesto que en la generación de estos últimos existe pérdida de información representativa para la modelación numérica.
- Se recomienda usar la versión 5 de Hec-Ras para la modelación numérica unidimensional, ya que esta presenta mayores bondades y una mejor discretización de parámetros tales como el intervalo de cálculo, lo cual resulta de gran beneficio para la estabilidad de los resultados obtenidos.
- Los modelos bidimensionales son recomendables en aquellas zonas en las cuales se evidencie un flujo lateral o con zonas de inundación, puesto que en estos casos las aproximaciones realizadas por los modelos unidimensionales no resultan suficientes para representar adecuadamente el fenómeno, lo cual si es logrado por modelos bidimensionales.
- Se recomienda usar modelos que utilicen las ecuaciones de Manning para

simulación de lahares siempre y cuando las características rehológicas encontradas sean de un fluido dilatante, puesto que se ha comprobado que estos pueden ser modelados como fluidos newtonianos o como agua.

- Cuando se evidencie una notable influencia de la turbulencia en el flujo, es recomendable usar el modelo de turbulencia k- ϵ , mismo que además de ser uno de los más estudiados y sofisticados ha demostrado tener excelentes resultados en la modelación numérica del flujo de lahares.
- Se recomienda generar una malla no estructurada para la simulación del flujo en ríos puesto que a diferencia de la malla estructurada, esta se ajusta de una mejor manera a geometrías irregulares como las que se encuentran en un flujo natural.
- Al usar el modelo Iber, es recomendable tener un computador cuyas características sean lo más avanzadas posibles, debido al alto costo computacional que este representa.
- En caso de que el computador utilizado en la simulación numérica presente incompatibilidades con el modelo Iber, se recomienda utilizar el modo a prueba de fallos, mismo que permitirá modelar el flujo, pero con un mayor costo computacional.
- Se recomienda usar los hidrogramas generados en el presente trabajo para la modelación numérica en tramos aguas abajo del tramo modelado, puesto que se garantiza la fiabilidad de los mismos.
- Con el objetivo de tener una mayor eficiencia en el proceso de cálculo de Iber, se recomienda usar el número máximo de procesadores disponibles en el computador, puesto que esto permitirá mejorar los tiempos de ejecución del modelo.
- En casos similares a los del presente trabajo y en los cuales se cuenten con modelos digitales de elevación de una resolución de 3m. Se recomienda realizar las simulaciones con malla de 9m*9m y sin modelo de turbulencia ya que con estas características se tienen resultados satisfactorios y con un costo computacional relativamente bajo.
- Se recomienda el modelo hidrodinámico Iber para la simulación del flujo de lahares en tramos con aparente flujo bidimensional, ya que como se ha visto

en el presente trabajo este modelo resulta ser muy ventajoso, para este tipo de simulaciones numéricas, adicionalmente de que sus resultados se asemejan en gran porcentaje a aquellos considerados como oficiales.

- Con los resultados obtenidos en la modelación bidimensional con el programa Iber se ha podido evidenciar zonas de aparente flujo del lahar, las cuales no fueron consideradas en la realización del mapa de amenazas del volcán Cotopaxi, por lo que se recomienda realizar una extensión del trabajo de campo especialmente en el tramo final del río San Pedro antes de la junta con el río Santa Clara en el sector del puente Agustín Miranda con el propósito de corroborar la existencia o no del flujo del lahares del volcán Cotopaxi dentro de la zona en mención.
- Se recomienda continuar con la investigación alrededor del tema con el fin de llenar ciertos vacíos existentes en el ámbito, puesto que al ser un tema de interés público debería generarse más información con la finalidad de tener el menor número de incertidumbres posible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, E., M.T. Pareschi, M. Rosi, Zancheta G., (2004), Risk from Lahars in the Northern Valleys of Cotopaxi Volcano (Ecuador), vol. 33, Natural Hazards, p. 161-189.
- Andrade D., Hall M., Mothes P., Troncoso L., Eissen J., Samaniego P., Egred J., Ramón P., Rivero D., Yepes Hugo, (2005), Los Peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi, Quito-Ecuador, Corporación Editora Nacional.
- Bladé E., Cea L., Corestein G., Escolano E., Puertas J., Vázquez-Cendón M.E., Dolz J., A. Coll., (2014), Iber: Herramienta de Simulación Numérica del flujo en ríos, Revista Internacional de métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 30(1) p. 1-10.
- Cáceres, B., (2008), Evaluación geométrica del casquete glaciar del volcán Cotopaxi usando fotogrametría digital, Revista técnica Sigma, Colegio de Ingeniero civiles de Pichincha (CICP). Quito-Ecuador
- Cáceres, B., Jordan, E., Ungerechts, L., Francou, B., A. Peñafiel, (2005), Evaluación Geométrica del Casquete Glaciar del Volcán Cotopaxi usando Fotogrametría Digital. Memorias del VI Congreso Latinoamericano de Geología. Quito- Ecuador.
- Cáceres, B., Ramírez J., B. Francou, J-P. Eissen, J-D. Taupin, E. Jordan, L. Ungerechts, L. Maisincho, D. Barba, E. Cadier, R. Bucher, A. Peñafiel, P. Samaniego, Mothes Patricia, (2004), Determinación del volumen del casquete de hielo del volcán Cotopaxi, Quito- Ecuador, Inamhi-IRD-IG/EPN-IN-Geominas- IGM-HHUD, p. 54.
- Coussot, P., Laigle, D., Arattano, M., Deganutti, A.; Marchi, L. (1998). Direct determination of rheological characteristics of debris flow. Journal of Hydraulic Engineering, 124, 865-868.
- Francou, B., Vuille, M., Favier, V., Bolivar Cáceres (2004), New evidences of ENSO an impacts on glaciers at low latitude: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'. Journal of Geophysical Research, 109, doi: 10.1 029/2003JD004484.

- Gaibor M., (2012), Estudio del Flujo Generado por la ruptura de un dique a causa de Infiltraciones, Quito-Ecuador.
- Galárraga R.,(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- Modelación Matemática Unidimensional, Quito-Ecuador.
- Galárraga R., (2005), Estudio de la Amenaza, Evaluación de la Vulnerabilidad, Evaluación del Riesgo, Quito-Ecuador.
-
- Hall, M., Mothes P. (2007). The rhyolitic–andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador. Bulletin of Volcanology, 1-28.
- Hall, M., Mothes P., Hidalgo S., (2005), Mapa geológico del volcán Cotopaxi/Geologic Map of Cotopaxi Volcano, esc. 1:50 000, IGM-IG/EPN, edits., Quito- Ecuador.
- Hall, M., Mothes, P., Samaniego, P., Yepes, H., Daniel Andrade, (2004), Mapa Regional de Peligros Volcánicos Potenciales del Volcán Cotopaxi – Zona Norte, escala (1:50000), Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Quito- Ecuador.
- IG-EPN, ESPE, (2015), Informe del Ajuste y Generación de los nuevos Polígonos relacionados a los lahares del Volcán Cotopaxi-Zona Norte y Sur, Quito-Ecuador.
- INEGI, (2016), Modelos Digitales de Elevación (MDE)- Descripción, <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmd e.aspx>.
- IPCC, (2007), Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra- Suiza, 104 págs.
- Jordan E., (1983), Die Vergletscherung Des cotopaxi-ecuador. Zeitschrift Für Gletscherkunde und Glazialgeologie 9 (1), Universitätsverlag Wagner, Innsbruck, 73-102.

- Jordan, E., Ungerechts, L., Cáceres B., Francou B., Peñafiel A. B. Francou, (2005), Estimation by Photogrammetry of the glacier recession on the Cotopaxi Volcano (Ecuador) between 1956 and 1997. Hydrological Sciences Journal, 50 (6) December 2005, p. 949-961.
- Lima P., (2007), Simulación del Flujo Lahártico No Permanente en el Flanco Sur del Volcán Cotopaxi, Quito-Ecuador.
- Lorenzini G., N. Mazza., (2004), Debris Flow. Phenomenology and Pheological Modelling. WITPress.
- Macedinio C., M. T. Parechi, (1992), Numerical simulation of some lahars from Mount St. Helens. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 54 (1992) 65-80. Elsevier Science Publishers B. V.
- Mohamed K., (2008), Aplicaciones del Modelo Hec-Ras para el Análisis del Flujo No Permanente con superficie Libre, Quito-Ecuador.
- Mothes, P., (1991), Lahars of Cotopaxi Volcano, Ecuador: Hazard and risk evaluation, G.J.H. McCall, D.J.C. Laming, y S.C. Scott, edits, Geohazards: Natural and manmade, London, Chapman & Hall, p. 53-64.
- Mothes P.,(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- Flujos de lodos Asociados con las erupciones del volcán Cotopaxi, Quito-Ecuador.
- Mothes, P., Hall M., y R.J. Janda, (1998), The enormous Chillos valley lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi volcano, Ecuador, *Bulletin of Volcanology*, No. 59, p. 233-244.
- Mothes P., Hall M., Vásconez F., Sierra D., Córdova M., Santamaría S., Andrade D., José Marrero, (2016), Reedición y Actualización del mapa de Amenazas del volcán Cotopaxi Zona Norte, Rumiñahui-Ecuador.
- Ordoñez J., Samaniego P, Mothes P., Steve Schilling, (2013), Las Potenciales zonas de Inundación por Lahares en el Volcán Cotopaxi, Quito-Ecuador.
- Palavecino A, (2015), Modelación Bidimensional del Flujo Generado por la Rotura de una presa de tierra, Utilizando el Programa IBER, Quito-Ecuador.

- Parechi, M. T., (1996), Physical Modeling of Eruptive Phenomena: Lahars. Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards, Scarpa/Tilling (Eds). Springer-Verlag.
- Robalino E, (2006), Caracterización reológica del flujo lahárico en el flanco norte del volcán Cotopaxi, Quito-Ecuador.
- Samaniego P.,(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 –Escenarios Eruptivos del Volcán Cotopaxi, Quito-Ecuador.
- Samaniego P., Ordóñez J., Schilling S. y Patricia Mothes. (2011). Los posibles escenarios eruptivos del Cotopaxi y la delimitación de zonas inundadas por lahares: Aplicación de LAHARZ en el drenaje Sur, Informe Inédito BID, Ecuador., p. 34
- Sodiro, L., (1877), Relación sobre la erupción del Cotopaxi acaecida el día 26 de junio de 1877, Quito-Ecuador, Imprenta Nacional, p. 50.
- Suárez J., (2001), Control de Erosión en zonas Tropicales, Colombia, Ediciones Universidad Industrial de Santander.
- Takahashi T. (1991). Debris flow, International Association for Hydraulic Research. AA. Balkema. Rotterdam p165.
- Vasques J., (2003), Modelación Numérica en Hidráulica, Piura- Perú.
- Wolf, T., (1878), Memoria sobre el Cotopaxi y su última erupción acaecida el 26 de junio de 1877, Guayaquil- Ecuador, Imprenta del Comercio, p. 64.

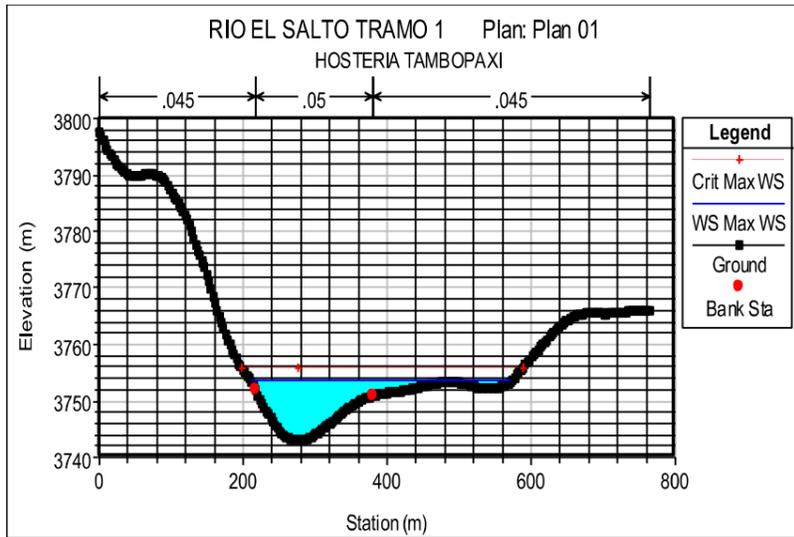
ANEXOS

ANEXO No 1

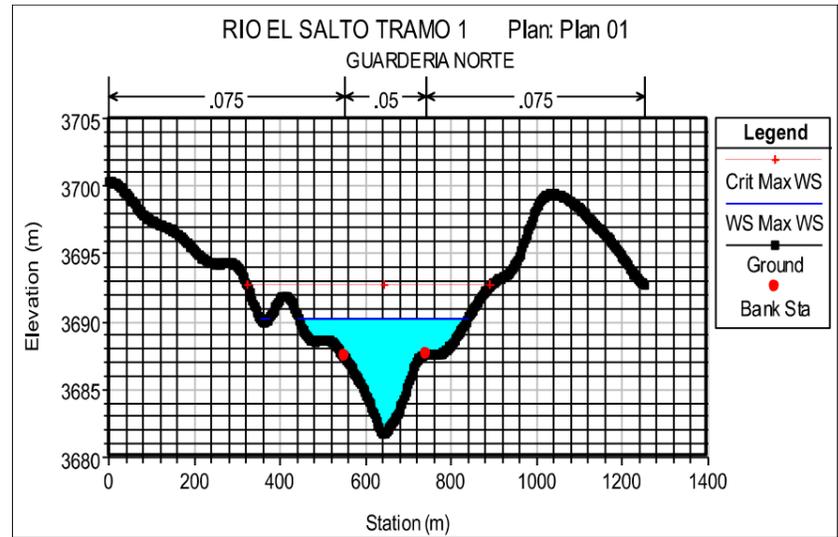
**SECCIONES TRANSVERSALES CARACTERÍSTICAS DE
LOS TRAMOS ANALIZADOS EN LA MODELACIÓN
UNIDIMENSIONAL**

A1.1 SECCIONES DE CALIBRACIÓN RÍO EL SALTO

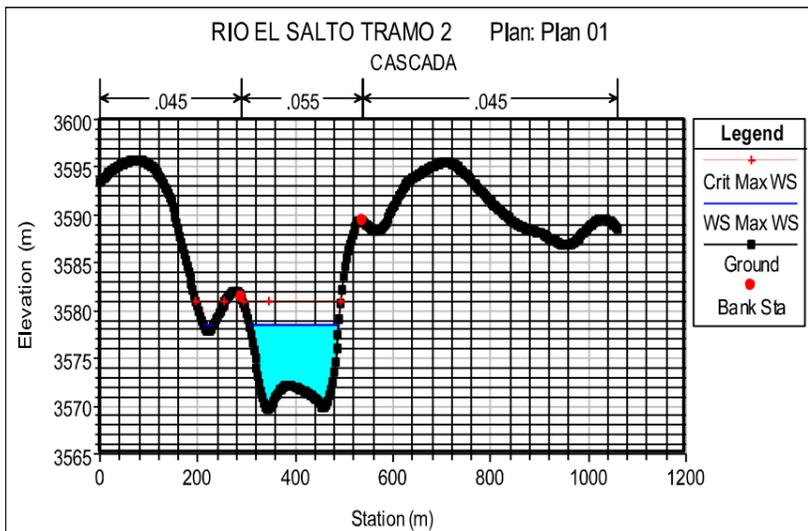
**78 GRÁFICO NO A1.1: SECCIÓN
HOSTERIA TAMBOPAXI**



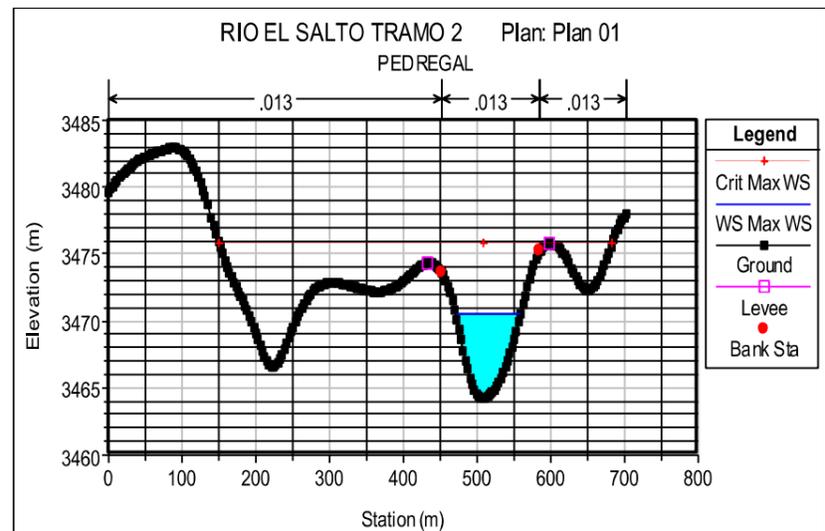
**GRÁFICO NO A1.2: SECCIÓN
GUARDERIA N.**



**GRÁFICO NO A1.3: SECCIÓN
CASCADA**



80 NO A1.4: SECCIÓN PEDREGAL



**GRÁFICO NO A1.5: SECCIÓN
SIFON PITA**

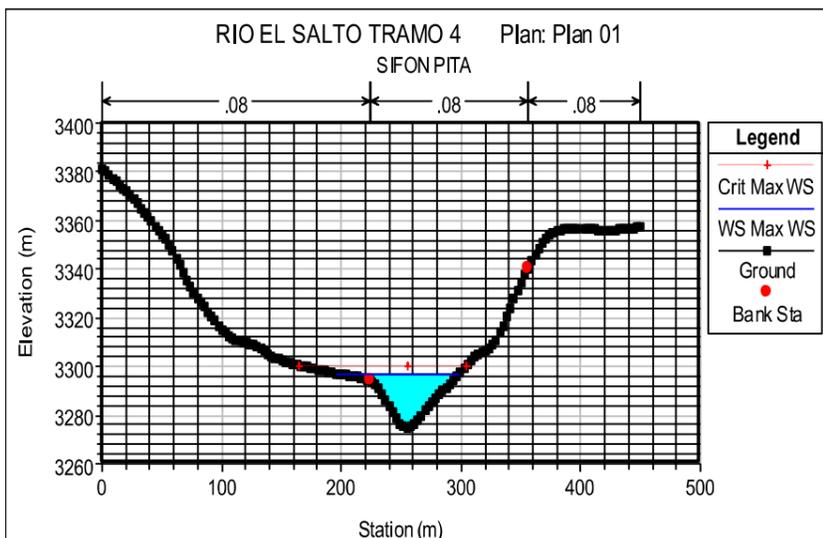
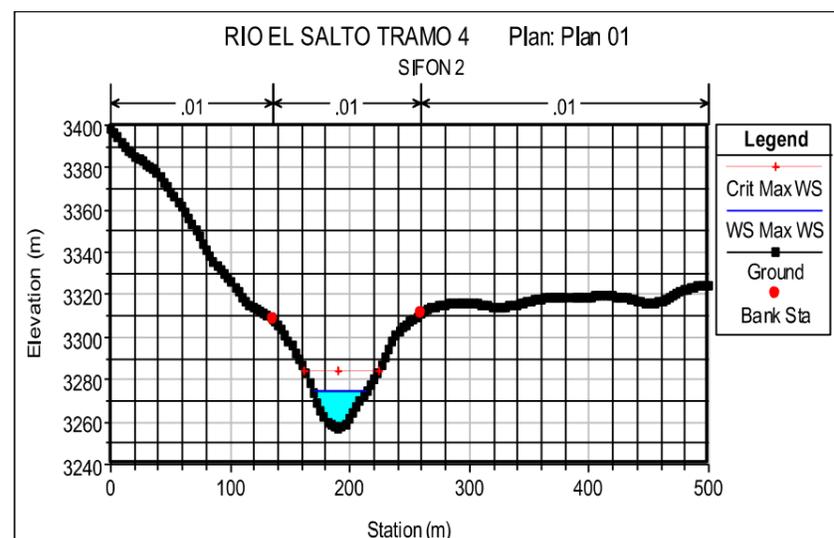


