

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“SIMULACIÓN DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI  
EN SUS DRENAJES DEL LADO NORTE CON EL USO DEL  
PROGRAMA HEC-RAS”**

**PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**ELABORADO POR:**

**LENIN RODRIGO CARRILLO GALLEGOS**

**SANGOLQUÍ, MAYO 2013**

## **RESUMEN**

El volcán Cotopaxi con 5897 m.s.n.m., es uno de los volcanes activos más altos del mundo y debido a sus características geológicas, es además, uno de los más peligrosos.

El presente trabajo de investigación pretende demostrar el latente peligro en el cual se encuentran los moradores de las ciudades de San Rafael, Sangolquí y demás poblados ubicados a lo largo de la cuenca norte del volcán, debido principalmente, a los lahares producidos por el mismo al momento de generarse una erupción volcánica.

Es por eso que, mediante la utilización del software para análisis hidráulicos HEC-RAS, especializado en calcular alturas de inundación y desbordamiento, se determinará los potenciales sectores en riesgo, con la finalidad de influir en la conciencia de los ciudadanos y de los Gobiernos Autónomos Descentralizados que los representan.

De esta manera se podrán tomar medidas urgentes, mismas que permitirán mitigar la vulnerabilidad existente, de tal forma que, en caso de ocurrir un nuevo episodio eruptivo, exista la preparación suficiente para poder salvar la mayor cantidad de vidas humanas.

## **ABSTRACT**

The Cotopaxi volcano with 5897 meters, is one of the highest active volcanoes, and because of the geological characteristics, is also one of the most dangerous.

This research aims to demonstrate the latent danger in which they are the inhabitants of the cities of San Rafael, Sangolquí and other villages located along the northern basin of the volcano, due mainly to lahars produced at the moment when it generates a volcanic eruption.

That's why, through the use of software for hydraulic analysis HEC-RAS, specialized to calculate flood heights and overflowing, will determine the potential risk sectors, in order to influence the conscience of citizens and Autonomous Governments that represent them.

Thus it may take urgent measures, same as to permit us to mitigate existing vulnerability and in case of exist a new eruptive episode, save a lot human lives.

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. LENIN RODRIGO CARRILLO GALLEGOS como requerimiento parcial para a la obtención del título de INGENIERO CIVIL.

Sangolquí, 8 de mayo del 2013.

-----

Dr. Theófilos Toulkeridis.

**Director de Tesis**

-----

Ing. Eduardo Aguilera.

**Codirector de Tesis**

-----

Ing. Jorge Zúñiga

**Director de la Carrera de Ingeniería Civil**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Carlos Carrillo y María Luisa Gallegos, por darme siempre su apoyo incondicional, por sacrificar todo lo que fuera necesario con el único fin de verme salir adelante y sobre todo, por enseñarme los valores del respeto, la honestidad y la humildad, que son sin duda alguna, los pilares que me permitirán ser una persona incorruptible y de mucha dignidad.

A mis hermanos, en especial a mi hermano Carlos, por haber asumido el papel de padre y madre durante mi niñez, por haberme educado durante esta etapa de mi vida, por apoyarme en todos mis sueños y porque además de ser mi hermano, es mi mejor amigo.

A mis sobrinos, sobre todo a María Alejandra, por permitirme crecer a su lado, por ser la mujer más dulce, inteligente y valiente que conozco y porque siempre la llevo en mi corazón.

**LENIN CARRILLO.**

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A mi director y codirector de tesis.**

Dr. Theófilos Toulkeridis e Ing. Eduardo Aguilera, por brindarme todo el apoyo y conocimientos necesarios, mismos que, permitieron cumplir los objetivos planteados del presente proyecto de investigación de una manera clara y concisa.

### **Al Dr. Washiton Sandoval.**

Por demostrar ser un excelente catedrático, por ser una persona totalmente asequible y por darme toda su ayuda incondicional durante el proceso de investigación del presente proyecto.

### **Al Ing. Jorge Zúñiga.**

Director de la Carrera de Ingeniería Civil y amigo. Gracias por dedicar toda la atención posible a los problemas de sus estudiantes, por motivarnos a seguir adelante y por mostrar un extraordinario liderazgo conduciendo la Carrera de Ingeniería Civil de una manera justa, honesta y desinteresada.

**A mi hermana Betty Carrillo.**

Por enseñarme que cualquier sueño puede ser alcanzado en base a un trabajo duro, por enseñarme la importancia de ayudar al que más lo necesita sin esperar recibir algo a cambio y por hacerme sentir un hermano orgulloso.

**A todos los investigadores.**

Mencionados en las referencias y en la bibliografía. Gracias por dedicar gran parte de su tiempo en estudiar el comportamiento eruptivo del volcán Cotopaxi, esta información, permitió desarrollar de mejor manera el presente proyecto de investigación.

**A mis amigos.**

Paúl Dávila, Carlos Sánchez, Andrés Guerrón y Jorge Cadena, por estar siempre pendientes de los avances de mi proyecto de tesis, por permitirme formar parte de sus vidas, pero sobre todo, por darme su apoyo en las peores y mejores circunstancias.

**A mi profesor.**

Santiago Rubio (Poncho), por fortalecer mi cuerpo, mente y espíritu con sus enseñanzas, por permitirme formar parte de la gran familia "RumiZumbi" y por demostrar ser una persona de excelentes principios y valores éticos.

**LENIN CARRILLO.**

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**INGENIERÍA CIVIL**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**LENIN RODRIGO CARRILLO GALLEGOS**

**DECLARO QUE:**

El proyecto de grado denominado **“SIMULACIÓN DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI EN SUS DRENAJES DEL LADO NORTE CON EL USO DEL PROGRAMA HEC-RAS”**, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas indicadas, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 8 de mayo del 2013.

EL AUTOR

LENIN RODRIGO CARRILLO GALLEGOS

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**  
**INGENIERÍA CIVIL**  
**AUTORIZACIÓN**

Yo, LENIN RODRIGO CARRILLO GALLEGOS

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación en la biblioteca virtual de la institución, el proyecto titulado “**SIMULACIÓN DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI EN SUS DRENAJES DEL LADO NORTE CON EL USO DEL PROGRAMA HEC-RAS**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 8 de mayo del 2013.

EL AUTOR

LENIN RODRIGO CARRILLO GALLEGOS

# **HOJA DE LEGISLACIÓN DE FIRMAS**

**ELABORADO POR**

-----  
LENIN RODRIGO CARRILLO GALLEGOS

**DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

-----  
ING. JORGE ZÚÑIGA GALLEGOS

**DIRECTOR DE LA UNIDAD DE ADMISIÓN Y REGISTRO**

-----  
ING. AMPARITO NAVAS P.

## INDICE

TEMA		PÁGINA
<b>CAPÍTULO I</b>		
1.	GENERALIDADES	1
1.1.	ANTECEDENTES	1
1.2.	OBJETIVO DEL PROYECTO EL VOLCÁN COTOPAXI Y SU PROCESO	5
1.3.	ERUPTIVO EL RIESGO	7
1.3.1.	VOLCÁNICO	7
1.3.2.	FENÓMENOS ERUPTIVOS DEL VOLCÁN COTOPAXI	10
1.3.2.1.	CAÍDA DE PIROCLÁSTOS Y CENIZA	12
1.3.2.2.	FLUJOS PIROCLÁSTICOS	15
1.3.2.3.	DERRAMES DE LAVA	16
1.3.2.4.	GASES VOLCÁNICOS Y VAPOR DE AGUA	17
1.3.2.5.	SISMOS VOLCÁNICOS	18
1.3.2.6.	FLUJOS DE LODO O LAHARES	20
1.4.	EVENTOS HISTÓRICOS IMPORTANTES	25
1.4.1.	SIGLO XVII	27
1.4.2.	SIGLO XIX	27
1.4.3.	LA GRAN ERUPCIÓN DE 1877	28
<b>CAPÍTULO II</b>		
2.	PROGRAMA COMPUTACIONAL HEC-RAS	34
2.1.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	34
2.1.1.	BASE TEÓRICA DEL HEC-RAS	39
2.1.1.1.	ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL PERFIL BÁSICO	40
2.1.1.2.	SUBDIVISIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES PARA LA TRANSPORTACIÓN DE CÁLCULO	42
2.1.1.3.	EVALUACIÓN DE LA CARGA DE ENERGÍA CINÉTICA MEDIA	43
2.1.1.4.	PÉRDIDAS POR FRICCIÓN	45
2.1.1.5.	COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN Y EXPANSIÓN	46
2.1.2.	APLICACIONES	48
2.1.3.	ACTIVIDADES PARA LA EJECUCIÓN CONCEPTUALIZACIÓN PARA LOS LAHARES O FLUJOS DE	49
2.1.3.1.	LODO	50
2.1.3.2.	DESCRIPCIÓN Y MANEJO DEL SOFTWARE HEC-RAS	50
2.1.3.3.	MODELACIÓN HIDRÁULICA EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL HEC-	51
2.1.3.4.	RAS	51
2.2.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SOFTWARE HEC-RAS	52
2.2.1.	VENTAJAS DEL SOFTWARE HEC-RAS	52
2.2.2.	DESVENTAJAS DEL SOFTWARE HEC-RAS	54

### **CAPÍTULO III**

3.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	55
3.1.	DATOS HIDROLÓGICOS	55
3.2.	RECORRIDO DEL FLUJO DE LODO	59
	DATOS	
3.3.	TOPOGRÁFICOS	65
3.4.	DATOS HIDRÁULICOS	69
3.4.1.	ÁREA Y VOLUMEN DEL GLACIAR DEL VOLCÁN COTOPAXI	70
3.4.1.1.	ÁREA DEL GLACIAR PARA LA CUENCA NORTE	70
3.4.1.2.	VOLUMEN DEL GLACIAR PARA LA CUENCA NORTE	74
	ÁREA Y VOLUMEN PARA EL RÍO	
3.4.1.2.1.	PITA	76
3.4.1.2.2.	DETERMINACIÓN DEL ÁREA	76
3.4.1.2.3.	DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN	78
	DETERMINACIÓN DEL CAUDAL PARA EL RÍO	
3.4.2.	PITA	78
3.4.3.	COEFICIENTE DE MANNING	81

### **CAPÍTULO IV**

4.	SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS DE LODO	83
4.1.	CONDICIONES DE ENTRADA	83
4.1.1.	CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO	84
4.1.2.	INTRODUCCIÓN DE DATOS GEOMÉTRICOS	88
4.1.2.1.	BREVE INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA ARCGIS	89
	DESCRIPCIÓN DE LAS APLICACIONES	
4.1.2.1.1.	COMUNES	90
4.1.2.2.	FUNCIONALIDAD DEL PROGRAMA HEC-geoRAS	94
4.1.2.3.	MANEJO DEL PROGRAMA ARCGIS 10 Y HEC-geoRAS 10 PARA LA EXPORTACIÓN DE DATOS GEOMÉTRICOS A HEC-RAS	96
4.1.2.3.1.	MÉTODO DE USO DEL PROGRAMA HEC-geoRAS	103
4.1.2.3.1.1.	DIGITALIZACIÓN DE LA CORRIENTE CENTRAL (STREAM CENTERLINE)	105
4.1.2.3.1.2.	DIGITALIZACIÓN DE LOS BANCOS DEL RÍO (BANKS LINES)	108
4.1.2.3.1.3.	DIGITALIZACIÓN DE LOS CIRCUITOS DE FLUJO (FLOW PATH CENTERLINES)	109
4.1.2.4.	GENERACIÓN DE LOS PERFILES TRANSVERSALES	112
4.1.2.4.1.	DIGITALIZACIÓN DE LOS PERFILES TRANSVERSALES (XS CUT LINES) CON EL PROGRAMA HEC-geoRAS	113
4.1.2.4.1.1.	EXPORTACIÓN DE LOS DATOS GEOMÉTRICOS	115
4.1.2.4.2.	INTRODUCCIÓN DE LOS PERFILES TRANSVERSALES MEDIANTE EL PROGRAMA HEC-RAS	119
	INTRODUCCIÓN DE LOS CAUDALES Y CONDICIONES DE FLUJO	
4.1.3.	FLUJO	121
4.2.	PARÁMETROS DE SALIDA	125
4.3.	CALIBRACIÓN DEL MODELO	127

## **CAPÍTULO V**

5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	130
5.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL CAUCE DEL RÍO PITA	131
5.1.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LA ZONA DE SINCHOLAGUA	134
5.1.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LA ZONA DE PÍNTAG	136
5.1.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LA ZONA DE SANGOLQUÍ	141
5.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL CAUCE DEL RÍO SANTA CLARA	145
5.2.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LA ZONA DE PÍNTAG	146
5.2.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LA ZONA DE SANGOLQUÍ	148

## **CAPÍTULO VI**

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	155
6.1.	CONCLUSIONES	155
6.2.	RECOMENDACIONES	158
6.3.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162
6.4.	BIBLIOGRAFÍA	163

## LISTADO DE TABLAS

<b>NOMBRE</b>	<b>PÁGINA</b>
Tabla 2.1.1.5.1: Valores del coeficiente de contracción y expansión	46
Tabla 3.1.1: Caudales Mínimos del Río Pita	56
Tabla 3.1.2: Caudales Medios del Río Pita	57
Tabla 3.1.3: Caudales Máximos del Río Pita	58
Tabla 3.3.1: Perfil Transversal del Río Pita Punto 1 Aguas Arriba	67
Tabla 3.3.2: Perfil Transversal del Río Sta. Clara Aguas Abajo	68
Tabla 3.4.1.1.1: Estimación de las área y reducción del glaciar del volcán Cotopaxi	73
Tabla 3.4.1.1.2: Resultados del área del glaciar para el 2011	74
Tabla 3.4.1.2.1: Áreas del glaciar que se dirigen hacia el Río Pita y Salto	77
Tabla 3.4.2.1: Resumen de los cálculos hidráulicos	80
Tabla 5.1.1: Perfiles transversales o puntos de control del Río Pita en la zona de Sincholagua	131
Tabla 5.1.2: Perfiles transversales o puntos de control del Río Pita en la zona de Píntag	132
Tabla 5.1.3: Perfiles transversales o puntos de control del Río Pita en la zona de Sangolquí	133
Tabla 5.1.4: Indicativo de las alturas de inundación considerados para señalar la afectación de los diferentes sectores	133
Tabla 5.1.1.1: Resumen de la de Afectación en el Área de Sincholagua	136
Tabla 5.1.2.1: Resumen de Análisis de Afectación en la Zona de Píntag	140
Tabla 5.1.3.1: Resumen de Análisis de Afectación en la Zona de Sangolquí	144
Tabla 5.2.1: Perfiles transversales o puntos de control del Río Santa Clara en la zona de Píntag	145
Tabla 5.2.2: Perfiles transversales o puntos de control del Río Santa Clara en la zona de Sangolquí	146
Tabla 5.2.1.1: Resumen de Análisis de Afectación en la Zona de Píntag	148
Tabla 5.2.2.1: Resumen de Análisis de Afectación en la Zona de Sangolquí	151
Tabla 5.2.2.2: Resumen de afectación de los lahares por el cauce del Río Pita	152
Tabla 5.2.2.3: Resumen de afectación de los lahares por el cauce del Río Santa Clara.	153