GRÁFICO NO A1.6: SECCIÓN SIFON 2



A1.2 SECCIONES DE CALIBRACIÓN RÍO EL PITA 1

GRÁFICO NO A1.7: SECCIÓN

HDA. SAN RAFAEL

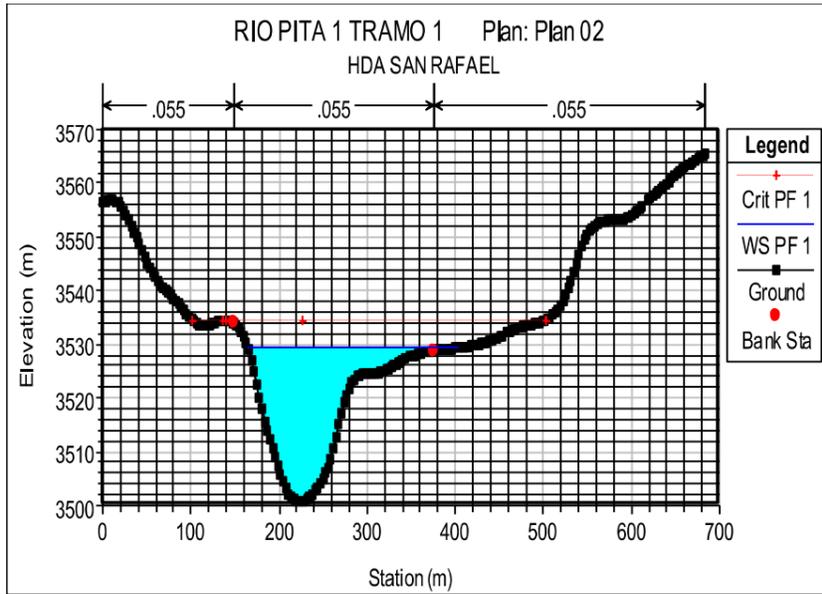


GRÁFICO NO A1.8 SECCIÓN

PITA CAÑON

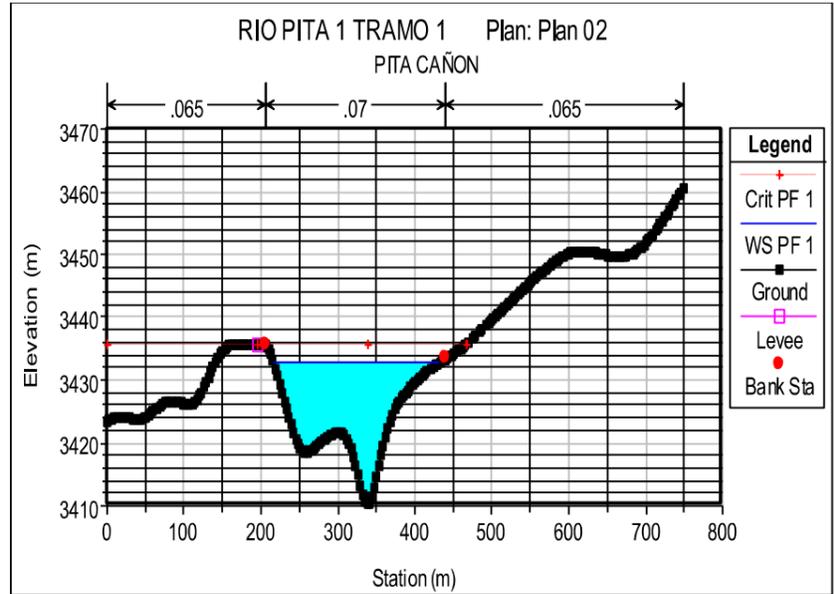
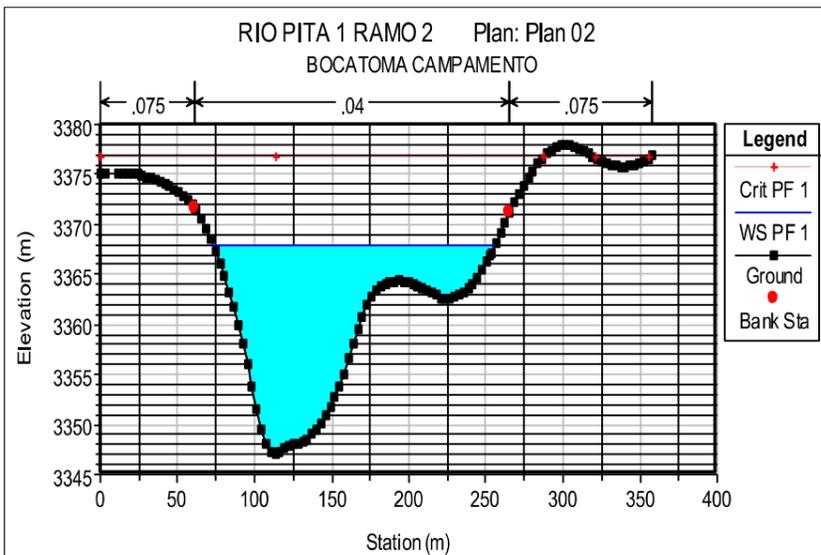


GRÁFICO NO A1.9: SECCIÓN

BOCATOMA CAMPAMENTO.



85 GRÁFICO NO A1.10:

SECCIÓN BOCATOMA EMAP

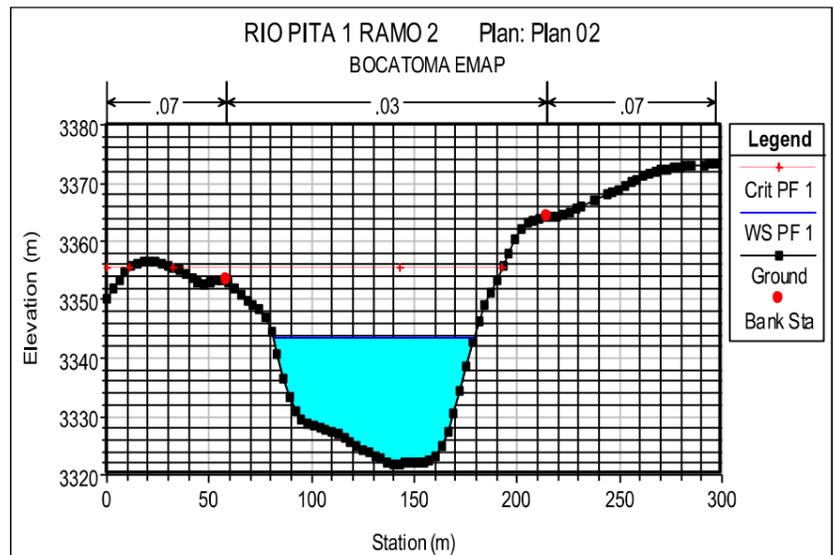
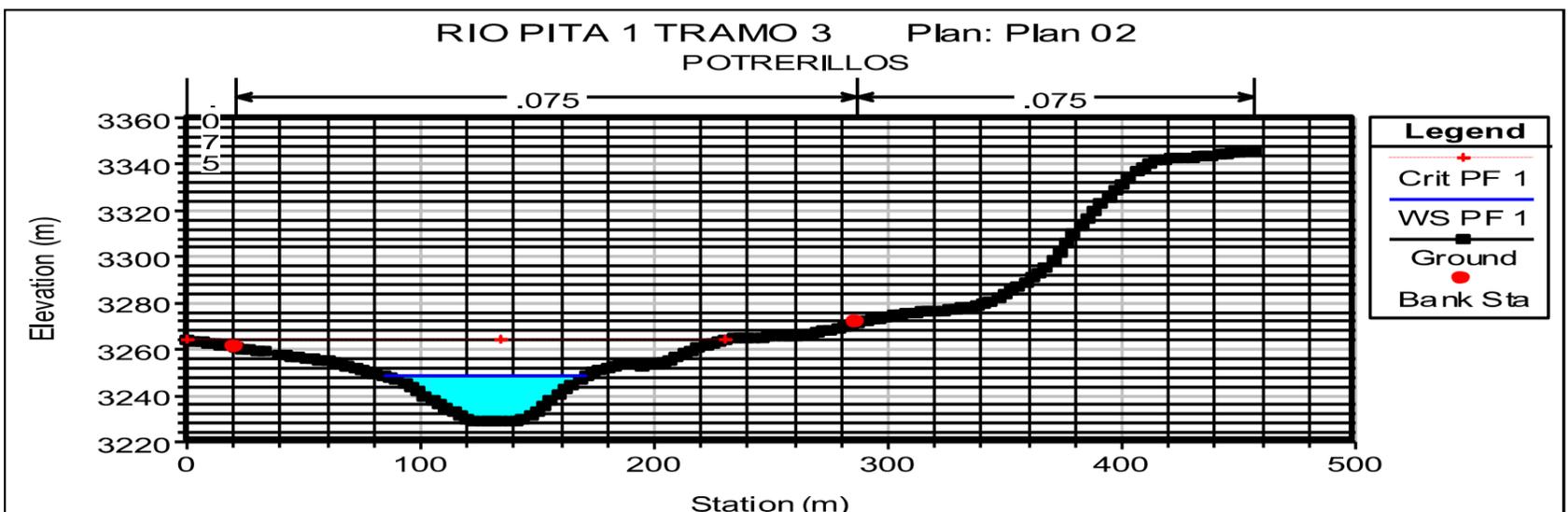
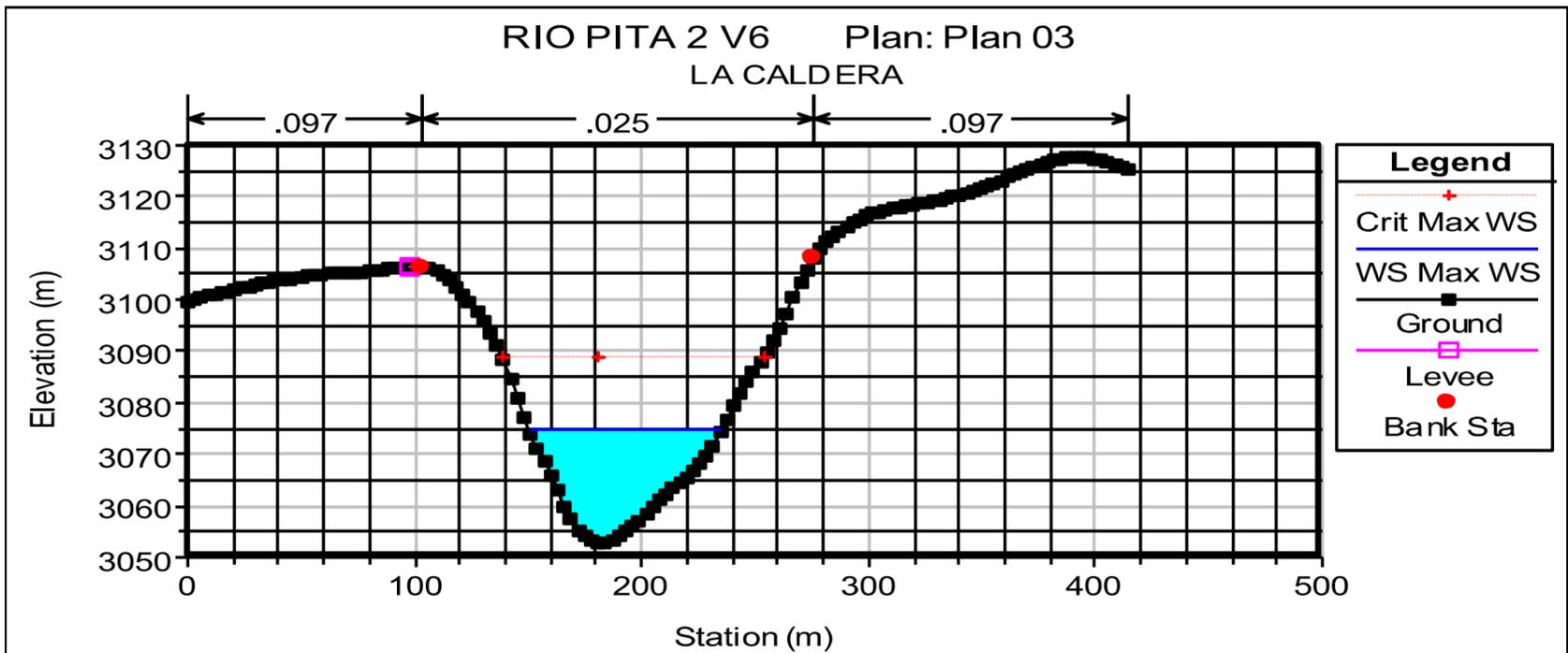


GRÁFICO NO A1.11: SECCIÓN POTRERILLOS



A1.3 SECCIONES DE CALIBRACIÓN RÍO PITA 2

GRÁFICO NO A1.12: SECCIÓN LA CALDERA EL PITA



A1.4 SECCIONES DE CALIBRACIÓN RÍO SANTA CLARA

GRÁFICO NO A1.13: SECCIÓN LA CALDERA SC

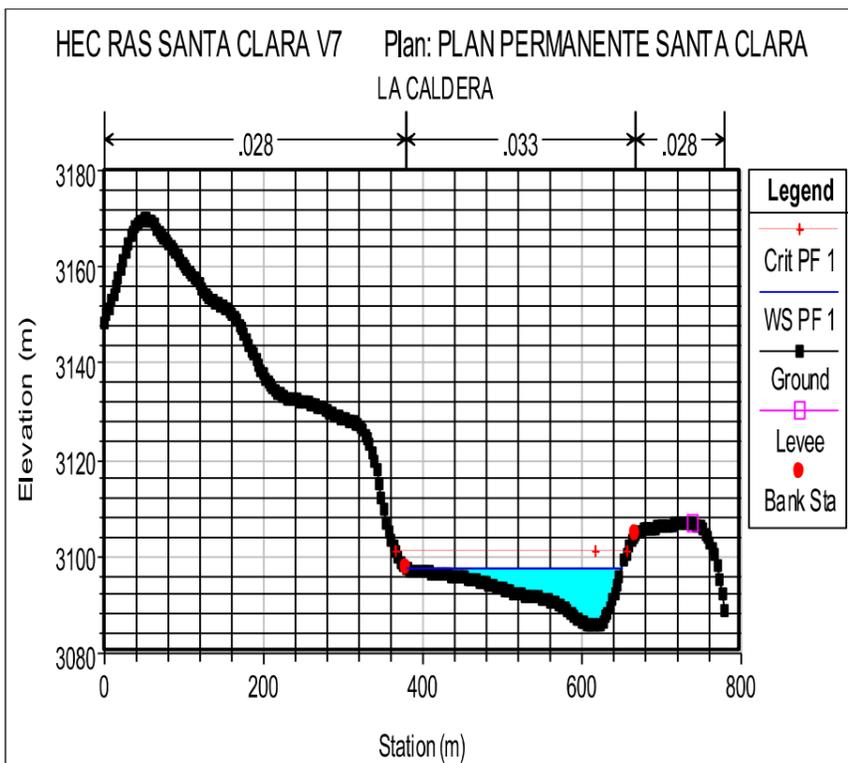
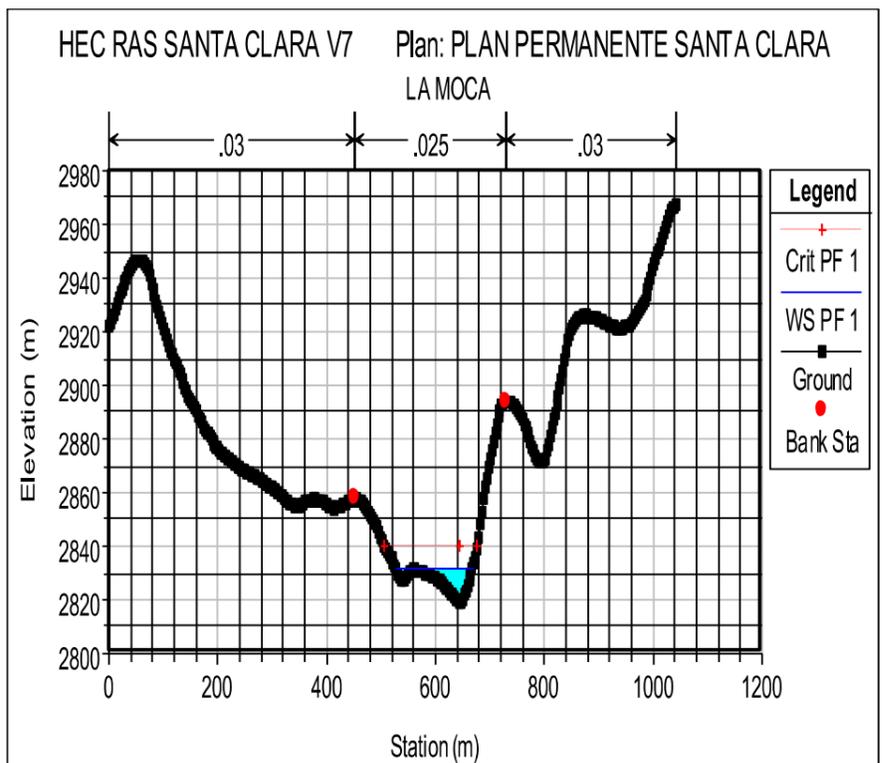
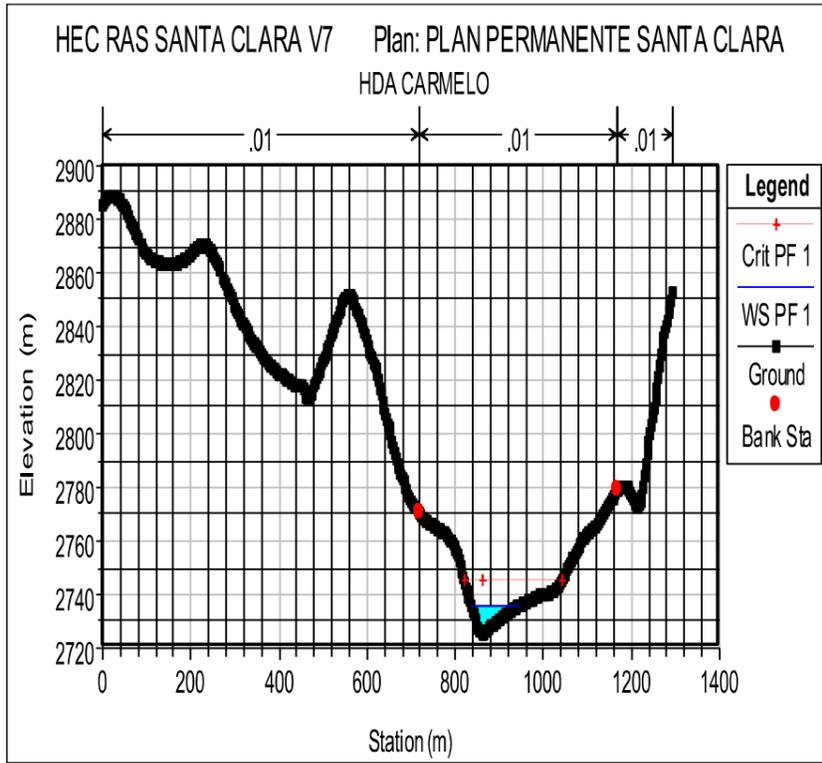


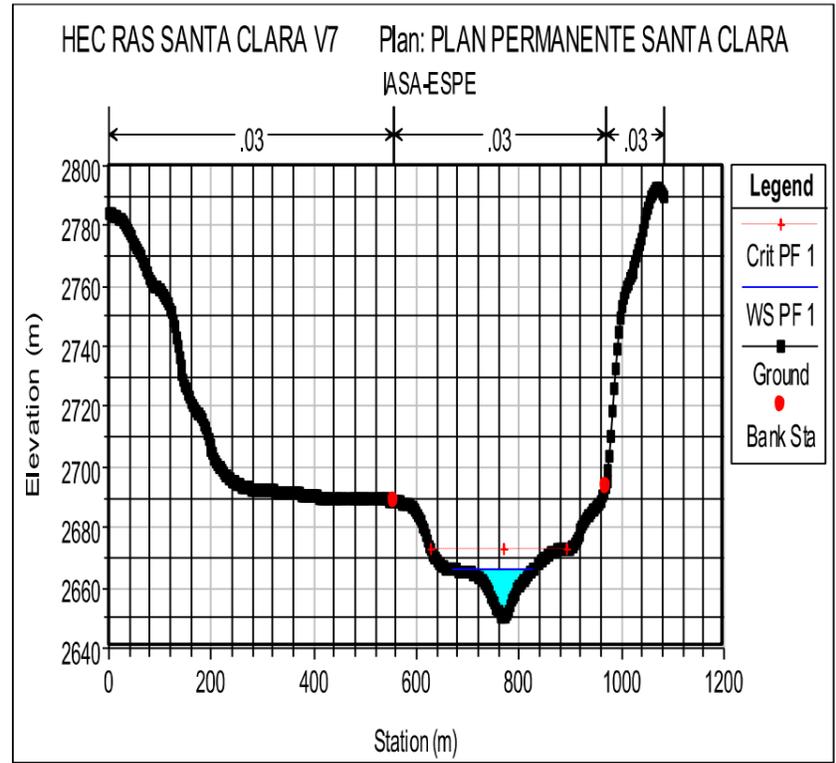
GRÁFICO NO A1.14: SECCIÓN LA MOCA



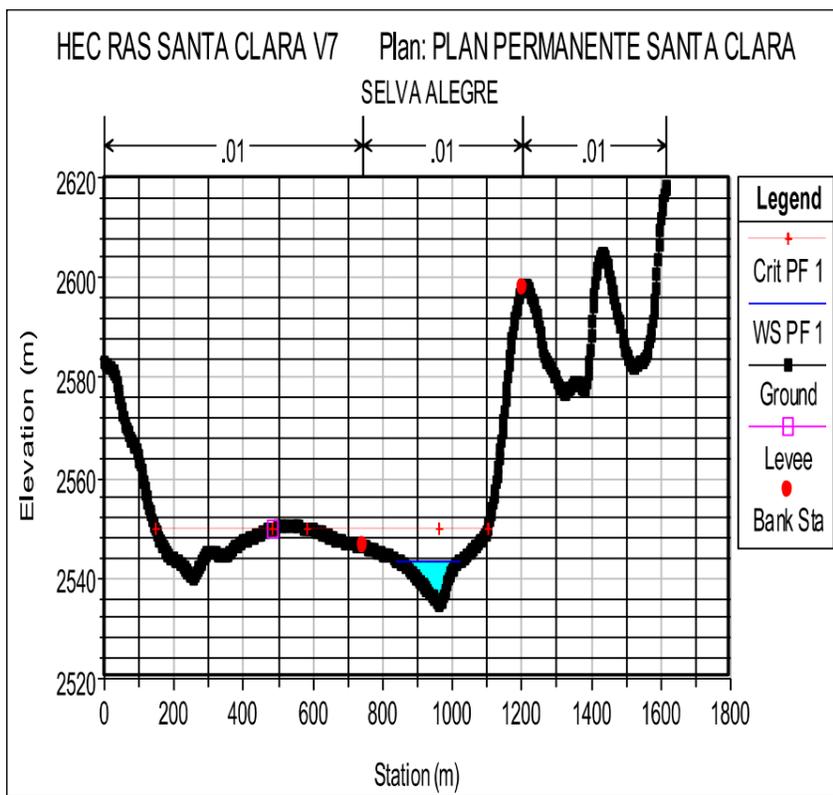
**GRÁFICO NO A1.15: SECCIÓN
HDA. CARMELO**



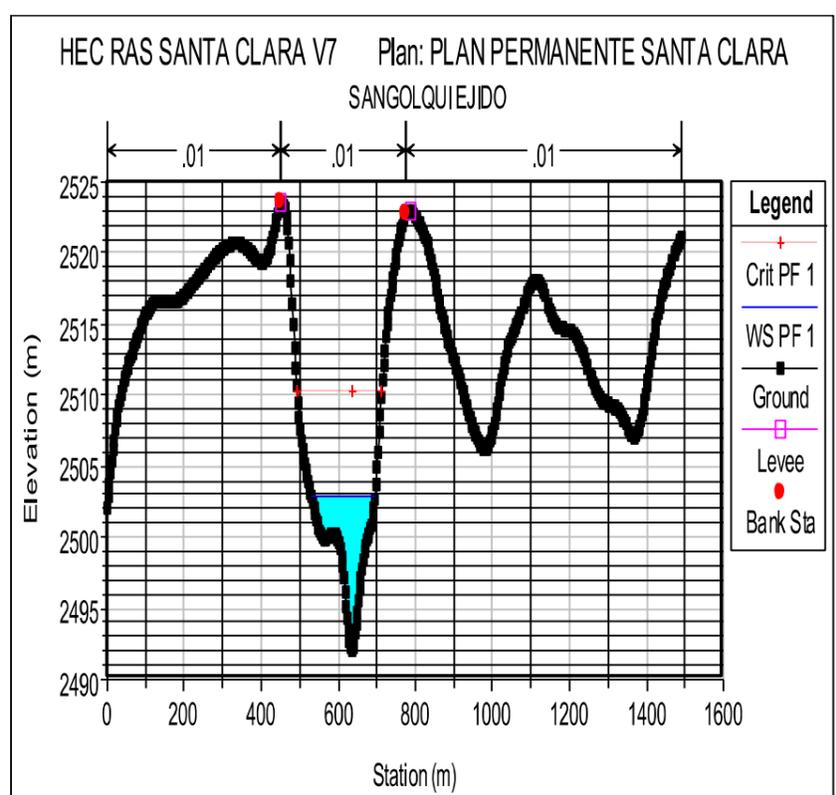
**GRÁFICO NO A1.16: SECCIÓN
IASA-ESPE**



**GRÁFICO NO A1.17: SECCIÓN
SELVA ALEGRE**



**GRÁFICO NO A1.18: SECCIÓN
SANGOLQUI-EJIDO**



A1.5 COORDENADAS DE LAS SECCIONES CARACTERÍSTICAS OCUPADAS EN LA SIMULACIÓN UNIDIMENSIONAL

**TABLA NO A1.1. COORDENADAS DE LAS SECCIONES
TRANSVERSALES CARACTERÍSTICAS UTILIZADAS EN LA MODELACIÓN
UNIDIMENSIONAL EN SISTEMA UTM WGS84-17S.**

COORDENADAS DE SECCIONES CARÁCTERISTICAS USADAS EN LA MODELACIÓN					
No	RÍO	TRAMO	DESCRIPCION	X	Y
1	SALTO	1	INICIO TRAMO MIZ	783725.35	9934940.26
			INICIO TRAMO MD	784521.75	9934929.68
2	SALTO	1	HOSTERIA TAMBOPAXI MIZ	783950.89	9934934.26
			HOSTERIA TAMBOPAXI MD	784250.89	9934934.26
3	SALTO	1	GUARDERIA NORTE MIZ	783967.89	9937165.26
			GUARDERIA NORTE MD	784694.89	9937140.26
4	SALTO	1	FIN TRAMO MIZ	783415.26	9939027.03
			FIN TRAMO MD	784194.20	9939314.89
5	SALTO	2	INICIO TRAMO/CASCADA MIZ	783347.73	9939153.17
			INICIO TRAMO/CASCADA MD	784380.67	9939551.10
6	SALTO	2	FIN TRAMO /PEDREGAL MIZ	783462.03	9941735.51
			FIN TRAMO /PEDREGAL MD	784207.10	9941756.67
7	SALTO	3	INICIO DE TRAMO MIZ	784194.40	9942544.07
			INICIO DE TRAMO MD	784787.07	9942294.31
8	SALTO	3	FIN TRAMO MIZ	783961.57	9944478.71
			FIN TRAMO MD	784329.87	9944394.04
9	SALTO	4	INICIO TRAMO MIZ	784005.59	9945021.43
			INICIO TRAMO MD	784422.15	9944898.24
10	SALTO	4	SIFON PITA MIZ	784650.89	9945434.26
			SIFON PITA MD	784750.89	9945234.26
11	SALTO	4	SIFON 2 MIZ	785050.89	9945834.26
			SIFON 2 MD	785080.89	9945859.26
12	SALTO	4	FIN TRAMO MIZ	785603.26	9946518.76
			FIN TRAMO MD	785857.26	9946057.75
13	PITA 1	1	INICIO TRAMO/HAD. SAN RAFAEL MIZ	786118.91	9941891.713
			INICIO TRAMO/HAD. SAN RAFAEL MD	786843.87	9941785.879
14	PITA 1	1	PITA CAÑON MIZ	785759.89	9944199.26
			PITA CAÑON MD	785958.89	9944217.26
15	PITA 1	1	FIN TRAMO MIZ	785622.02	9944292.02
			FIN TRAMO MD	786320.42	9944424.10
16	PITA 1	2	INICIO TRAMO MIZ	785537.257	9944695.349
			INICIO TRAMO MD	785800.571	9944675.875
17	PITA 1	2	BOCATOMA CAMPAMENTO MIZ	785350.89	9944934.26
			BOCATOMA CAMPAMENTO MD	785450.89	9945134.26

18	PITA 1	2	FIN TRAMO /BOC. EMAAP MIZ	785450.89	9945134.26
			FIN TRAMO /BOC. EMAAP MD	785471.89	9945391.26
19	PITA 1	3	INICIO TRAMO MIZ	785331.561	9945794.31
			INICIO TRAMO MD	785650.947	9945597.597
20	PITA 1	3	FIN TRAMO /POTRERILLOS MIZ	785694.89	9946342.26
			FIN TRAMO /POTRERILLOS MD	785829.89	9946112.26
21	PITA 2	1	INICIO TRAMO MIZ	785755.29	9946631.92
			INICIO TRAMO MD	786453.79	9946263.62
22	PITA 2	1	FIN TRAMO /LA CALDERA MIZ	786981.89	9949757.26
			FIN TRAMO /LA CALDERA MD	786937.89	9949614.26
23	SANTA CLARA	1	INICIO TRAMO MIZ/LA CALDERA	786659.89	9949859.26
			INICIO TRAMO MD/LA CALDERA	786981.89	9949757.26
24	SANTA CLARA	1	LA MOCA MIZ	787601.89	9954047.26
			LA MOCA MD	787550.89	9954034.26
25	SANTA CLARA	1	FIN TRAMO /HDA. EL CARMELO MIZ.	787651.89	9955829.26
			FIN TRAMO /HDA. EL CARMELO MD.	787779.89	9955823.26
26	SANTA CLARA	2	INICIO TRAMO MIZ	787381.047	9955823.412
			INICIO TRAMO MD	788109.182	9955840.345
27	SANTA CLARA	2	IASA-ESPE MIZ	787470.89	9958086.26
			IASA-ESPE MD	787527.89	9958129.26
28	SANTA CLARA	2	FIN TRAMO MIZ	785871.86	9960516.07
			FIN TRAMO MD	787279.45	9960516.07
29	SANTA CLARA	3	INICIO TRAMO MIZ	786046.819	9960058.01
			INICIO TRAMO MD	787475.572	9960908.911
30	SANTA CLARA	3	SELVA ALEGRE MIZ	786427.89	9961389.26
			SELVA ALEGRE MD	786506.89	9961534.26
31	SANTA CLARA	3	SANGOLQUI EJIDO MIZ	784627.89	9963356.26
			SANGOLQUI EJIDO MD	784761.89	9963459.26
32	SANTA CLARA	3	FIN TRAMO MIZ	781239.859	9967900.275
			FIN TRAMO MD	784579.966	9967627.225

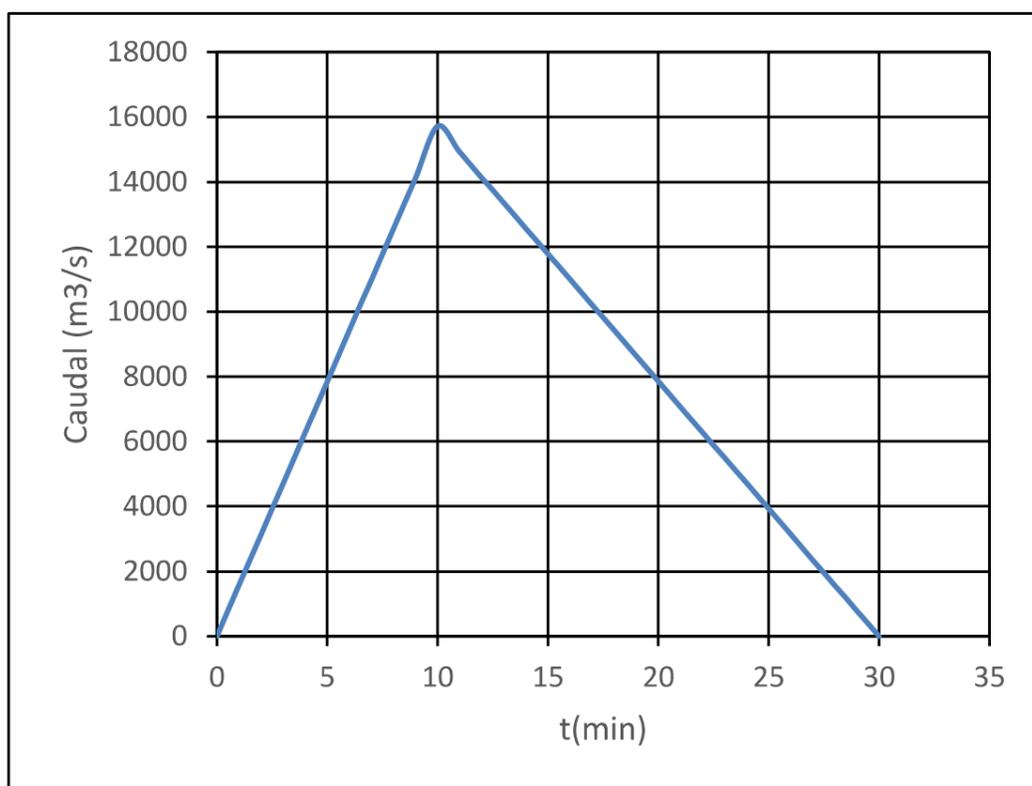
ELABORACIÓN: Javier Méndez Padilla

ANEXO No 2

**HIDROGRAMAS DE ENTRADA Y SALIDA DE LOS
TRAMOS MODELADOS**

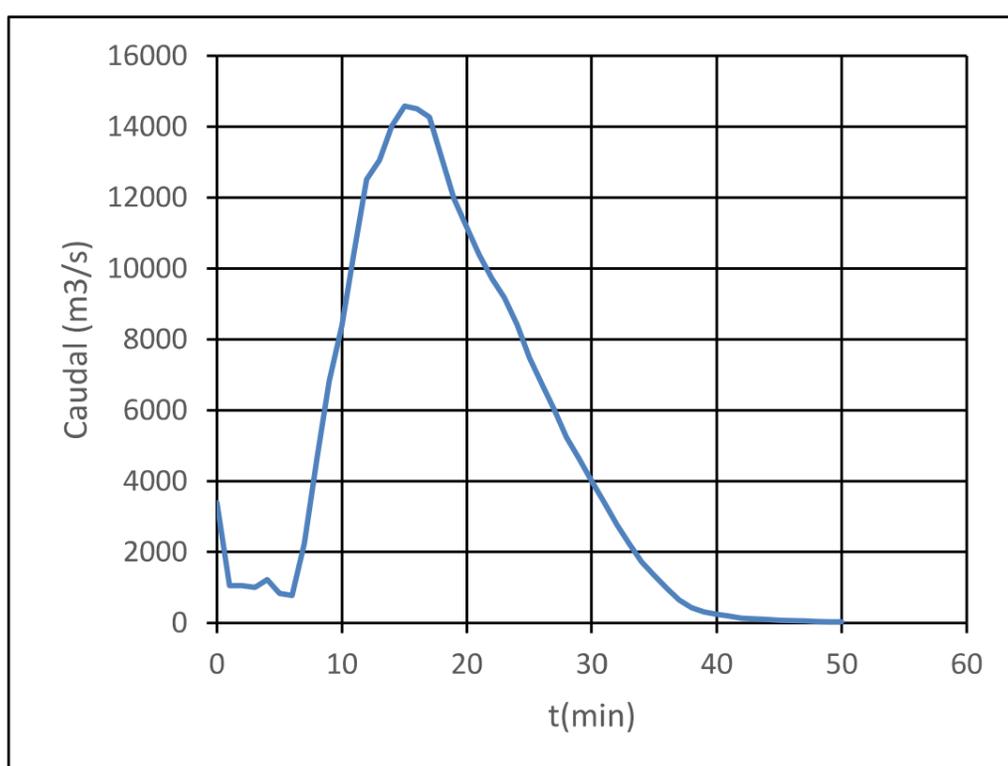
**A2.1 HIDROGRAMAS DE ENTRADA Y SALIDA DE LA
MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL EN CADA UNO DE LOS
TRAMOS DE ESTUDIO (VOLUMEN 2011).**

**GRÁFICO NO A2.1: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO EL SALTO TRAMO1
(VOLUMEN 2011)**



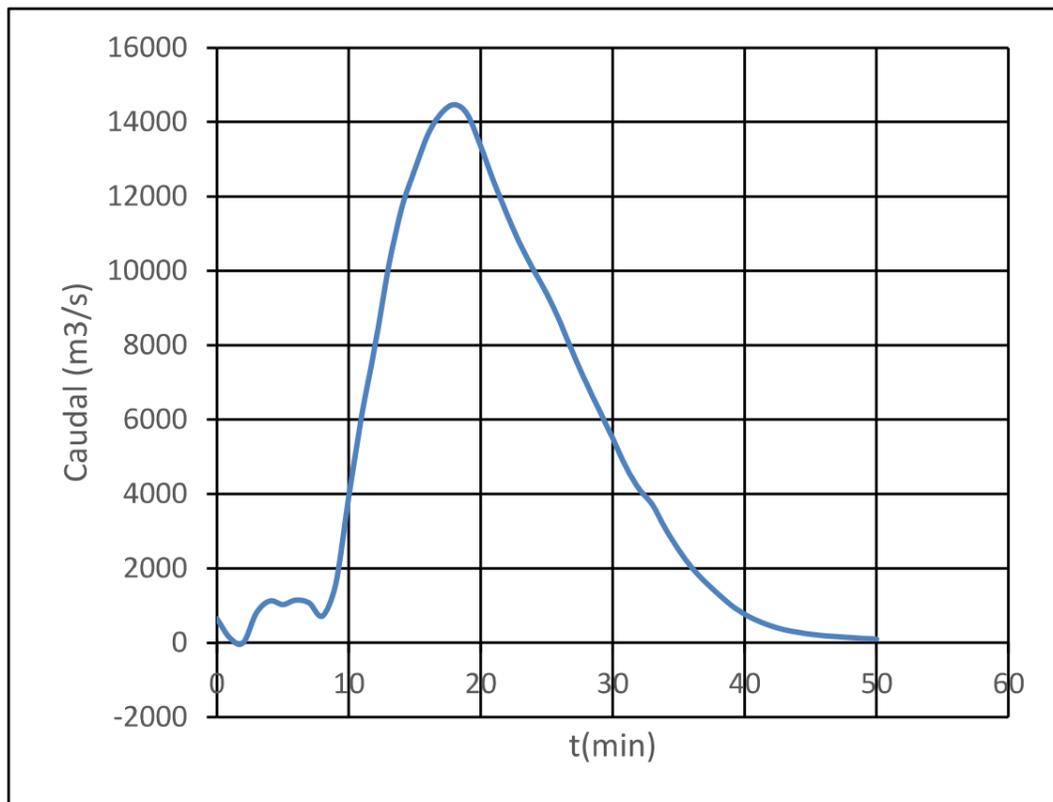
t (min)	Q (m3/s)
0	0
5	7854.235
10	15708.47
15	11781.3525
20	7854.235
25	3927.1175
30	0

**GRÁFICO NO A2.2: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO EL SALTO
TRAMO1 Y TRAMO 2 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).**



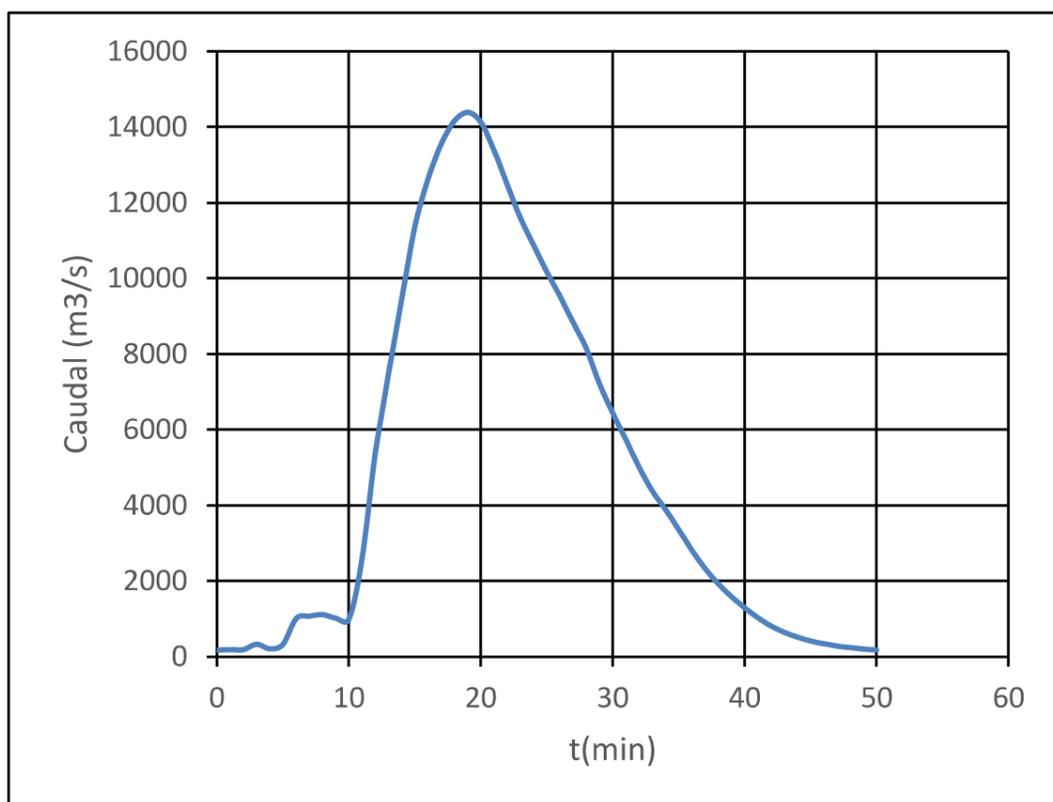
t (min)	Q (m3/s)
0	3389.08
5	834.94
10	8418.59
15	14582.75
20	11168.1
25	7478.12
30	4010.35
35	1350.1
40	232.72
45	77.92
50	35.97

GRÁFICO NO A2.3: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO EL SALTO TRAMO2 Y TRAMO 3 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).