## LISTADO DE FIGURAS

<b>NOMBRE</b>	<b>PÁGINA</b>	
Figura 1.1.1:	Vista del flanco norte del volcán Cotopaxi	1
Figura 1.1.2:	Cráter del volcán Cotopaxi con una emisión de gases fumarólicos	2
Figura 1.1.3:	El volcán Cotopaxi y sus drenajes a su alrededor	4
Figura 1.3.1.1:	Gráfico de sobre visión de amenazas volcánicas	7
Figura 1.3.2.1:	Yanasacha	11
Figura 1.3.2.1.1:	Ceniza acumulada después de una emisión del volcán Tungurahua	14
Figura 1.2.1.2.1:	Flujos piroclásticos en acción en volcán Tungurahua	15
Figura 1.3.2.3.1:	Derrame de lava volcán Reventador	17
Figura 1.3.2.4.1:	Volcán Cotopaxi y parte de su glaciar	18
Figura 1.3.2.5.1:	Tipos de sismos volcánicos registrados en el volcán Cotopaxi	19
Figura 1.3.2.6.1:	Roca llamada Chilintrosa al norte de Mulaló, parte sur del volcán Cotopaxi transportada con flujos de lodo	20
Figura 1.3.2.6.2:	Partes características de un lahar	22
Figura 1.4.3.1:	Espesor de ceniza y otros piroclastos algunos de hasta 1.5m por erupción anterior del volcán Cotopaxi	32
Figura 2.1.1:	Entorno gráfico del programa HEC-RAS	39
Figura 2.1.1.1.1:	Diagrama con los términos de la ecuación de energía y ubicación de cada término utilizado en la ecuación (2.1)	41
Figura 2.1.1.2.1:	Gráfico demostrativo para el transporte de la subdivisión de las secciones transversales, subdivisión en áreas overbank utilizado por el programa HEC-RAS para sección izquierda, derecha y principal	43
Figura 2.1.1.3.1:	Energía Cinética Media para una sección transversal con canal principal y un desbordamiento derecho	44
Figura 2.1.2.1:	Ejemplo del modelamiento hidráulico con el programa HEC-RAS	49
Figura 3.2.1:	(SIM-LAHAR) Resumen datos de salida del Río Pita	61
Figura 3.2.2:	(SIM-LAHAR) Resumen datos de salida del Río Sta. Clara	61
Figura 3.2.3:	Inicio de los lahares, casi 20 millones de m <sup>3</sup>	62
Figura 3.2.4:	Formación lahares, casi 25 millones de m <sup>3</sup>	63
Figura 3.2.5:	Más de 40 millones de m <sup>3</sup> . Luego de 6 a 15 minutos	63
Figura 3.2.6:	Más de 40 millones de m <sup>3</sup> . Luego de 16 a 28 minutos	64
Figura 3.2.7:	Más de 40 millones de m <sup>3</sup> . Luego de 29 a 35 minutos	64
Figura 3.3.1:	Perfil Transversal del Río Pita en el primer punto aguas arriba	68
Figura 3.3.2:	Perfil Transversal del Río Sta. Clara en el sexto punto aguas abajo	69
Figura 3.4.1.1.1:	Distribución del área de los glaciares del Cotopaxi según Jordan	71
Figura 3.4.1.1.2:	Distribución del área de los glaciares del Cotopaxi según Cáceres	72
Figura 3.4.2.1:	Hidrograma de Flujo para la Cuenca Norte del Volcán Cotopaxi	79
Figura 4.1.1.1:	Restricción por uso del separador decimal	84
Figura 4.1.1.2:	Ventana principal del HEC-RAS	84

Figura 4.1.1.3:	Barra de Menú Principal e Iconos de la ventana principal	85
Figura: 4.1.1.4:	Ventana para crear un nuevo proyecto	87
Figura 4.1.2.1.1.1:	Interfaz gráfica de la aplicación ArcMap y sus ventanas principales	90
Figura 4.1.2.1.1.2:	Vista de la ventana ArcCatalog lanzada desde la aplicación ArcMap	91
Figura 4.1.2.1.1.3:	Vista de la ventana ArcToolbox lanzada desde la aplicación ArcMap	92
Figura 4.1.2.1.1.4:	Vista del modelamiento 3D del Mapa Volcán Cotopaxi generado a partir de un TIN. Escala 1:50000	94
Figura 4.1.2.2.1:	Vista de la barra de herramientas de HEC-geoRAS activada en la aplicación ArcMap	95
Figura 4.1.2.3.1:	Base de datos del mapa digital de la zona de Sincholagua y selección de las capas correspondientes a las curvas de nivel y ríos de la zona	97
Figura 4.1.2.3.2:	Vista del archivo "unidascartas2.dwg", en el área de visualización de la aplicación ArcMap. Escala 1:50000	98
Figura 4.1.2.3.3:	Vista de la ventana "Create TIN", donde se muestra la dirección, el nombre y la altura de campo del archivo TIN que se va a crear	99
Figura 4.1.2.3.4:	Vista del archivo TIN, creado a partir de la capa "unidascartas2.dwg" que contiene los mapas de las áreas de Sincholagua, Pintag y Sangolquí unidas. Escala 1:50000	100
Figura 4.1.2.3.5:	Vista del cauce del río Pita en el área de visualización de la aplicación ArcMap, creada mediante la selección de datos de la tabla de atributos de cada archivo	102
Figura 4.1.2.3.1.1:	Vista de las capas geométricas para el pre-procesamiento de datos hidráulicos abierta desde la barra de herramientas de HEC-geoRAS	104
Figura 4.1.2.3.1.1.1:	Vista de la Barra de Edición, Ventana Crear Funciones, Ventana Herramientas de Construcción y formación de la capa "Rio_Pita" como corriente central del flujo, dibujada desde aguas arriba hacia aguas abajo del cauce	106
Figura 4.1.2.3.1.1.2:	Vista de las opciones de atributos de la capa "Stream Centerline"	108
Figura 4.1.2.3.1.3.1:	Vista de ubicación del icono "Select Flowpath and Assign LineType Attributes" en la barra de herramientas de HEC-geoRAS y su ventana de atributos	111
Figura 4.1.2.3.1.3.2:	Esquema fluvial del río Pita esquematizado a partir de las diferentes capas de HEC-geoRAS en el área de visualización de la aplicación ArcMap. Escala 1:50000	112
Figura 4.1.2.4.1.1:	Vista del Río Pita con todas las capas o datos geométricos dibujados en ArcMap. Escala 1:50000	115
Figura 4.1.2.4.1.2:	Vista de la ventana "Layer Setup" y activación de la capa Circuitos	116
Figura 4.1.2.4.1.3:	Error en la exportación de datos geométricos al programa HEC-RAS por falla en el archivo (ESRI XML)	117
Figura 4.1.2.2:	Primera sección transversal del Río Pita vista desde la ventana	120

	“Cross Section” del programa HEC-RAS	
Figura 4.1.3.1:	Vista de la Ventana “Steady Flow Data” (Flujo de Datos Constantes) y la introducción de varios caudales en (m <sup>3</sup> /s)	122
Figura 4.1.3.2:	Vista de la ventana “Boundary Conditions” (Condiciones de Contorno), donde se muestra la selección de la condición de Calado Crítico tanto aguas arriba como aguas abajo del cauce	123
Figura 4.1.3.3:	Vista de la ventana “Steady Flow Analysis” (Análisis de Flujo Permanente), antes de ejecutar la corrida del programa y selección del régimen mixto	124
Figura 4.2.1:	Desfase de la pendiente del río pita con respecto a la pendiente del flujo establecida por los caudales introducidos vista desde la ventana “Perspective Plot” (Gráfico en Perspectiva) del programa HEC-RAS	125
Figura 4.2.2:	Ilustración del corte longitudinal del río Pita donde se observa el embalse de la inundación como resultado de la simulación vista desde la ventana “Profile Plot” del programa HEC-RAS	126
Figura 4.3.1:	Ilustración del corte longitudinal del calibrado, donde se observa la pendiente del flujo de lodo en concordancia con la pendiente del río Pita como resultado de la simulación vista desde la ventana “Profile Plot” del programa HEC-RAS	128
Figura 5.1.2.1:	Vista del punto de control 17 desde la ventana “Cross Section” del programa HEC-RAS, correspondiente al sector de la Caldera e indicación de los 37 metros de embalse en el punto	139
Figura 5.1.3.1:	Vista del Flujo de Lodo que se moviliza por el río Pita desde la ventana “Perspective Plot” del programa HEC-RAS	144

# CAPÍTULO I

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. ANTECEDENTES

El volcán Cotopaxi es un estratovolcán de 5.897 m de elevación medida desde el nivel del mar, es uno de los volcanes activos más altos del mundo, lo superan volcanes como el nevado “Ojos del Salado”, que posee una altura de 6.893 m.s.n.m. (Aguilera y Toulkeridis, 2005) y se encuentra sobre los límites entre Argentina y Chile.

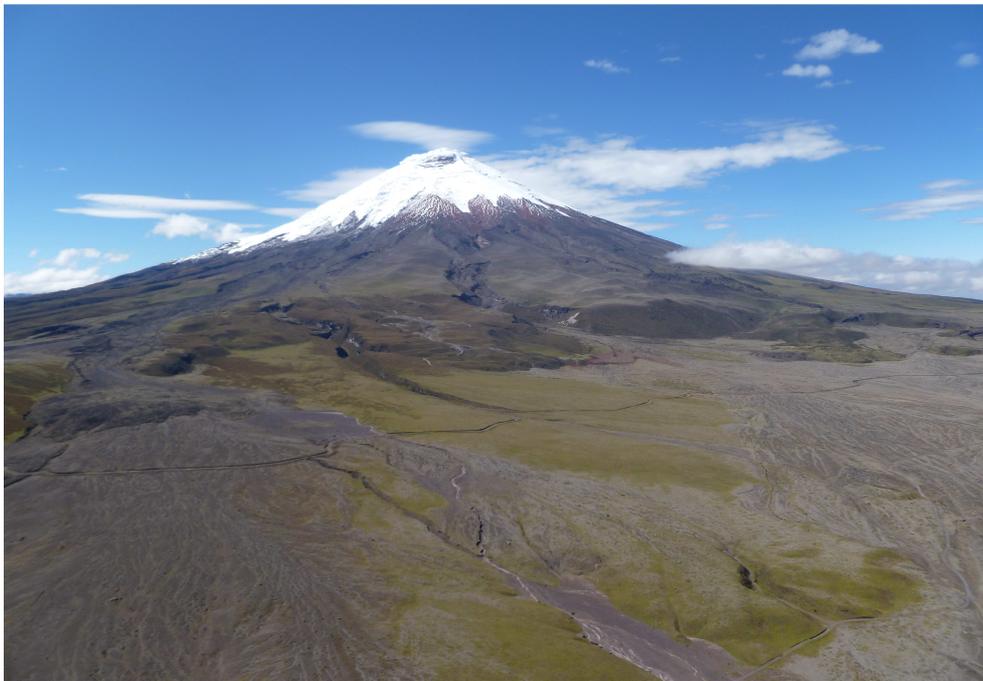


Figura. 1.1.1: Vista del flanco norte del volcán Cotopaxi.

Está ubicado a unos 50 km al sureste de la capital del Ecuador en las coordenadas geográficas 0° 40' 0" S; 78° 26' 0" W (centro del cráter), se eleva majestuosamente por encima de las montañas andinas. Posee un gran cono casi simétrico y truncado con un diámetro de 600 x 800 m y un cráter con profundidad de más de 300 m, ocupado por un cono piroclástico pequeño (Aguilera et al; 2004). La parte superior del volcán se encuentra cubierta por un glaciar de aproximadamente 20 km<sup>2</sup> y 1 km<sup>3</sup> de volumen (Mothes et al; 1998), que se extiende desde los 4500 m hasta la cumbre.