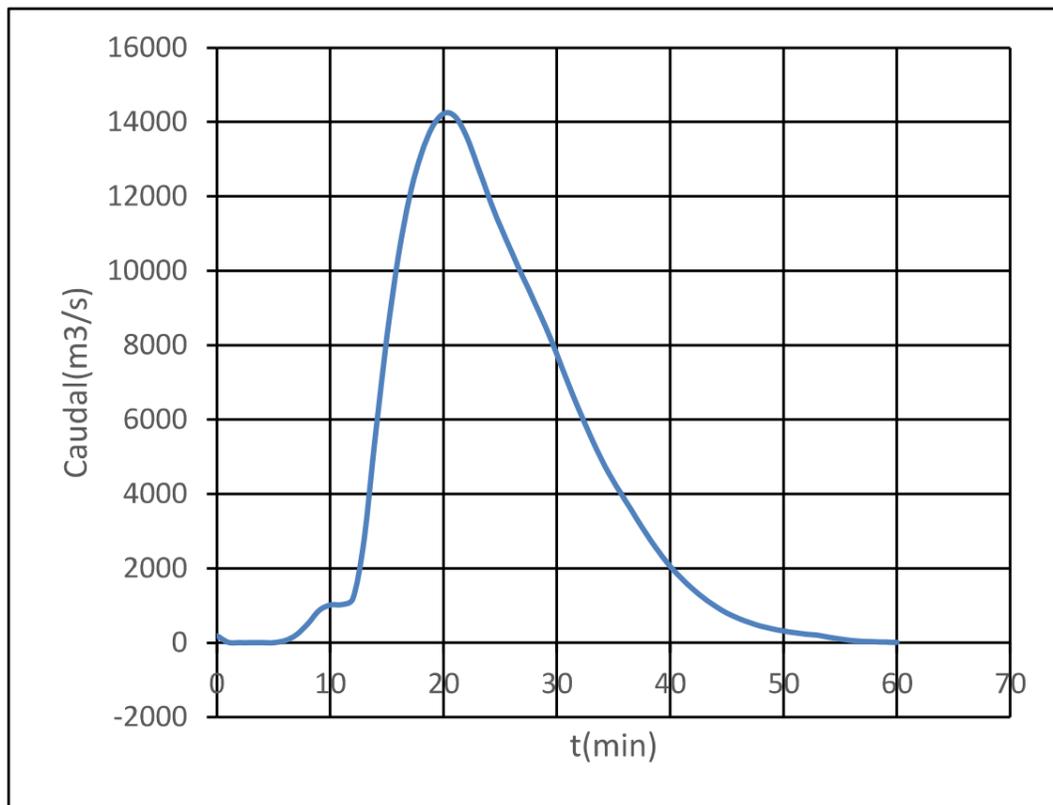
t (min)	Q (m3/s)
0	644.5
5	1028.62
10	3906.96
15	12724.65
18	14469.27
20	13350.76
25	9384.89
30	5505.72
35	2506.26
40	768.8
45	230.58
50	100.39

GRÁFICO NO A2.4: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO EL SALTO TRAMO3 Y TRAMO 4 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).



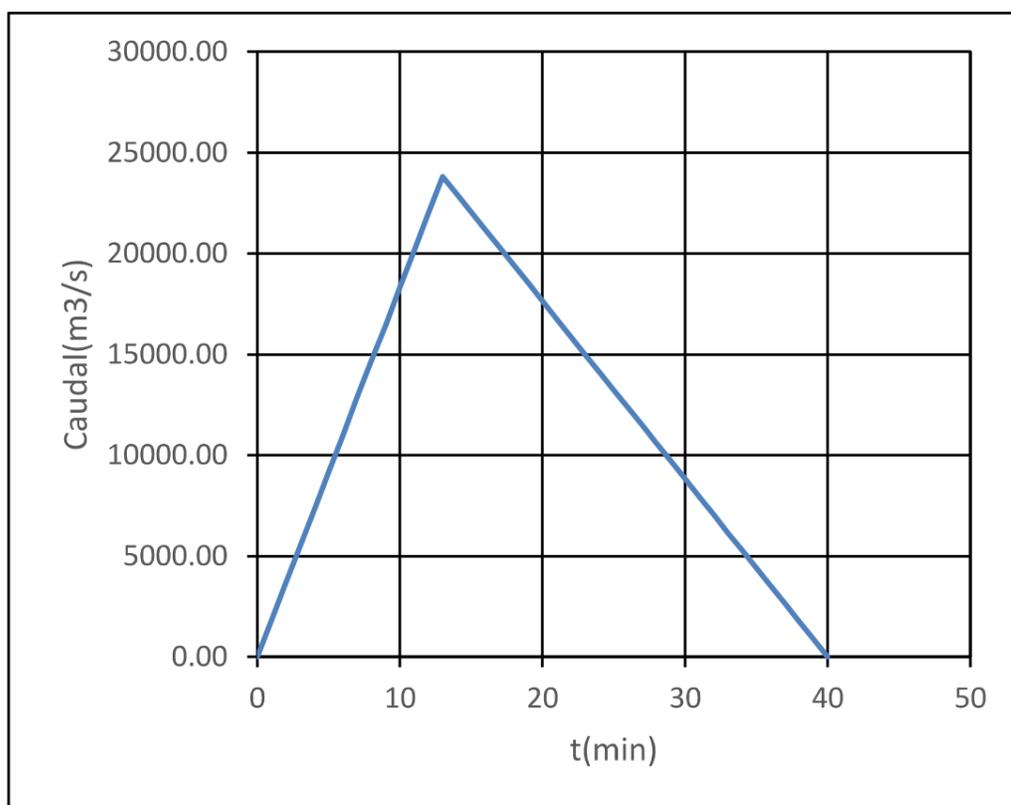
t (min)	Q (m3/s)
0	165.09
5	324.64
10	974.87
15	11365.88
19	14385.76
20	14135.91
25	10170.43
30	6445.15
35	3367.03
40	1288.41
45	411.99
50	171.15

GRÁFICO NO A2.5: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO EL SALTO TRAMO 4 (VOLUMEN 2011).



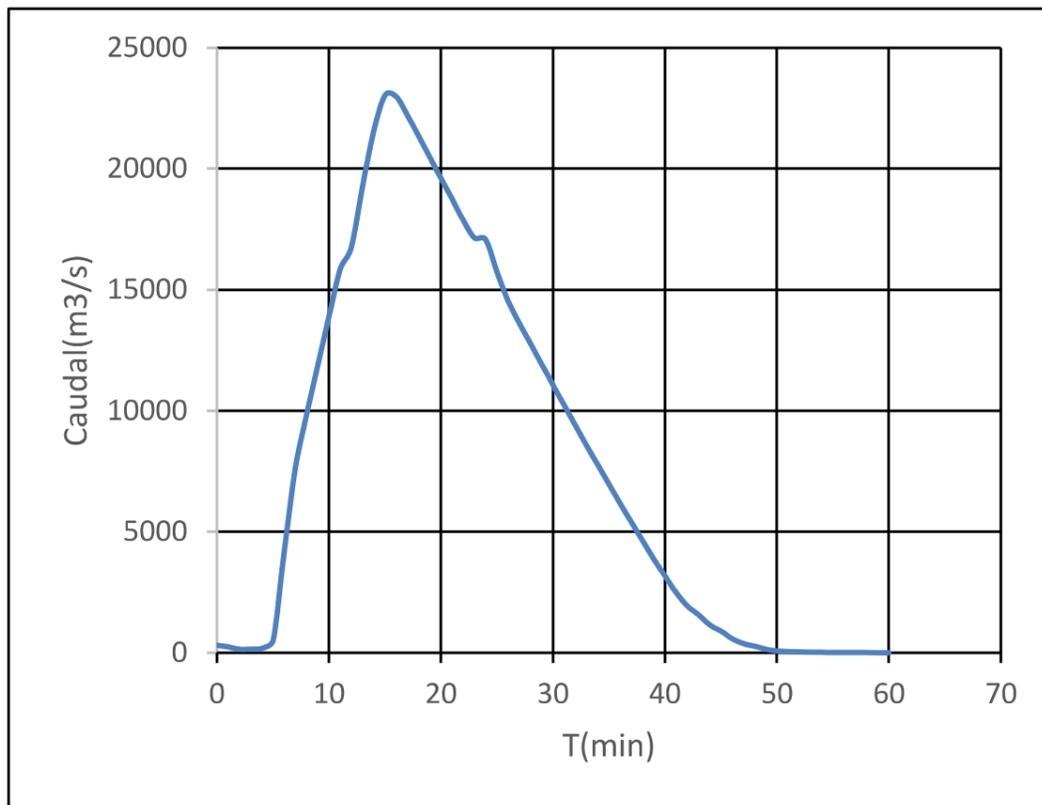
t (min)	Q (m3/s)
0	188.99
5	0
10	1017.5
15	8243.35
20	14227.94
25	11205.7
30	7746.24
35	4337.53
40	2057.33
45	803.97
50	314.37
55	98.47
60	11.19

GRÁFICO NO A2.6: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO PITA1 TRAMO 1 (VOLUMEN 2011).



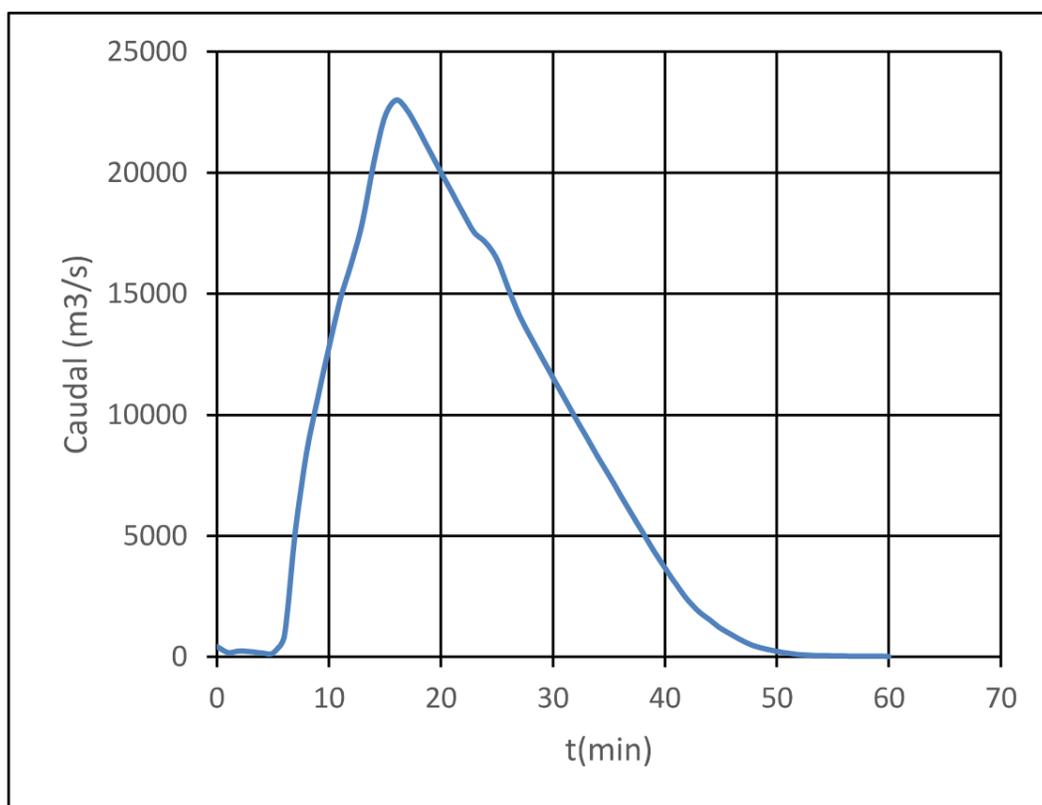
t (min)	Q (m3/s)
0	0
5	9159.23077
10	18318.4615
15	22050
20	17640
25	13230
30	8820
35	4410
40	0

GRÁFICO NO A2.7: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO PITA1 TRAMO 1 Y TRAMO 2 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).



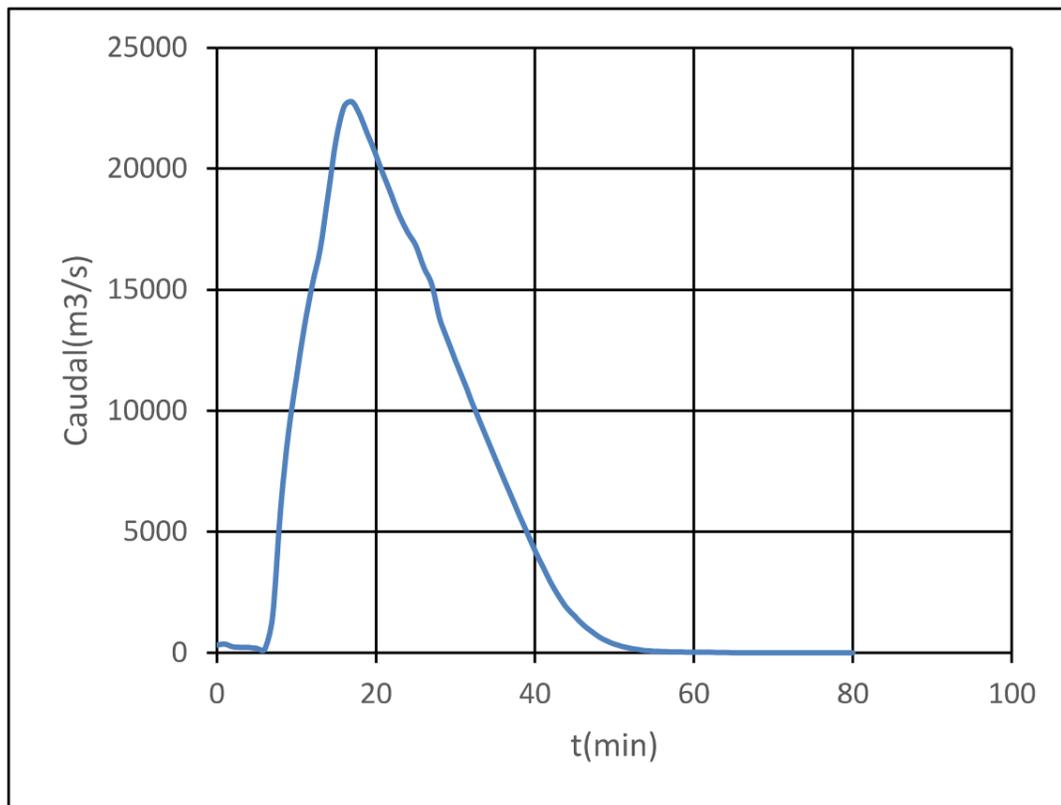
t (min)	Q (m3/s)
0	308.98
5	520.14
10	13874.55
15	23039.13
20	19606.61
25	15727.66
30	11074.99
35	6961.7
40	3177.23
45	902.29
50	79.04
55	15.87
60	5.29

GRÁFICO NO A2.8: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO PITA1 TRAMO 2 Y TRAMO 3 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).



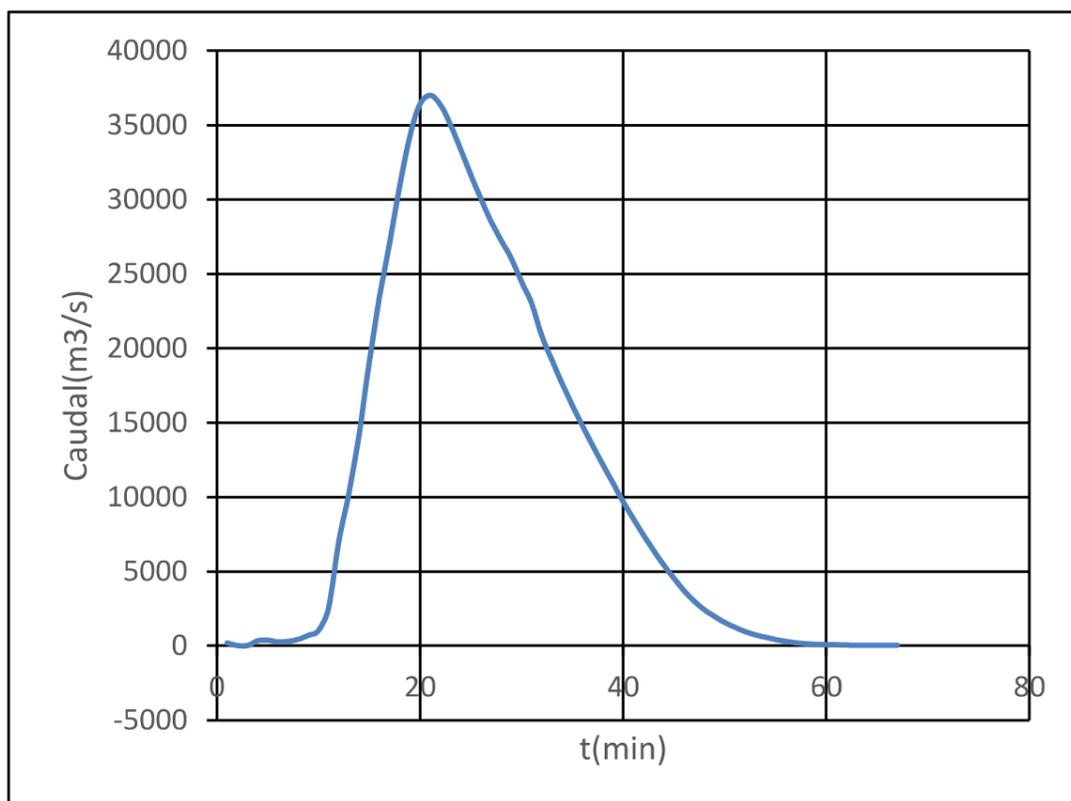
t (min)	Q (m3/s)
0	424.25
5	161.56
10	12777.84
16	22996.56
20	20031.13
25	16417.59
30	11543.8
35	7489.41
40	3677.99
45	1170.58
50	223.72
55	40.23
60	17.65

GRÁFICO NO A2.9: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO PITA1 TRAMO 3 (VOLUMEN 2011).



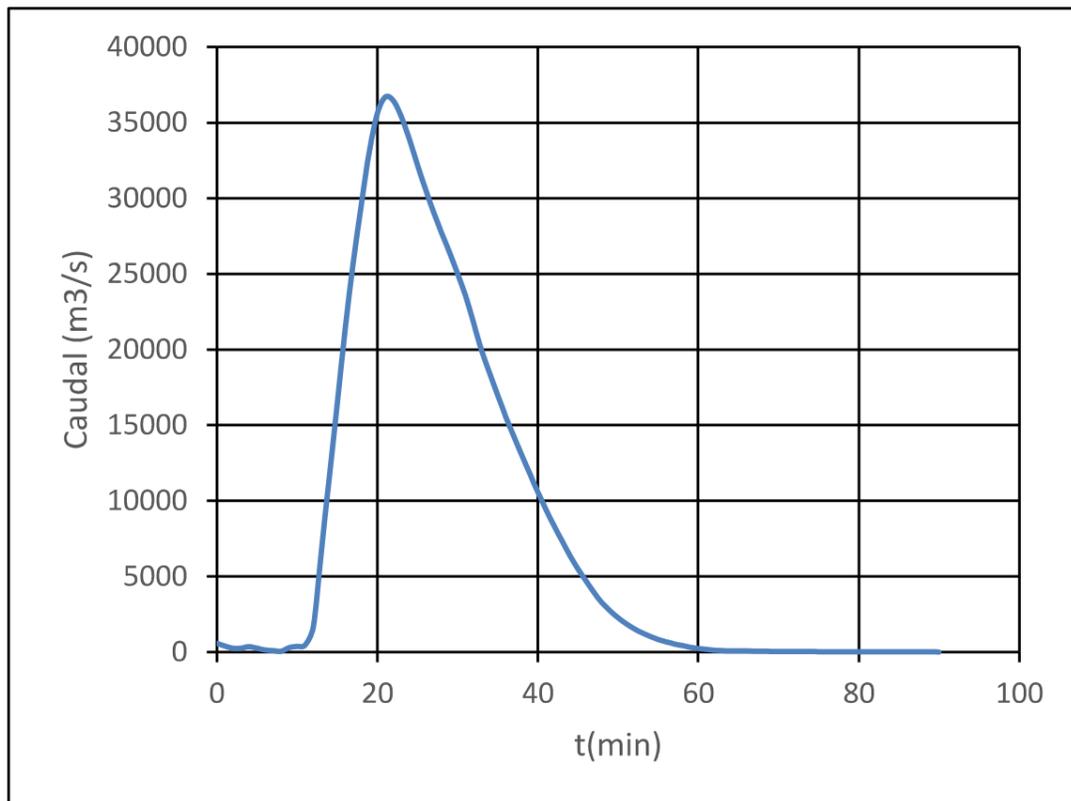
t (min)	Q (m3/s)
0	320.91
10	11382.67
17	22769.73
20	20541.84
30	12095.52
40	4235.46
50	364.56
60	26.94
70	1.51
80	1.01

GRÁFICO NO A2.10: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO PITA 2 (VOLUMEN 2011).



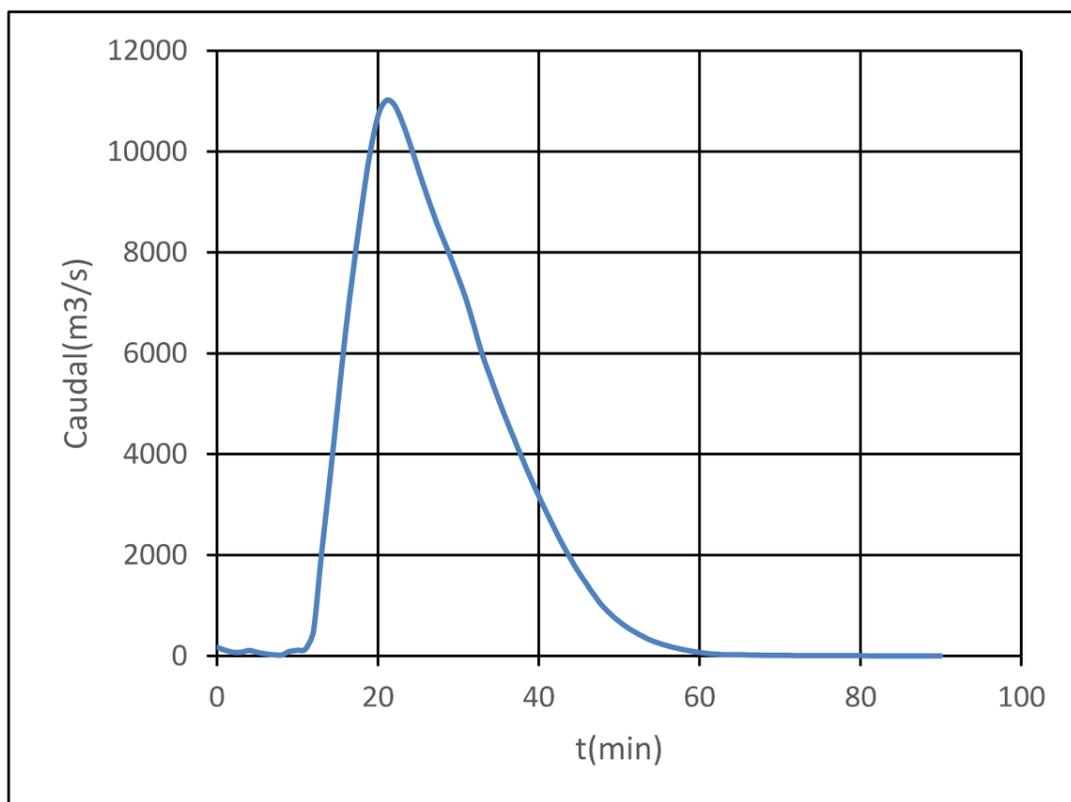
t (min)	Q (m3/s)
1	188.99
5	358.97
10	1018.72
15	19072.01
20	36427.34
25	31673.16
30	24428.69
35	16160.08
40	9688.78
45	4531.88
50	1558.3
55	417.4
60	70.76
65	23.86
67	14.76

**GRÁFICO NO A2.11: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO PITA 2
(VOLUMEN 2011).**



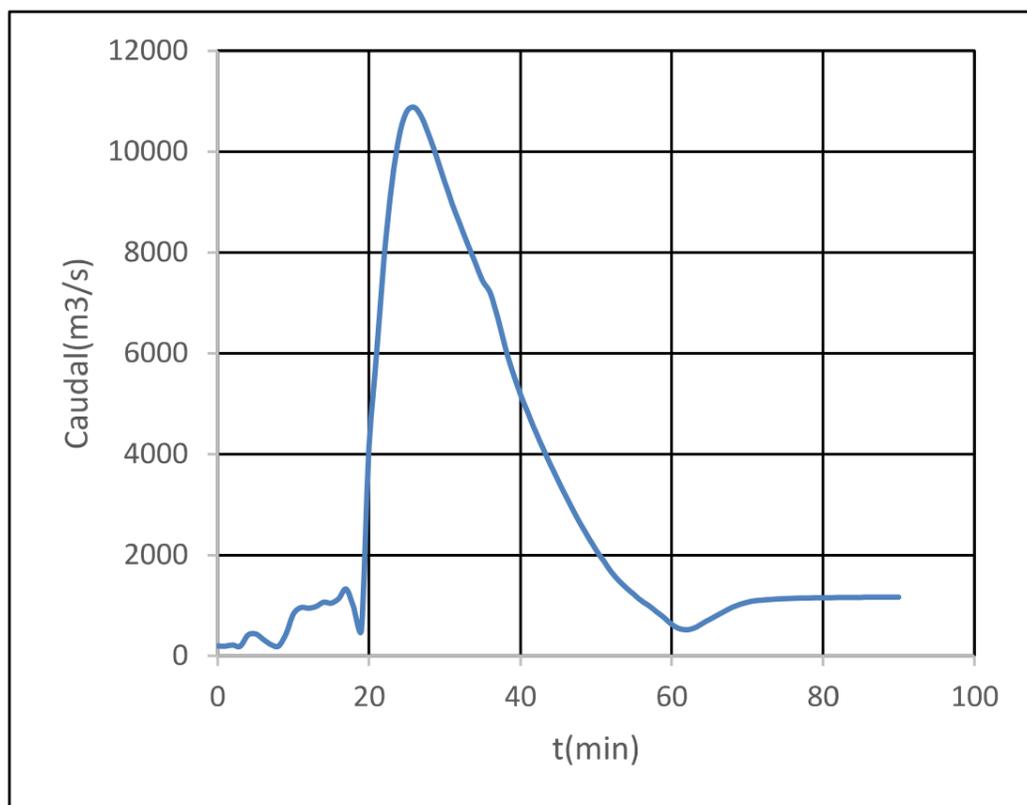
t (min)	Q (m3/s)
0	578.86
10	376.78
21	36692.26
30	25010.75
40	10576.99
50	2260.72
60	236.96
70	43.07
80	18.13
90	8.94

**GRÁFICO NO A2.12: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO SANTA CLARA
TRAMO 1 (VOLUMEN 2011).**



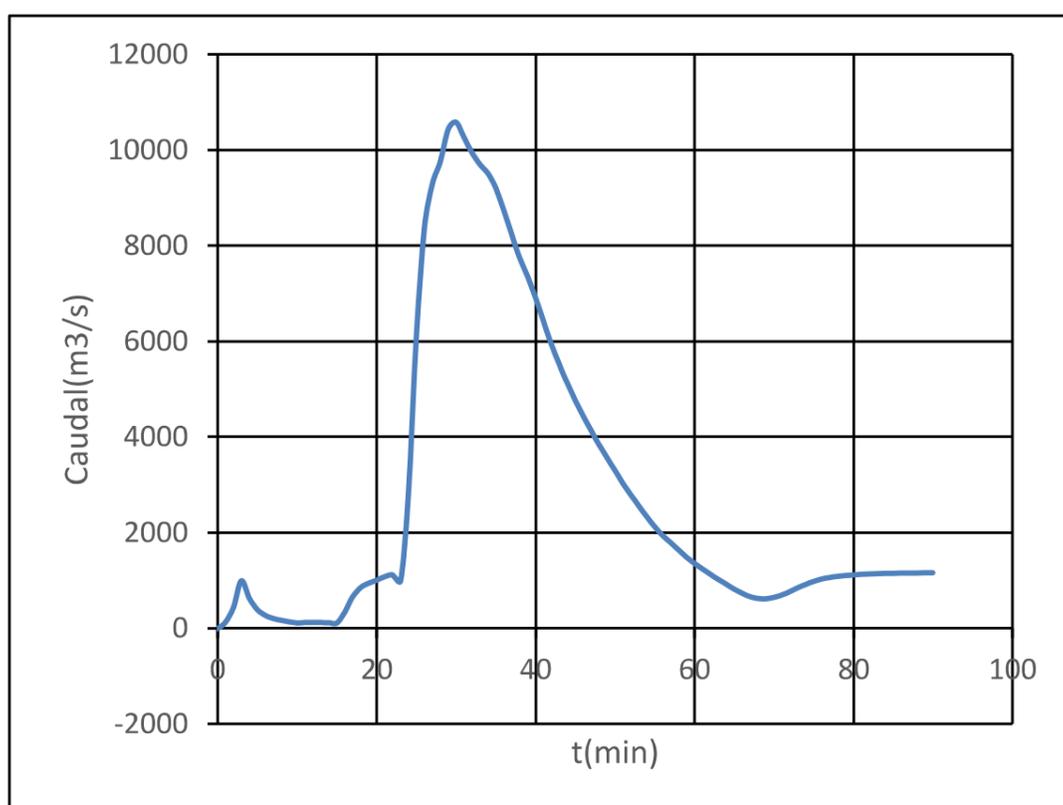
t (min)	Q (m3/s)
0	173.658
10	113.034
21	11007.678
30	7503.225
40	3173.097
50	678.216
60	71.088
70	12.921
80	5.439
90	2.682

GRÁFICO NO A2.13: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO SANTA CLARA TRAMO 1 Y TRAMO 2 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).



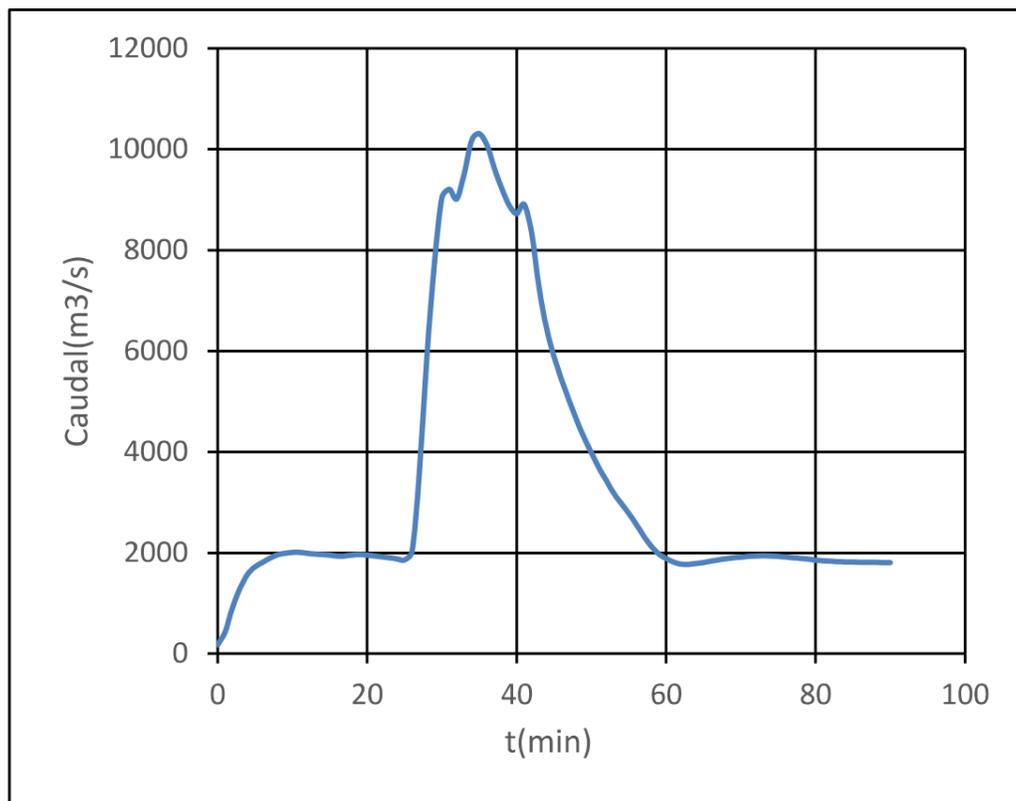
t (min)	Q (m ³ /s)
0	194.18
10	834.07
20	4114.31
26	10872.67
30	9398.75
40	5194.06
50	2103.6
60	622.01
70	1065.23
80	1153.76
90	1167.22

GRÁFICO NO A2.14: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO SANTA CLARA TRAMO 2 Y TRAMO 3 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 2011).



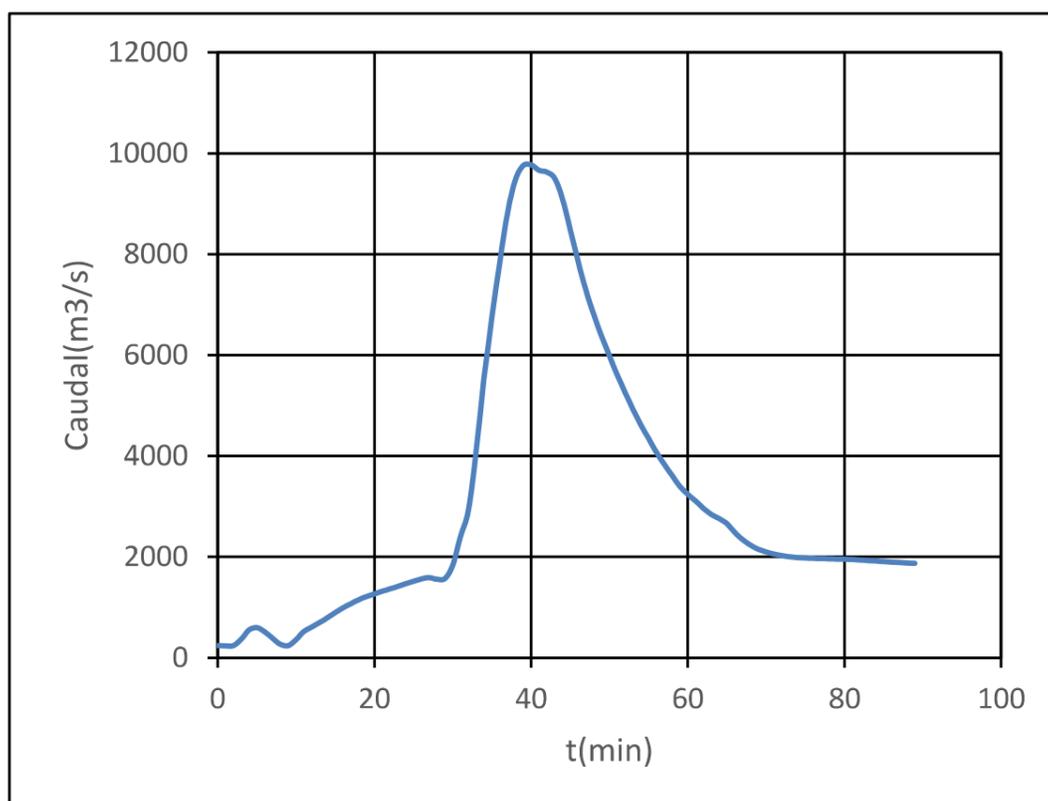
t (min)	Q (m ³ /s)
0	0
10	108.88
20	1005.6
30	10580.17
40	6905.49
50	3290.06
60	1357.63
70	644.37
80	1115.19
90	1159.59

GRÁFICO NO A2.15: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO SANTA CLARA SECCIÓN SANGOLQUÍ- EJIDO E INGRESO EN EL MODELO BIDIMENCIONAL (VOLUMEN 2011).



t (min)	Q (m3/s)
0	171.86
10	2008.01
20	1953.99
30	9043.48
35	10306.97
40	8722.09
40	8722.09
50	3983.68
60	1887.08
70	1914.19
80	1855.66
90	1806.58

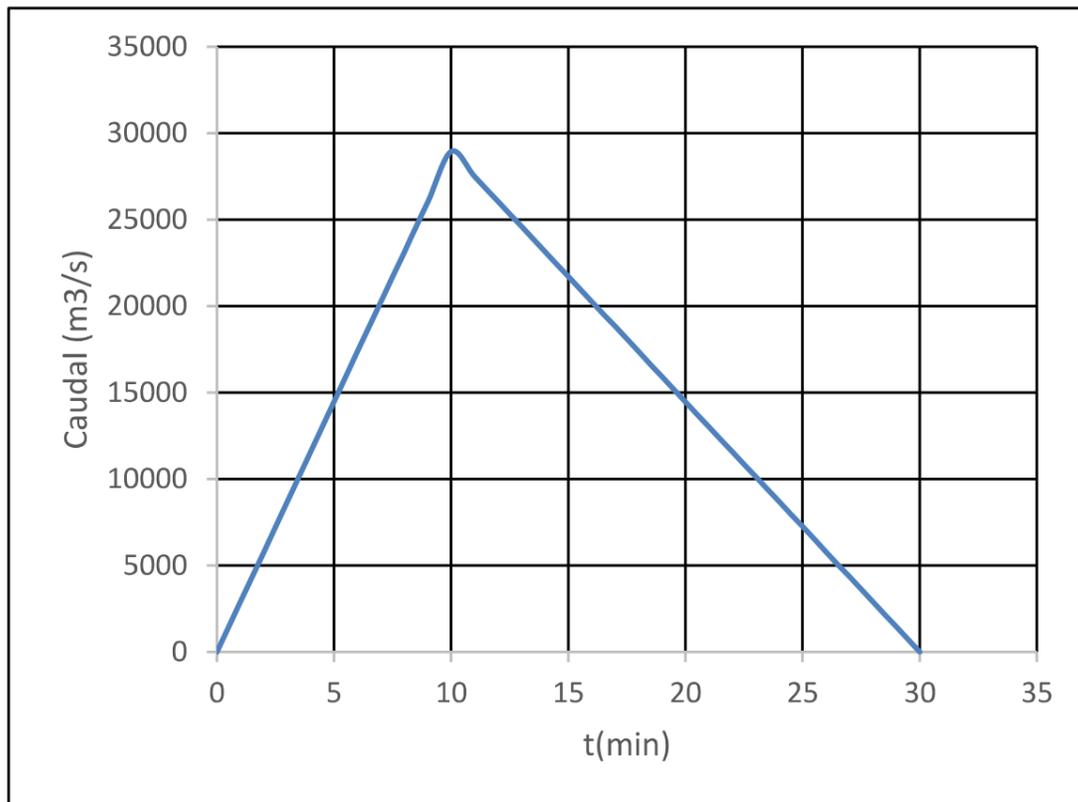
GRÁFICO NO A2.16: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO SANTA CLARA TRAMO 3 (VOLUMEN 2011).



t (min)	Q (m3/s)
0	242.54
10	361.67
20	1263.16
30	1827.12
40	9771.09
50	5980.05
60	3240
70	2094.84
80	1950.49
89	1868.1

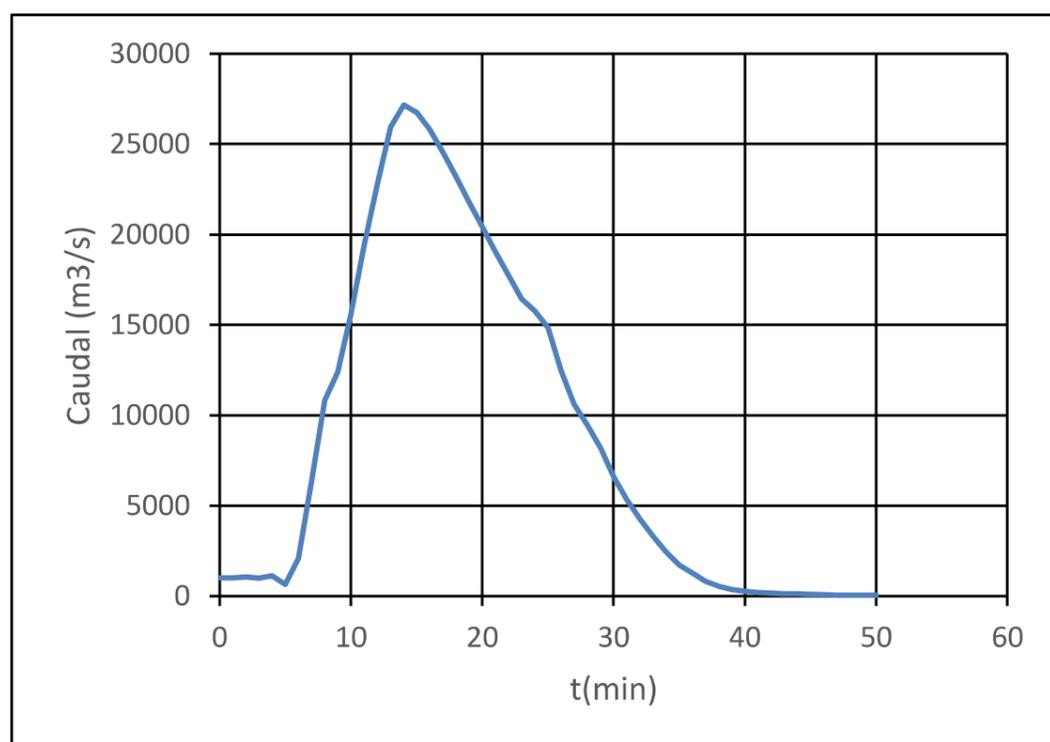
A2.2 HIDROGRAMAS DE ENTRADA Y SALIDA DE LA MODELACIÓN UNIDIMENSIONAL EN CADA UNO DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO (VOLUMEN 1976).