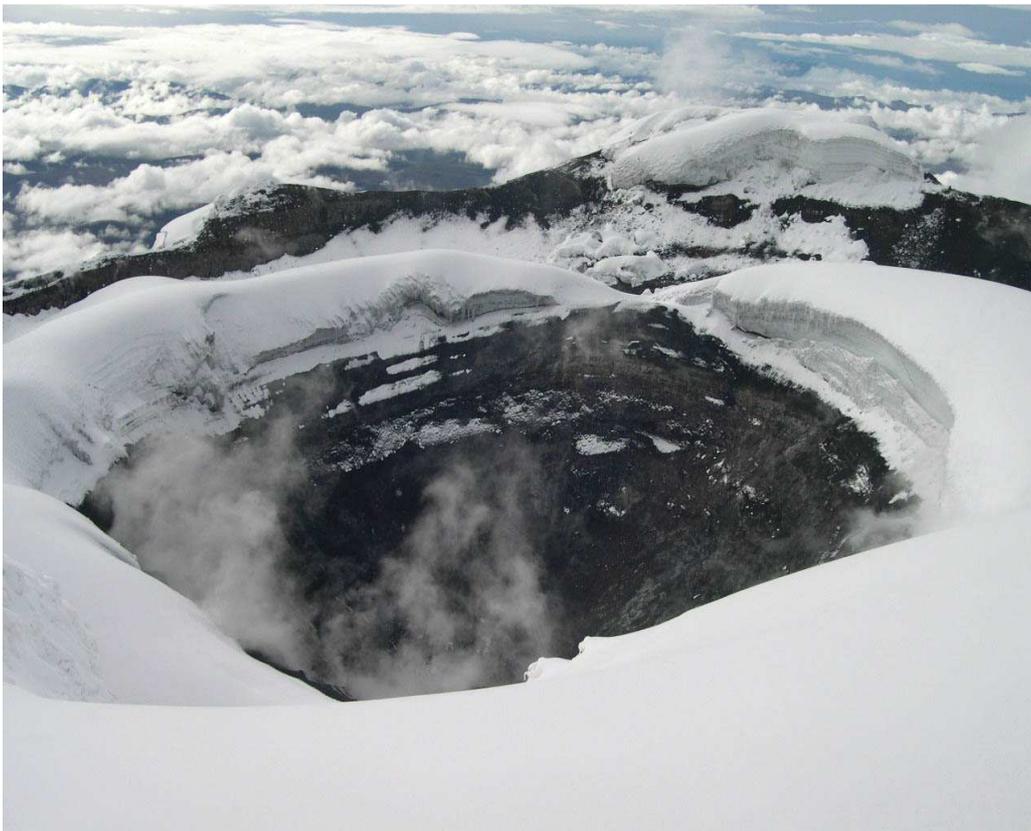


Figura 1.1.2: Cráter del volcán Cotopaxi con una emisión de gases fumarólicos, Fuente:

Toulkeridis, 2005.

El volcán Cotopaxi se originó a mediados del pleistoceno sobre capas volcánicas más antiguas de los volcanes Morurco y Chalupas, y en vista que datos geológicos recientes demuestran que es un volcán bimodal, ha presentado erupciones de intensidad moderada (productos de composición geoquímicas andesítica, Índice de Explosividad Volcánica (VEI) entre 2-4), y erupciones riolíticas muy grandes, con una gran disposición de piroclastos (VEI comprendida entre 5-6).

Se estima que la energía liberada en los episodios eruptivos oscila entre  $10^{15}$  y  $10^{19}$  Joules, lo cual es equivalente a un terremoto de entre 6.3 y 8.5 en la escala de magnitud Richter y mayor a una bomba nuclear de potencia mediana cuya energía es de  $10^{14}$  Joules (Aguilera y Toulkeridis, 2005). Los eventos explosivos de baja magnitud han originado, depósitos de lapilli (material fragmentario de 2 mm a 64 mm de diámetro), ceniza (material fragmentario de hasta 2 mm) y flujos piroclásticos con un volumen de aproximadamente  $1 \text{ km}^3$ . Las fases plinianas del volcán se han caracterizado por presentar caudales masivos de hasta  $4 \times 10^8 \text{ kg/s}$  (Aguilera et al; 2004).

En el volcán Cotopaxi se originan tres grandes drenajes: los ríos Tambo-Tamboyacú-Napo hacia el este, Pita-Guayllabamba-Esmeraldas al norte y Cutuchi-Pastaza al sur. El sistema fluvial Tambo-Tamboyacú-Napo desciende por el flanco oriental para desembocar en el Río Amazonas; el Pita-Guayllabamba-Esmeraldas fluye hacia el norte por el valle interandino, corta la Cordillera Occidental y desciende hasta la ciudad de Esmeraldas, para desembocar en el Océano Pacífico; el Río Cutuchi-Pastaza, fluye hacia el sur, por el Valle

Interandino y luego hacia el este, atravesando la Cordillera Real convirtiéndose en un afluente del Río Amazonas (Mothes et al; 1998).

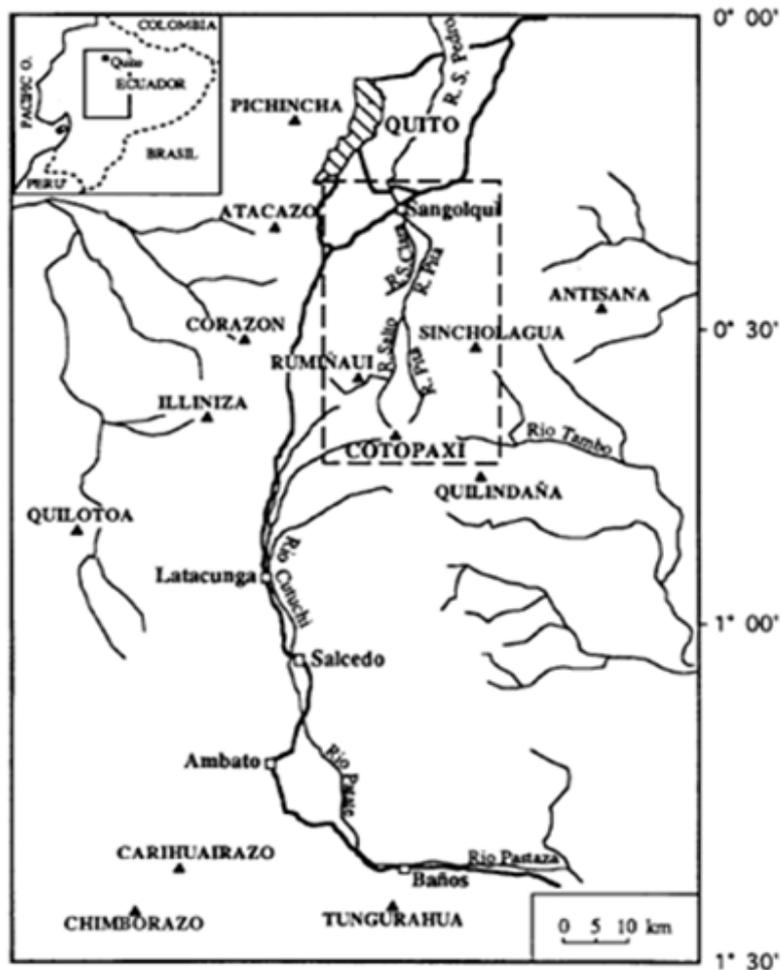


Figura 1.1.3: El volcán Cotopaxi y sus drenajes a su alrededor; Fuente: Aguilera, 2004

Estas vertientes se convierten en vías por las que transitan los flujos de lodo o lahares que se forman por la erupción del volcán, los cuales cruzan por ciudades y poblados, como por ejemplo las ciudades de Latacunga y Salcedo que se encuentran cerca del Río Cutuchi, mientras que, Sangolquí, San Rafael y

Tumbaco están asentados cerca de los ríos Pita, Santa Clara y San Pedro. Poblaciones que han experimentado en las últimas décadas un gran desarrollo y para el caso de la cuenca norte, Sangolquí y San Rafael se han convertido en zonas de expansión de la ciudad de Quito.

Desafortunadamente este desarrollo ha afianzado una alarmante despreocupación sobre el tema por parte de los ciudadanos que habitan estos sectores y por las entidades públicas que las administran.

El Cotopaxi, cuya última fase eruptiva ocurrió en 1877 causó aproximadamente un millar de víctimas a pesar de haber afectado zonas rurales, lo que para ese entonces representó pérdidas humanas en un alto porcentaje, ya que en ese año la población total del Ecuador no superaba 450000 habitantes.

En los últimos 2200 años el volcán experimentó 19 fases eruptivas con alto impacto de destrucción a sus alrededores. Desde el último evento eruptivo del año 1877, ha ocurrido más de una actividad fumarólica y pequeñas explosiones con emisiones de gases. En épocas recientes se han presentado incrementos de su actividad sísmica, siendo el 2012, el de mayor actividad.

## **1.2. OBJETIVO DEL PROYECTO**

El presente proyecto tiene como finalidad actualizar y calibrar el modelo de flujos de lodo, o lahares del volcán Cotopaxi para los ríos Pita y Sta. Clara con el programa computacional HEC-RAS (VERSION 4.1.0). Así, la Escuela Politécnica del Ejército tendrá en sus manos un documento que permita a sus autoridades,

actualizar las medidas de prevención para salvaguardar la vida de los moradores y la infraestructura que se encuentre ubicada dentro de las zonas de riesgo, con base en los estudios presentados. Por otra parte, se aspira tomar en consideración lo siguiente:

- Buscar recursos de entidades públicas y/o privadas, para realizar más investigaciones sobre el comportamiento histórico y actual del volcán Cotopaxi, de tal forma que se pueda prevenir de mejor manera los efectos de una eventual erupción.
- Presentar la información de las investigaciones realizadas a todas las instituciones encargadas de precautelar la vida de los ecuatorianos frente a posibles fenómenos o eventos naturales como: La Secretaría Nacional de Riesgos, los diferentes Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs), Cruz Roja, etc., para que realicen capacitaciones de prevención de desastres naturales, con base en información precisa y fidedigna, para que los habitantes se encuentren suficientemente preparados en el momento de una erupción.
- Propender que los GADs del Valle de los Chillos, en conocimiento de los peligros de una erupción del volcán Cotopaxi, puedan elaborar nuevas ordenanzas que reduzcan la incidencia de los daños materiales y precautelen la seguridad de las vidas humanas.

### 1.3. EL VOLCÁN COTOPAXI Y SU PROCESO ERUPTIVO

#### 1.3.1. EL RIESGO VOLCÁNICO

El riesgo volcánico es una idea que poco a poco se ha ido afianzando a causa de algunas erupciones recientemente ocurridas. También se debe a la destacada participación de diversos organismos internacionales que han puesto en marcha labores de concientización y divulgación, como el programa de las Naciones Unidas denominado “*Década para la Mitigación de los Desastres Naturales 1990-2000*”, que se inició después de la erupción del volcán “Nevado del Ruiz”, en el año de 1985 en Colombia.

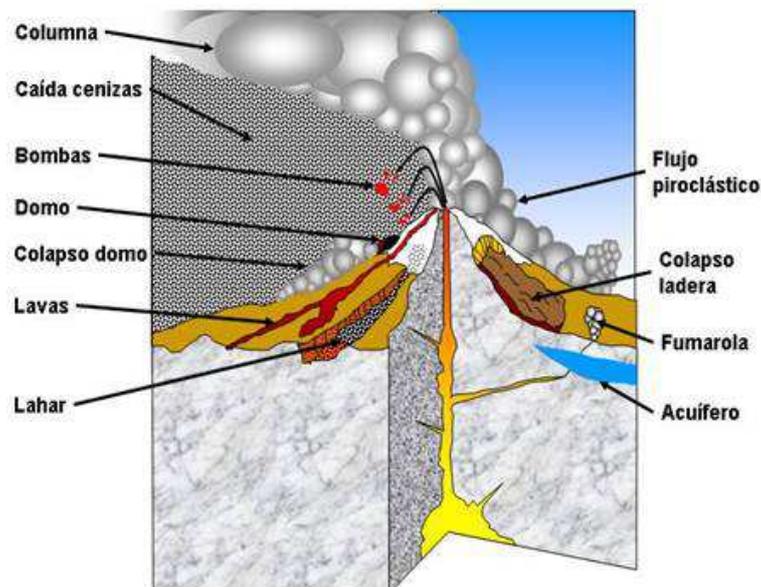


Figura 1.3.1.1: Gráfico de sobre visión de amenazas volcánicas. Fuente [http://riesgosycatastrofes\\_1a.wikispaces.com/2.-ANÁLISIS+Y+PLANIFICACIÓN++DE+LOS++RIESGOS](http://riesgosycatastrofes_1a.wikispaces.com/2.-ANÁLISIS+Y+PLANIFICACIÓN++DE+LOS++RIESGOS).

Desde el punto de vista metodológico, uno de los errores más frecuentes es considerar al riesgo volcánico y al riesgo sísmico como si fueran uno solo, cuando lo único que poseen en común es que son eventos naturales que muestran la fuerza interna y destructiva de nuestro planeta. La diferencia esencial radica en que el riesgo sísmico trae consigo un evento único, los llamados terremotos, que son efímeros o instantáneos; mientras que el riesgo volcánico viene cargado de muchos fenómenos dentro de su proceso eruptivo como: avalanchas de escombros, caída de piroclastos, flujos piroclásticos, derrames de lava, tsunamis, deformaciones del terreno, anomalías térmicas, sismos volcánicos, gases volcánicos y los mencionados lahares; que causan parciales o grandes daños y pueden llegar a durar varios meses.

([http://www.volcanesdecanarias.com/interna/Educacion/edu\\_riesgo.htm](http://www.volcanesdecanarias.com/interna/Educacion/edu_riesgo.htm))

Al riesgo volcánico se lo puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{R = P.V.S}$$

Donde **R**, representa al riesgo volcánico, **P** indica la probabilidad en que un fenómeno volcánico puede afectar un lugar determinado en un tiempo determinado, es decir, indica el peligro volcánico; **S** representa las pérdidas que se pueden producir por motivos de una erupción volcánica como: pérdida de vidas humanas, pérdidas materiales y pérdidas de fuentes de producción que se encuentran dentro del área de riesgo; y, **V** es el porcentaje esperado de daños o vulnerabilidad (Aguilera y Toulkeridis, 2005).

Además, se debe señalar que la peligrosidad **P** incluye todos los fenómenos que puede producir un volcán (caída de piroclastos, coladas de lava, lahares, etc.) y

que causan daños tanto humanos como materiales. Por esta razón es importante recurrir a la historia eruptiva para poder determinar con mayor exactitud la peligrosidad volcánica, y de esta manera prever su comportamiento futuro.

La vulnerabilidad **V**, al indicar los bienes expuestos en caso de que ocurriera el evento, se lo expresa en porcentaje del total del elemento en riesgo. Por lo tanto este valor tiene un concepto estadístico y habrá que calcularlo para todos los componentes iguales; es decir, igual tipo de cultivo, de construcción, etc.

Es así que se define una escala de daños: ligero (0-20%), moderado (10-60%) y grave (50-100%).([http://www.volcanesdecanarias.com/interna/Educacion/edu\\_riesgo.htm](http://www.volcanesdecanarias.com/interna/Educacion/edu_riesgo.htm))

Se debe considerar, que todos los factores que determinan el valor del riesgo volcánico son susceptibles a cambios, que dependerán, en primer lugar, de las características de la erupción, la distancia que existe entre el causante del riesgo y la zona en riesgo, la topografía, el viento y otras condiciones meteorológicas, pero sobre todo, dependerá de un factor **Q**, que representa las medidas que se han tomado por el hombre para mitigar la vulnerabilidad y por ende el riesgo volcánico.

Así se tiene que:

$$R = \frac{P \cdot V \cdot S}{Q}$$

Por tanto, es evidente que mientras mayor sea la preparación y la concientización frente a una posible erupción volcánica por parte de los ciudadanos y entidades públicas, menor será el impacto del riesgo volcánico de la zona posiblemente afectada.

En el caso de Ecuador es notoria la falta de preocupación, medidas preventivas y acciones políticas del estado, que permitan disminuir el riesgo volcánico. Esta

despreocupación y el riesgo se magnifican, al tratarse de uno de los países con más alta concentración de volcanes activos en el mundo. En el caso del volcán Cotopaxi -por ejemplo- se han realizado muchas investigaciones que dan veracidad de su potencial peligro, pero que sirven de poco o nada para planificar el desarrollo de las ciudades cercanas a las principales vertientes del volcán. Basta señalar que en el último año -2012- se han construido 3 nuevos edificios de departamentos y oficinas en el Valle de los Chillos en el sector conocido como “El Triángulo”, a pocos metros del cauce del Río Pita.

### **1.3.2. FENÓMENOS ERUPTIVOS DEL VOLCÁN COTOPAXI**

En función de las erupciones pasadas del volcán Cotopaxi, incluyendo la de 1877, se han definido seis fenómenos eruptivos que caracterizan la actividad del volcán:

- Avalancha de escombros
- Lahares (flujos de lodo)
- Caída de piroclastos y ceniza
- Flujos piroclásticos
- Derrames (coladas/flujos) de lava
- Emisión de gases volcánicos, y
- Sismos volcánicos

Las avalanchas de escombros son fenómenos poco frecuentes pero muy destructivos, debido a que se originan por el colapso parcial de un flanco del cono volcánico. En el caso del volcán Cotopaxi, ha ocurrido este tipo de amenaza hace 4500 años atrás (Andrade et al; 2005), con resultados destructivos visibles hasta hoy en día. La cicatriz del colapso de la primera avalancha de los escombros representa la pared casi vertical en el lado norte del volcán llamada Yanasacha.



Figura 1.3.2.1: Yanasacha, Fuente: Foto Toulkeridis

Son diversas las fuentes que registran la presencia de estos fenómenos como: cortes geológicos, registros históricos desde la llegada de los españoles,

levantamientos topográficos, testimonios de las personas que sobrevivieron a la última erupción, estudios estratigráficos y los depósitos de los últimos 2.000 años; los cuales han permitido además demostrar que el volcán Cotopaxi tiene períodos eruptivos más o menos regulares, siguiendo un patrón común de su actividad (Aguilera et al; 2004).

Más de 18 grandes erupciones explosivas identificadas por la caída de lapilli, los flujos piroclásticos producidos, los lahares y su intervalo de recurrencia, la producción de tefra (fragmentos piroclásticos que salen volando hacia la atmósfera); determinan que la probabilidad de tener una nueva erupción como la de 1877 es de 0.57 y 0.82 (Aguilera et al; 2004); y logran establecer períodos de retorno de  $117 \pm 70$  años aproximadamente (Barberi et al; 1995), entendiéndose así que, desde 1877 año de su última fase eruptiva hasta el 2012, han transcurrido 135 años, por lo que nos encontramos dentro de su período de retorno con una probabilidad de alrededor del 69% de erupción en este año en curso (Aguilera y Toulkeridis, 2005).

#### **1.3.2.1. CAÍDA DE PIROCLÁSTOS Y CENIZA**

Este fenómeno ocurre cuando la ceniza (partículas de hasta 2 mm) derivadas de la fragmentación del magma, forma una columna de tipo ascendente que es inmediatamente expulsada hacia la atmósfera por la violenta expansión de los gases. Cuando esta columna es alcanzada por los vientos que se encuentran alrededor y sobre el volcán, son empujados en la dirección en que los mismos se

mueven y una vez que se haya enfriado la ceniza, comienza su proceso de precipitación acumulándose sobre la superficie del suelo. La ceniza está directamente relacionada con la actividad volcánica explosiva.

Existen tres formas para la formación de ceniza volcánica: una es mediante la liberación repentina de gases atrapados que al liberarse provocan erupciones magmáticas; otra es mediante la aglomeración térmica por la erupción en agua o hielo; y finalmente por la expulsión de partículas que son arrastradas durante las erupciones de vapor, lo que causa erupciones freáticas ([http://es.wikipedia.org/wiki/Ceniza\\_volc%C3%A1nica](http://es.wikipedia.org/wiki/Ceniza_volc%C3%A1nica)).

En el caso del Cotopaxi, los vientos encargados de transportar los materiales fragmentados como la ceniza, llegan en general desde el este y sudeste hacia el noreste, oeste y sudoeste, afectando al valle interandino entre Machachi, al norte, y Salcedo al sur. Esta será la que reciba la mayor cantidad de ceniza y a medida que nos alejamos las acumulaciones de este material seguirán disminuyendo. En los caseríos o poblaciones cercanas al volcán y donde los lahares no producen daño alguno, la acumulación de estos fragmentos generan espesores importantes que abarcan una considerable carga adicional a las estructuras y en el caso de que existan viviendas mal construidas, podrían generar el colapso de sus techos y paredes. Además en dichos lugares cercanos, fragmentos que guarden mucho calor pueden ocasionar incendios.

Recurriendo un poco a la historia, se tiene incluso narraciones de sobrevivientes o personas que pudieron presenciar la erupción de 1877, en las cuales se habla también de este fenómeno... **“y se aclaró como media hora, y después volvió a**

***oscurecer de manera errante, resultando una lluvia de tierra, que duró hasta el amanecer del día siguiente.”***

<http://publiespe.espe.edu.ec/articulos/vulcanismo/flujo-de-lodos/infocoto.htm>



Figura 1.3.2.1.1: Ceniza acumulada después de una emisión del volcán Tungurahua,

Fuente: Foto Cruz

En la última erupción del Cotopaxi, la ceniza depositó en Machachi unos 2 cm, en la ciudad capital de Quito unos 6 mm, y en Latacunga un poco menos (Sodiro, 1877). En esta erupción, la caída de ceniza duró aproximadamente 5 días con breves interrupciones.

Este fenómeno también presenta serios inconvenientes desde el punto de vista socioeconómico de los habitantes al causar daño a los cultivos y a los animales y por supuesto, genera afectaciones de tipo respiratorio a los seres humanos.

### 1.3.2.2. FLUJOS PIROCLÁSTICOS

Los flujos piroclásticos, también conocidos como nube ardiente o corriente de densidad piroclástica (Braney y Kokelaae, 2002), representan un fenómeno muy peligroso, tienen una temperatura de entre 900 y 1000°C y son los que funden los glaciares o capas de hielo del volcán para generar los flujos de lodo o lahares. Los flujos piroclásticos se forman a partir de la columna eruptiva sobre el volcán, creando una separación de gases volcánicos con fragmentos sólidos y líquidos. Por tener una densidad muy característica, se desplaza como un fluido sobre la superficie, con un movimiento que alcanza velocidades muy altas, de 50 a 100 km/h lo que le convierte en un fenómeno destructivo (Aguilera y Toulkeridis, 2005). Los flujos piroclásticos del tipo “scoria flow” han sido característicos en varias erupciones del Cotopaxi.



Figura 1.3.2.2.1: Flujo piroclástico en acción en volcán Tungurahua, 15 de Julio 2006,

Fuente: Foto de Speck.

Varios tipos de erupciones volcánicas pueden dar inicio a los flujos piroclásticos mediante los elementos producidos por las mismas como: la salida de presión en cuerpos de magma cerca de la superficie, la violenta mezcla de los gases con pedazos de roca (Lockwood John y Hazlett Richard, 2010), entre otros.

El movimiento fluido de los flujos piroclásticos se debe principalmente a la turbulencia interna generada por sus gases. Generalmente este movimiento es guiado por la fuerza de gravedad, pero cuando las velocidades son potencialmente elevadas pueden viajar contra pendiente.

### **1.3.2.3. DERRAMES DE LAVA**

Los derrames de lava se dan por el ascenso del magma hacia la superficie, suelen alcanzar temperaturas muy altas que varían entre 700 a 800 °C.

En el caso del Cotopaxi han ocurrido frecuentemente derrames o flujos de lava emitidos por el cráter o por fisuras en el flanco occidental del cono. Afortunadamente tales flujos avanzan lentamente y según estudios geológicos llegaron solamente hasta la base del cono. Por lo tanto no representan peligro alguno para las zonas pobladas alrededor del volcán.



Figura 1.3.2.3.1: Derrame de lava volcán Reventador, 2004, Fuente: Foto Toulkeridis.

#### **1.3.2.4. GASES VOLCÁNICOS Y VAPOR AGUA**

Los gases volcánicos o los vapores a altas temperaturas son característicos de la actividad volcánica. Proviene de una cámara magmática en proceso de presurización y de la interacción de los gases magmáticos calientes con acuíferos subterráneos.

El vapor de agua es el gas volcánico más abundante y representa cerca del 60% de las emisiones; este gas proviene casi siempre del agua meteórica, pero en ciertos casos puede provenir de agua de origen magmático (Lockwood y Hazleet, 2010).



Figura 1.3.2.4.1: Volcán Cotopaxi y parte de su glaciar, Fuente: Foto Kwasek.

#### **1.3.2.5. SISMOS VOLCÁNICOS**

Son fenómenos premonitores de una reactivación volcánica. Se caracterizan por un bajo nivel de energía, que normalmente les ubica en la categoría de microsismos.

Se originan por la fracturación de las rocas del conducto volcánico bajo los esfuerzos derivados de la presión del magma ascendente (VT) y/o por la circulación de fluidos en las rocas del fluido volcánico (LP).

Este fenómeno más allá de causar un ligero daño a las edificaciones ubicadas en la inmediata cercanía del volcán, permite a los científicos estudiar y deducir los procesos magmáticos que ocurren en un volcán activo.

Por consiguiente, para el caso de una reactivación del Cotopaxi no es posible la presencia de sismos de magnitudes grandes o intermedias, ni tampoco

destructoras, pues en erupciones pasadas se reportó que los moradores sintieron temblores, pero estos no causaron daño en los alrededores.

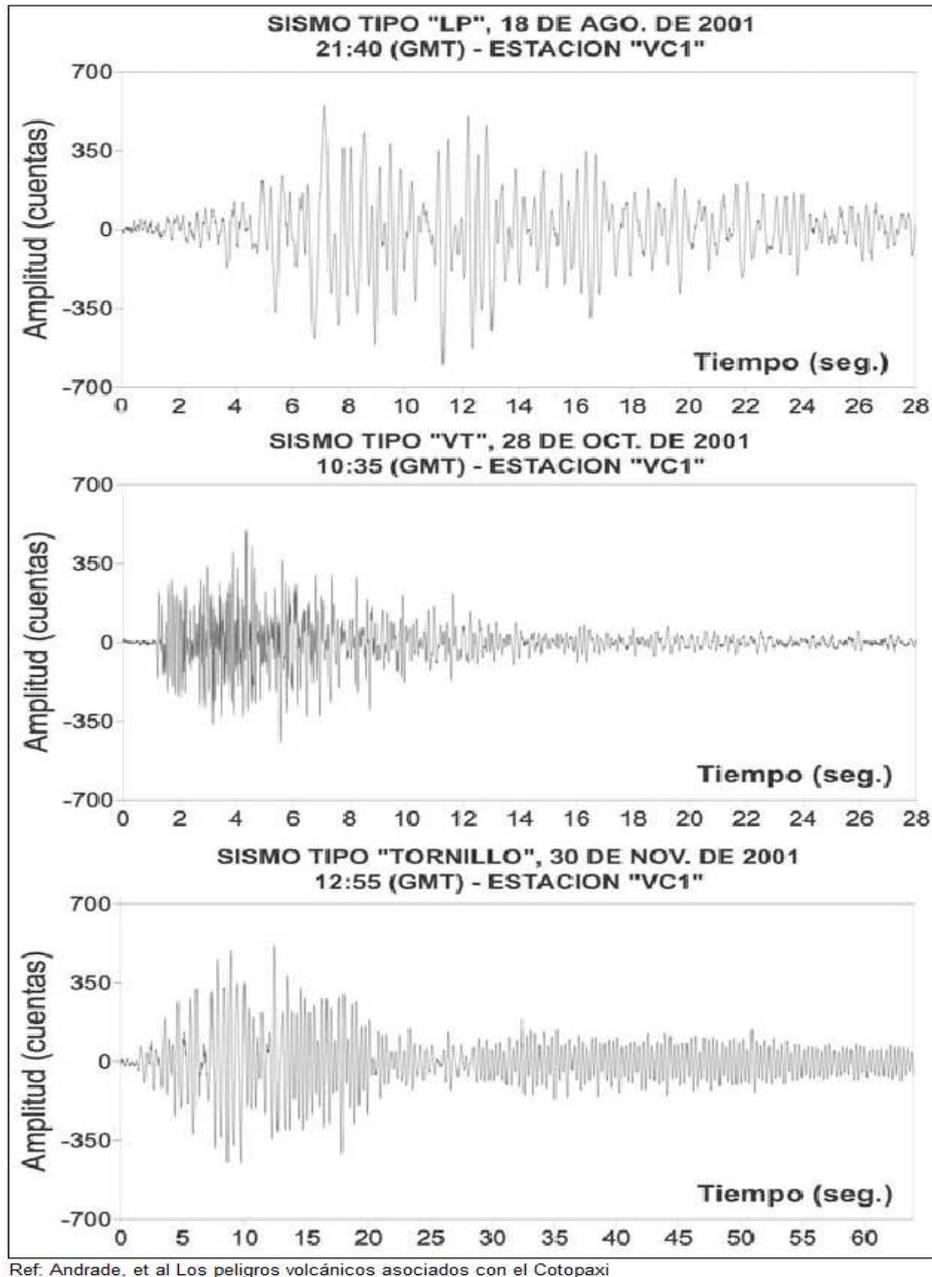


Figura 1.3.2.5.1: Tipos de sismos volcánicos registrados en el volcán Cotopaxi. FUENTE

Andrade et al, 2008.