**GRÁFICO NO A2.17: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO EL SALTO
TRAMO1 (VOLUMEN 1976)**



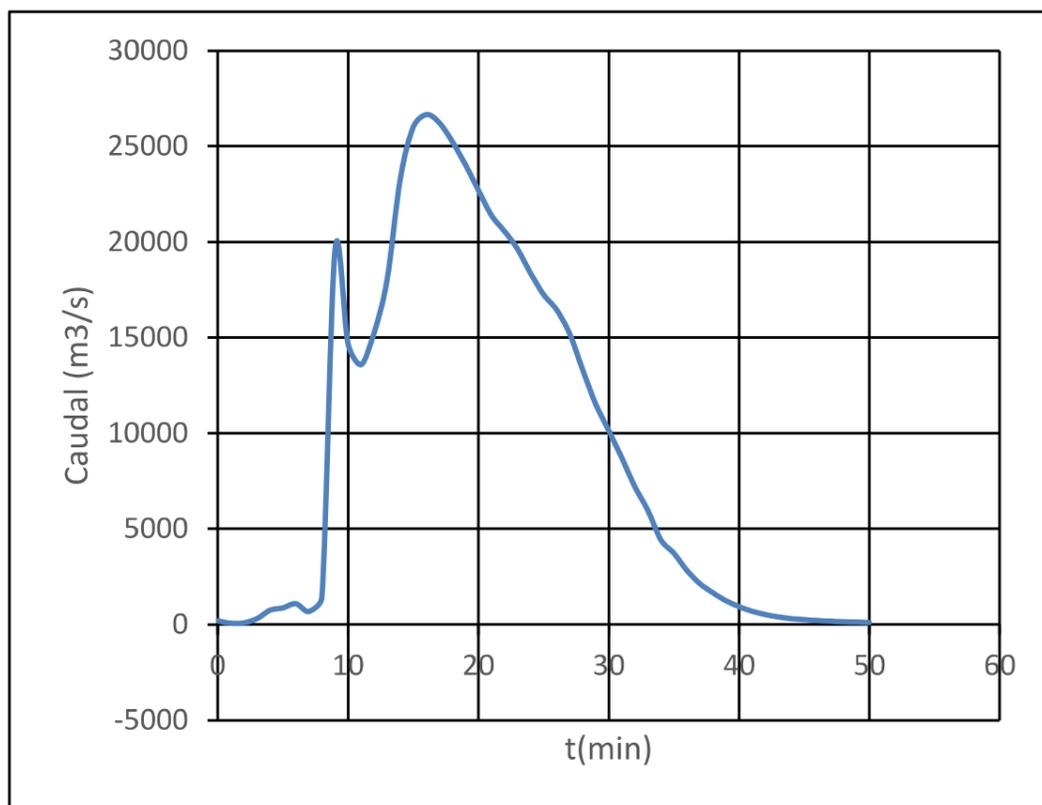
t (min)	Q (m³/s)
0	0
5	14472.6
10	28945.2
15	21708.9
20	14472.6
25	7236.3
30	0

**GRÁFICO NO A2.18: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO EL
SALTO TRAMO1 Y TRAMO 2 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).**



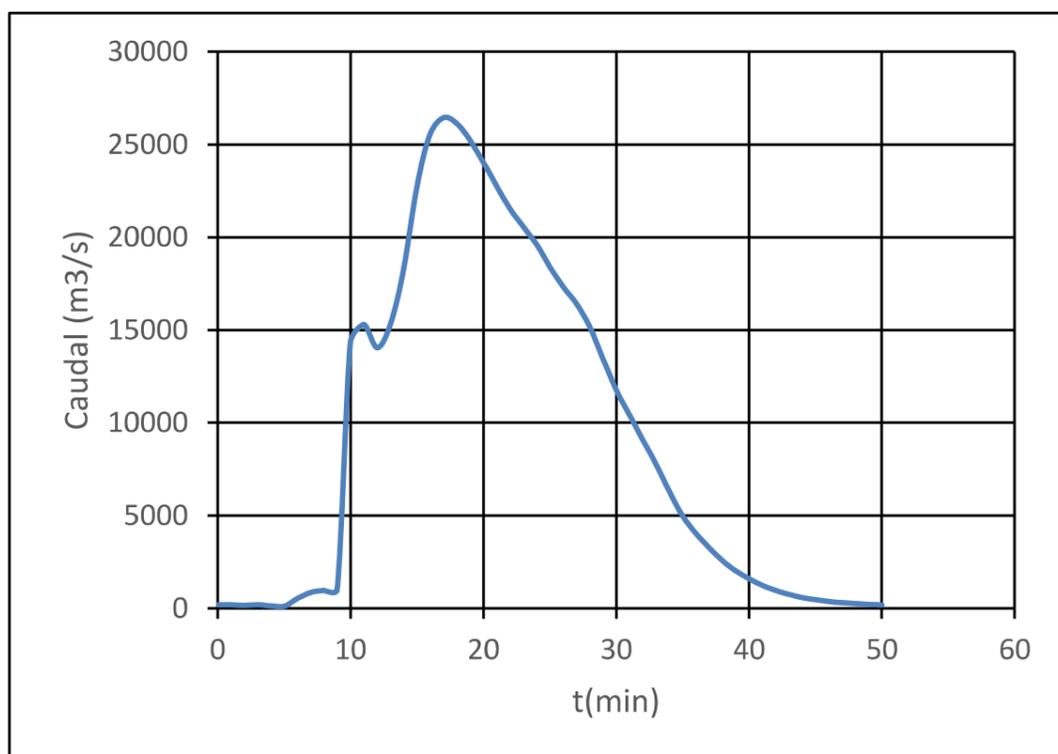
t (min)	Q (m³/s)
0	1000
5	641.27
10	15554.1
14	27171.68
20	20434.41
25	14830.3
30	6638.06
35	1712.72
40	257.57
45	88.31
50	36.77

GRÁFICO NO A2.19: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO EL SALTO TRAMO2 Y TRAMO 3 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).



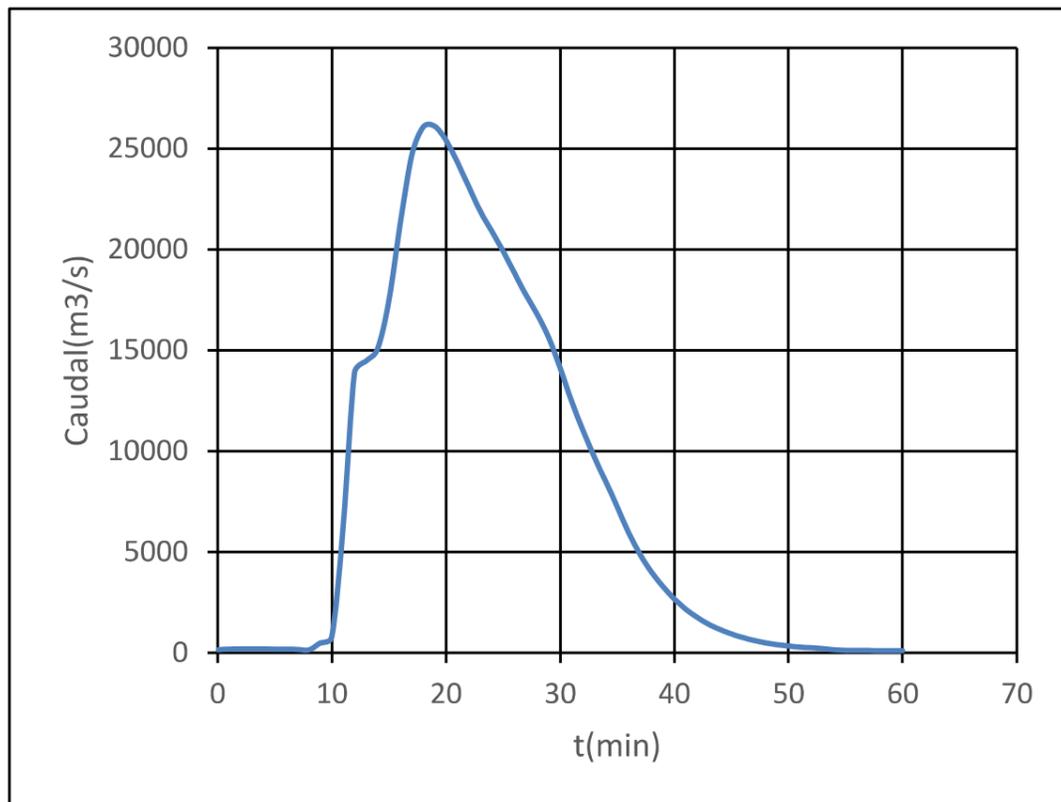
t (min)	Q (m3/s)
0	200
5	872.33
10	14709.69
16	26659.08
20	22725.52
25	17252.12
30	10131.56
35	3739.3
40	932.83
45	252.9
50	107.21

GRÁFICO NO A2.20: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO EL SALTO TRAMO3 Y TRAMO 4 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).



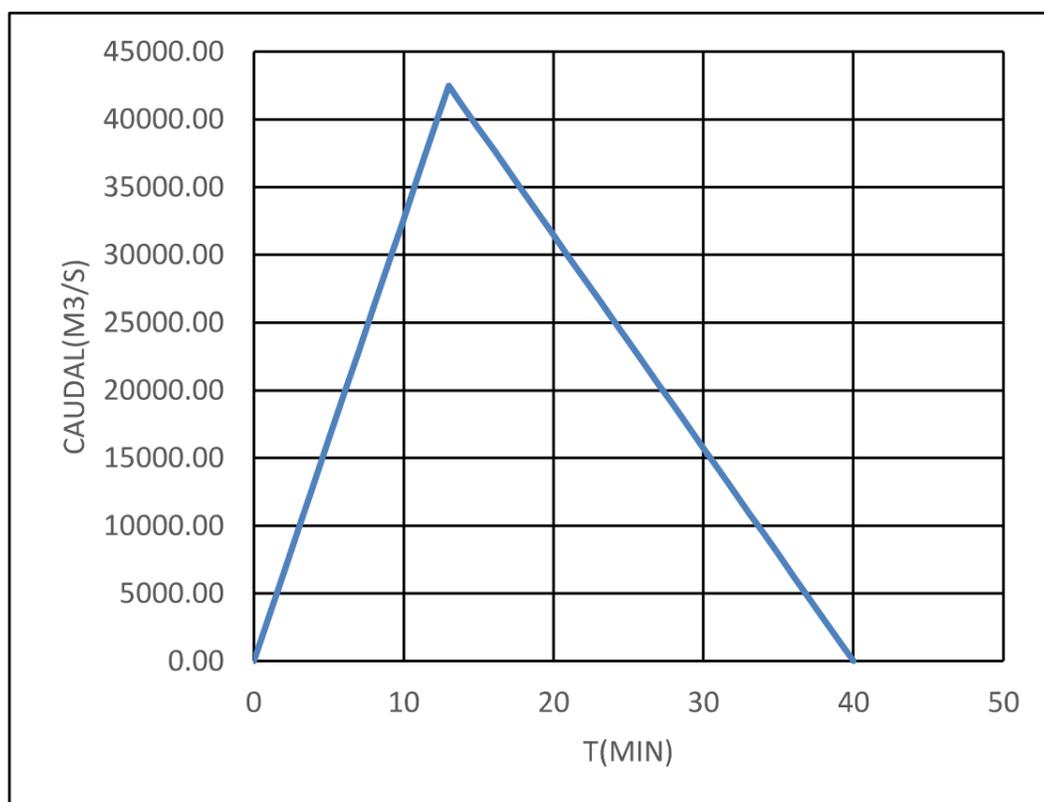
t (min)	Q (m3/s)
0	200
5	106.92
10	14302.2
15	22753.75
17	26458.47
20	24051.02
25	18431.07
30	11760.23
35	4995.85
40	1589.54
45	463.48
50	182.11

GRÁFICO NO A2.21: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO EL SALTO TRAMO 4 (VOLUMEN 1976).



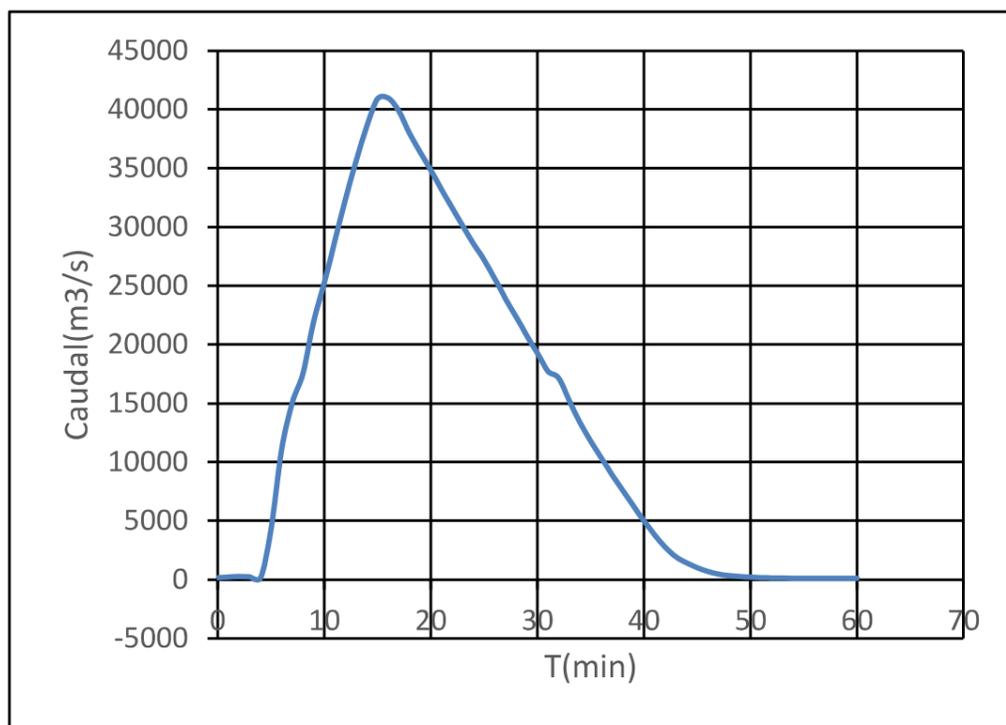
t (min)	Q (m3/s)
0	154.31
5	176.9
10	790.27
15	17491.89
19	26104.31
25	19905.09
30	14121.55
35	7218.03
40	2682.07
45	932.5
50	339.85
55	125.48
60	113.61

GRÁFICO NO A2.22: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO PITA1 TRAMO 1 (VOLUMEN 1976).



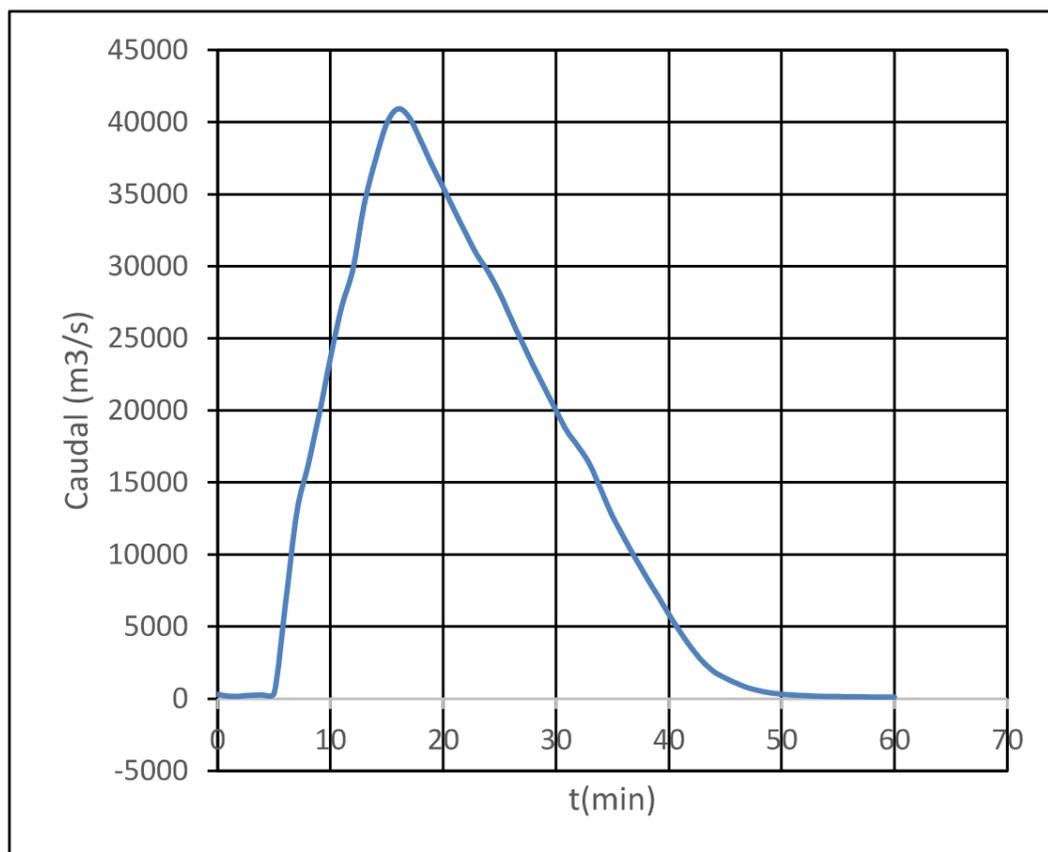
t (min)	Q (m3/s)
0	0
5	16338.4615
10	32676.9231
13	42480
15	39333.3333
20	31466.6667
25	23600
30	15733.3333
35	7866.66667
40	0

GRÁFICO NO A2.23: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO PITA1 TRAMO 1 Y TRAMO 2 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).



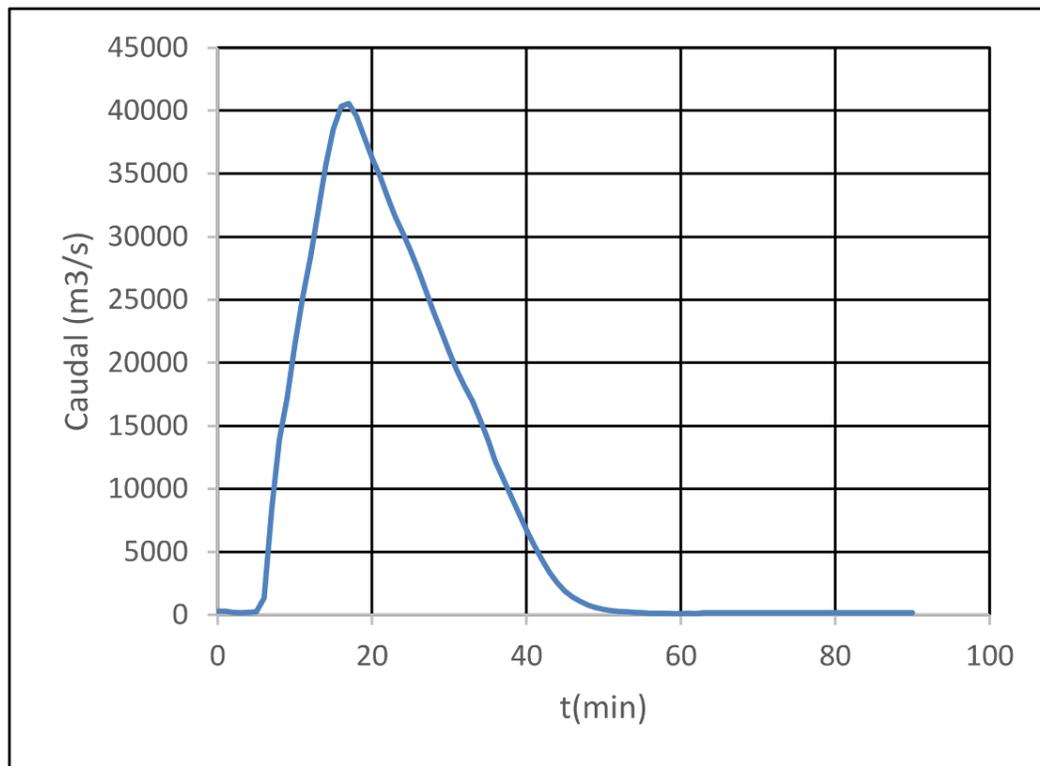
t (min)	Q (m³/s)
0	166.2
5	4257.27
10	25248.37
16	40951.45
20	34826.47
25	27237.71
30	19254.89
35	11830.51
40	4997.48
45	1044.3
50	212.33
55	118.41
60	104.94

GRÁFICO NO A2.24: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO PITA1 TRAMO 2 Y TRAMO 3 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).