### 1.3.2.6. FLUJO DE LODO O LAHARES

Por sus particulares características, este fenómeno representa un gran peligro para los poblados asentados a los principales cauces del volcán y sus zonas de desborde.

Prácticamente todas las erupciones históricas del volcán han producido lahares por la fusión de grandes cantidades de glaciár, que para el caso de Latacunga, la ciudad más poblada en el siglo pasado, desencadenó devastaciones importantes en 1742, 1768 y por supuesto la gran erupción de 1877 (Aguilera et al; 2004).



Figura 1.3.2.6.1: Roca llamada Chilintrosa al norte de Mulaló, parte sur del volcán Cotopaxi transportada con flujos de lodo, Fuente: Foto Toulkeridis.

Con la última erupción del volcán Nevado del Ruiz (Colombia), se pudo observar la capacidad de los lahares en alcanzar zonas situadas a grandes distancias. El alcance de los lahares depende de la diferencia de nivel que existe entre el origen y el punto donde se agota su energía, para el caso del volcán Nevado del Ruiz, los lahares recorrieron una distancia de 60 km con un desnivel de alrededor de 5000 m; pero en el caso del volcán Cotopaxi el alcance es aún mayor, pues en la erupción de 1877 los flujos de lodo se desplazaron más de 300 km hasta llegar al Océano Pacífico, con una diferencia de nivel de hasta 5800 m (Aguilera y Toulkeridis, 2005).

Los lahares son flujos torrenciales de agua lodosa, generada por el rápido descongelamiento de los glaciares, cargados de material pétreo de diferentes tamaños, los mismos que se desplazan a grandes velocidades desde las laderas hacia los valles aledaños, controlados únicamente por la gravedad (Aguilera y Toulkeridis, 2005). Pero ciertamente el descongelamiento de los glaciares a causa de los flujos piroclásticos en una erupción, no es el único motivo que puede generar este fenómeno. Los lahares también pueden generarse por períodos de intensa lluvia, vaciado de un lago que se encuentre en la cumbre de un volcán y por el desplome de una ladera a causa de un sismo o la extensa modificación hidrotermal (<http://es.wikipedia.org/wiki/Lahar>). Sin importar la causa que forma este desastre natural, es importante señalar que, es el principal causante de varias pérdidas humanas y materiales.

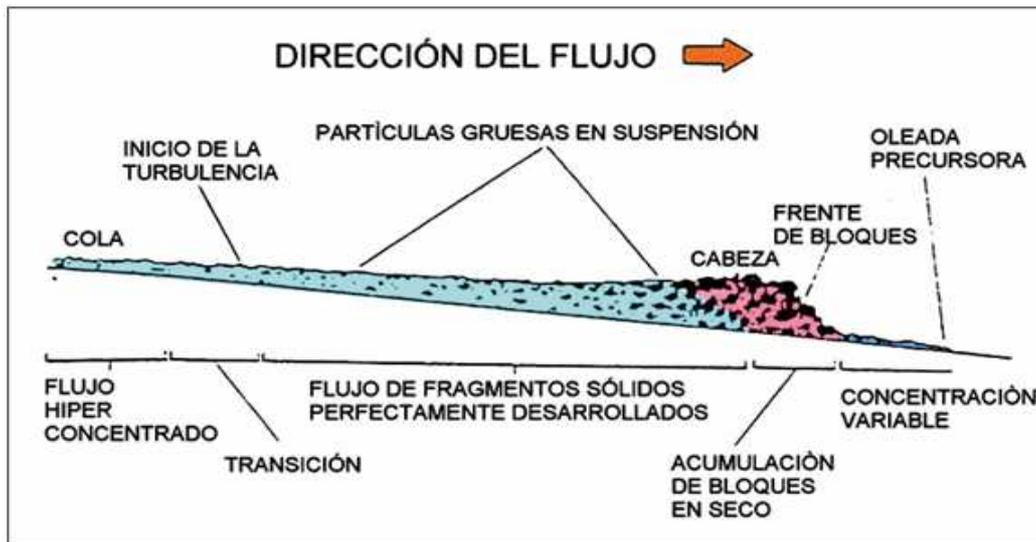


Figura 1.3.2.6.2: Partes características de un lahar. Fuente Pierson, 1986.

El lahar posee un cuerpo alargado con un borde superior bastante plano, en su parte frontal o cabeza, se depositan los bloques de roca de mayor tamaño; en el cuerpo se transporta el material que varía entre 75% y 90% en peso y finalmente la cola, transporta los sólidos con una concentración cerca al 45% en peso, semejante a la de un flujo hiperconcentrado (Aguilera y Toulkeridis, 2005).

Los lahares tienen la apariencia de una especie de colada, misma que no evita que su desplazamiento sea fluido; y una densidad muy alta, semejante a la del concreto, la cual arrastra y destruye cualquier cosa que se encuentre a su paso (Aguilera y Toulkeridis, 2005), debido a estas características, los flujos de lodo se desplazan a grandes velocidades, llegando a alcanzar hasta 100 km/h.

Los caudales iniciales de los lahares abarcan miles de metros cúbicos por segundo en cortos períodos de tiempo, controlando la capacidad de arrastrar los materiales en suspensión mediante los cambios de pendiente de los cauces por

donde estos transitan, los cuales a su vez controlan la velocidad y la turbulencia, es decir; en tramos de pendientes cortas disminuye la velocidad con la que fluyen los flujos de lodo, pero en tramos de grandes pendientes, aumenta la velocidad produciendo erosión en los depósitos aluviales no cohesivos. Por consiguiente, la velocidad de los lahares dependerá de la pendiente del terreno y de la masa que se encuentra en movimiento. En el caso del Cotopaxi los flujos recorrieron los casi 300 km. que les separa del Océano Pacífico en alrededor de 18 horas, es decir, que todo el material o sólidos se transportaron a una velocidad de aproximadamente 20 km/h y en el caso del Valle de los Chillos, que se encuentra a 50 km del cráter del volcán, los flujos de lodo llegaron en cerca de cuarenta minutos (Aguilera y Toulkeridis, 2005).

En el portal de la Escuela Politécnica del Ejército ESPE, existen varios artículos publicados por la UGE (Unidad de Gestión de la Extensión), donde hablan del volcán Cotopaxi y la problemática con los flujos de lodo que este ocasiona, por ejemplo, en parte del artículo ***Mapa de Peligrosidad de los Flujos de Lodo del Volcán Cotopaxi, tramo Selva Alegre-Hacienda El Prado***, dice: ***...”Considerando que el fenómeno de los flujos de lodo es el evento más devastador y recurrente, surge la necesidad de contar con instrumentos básicos para enfrentar una crisis volcánica y poder prevenir y mitigar los eventos negativos derivados del tránsito de los flujos de lodo por el Río Santa Clara, que afectarían a poblaciones consolidadas del Valle de los Chillos, importantes centros educativos, industriales y obras de infraestructura básica.”***

Parte del artículo ***Sistema de Alerta Temprana Automático para los Flujos de Lodo del Volcán Cotopaxi***, publicado por la misma UGE, menciona lo siguiente: ***“El Cotopaxi (5,897 m) es uno de los volcanes más peligrosos del Ecuador, por su intensa actividad y capacidad de generar lahares) cuando los flujos piroclásticos funden el casquete glaciar que recubre su cima y liberan enormes volúmenes de agua líquida. Se ha determinado que este tipo de evento tiene una elevada probabilidad de repetirse durante los próximos 20 años.”...***

En este último menciona el desarrollo de un sistema electrónico, que en base a sensores soportados por un SCADA y conectado a switch eléctrico, puede detectar el momento en el que los flujos de lodo pasan por un sitio determinado, dando señales de alarma a los sectores poblados.

Es totalmente cierto que desde la última erupción del Cotopaxi en 1877, ciertas características que determinan la magnitud de los flujos de lodo han variado hasta la fecha actual, pues los estudios realizados en el Nevado del Ruiz (Pierson et al; 1990) y mencionados en el artículo del l’Institut Français d’Études Andines / 2009, 38 (3): 709-733, mostraron que la superficie del glaciar es el factor que condiciona el volumen de los lahares y para el caso del Cotopaxi, está superficie disminuyó un 40% entre 1976 y 2006, además permitieron estimar que el 10% del hielo disponible es movilizada por los flujos piroclásticos, lo que determina una disminución del riesgo. Esta información fue entregada en el marco de la presentación ***“Segunda campaña de mediciones de los glaciares del volcán***

**Cotopaxi”, durante el seminario “El volcán Cotopaxi y los riesgos asociados”, Quito, 2007.**

Sin embargo debemos recordar que el volumen de los lahares depende también de otros factores como la intensidad eruptiva. Recordar que de diecinueve erupciones de gran magnitud conocidas desde el año 50 a.n.e., nueve alcanzaron un índice de explosividad volcánica igual a 4, lo que ratifica un análisis y estudios más detallados de su comportamiento.

#### **1.4. EVENTOS HISTÓRICOS IMPORTANTES**

Sin duda alguna el volcán Cotopaxi ha sido fuente de admiración de varios científicos tanto nacionales como extranjeros, es así que los primeros estudios geológicos fueron realizados por personalidades como: La Condamine (1751), Humboldt (1810), Reiss (1874), Sodiro (1877), Wolf (1878, 1904), Whymper (1892), Stubel (1903), Hall (1977), entre otros. De la misma manera estudios más recientes que muestran el comportamiento eruptivo del volcán fueron realizados por Barberi, et al (1995), Mothes, et al (1998), Aguilera, et al (2004), Ettinger, et al (2005) (Andrade et al, 2005), Aguilera y Toulkeridis (2005). Investigaciones que han dado cabida a la importancia de conocer las problemáticas que este extraordinario coloso ocasiona al momento de una erupción y que además, han servido como aporte para realizar la presente investigación, la cual permitirá observar de una manera visual, el comportamiento hidráulico de los flujos de lodo producidos por el volcán Cotopaxi hacia la cuenca norte.

Más allá del conocimiento brindado por los antecedentes geológicos, se hace necesaria también la recopilación de información en base a la historia hallada, documentada y contada por los mismos sobrevivientes, la historia de quienes verdaderamente fueron testigos de la monumental fuerza destructiva de este apoteósico volcán, historia que a medida que va siendo analizada, nos permite mirar a través de sus ojos la original catástrofe que puede ocasionar un volcán de estas características, pero además, nos brinda información para poder en cierta forma, predecir su comportamiento futuro y prever en la medida de lo posible la pérdida de nuevas vidas humanas.

Es claro que los aborígenes pre-hispánicos hayan presenciado eventos eruptivos, esto debido a que la historia volcánica del Cotopaxi data de hace 500 ka, durante la fase riolítica del volcán (Andrade et al, 2005). Lamentablemente esta información nunca pudo ser registrada, perdiéndose así, a la deriva de los mares del tiempo, los conocimientos adquiridos sobre su tipo de actividad.

Desde la llegada de los conquistadores españoles en 1534, existe una referencia histórica de las erupciones del volcán. Se tiene como referencia que durante los últimos 5 siglos, el Cotopaxi ha tenido procesos eruptivos de por lo menos una vez cada 100 años, así tenemos: 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1854-1855, 1877-1880 (Andrade Daniel, et al, 2005). Aunque no se tiene mayor información del primer ciclo eruptivo, queda claro que durante el arribo de los españoles a tierras ecuatorianas, el volcán que despertó para recibirlos y demostró su descontento, fue el Cotopaxi.

#### **1.4.1. SIGLO XVII**

Al culminar el primer ciclo eruptivo, el volcán entró en un estado de reposo por cerca de 200 años. Entonces y según la información histórica volvió a presentar erupciones explosivas entre los meses de junio y diciembre del año de 1742, erupciones que formaron importantes lahares y que destruyeron cultivos, ganado, viviendas y vidas humanas. En 1743 la actividad del volcán se manifestó con la emisión de ceniza acompañada de pequeñas explosiones, pero sería hasta un año después, precisamente en el mes de noviembre cuando la fase eruptiva fue mucho más explosiva, porque aparecieron flujos piroclásticos que derritieron una parte del glaciar y produjeron lahares que afectaron a los sectores del Valle de Los Chillos y Latacunga. Años después en 1766 y 1768 nuevas erupciones originaron los denominados flujos de lodo por el descongelamiento de los glaciares, con la particularidad de que en estos dos años el alcance de la ceniza fue tan extenso que llegó hasta la ciudad de Pasto-Colombia (Andrade et al; 2005).

#### **1.4.2. SIGLO XIX**

Pasarían más de 85 años, tiempo en el cual el Cotopaxi presentaba ocasionalmente una leve actividad con emisiones de ceniza y posiblemente algunas explosiones.

Sería hasta septiembre de 1853 cuando volvió a desencadenar catástrofes por la formación de lahares que afectaron en mayor proporción a las zonas aledañas al cauce del río Cutuchi (Andrade et al; 2005).

### 1.4.3. LA GRAN ERUPCIÓN DE 1877

El 26 de junio de 1877, justamente ocurrió un evento eruptivo considerado como la más importante erupción registrada del volcán Cotopaxi. A principios de ese año, el volcán ya daba señales de su nueva activación con la formación de densas columnas de humo y explosiones profundas, que causaron gran intranquilidad a los moradores. Tiempo después, a las 7h00 y 22h00 del 21 de abril se presentó el primer ciclo eruptivo, que causó estragos. Esta actividad eruptiva continuaría hasta el 25 de junio, cuando se elevó del cráter una columna de humo negro y cenizas que se extendió por el aire. Al día siguiente, a eso de las 10h00, el Cotopaxi entró en una fase violenta de la erupción.

(<http://publiespe.espe.edu.ec/articulos/vulcanismo/flujo-de-lodos/infocoto.htm>).

En 1878 Teodoro Wolf recopiló la descripción de los habitantes del sector donde los mismos señalan, en sus palabras, la formación de flujos piroclásticos de la siguiente manera: "**... una masa negra (la lava) brotaba humeante y con gran turbulencia simultáneamente sobre todo el rededor del cráter como la espuma que, de una olla de arroz colocada sobre el fuego, comienza de un imprevisto a hervir y rebosar...**"; esta formación de los flujos piroclásticos saliendo directamente desde el cráter del volcán sin que haya un vahído de

columna se denomina "boiling lover", y hasta ahora es un ejemplo clásico de la literatura vulcanológica global ( Cass y Wright, 1987).

La expulsión de los flujos piroclásticos hacia los flancos del volcán, dieron paso al violento descongelamiento de los glaciares, formando los terribles lahares, mismos que a medida que fueron incorporando sólidos durante su trayecto, aumentaron su capacidad destructora y causaron enormes destrozos al llegar a los valles de Latagunga y los Chillos en menos de 60 minutos (Sodiro, 1877). Dejando inclusive a los poblados de Alangasí, Guangopolo y Conocoto totalmente cubiertos de material pétreo (Wolf, 1878).

***"... Verdad es que por las quebradas del lado norte y noreste bajaron cantidades de agua, lodo y piedras tan considerables y aún más grandes que por las del lado de Latacunga, pero la mayor parte de los materiales y los más gruesos se depositaron en la altura de los páramos, en las llanuras de Limpiopungo, de Saltopamba y del Mutadero..."***

***"... El Río Pita corre desde su reunión con el río Pedregal encajonado en una quebrada profunda hacia el Valle del Chillo. Pero al entrar en las llanuras espaciosas se dividió en algunos brazos y devastó horriblemente ese ameno valle, que bien podría llamársele el vergel de Quito..."***

***"...Después de haber bajado del volcán y recorrido la grande planicie que media entre éste y el punto llamado Llavepungo, la avenida se hallaba encajonada en el profundo cauce del Río Pita, entre los dos cerros Pasochoa y Sincholagua, y habría debido seguir en él, en cuyo caso los daños habrían sido mucho menores; pero llegando al sitio llamado La Caldera, a donde el***

***cauce forma un recodo, por el ímpetu con que venía, una gran parte de ella saltó la orilla izquierda, que en aquel punto es bastante baja tomando la dirección de Pillocoto y Sangolquí, encañalada en el río Cunungyacu (o de San Rafael) ...".*** (Sodiro, 1877).

Hoy en día a este río se lo conoce como Santa Clara, que al igual que el río Pita recorre sectores que son densamente poblados como: Selva Alegre, Sangolquí y San Rafael.

Lo expuesto anteriormente señala que a pesar de que el río Santa Clara no nace en el volcán, sino que nace del Pasochoa, es sin duda un afluente más por donde se deslizan los lahares del Cotopaxi, al desbordarse sus flujos desde el Pita en el sector conocido como La Caldera.

(<http://publiespe.espe.edu.ec/articulos/vulcanismo/flujo-de-lodos/infocoto.htm>).

Debido a que en 1877, los sectores más poblados se encontraban en la cuenca sur, no hay mucha información sobre los acontecimientos ocurridos para la cuenca norte, pues en ella existían solamente haciendas que abarcaban un gran territorio.

Para la cuenca norte se describe lo siguiente: ***"...El daño principal que hizo por este lado consiste sin duda en la completa destrucción de dos máquinas para hilados y tejidos pertenecientes a los señores Aguirre y situadas en su hacienda Chillo. Los perjuicios de los propietarios se calculan en 200.000 pesos. Los valles de Tumbaco y de Guayllabamba participaron de las devastaciones del de Chillo. A las 4 de la mañana siguiente, es decir, 18 horas después del principio de la catástrofe, llegó la avenida en forma de una creciente del río Esmeraldas al Océano Pacífico. El nivel del anchuroso***

***río se levantó en algunos pies y los cadáveres, pedazos de casas, muebles de toda clase, palos, árboles etc. que flotaban en el agua turbia, anunciaron a los habitantes del Litoral la desgracia que había sucedido a sus hermanos del interior...".*** (T. Wolf, 1878).

Los daños en la cuenca norte fueron tan impresionantes como en la cuenca sur, no solo por las pérdidas económicas causadas por la destrucción de los molinos, vías, puentes, etc., sino que, debido a la modificación de los drenajes, comenzaron a existir enfermedades como el paludismo, causando gran cantidad de víctimas, al punto que para el mes de abril del año siguiente a la erupción existía todavía cerca de 100 enfermos.

<http://publiespe.espe.edu.ec/articulos/vulcanismo/flujo-de-lodos/infocoto.htm>).

Otro importante fenómeno eruptivo que se presentó, fue la caída de ceniza y piroclástos. Recordemos que en las erupciones del Guagua Pichincha en 1999 y el Reventador en 2002, las acumulaciones de ceniza estuvieron cerca de los 3 a 4mm, y fueron suficientes para paralizar las actividades de la ciudad de Quito durante varios días, causando importantes pérdidas económicas.

En 1877 las ciudades de Machachi, Quito y Latacunga, fueron las más afectadas, con acumulaciones de ceniza sobre el suelo de hasta 6 cm, que es muchísimo mayor que la acumulación de ceniza expulsada por los volcanes Pichincha y Reventador en 1999 y 2002 respectivamente, lo que permite establecer la magnitud del desastre que podría ocasionar este fenómeno en la actualidad, ya que nos encontramos en un mundo mucho más globalizado, con un mayor

asentamiento de viviendas, industrias, comercio, instituciones civiles, militares y educativas; es decir, con un mayor crecimiento poblacional.

Estos problemas se magnifican cuando el Cotopaxi ha dado evidencias de tener períodos más intensos, pues estudios geológicos y vulcanológicos demuestran que existen espesores mayores de ceniza y piroclastos, a causa de erupciones altamente mayores.



Figura 1.4.3.1: Espesor de ceniza y otros piroclastos algunos de hasta 1.5m por erupción anterior del volcán Cotopaxi, Fuente: Andrade et al, 2008.

Durante los siguientes años a la erupción, el Cotopaxi presentó una actividad moderada con ciertas explosiones y leves caídas de ceniza. El último reporte de actividad, corresponde a una explosión ocurrida en 1942 pero este evento volcánico no ha podido ser confirmado (Andrade et al; 2005).

A pesar de las evidencias establecidas sobre erupción de 1877, las cuales la han colocado como el evento eruptivo más importante del volcán Cotopaxi, debido a los impresionantes lahares generados por la misma erupción y que fueron

causantes de grandes pérdidas tanto humanas como materiales, debemos anotar que un reciente artículo científico publicado en Marzo del 2013 y escrito por un grupo de prestigiosos investigadores, el cual lleva por nombre **“Evidence for lahar-triggering mechanisms in complex stratigraphic sequences: the post-twelfth century euptive activity of Cotopaxi Volcano, Ecuador”**; señala que este evento eruptivo es el más pequeño y el más reciente. Esto se debe principalmente a que la formación de los flujos de lodo de 1877, fueron ocasionados por el confinamiento de flujos de escoria, los cuales tenían menos capacidad para derretir los glaciares y por lo tanto la energía producida por este acontecimiento así como el lahar generado, fue mucho menor que la producida por eventos eruptivos ocurridos en el transcurso del siglo XVIII.

Por lo tanto, podemos afirmar que de producirse una nueva erupción del volcán Cotopaxi, el lahar podría aumentar o disminuir dependiendo del tipo de fenómeno que produzca el mismo; cualquiera sea el caso, el desastre ocasionado será sin duda alguna de grandes proporciones.

La tesis que vamos a desarrollar sobre el comportamiento hidráulico de los lahares generados por el volcán Cotopaxi, el reciente artículo mencionado y todos los estudios que se realicen, siempre serán importantes para conocer no solamente el impacto de la erupción, sino, y sobre todo, para tomar medidas y prevenir en lo posible el gran desastre material y humano que se produciría en circunstancias como las actuales, en las que el crecimiento demográfico en la región, nos hace meditar.

## CAPÍTULO II

### 2. PROGRAMA COMPUTACIONAL HEC-RAS

#### 2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El programa computacional HEC-RAS fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) que pertenece al Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers).

El Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE siglas en inglés) formó el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) en 1964, con la finalidad de oficializar la pericia técnica que más tarde se conocería como Ingeniería Hidrológica.

El HEC se consolidó en el USACE del Distrito de Sacramento, bajo la dirección de Albert Cochran, perteneciente al área de Hidrología e Hidráulica; Emilio Gómez, jefe de la División de Ingeniería; y Emilio Roy, jefe del Distrito de Control. (<http://www.hec.usace.army.mil>).

Tiempo después y una vez establecida la organización, luego de haber brindado numerosos cursos de capacitación, la familia del Centro de Ingeniería Hidrológica desarrolló el HEC.

Existen varias versiones de este software para realizar el estudio de los diferentes aspectos hidráulicos, entre los que se menciona los siguientes:

- HEC-1: Para analizar la hidrología en cuencas.
- HEC-2: Para el estudio de la hidráulica fluvial.

- HEC-3: Para el análisis de yacimientos para la conservación.
- HEC-4: Para realizar el estudio de caudales.

HEC ha pasado por una serie de ajustes organizativos, pero siempre ha mantenido el mismo principio y la misma ética hacia el avance de los estudios hidrológicos e hidráulicos. Se han desarrollado y publicado una gran variedad de documentos dedicados a la gama de la ingeniería y la tecnificación de la planificación hidrológica. Es por esta razón que la familia HEC ha crecido a más de 20 programas, siendo uno de los últimos el soporte de archivos GIS para georeferenciación, aparte de la nueva familia de software conocidos como “NexGen”, que abarca los programas: HEC-RAS, HEC-HMS, HEC-FDA y HEC-ResSim, sucesores de la familia HEC. (<http://www.hec.usace.army.mil>).

De esta manera HEC se ha convertido en el software hidrológico más conocido en el mundo, por lo que es necesario conocer el manejo del mismo, para facilitar cualquier análisis hidráulico.

El programa HEC-RAS ha tenido por una serie de modificaciones o versiones, con la finalidad de seguir trabajando con la actualización de otros programas, así como también, la actualización de los sistemas operativos. Así se tiene por ejemplo, HEC-RAS 3.1, HEC-RAS 3.1.3 hasta el HEC-RAS 4.1, que por ser el último publicado, es el que se utiliza en el presente proyecto.

A pesar de que se han mejorado las versiones, el programa en sí no tiene mayores diferencias. Las versiones anteriores funcionan exactamente igual a las últimas, pues trabajan en base al mismo paquete y la misma interfaz gráfica.

El HEC-RAS cuenta con un paquete que integra programas de análisis hidráulicos, en el que el operador puede interactuar con el programa mediante la interfaz gráfica “Graphical User Interface” o GUI (Guerra Víctor, 1998). Adicionalmente contiene 3 componentes de análisis hidráulicos, en los que se puede introducir datos geométricos, rutinas geométricas y cálculos de rutinas hidráulicas, como:

- Flujo permanente en el cálculo del perfil de la superficie.
- Simulación del flujo no permanente; y,
- Cálculo para el transporte de sedimentos.

Para el HEC-RAS, un proyecto representa la introducción de una serie de datos o archivos que contienen un sistema específico de ríos, en el que el software puede realizar cualquier tipo de análisis incluido en su paquete. Así, mediante la incorporación de datos geométricos, tipos de flujo, sedimentos y de diseño hidráulico, permite, a partir de su modelamiento, realizar diferentes tipos de planes para obras de prevención o la determinación del comportamiento de los flujos frente a las estructuras hidráulicas construidas por el hombre.

Para el presente caso particular, por medio del programa se visualizará el comportamiento de los caudales generados por los lahares del volcán Cotopaxi, para los ríos Pita y Santa Clara, determinando las áreas en las que existe desborde, posibilitando la ejecución de estudios de inundabilidad en los sectores poblados.

A pesar de que cuenta con una interfaz gráfica que facilita la utilización del software, se hace necesario el conocimiento de la teoría básica de la materia de hidráulica, para introducir adecuadamente los datos, interpretar los resultados obtenidos en la simulación y, en caso de que fuera necesario, realizar las correcciones adecuadas en el ingreso de datos hasta obtener las salidas que mejor simulen el comportamiento hidráulico en estudio.

HEC-RAS fue diseñado mediante el lenguaje C++ con un entorno gráfico llamado Galaxy, que permite la formación de diferentes ventanas para que la introducción de datos sea clara y sencilla (Kuriowa Julio, 2010).

Para la simulación con el programa es necesario conocer los perfiles transversales de los ríos que se van a estudiar, las distancias entre cada sección transversal, los valores del coeficiente de Manning para cada porción de cada una de las secciones transversales, las condiciones de borde, y los caudales de diseño.

Para las condiciones de borde se debe establecer si el cálculo se realiza para un flujo sub-crítico, supercrítico o la combinación de ambos, ya que para un flujo sub-crítico las condiciones de borde son aguas abajo, para un flujo supercrítico aguas arriba, y en caso de que fueran las dos; es decir, un flujo mixto, las condiciones de borde son tanto aguas arriba como aguas abajo (Kuriowa Julio, 2010).

Este programa surgió tiempo después del conocido HEC-2, el mismo que también fue desarrollado por la familia HEC, pero con algunas mejoras, entre las que se puede mencionar:

- La interface gráfica de usuario, que facilita las labores de proceso y post proceso.

- La posibilidad de intercambio de datos con el sistema de información geográfica ArcGIS, mediante el programa computacional HEC-GeoRAS.
- La posibilidad de realizar análisis del flujo permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre; y,
- La posibilidad de realizar modelamientos hidráulicos.

Además otras mejoras que permiten la modelación hidráulica en régimen permanente de cauces abiertos, ríos y canales artificiales.

Asimismo, sus características técnicas permiten:

- Cálculo hidráulico de estructuras.
- Visualización gráfica de datos y resultados.
- Edición gráfica de secciones.