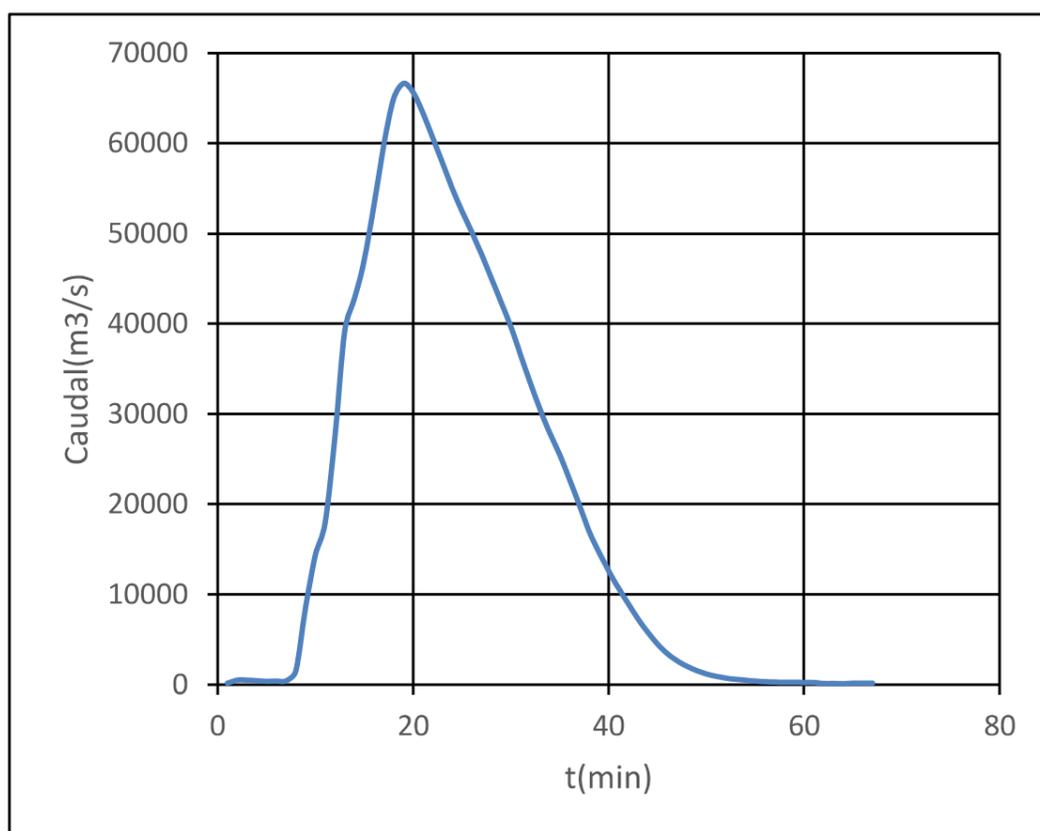
t (min)	Q (m³/s)
0	300
5	386.37
10	23680.92
16	40916.86
20	35451.05
25	28122.42
30	20001.17
35	12676.49
40	5865.86
45	1423.58
50	302.71
55	134.86
60	107.64

**GRÁFICO NO A2.25: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO PITA1 TRAMO 3
(VOLUMEN 1976).**



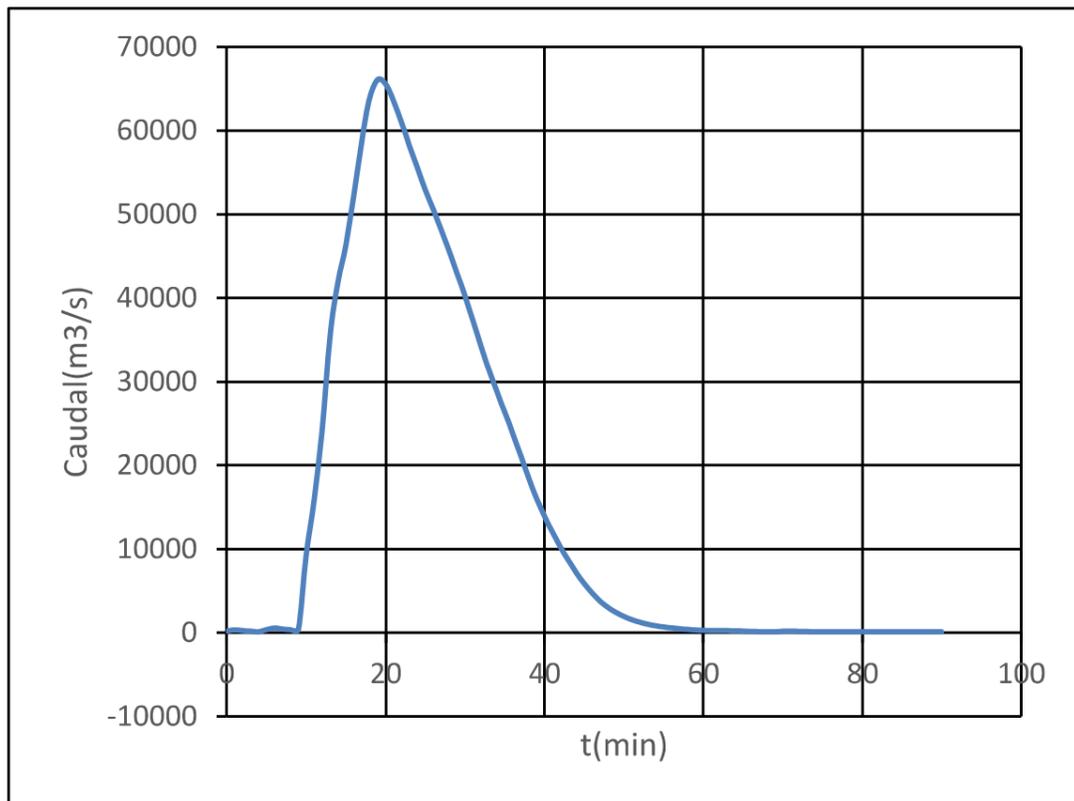
t (min)	Q (m3/s)
0	306.53
10	21325.45
17	40573.41
20	36298.11
30	20896.15
40	6772.82
50	435.42
60	112.99
70	166.85
80	166.85
90	166.85

**GRÁFICO NO A2.26: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO PITA 2
(VOLUMEN 1976).**



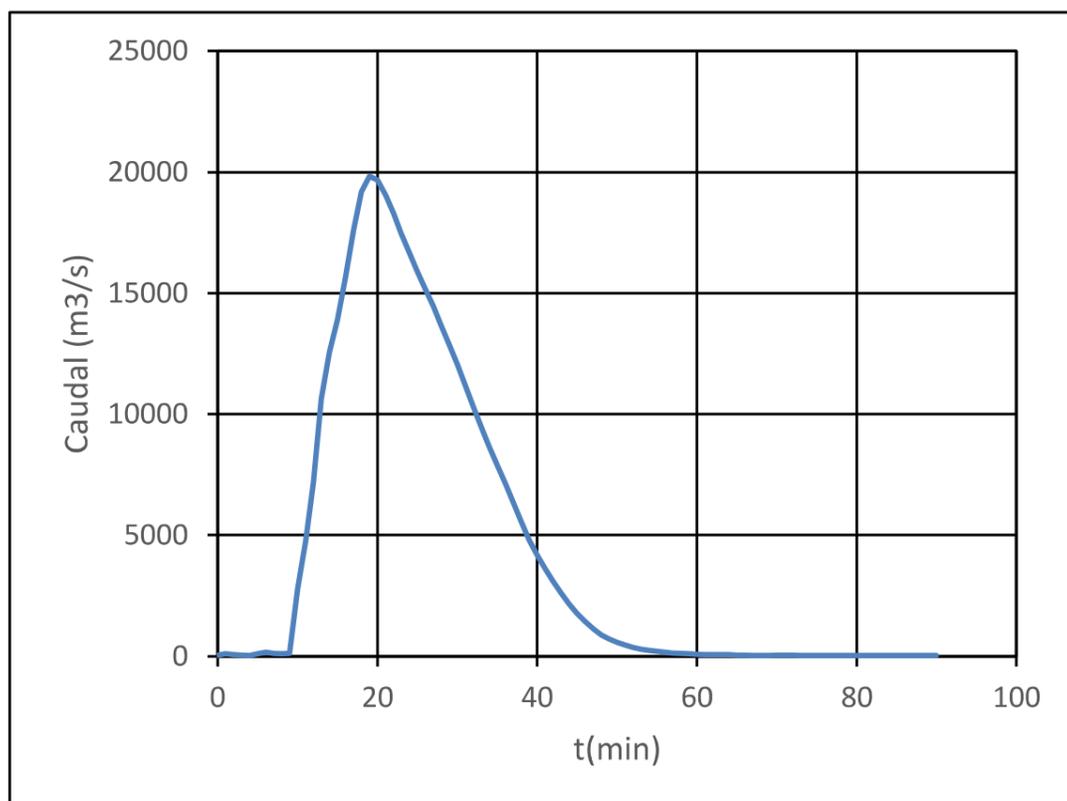
t (min)	Q (m3/s)
1	154.31
5	368.06
10	14367.76
15	47008.18
19	66631.26
25	52502.52
30	39593.35
35	25455.91
40	12654.81
45	4518.19
50	1199.28
55	374.33
60	237.1
67	167.98

**GRÁFICO NO A2.27: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO PITA 2
(VOLUMEN 1976).**



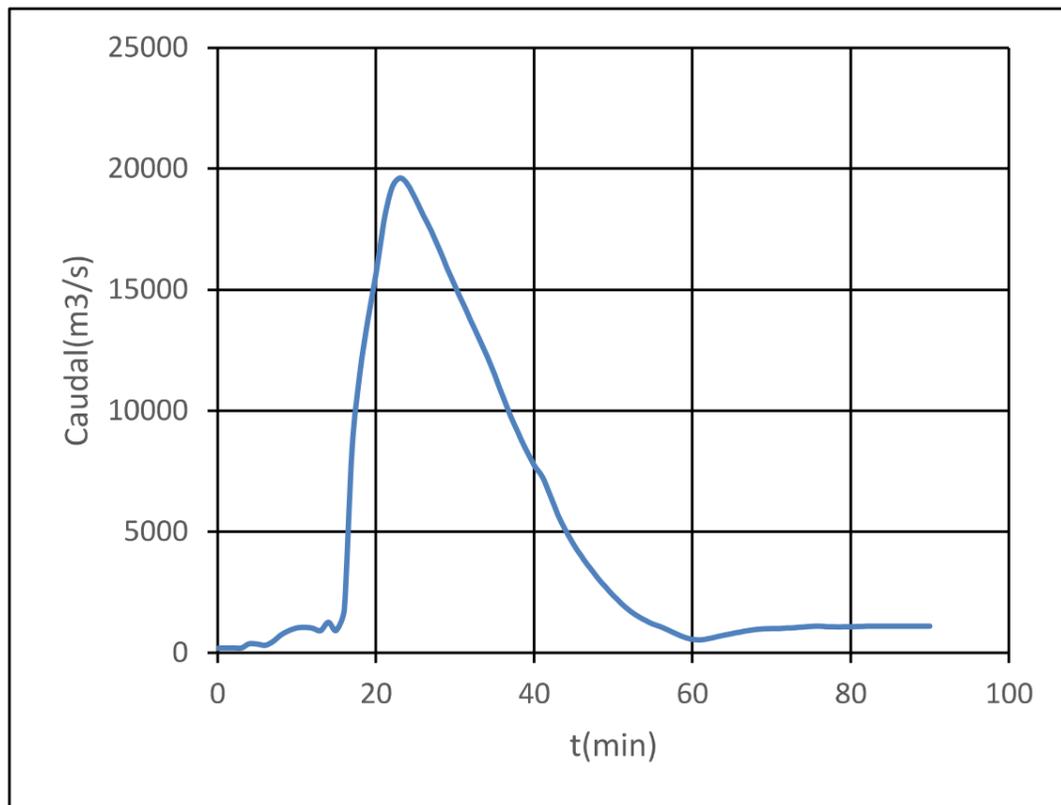
t (min)	Q (m3/s)
0	199.03
10	9254.36
19	66093.12
30	40240.91
40	13929.52
50	1928.27
60	281.54
70	176.22
80	115.41
90	115.33

**GRÁFICO NO A2.28: HIDROGRAMA DE INGRESO RÍO SANTA CLARA
TRAMO 1 (VOLUMEN 1976).**



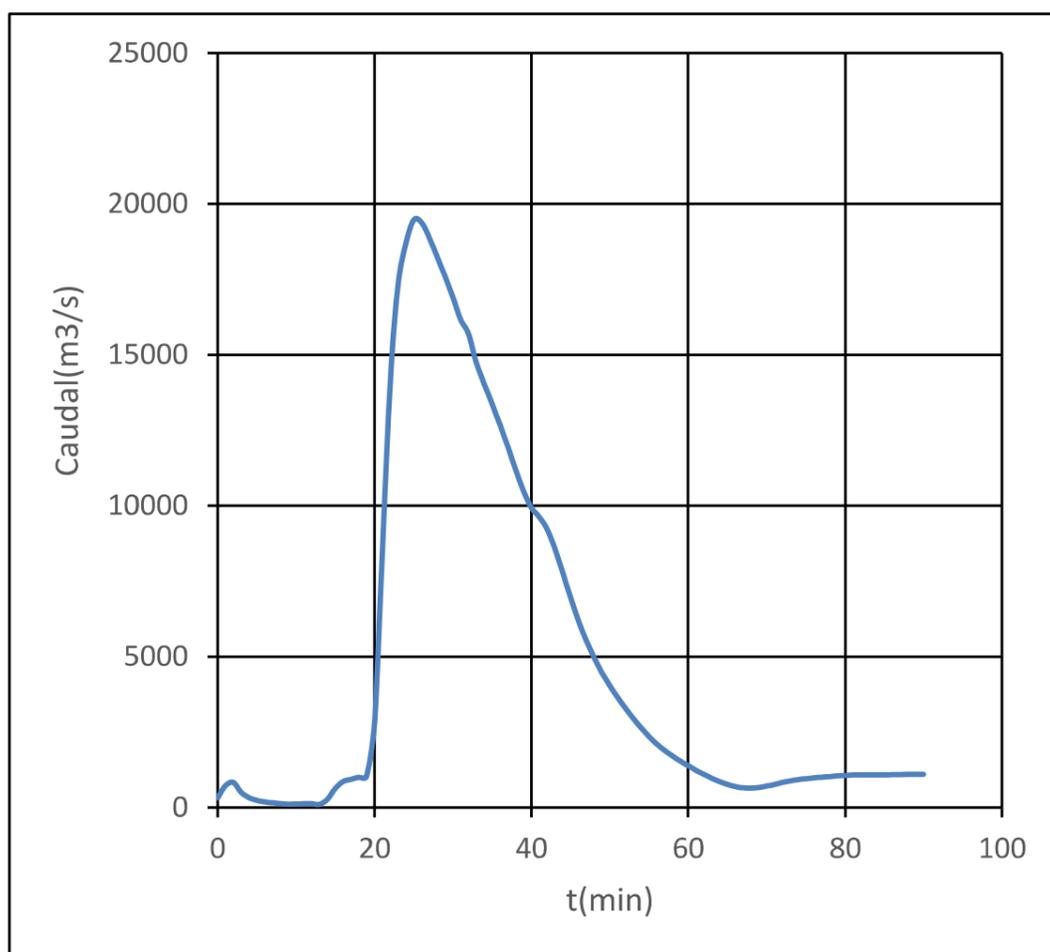
t (min)	Q (m3/s)
0	59.709
10	2776.308
19	19827.936
30	12072.273
40	4178.856
50	578.481
60	84.462
70	52.866
80	34.623
90	34.599

GRÁFICO NO A2.29: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO SANTA CLARA TRAMO 1 Y TRAMO 2 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).



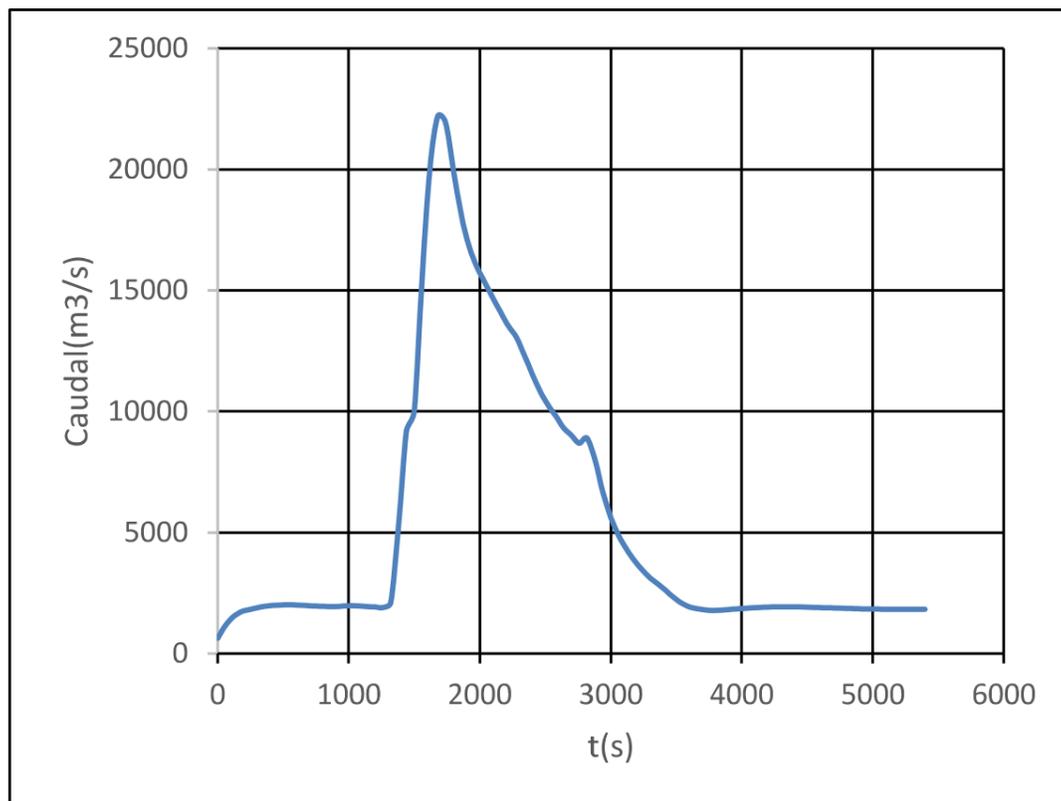
t (min)	Q (m3/s)
0	191.63
10	1033.29
20	15679.04
23	19609.07
30	15156.91
40	7752.67
50	2360.95
60	560.02
70	1002.97
80	1081.49
90	1108.46

GRÁFICO NO A2.30: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO SANTA CLARA TRAMO 2 Y TRAMO 3 RESPECTIVAMENTE (VOLUMEN 1976).



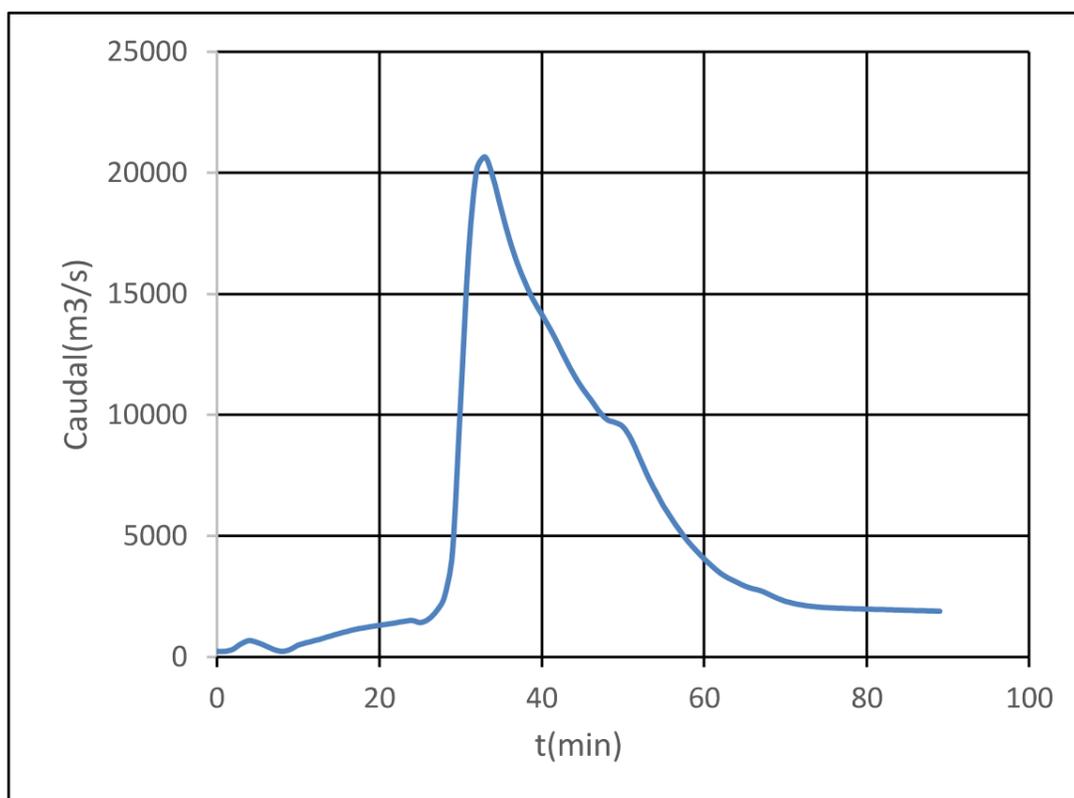
t (min)	Q (m3/s)
0	317.38
10	112.63
20	2921.42
25	19468.8
30	16894.93
40	9928.15
50	4025.33
60	1371.61
70	706.73
80	1062.83
90	1101.9

GRÁFICO NO A2.31: HIDROGRAMA DE SALIDA E INGRESO RÍO SANTA CLARA SECCIÓN SANGOLQUÍ- EJIDO E INGRESO EN EL MODELO BIDIMENCIONAL (VOLUMEN 1976).



t (s)	Q (m ³ /s)
0	624.98
600	2006.75
1200	1923.76
1800	20000.51
2100	14690.23
2400	11570.38
3000	5635.53
3600	1932.83
4200	1918.88
4800	1867.54
5400	1826.5

GRÁFICO NO A2.32: HIDROGRAMA DE SALIDA RÍO SANTA CLARA TRAMO 3 (VOLUMEN 1976).



t (min)	Q (m ³ /s)
0	236.19
10	481.88
20	1303.11
33	20658.13
40	14134.37
50	9502.63
60	4048.89
70	2298.39
80	1971.91
90	1879.6

ANEXO No 3

GUIA DEL USO DEL MODELO IBER PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA BIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI EN LA ZONA CONSOLIDA DE SANGOLQUÍ

Con el propósito de que aquellos interesados en el tema puedan tener una guía o una pequeña referencia sobre el uso del modelo numérico Iber para la simulación numérica, se plantea realizar un anexo con el proceso utilizado en el presente proyecto de titulación mismo que consta de las etapas de pre proceso y post proceso de Iber.

A3.1 GENERACIÓN DE DATOS

Para la modelación numérica se dispone de 2 datos fundamentales

- Modelo digital de Elevación del tramo en formato ASCII
- Hidrograma de Entrada en una tabla Excel.

Adicionalmente, en caso de disponer de una orto foto de la zona resulta ser de gran ayuda para la visualización de resultados.