La realización de modelos mediante la utilización del programa computacional HEC-RAS, se la puede resumir en cinco pasos:

- Iniciar un nuevo proyecto.
- Introducir y editar datos geométricos.
- Introducir distancias, valores y coeficientes así como las condiciones de frontera que caractericen a cada zona o sector de estudio.
- Desarrollar los cálculos hidráulicos, mediante la corrida del programa.
- Obtener el módulo de flujo hidráulico.
- Obtener, imprimir y analizar los resultados.

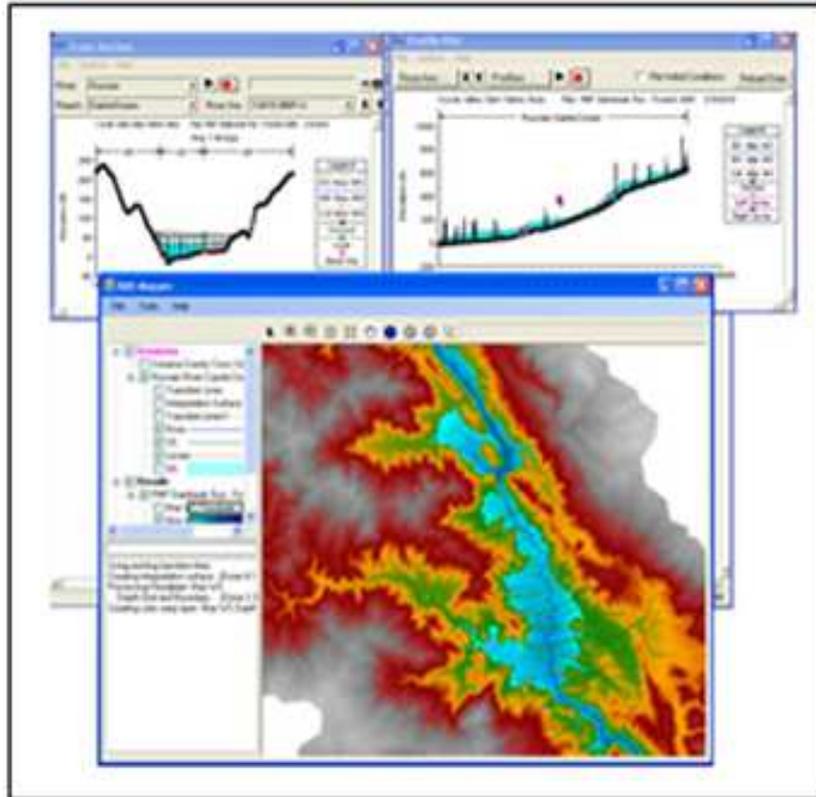


Figura 2.1.1: Entorno gráfico del programa HEC-RAS. Fuente: US Army Corps Engineers, 2008.

### 2.1.1. BASE TEÓRICA DEL HEC-RAS

A continuación se presenta algunos de los fundamentos teóricos que contiene el programa, para el desarrollo de los cálculos dentro de las simulaciones que realiza.

Como hemos visto, el software es capaz de realizar cálculos para simulaciones unidimensionales en canales naturales y artificiales, en diferentes tipos de régimen, mediante diferentes ecuaciones que permiten el desarrollo del perfil base, el transporte de cálculos mediante la subdivisión del perfil transversal, el

coeficiente “n” de Manning para los canales principales, la ponderación de velocidad para el coeficiente alfa, pérdidas de contracción y expansión, determinación de la profundidad crítica, el análisis de las pérdidas por fricción, aplicaciones para la ecuación de momentos, etc. (US Army Corps of Engineers, 2008).

#### 2.1.1.1. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL PERFIL BÁSICO

Para la realización del perfil básico y determinar la altura de la superficie de agua en una sección transversal, el programa lo resuelve con base en la resolución de la ecuación de la energía, a través de un método interactivo. La ecuación anteriormente señalada es la siguiente.

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

Donde  $Z_1, Z_2$  son las elevaciones del canal principal invertido;  $Y_1, Y_2$  son las profundidades de agua en las secciones transversales;  $V_1, V_2$  las velocidades promedio de descarga;  $a_1, a_2$  los coeficientes de ponderación de velocidad;  $g$  la aceleración de la gravedad; y  $h_e$  la energía de pérdida de carga. (US Army Corps of Engineers, 2008).

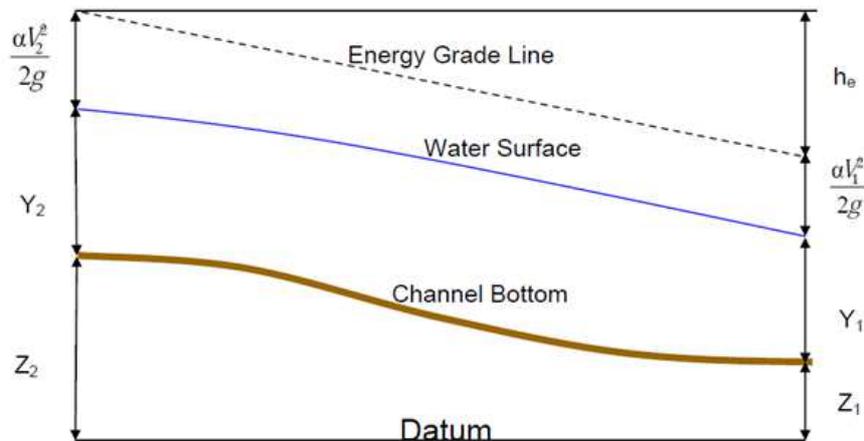


Figura 2.1.1.1.1: Diagrama con los términos de la ecuación de energía y ubicación de cada término utilizado en la ecuación (2.1), Fuente: US Army Corps of Engineers, 2008.

Para la resolución de las pérdidas de energía se debe tomar en cuenta las pérdidas por fricción así como las provocadas por la contracción o expansión, en la siguiente forma:

$$h_e = LS_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

Donde  $L$  es la longitud de alcance de descarga ponderada;  $S_f$  es la pendiente de fricción representativa entre dos secciones; y  $C$  es el coeficiente de pérdida que corresponde a la contracción o expansión. (US Army Corps of Engineers, 2008).

Para obtener la longitud de descarga ponderada de alcance  $L$ , se utiliza la siguiente ecuación:

$$L = \frac{L_{lob} Q_{lob} + L_{ch} Q_{ch} + L_{rob} Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Donde  $Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}$  corresponde a la media aritmética a través del desbordamiento del canal izquierdo, derecho y principal;  $L_{lob}$ ,  $L_{ch}$ ,  $L_{rob}$  son las distancias o longitudes transversales para la sección de alcance particulares para el flujo en desbordamiento de la izquierda, derecho y principal. (US Army Corps of Engineers, 2008).

#### 2.1.1.2. SUBDIVISIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES PARA LA TRANSPORTACIÓN DE CÁLCULOS

Para poder determinar el transporte total y el coeficiente de velocidad en las secciones transversales, es necesario que el flujo esté dividido en áreas o unidades, de tal manera que la velocidad sea uniformemente distribuida. Para esto el software divide el flujo en áreas denominadas “*overbank*” mediante el empleo de la sección transversal de entrada con diferentes valores “n” de puntos de ruptura, como base para la subdivisión. Por lo tanto, el transporte se lo calcula dentro de cada subdivisión mediante la ecuación de Manning, como sigue:

$$Q = KS_f^{1/2} \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

Donde  $K$  es el transporte para la subdivisión;  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning para la subdivisión;  $R$  es el radio hidráulico para la subdivisión; y  $A$  es el área de flujo para la subdivisión. (US Army Corps of Engineers, 2008).

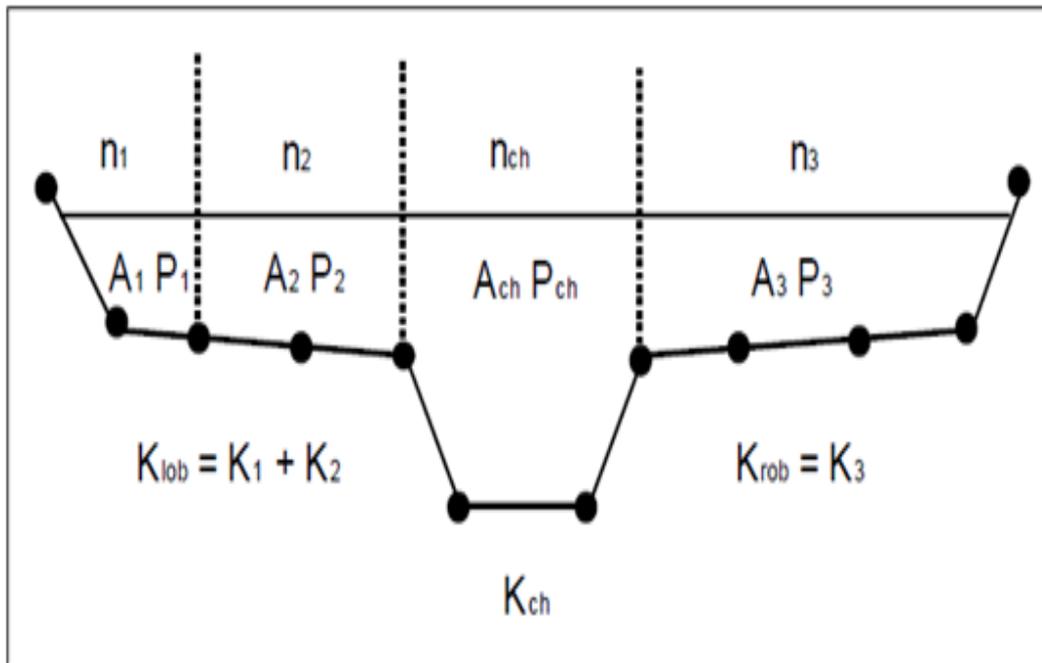


Figura 2.1.1.2.1: Gráfico demostrativo para el transporte de la subdivisión de las secciones transversales, subdivisión en áreas overbank utilizado por el programa HEC-RAS para sección izquierda, derecha y principal, Fuente: US Army Corps of Engineers, 2008.

Por defecto el software considera subsecciones en donde existen variaciones del coeficiente de rugosidad de Manning.

### 2.1.1.3. EVALUACIÓN DE LA CARGA DE ENERGÍA CINÉTICA MEDIA

Debido a que el software trata un modelo unidimensional, se hace imprescindible utilizar únicamente una altura de velocidad. Para ello se calcula el coeficiente alfa o coeficiente de energía cinética media, que permite compaginar las diferencias

entre las alturas de velocidad de las diferentes subsecciones. Por lo tanto, para una elevación dada, el coeficiente se lo obtiene mediante el cálculo del flujo de energía ponderada de las tres subsecciones de una sección transversal; es decir, para el desbordamiento izquierdo, derecho y canal principal. (US Army Corps of Engineers, 2008).

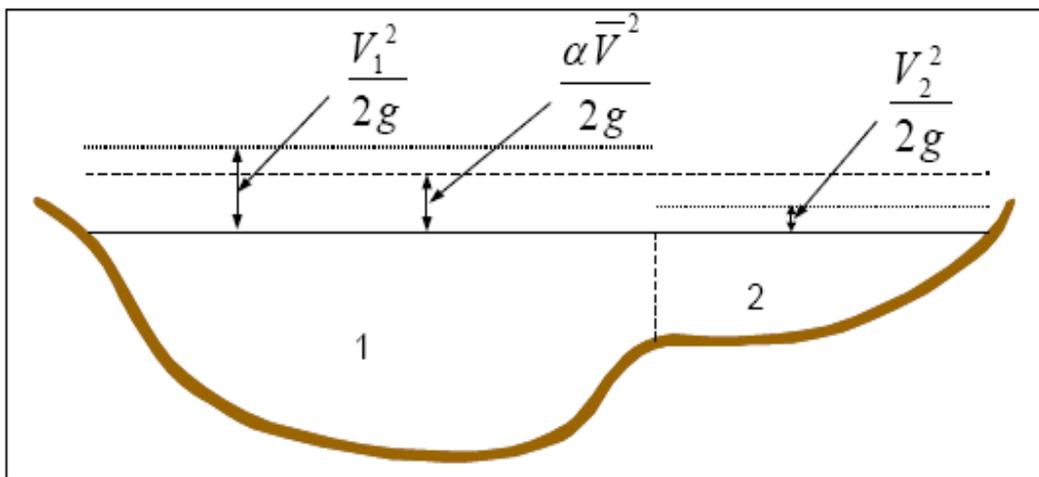


Figura 2.1.1.3.1: Energía Cinética Media para una sección transversal con canal principal y un desbordamiento derecho. Fuente: Us Army Corps of Engineers, 2008.

Entonces, el coeficiente alfa queda expresado de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[ \frac{(K_{Lob})^3}{(A_{Lob})^2} + \frac{(K_{Ch})^3}{(A_{Ch})^2} + \frac{(K_{Rob})^3}{(A_{Rob})^2} \right]}{(K_t)^3} \quad \text{Ecuación (2.6)}$$

Donde  $A_t$  corresponde al área total del de la sección transversal;  $A_{Lob}, A_{Ch}, A_{Rob}$  son las áreas de flujo de desbordamiento izquierdo, principal y derecho, respectivamente;  $K_t$  es el valor de la capacidad de conducción total y  $K_{Lob}, K_{Ch}, K_{Rob}$  son los medios de transporte de desbordamiento de la izquierda, principal y derecha, respectivamente. (US Army Corps of Engineers, 2008). Es así que se puede decir que la energía cinética media se la define en función de las áreas de flujo y las capacidades de conducción.

La capacidad de conducción total de una sección, es igual a la suma de las conducciones de las subsecciones.