Posiblemente el Dem en formato ASCII resulte ser el más complicado de realizarse, por ello se mostrarán los pasos realizados en el presente trabajo para la generación del mismo

A3.1.1 PASOS PARA LA GENERACIÓN DEL DEM EN FORMATO ASCII

1. **Cortar el Dem:** Como el DEM que disponemos posee información de un Área mayor a la de interés, lo cual representaría una explotación de recursos computacionales innecesaria, se debe cortar el Dem para obtener dicha información únicamente de la zona de estudio para lo cual, con la Ayuda del programa Arc Map realizamos lo siguiente:

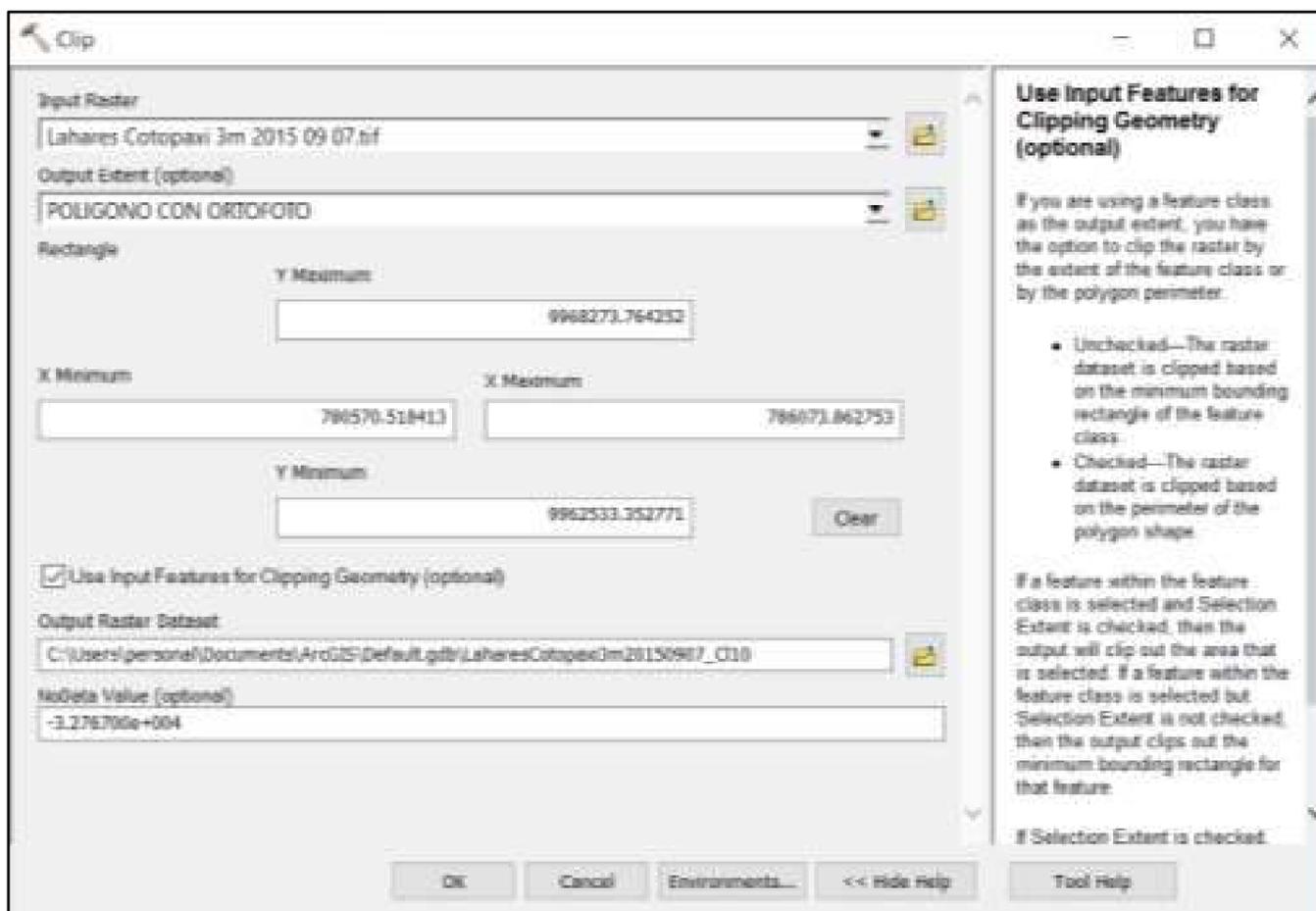
Primero crearemos un polígono en formato shape de la zona de estudio así: Catalog→Click derecho (new) →shape file→Polígono nos aparecerá una ventana en la cual daremos el nombre del polígono y adicionalmente debemos georeferenciar el mismo para ello presionamos edit→Projected coordinate systems→UTM→WGS 1984→Hemisferio Sur→Zona 17.

Una vez creado el polígono dibujamos el mismo de tal manera que ahora

podamos intersecar este con el DEM original y obtener el DEM de la zona de estudio para ello seguimos el siguiente proceso:

Arctoolbox→Raster →Raster Processing→Clip y nos aparecerá la siguiente pantalla:

GRÁFICO NO A3.1: PANTALLA DE INGRESO DEL CORTE DEL DEM



En la pantalla anterior deberá indicarse el nombre del DEM original y el nombre del polígono con el cuál queremos intersecar para obtener el nuevo DEM.

2. **Convertir el DEM a formato ASCII.**- Una vez que se genera el DEM de la zona el siguiente paso es convertir el mismo en formato ASCII para poder ingresarlo al modelo IBER. Para lo cual se procede de la siguiente forma: ArcToolbox→ Conversion Tools→ From Raster→ Raster to ASCII, nos aparecerá una pantalla en la cual debemos seleccionar el DEM cortado y el lugar donde queremos que se guarde el archivo en formato ASCII.

GRÁFICO NO A3.3: PARÁMETROS DE INGRESO DEL RTIN

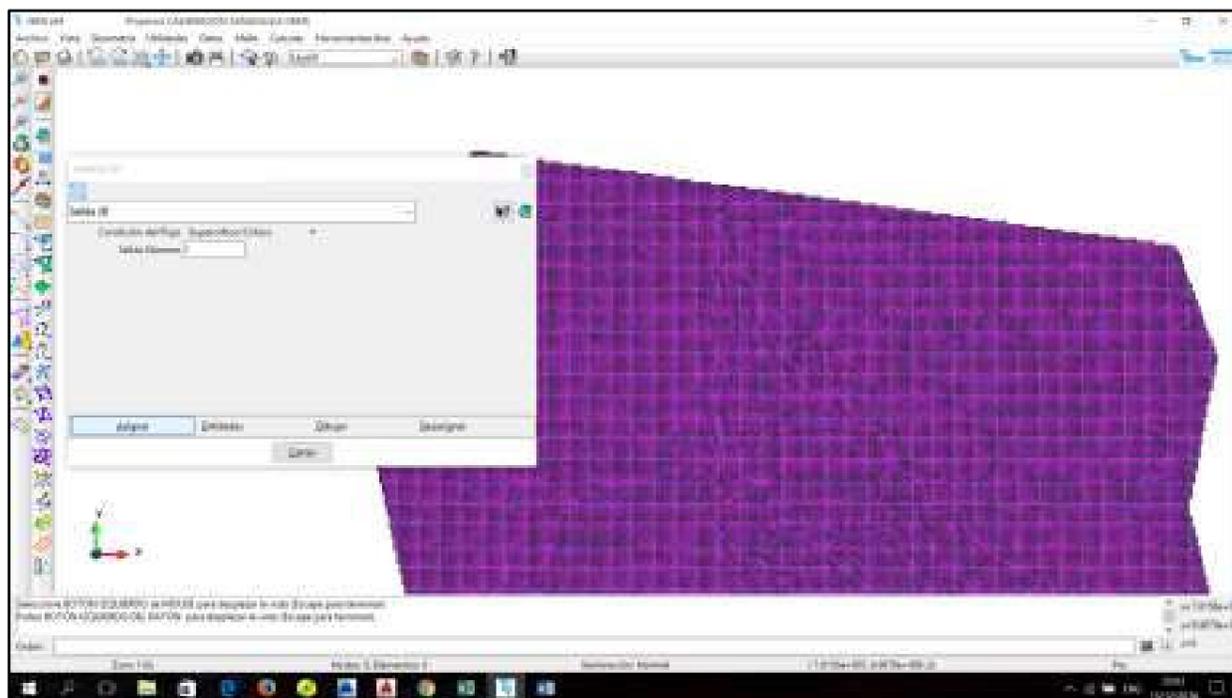


Después de aceptar aparecerá una malla indicando que el RTIN fue creado con éxito y a la vez se preguntará si deseamos colapsar la geometría, la colapsamos y esperamos, al finalizar el colapso preguntará si queremos malla la geometría a lo cual nos negaremos. Obteniendo así la geometría del tramo en estudio.

3. **Asignar Condiciones de Contorno:** El siguiente paso es la asignación de los parámetros y condiciones de contorno.

Condiciones de Entrada y Salida: Datos→Hidrodinámica→Condiciones de Contorno y en la pestaña desplegable elegimos entre Entrada 2D y Salida 2D, asignamos en el lugar correspondiente y aceptamos.

GRÁFICO NO A3.4: INGRESO DE CONDICIONES DE SALIDA



Condiciones Iniciales: Datos→Hidrodinámica→Condiciones Iniciales, ingresamos la condición inicial correspondiente y asignamos a toda la geometría.

Nota: El proceso de selección entidad por entidad puede resultar demasiado tedioso, para lo cual se recomienda seleccionar, un área en la cual se encuentre la línea de entidades a las que se quiere dar los atributos, dicha línea debe estar en el borde de la geometría, y posteriormente filtramos las superposición entidades así:

Click derecho en el área seleccionada (la cual se marcará de color rojo)→ventana de selección→quitar→super entidades→2 y aceptamos.

Al hacer esto se deseleccionará aquello que no nos interesa del polígono, quedando únicamente la línea de entidades en las cuales queremos asignar las condiciones del caso.

4. **Mallado:** Una vez asignadas las condiciones de contorno e iniciales continuamos con el mallado de la geometría así:

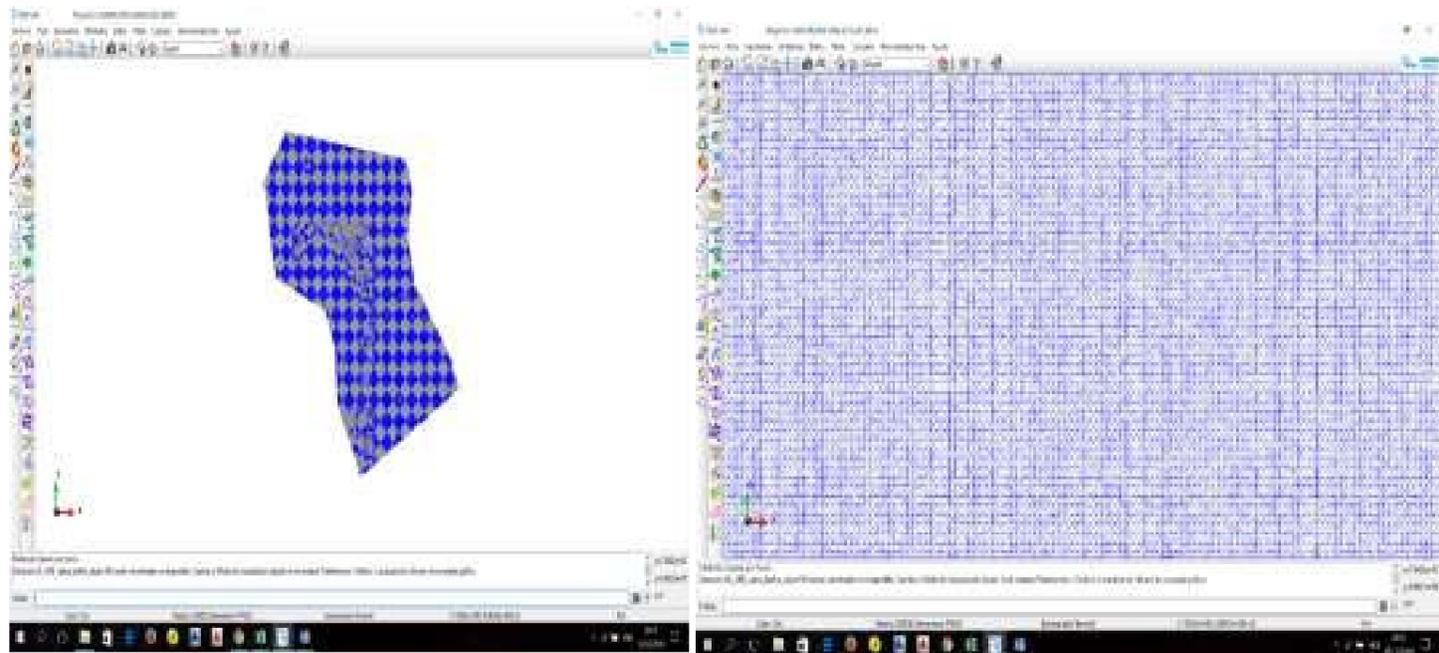
Malla→No estructurada→Asignar Tamaño de Superficies, e incicamos el tamaño de la malla se debe tener en cuenta que mientras más fina sea la malla mayor es el costo computacional del cálculo.

Posteriormente asignamos la malla a todo el modelo o si es el caso a una parte del mismo cuando se quiere diferenciar zonas con distintos mallados.

Para continuar con el proceso del mallado generamos la misma así:

Malla→Generar Malla esperamos y tendremos la malla del modelo.

GRÁFICO NO A3.5: MALLA DE CÁLCULO



- 5. Asignación del Coeficiente de Manning:** Este es uno de los parámetros que debe tener una mayor cautela, por ende su asignación debe realizarse con cierto criterio y experiencia, puesto que de este valor puede depender el éxito o no del modelo numérico.

Para asignar el coeficiente de Manning tenemos que seguir el siguiente proceso:

Datos→Rugosidad→Uso de Suelo y damos un valor al coeficiente de Manning en la ventana que nos aparecerá y posteriormente asignamos el mismo a la zona correspondiente.

- 6. Turbulencia:** En caso de que se desee evaluar la turbulencia asignaremos la misma de la siguiente manera: Datos→Turbulencia(k-eps) y nos aparecerá una pestaña, en la cual siguiendo un proceso similar a la asignación de las condiciones de contorno generales, asignamos las condiciones de entrada del modelo de turbulencia y las condiciones iniciales del mismo.

Nota: este paso solo debe ser realizado en caso de que se desee evaluar la turbulencia del flujo caso contrario debe obviarse y continuar con el paso 7.

- 7. Datos del Problema:** Con el coeficiente de rugosidad y el modelo de turbulencia se han asignado todos los datos necesarios para correr el modelo, Ahora es necesario indicar los parámetros de la simulación para esto vamos a:

Datos→Datos del Problema y nos aparecerá una pantalla, en la pestaña

Parámetros de tiempo indicamos:

- Instante Inicial: por lo General es 0.
- Tiempo máximo de Resultados: Este valor debe ser mayor al tiempo de duración del hidrograma de entrada.
- Intervalo de Resultados: El intervalo de tiempo en el que queremos ver los resultados.

En la pestaña General asignamos en el número de procesadores, el número máximo con el que disponga nuestro pc, esto con el objeto de optimizar los tiempos de cálculo.

En caso de que se evalúe la turbulencia dentro de la pestaña con este nombre, se debe indicar el modelo de turbulencia a usarse en la simulación (por lo general K- ϵ), en caso de no evaluarse la turbulencia del flujo, dejar el valor por defecto es decir sin turbulencia.

Finalmente dentro de la pestaña resultados indicamos los resultados que queremos obtener y Aceptamos, para posteriormente correr el programa con F5.

Iber permite observar el avance del proceso mediante una ventana de cálculo la cual nos permite conocer, el Caudal de Entrada, caudal de salida, tiempo de simulación etc.

Una vez finalizada la simulación o durante el cálculo podemos acceder al Post proceso de Iber, para visualizar los resultados obtenidos.

A3.1.3 POST PROCESO DE IBER

Dentro de la Barra de herramientas de Iber contamos con un Icono en forma de Arcoiris, el cual nos permite cambiar a la ventana de Post Proceso, la cual en un entorno muy amigable mostrará los resultados obtenidos en la modelación numérica.

GRÁFICO NO A3.6: INGRESO AL POST PROCESO DE IBER.

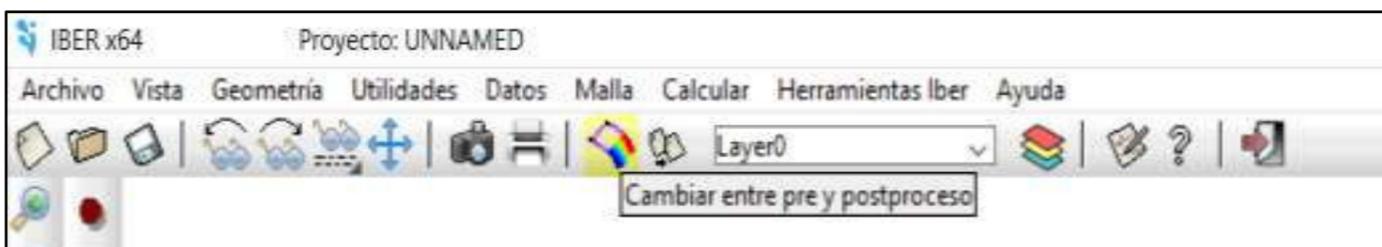
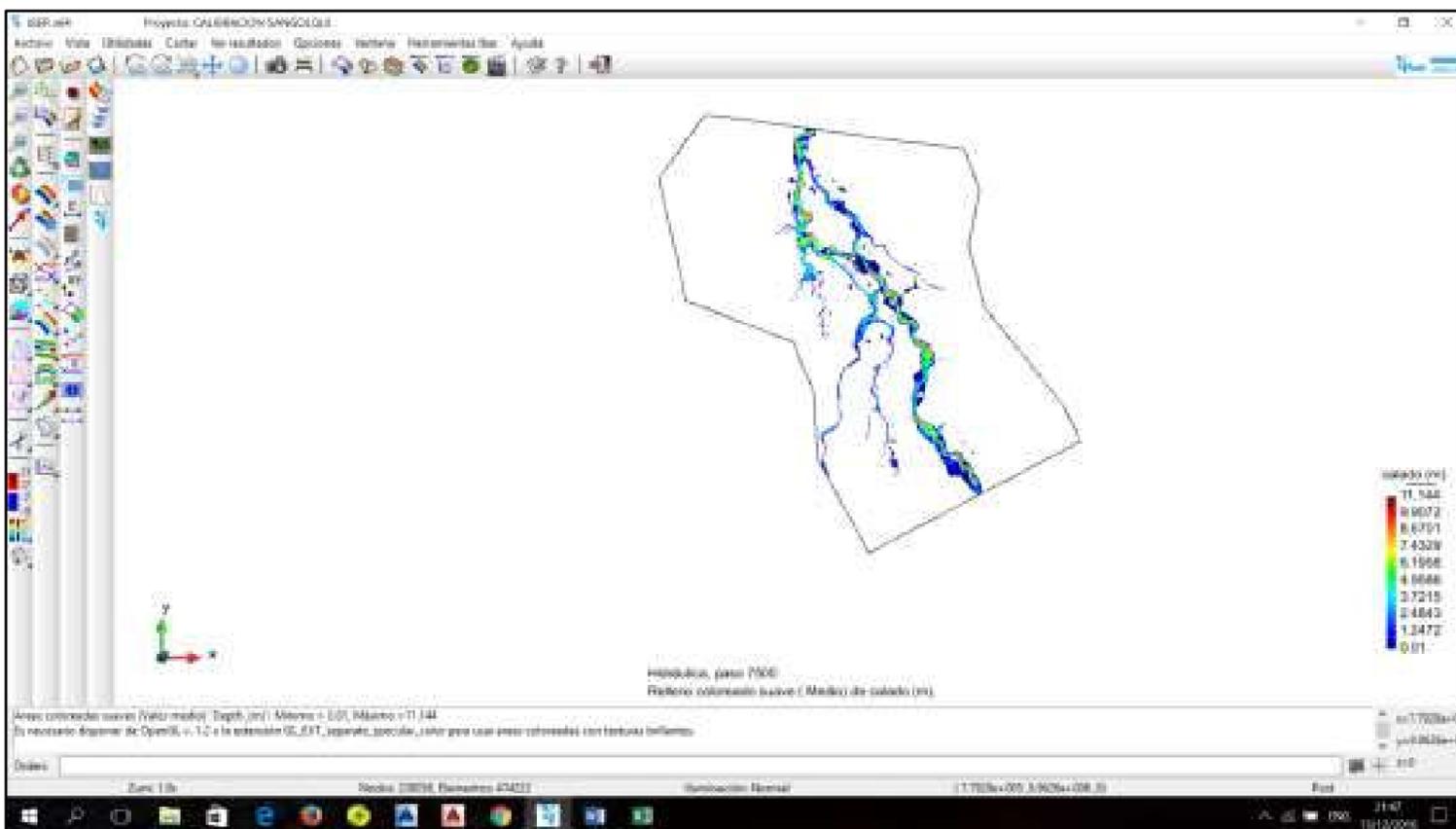


GRÁFICO NO A3.7: VENTANA DE POST PROCESO DE IBER



Para visualizar los mapas de resultados se debe acceder al icono de la barra de herramientas de Iber(Ventana de Resultados), la cual nos permitirá elegir el parámetro que queremos observar en el mapa.

GRÁFICO NO A3.7: ACCESO A LA VENTANA DE RESULTADOS DE IBER



Iber posee una serie de bondades que deben ser analizadas por el usuario, el presente anexo constituye una guía rápida para la modelación numérica, es por eso que se recomienda visitar la página oficial lberaula.com, en la cual se podrá tener una guía más extensa del programa, así como videos tutoriales e información extra del modelo numérico. Permitiendo al usuario familiarizarse de una manera muy óptima con el programa.

ANEXO No 4

MAPA DE COTAS DE AGUA MÁXIMAS

A4.1 MAPA DE COTAS MÁXIMAS DE AGUA EVENTO 1877