#### **2.1.1.4. PÉRDIDAS POR FRICCIÓN**

Las pérdidas por fricción se las evalúa con base en la ecuación (2.2), en la cual;  $S_f$  es la pendiente friccional representativa entre dos secciones; y L queda definido por la ecuación (2.3). (US Army Corps of Engineers, 2008). Entonces la pendiente de fricción o pendiente de la rasante de energía queda definido de la siguiente manera, a partir de la ecuación de Manning:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

### 2.1.1.5. COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN Y EXPANSIÓN

Para este coeficiente el programa supone que se produce una contracción cuando la velocidad aguas abajo es mayor que la carga de velocidad aguas arriba. En igual forma, cuando la velocidad aguas arriba es mayor que la velocidad de carga aguas abajo, el programa asume que está ocurriendo una expansión (US Army Corps of Engineers, 2008).

$$h_{ce} = C \left| \frac{a_1 V_1^2}{2g} - \frac{a_2 V_2^2}{2g} \right| \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

Donde; C es el coeficiente de expansión o contracción, cuyos valores se los puede obtener a partir de la siguiente tabla:

Tabla 2.1.1.5.1: Valores del coeficiente de contracción y expansión.

<b>CASOS</b>	<b>CONTRACCIÓN</b>	<b>EXPANSIÓN</b>
<i>SIN PÉRDIDA DE TRANSICIÓN</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>
<i>TRANSICIONES GRADUALES</i>	<i>0,1</i>	<i>0,3</i>
<i>SECCIONES PUENTE TÍPICAS</i>	<i>0,3</i>	<i>0,5</i>
<i>TRANSICIONES ABRUPTAS</i>	<i>0,6</i>	<i>0,8</i>

Fuente: US Army Corps of Engineers, 2008.

Una vez definidas las ecuaciones, el procedimiento de cálculo del programa es el siguiente:

- Se asume una elevación de la superficie del agua en la sección transversal aguas arriba o aguas abajo, dependiendo del tipo de régimen.
- Bajo esta elevación asumida, el programa determina la capacidad de transporte total, así como la carga de velocidad.
- Con los valores determinados en el segundo ítem, se calcula la pendiente de rasante de energía y se resuelve la ecuación (2.2), para la determinar la pérdida de energía  $h_e$ .
- Una vez obtenidos los valores de los pasos 2 y 3, se resuelve la ecuación (2.1) para  $WS_2$ .
- Se compara el valor calculado de  $WS_2$  con el valor que se asumió en el primer paso. Se repite el procedimiento hasta que la diferencia entre ellos sea de 0.003 m o hasta obtener la tolerancia establecida por el usuario.

Es así como se puede tener una idea del tipo de ecuaciones utilizando el programa HEC-RAS para realizar los cálculos necesarios para desarrollar las simulaciones de cualquier tipo de canal. Se resalta la importancia de tener

conocimientos básicos de hidráulica, pues solo así se puede visualizar cualquier tipo de error en los resultados expuestos por el software.

### **2.1.2. APLICACIONES**

Como ya se ha mencionado anteriormente, el programa fue diseñado de tal forma que; por medio de la elaboración de modelos se pueda realizar cálculos hidráulicos en una sola dimensión, con un régimen permanente para una red completa de cauces abiertos, ríos, canales, ya sean naturales o artificiales. El sistema es capaz de realizar cálculos para flujo constante o flujo inestable.

El HEC-RAS realiza simulaciones de áreas inundables y afectadas por deslizamientos, detecta zonas de desborde, realiza cálculos hidráulicos de estructuras, identifica zonas amenazadas, y permite definir la geometría de la planicie de inundación, etc.

Es por esto que la información obtenida en este programa, sirve para una efectiva administración de recursos hídricos, así como para identificar áreas amenazadas y mitigar los efectos de los desastres en zonas vulnerables. El programa también facilita la investigación en entidades científicas, permite simular escenarios y tomar decisiones oportunas para prevenir eventos extremos. Además, al calcular muy detalladamente los impactos que ocasionan las variaciones de caudal en los ecosistemas y en las estructuras, facilita la elaboración de presupuestos para la remediación. También ayuda en la preparación y respuesta de emergencias, así como en la implementación los sistemas de alerta temprana.

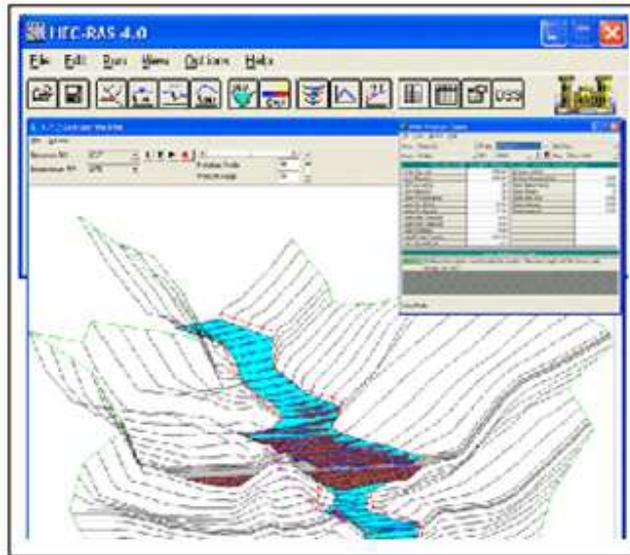


Figura 2.1.2.1: Ejemplo del modelamiento hidráulico con el programa HEC-RAS, Fuente: Departamento Territorio e Sistemas Agro Forestali.

En el presente proyecto, la utilización del HEC-RAS, permitirá determinar las zonas de afectación originadas por una eventual erupción del volcán Cotopaxi.

### 2.1.3. ACTIVIDADES PARA LA EJECUCIÓN

Como para todo estudio o proyecto que se desea realizar, es necesaria la organización y planificación, a continuación se presenta, de manera ordenada, los pasos a seguir para la modelación de los lahares del volcán Cotopaxi y, de esta manera, alcanzar los objetivos deseados que permitirán posteriormente realizar nuevas estrategias de mitigación de riesgos y concientización en las áreas determinadas como zonas de inundación. Estas actividades de ejecución se las puede utilizar de manera general para el desarrollo de cualquier tipo de proyecto,

pues la información que se requiere para manejar el programa es la misma, como son los perfiles transversales, caudales de diseño, etc.

#### **2.1.3.1. CONCEPTUALIZACIÓN PARA LOS LAHARES O FLUJOS DE LODO**

- Obtener información de artículos relacionados con el tema, ya sea en la bibliografía existente o el internet.
- Revisar la información adquirida y establecer, de manera científica, una línea conceptual idónea para la investigación.
- Definir, con base en la documentación adquirida, un nuevo concepto del flujo de lodos.

#### **2.1.3.2. DESCRIPCIÓN Y MANEJO DEL SOFTWARE HEC-RAS**

- Adquirir e instalar el software para un sistema operativo de 32 y 64 bits en el entorno operativo de Windows.
- Verificar su correcto funcionamiento mediante ejemplos sencillos.
- Utilizar los conocimientos adquiridos para el uso del software durante la formación académica, como base para el correcto manejo del mismo.
- Buscar manuales de usuario del programa, necesarios para apoyar el proceso de ingreso de los datos.

### **2.1.3.3. MODELACIÓN HIDRÁULICA**

- Utilizar la topografía existente y actualizada para el desarrollo del proyecto.
- Definir los parámetros de diseño, como por ejemplo, el coeficiente de Chézy, el coeficiente de rugosidad o coeficiente de Manning, etc., que ayudarán a enfocar las características físicas que rodean el comportamiento de los flujos de lodo, para que la modelación sea más real.
- Buscar, encontrar y utilizar todos los datos que el programa requiere para modelar los flujos de lodo, incluyendo los parámetros hidráulicos establecidos.

### **2.1.3.4. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL HEC-RAS**

- Con los datos requeridos, correr el programa y hacer la modelación.
- Revisar y analizar los resultados arrojados por el programa.
- Verificar que el programa no esté proporcionando respuestas incorrectas. (Para esto es importante saber qué tipo de resultados se esperan y hacer las correcciones adecuadas).
- Con los resultados consistentes, definir las zonas afectadas por las inundaciones, ocasionadas por los incrementos de caudal.
- Evaluar las soluciones adecuadas para evitar pérdidas económicas y principalmente pérdidas humanas.

Siguiendo cada uno de estos pasos, se podrá desarrollar a cabalidad cualquier tipo de simulaciones sin mayores inconvenientes, a la vez que se adquiere el conocimiento indispensable para obtener una nueva herramienta de apoyo para realizar estudios hidráulicos de una manera más simple y detallada.

## **2.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SOFTWARE HEC-RAS**

Se debe empezar con un análisis objetivo del programa, reconociendo las posibilidades que brinda para la realización de cualquier tipo de proyecto, las ventajas con respecto a otros programas que permiten elaborar modelamientos hidráulicos, y las desventajas que posee. De esta manera el lector podrá decidir si le resulta conveniente o no, la utilización del HEC-RAS para la ejecución de proyectos hidráulicos.

### **2.2.1. VENTAJAS DEL SOFTWARE HEC-RAS**

- La interface de usuario GUI permite un manejo amigable del programa por parte del usuario. De esta manera se eleva el rendimiento y se aumenta la eficiencia en el uso del software por medio de las funciones de administración de archivos, entrada y edición de datos, análisis hidráulicos, despliegue de tablas y gráficas de datos de entrada y salida, facilidad de reportes y la utilización de la ayuda en línea (Kuriowa, 2010).

- En el caso de flujos permanentes, el software tiene la posibilidad de manejar desde la corriente de un río hasta un gran sistema de canales en diferentes tipos de régimen, para el cálculo de los perfiles de la superficie del agua en un flujo variado.
- Los efectos causados en el cauce por la presencia de obras hidráulicas tales como vertederos, puentes, alcantarillas, etc. pueden ser considerados en el cálculo.
- En el caso de flujos no permanentes, el sistema permite modelar el flujo por medio de una serie de canales abiertos. Adicionalmente se tiene la capacidad de incluir dentro del modelo áreas de almacenaje, estaciones de bombeo, presas navegables, túneles y diques deteriorados (Kuriowa, 2010).
- Se puede modelar el transporte de sedimentos, además calcular los ensanchamientos o las reducciones ocasionadas por la socavación.

Estas son algunas de las ventajas que posee el programa computacional HEC-RAS. Dependerá del usuario compararlas con el funcionamiento de otros programas y decidir la utilización o no del mismo. Sin embargo es importante señalar que este software en particular tiene la aceptación de varias empresas públicas y privadas en todo el mundo, además es de dominio público por lo que su descarga es gratuita a través de la web del HEC (<http://www.hec.usace.army.mil>).

### **2.2.2. DESVENTAJAS DEL SOFTWARE HEC-RAS**

- El programa HEC-RAS realiza cálculos hidráulicos unidimensionales, razón por la cual no es aplicable para diseños en los que se requiera cálculos multidimensionales.
- En ríos demasiado empinados, puede generar problemas de tipo numérico y de inestabilidad durante el análisis. En caso de ser un usuario inexperto, resultaría complicado resolver este tipo de inconvenientes.

## **CAPÍTULO III**

### **3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

#### **3.1. DATOS HIDROLÓGICOS**

A un río se lo puede considerar como una corriente natural por la que fluye el agua de manera continua hasta desembocar en la mar, lago u otros ríos y cuyos caudales varían constantemente durante el año.

Debido a que el Río Pita nace en las faldas del volcán Cotopaxi, es necesario conocer los caudales que normalmente circulan por el mismo hasta desembocar en el Río San Pedro, para tener una referencia que se la pueda comparar con el caudal generado por los flujos de lodo.

A continuación se presenta la tabla de los caudales máximos, medios y de estiaje del Río Pita, datos proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), de los cuales se determina un caudal correspondiente a  $13,64 \text{ m}^3/\text{s}$  y que a su vez representa el máximo valor dentro de los años de registro.

Tabla 3.1.1: Caudales Mínimos del Río Pita

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA														
UNIDAD ATENCION AL USUARIO														
CAUDALES MÍNIMOS INSTANTANEOS (m3/s)														
SERIES MENSUALES DE DATOS HIDROLOGICOS														
NOMBRE: PITA AJ SALTO CODIGO: H158														
PERIODO: 1950 - 2011 LATITUD: 0 34 21.00 S LONGITUD: 78 25 59.00 W ELEVACION: 3550														
Años	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept.	octubre	nov.	dic.	suma	media
1998	3.609	4.771	6.880	6.761	2.665	2.910	3.079	2.746	2.665	2.665	2.506	2.352	43.609	3.634
1999	2.352	2.746	2.828	2.910	2.828	2.506	2.352	2.429	2.429	2.506	2.506	2.665	31.057	2.588
2000	2.828	2.746	2.994	2.994	2.994	2.994	2.828	2.665	2.506	2.352	2.055	1.775	31.731	2.644
2001	2.055	2.665	2.746	2.828	2.665	2.665	2.910	2.910	2.746	2.746	2.665	2.828	32.429	2.702
2002	2.506	2.352	2.746	2.828	2.665	2.910	2.746	2.746	2.352	2.128	2.910	2.828	31.717	2.643
2003	2.746	2.746	2.910	2.585	2.828	2.910	2.910	2.429	1.844	2.910	2.828	2.828	32.474	2.706
2004	2.506	2.276	2.276	2.746	2.746	2.665	2.585	2.585	2.429	2.665	2.746	2.746	30.971	2.581
2005	2.665	2.585	2.585	2.665	2.665	2.665		2.429	2.128	2.828	2.828	3.165		
2006	2.828	2.828	2.828	2.994	2.828	2.665	2.746	2.585	2.429	2.665	2.746	3.165	33.307	2.776
2007	3.252	3.981	2.910	2.910	3.079	2.746	2.665		2.352	2.910	2.828	3.609		
2008	3.079	3.165	2.506	3.165	2.994	2.910	2.746		2.506	2.910	3.609	2.828		
2009	3.079	2.994	3.165											
<b>Media</b>	2.507	2.648	2.556	2.520	2.404	2.336	2.374	2.201	2.181	2.154	2.359	2.349	28.594	2.382
<b>Min.</b>	0.992	0.866	1.026	0.210	1.026	1.026	1.026	0.239	0.927	0.866	0.927	0.927		0.210
<b>Max.</b>	6.526	6.761	6.880	6.761	3.079	2.994	3.079	3.742	4.005	2.910	4.287	4.144		6.880

Tabla 3.1.2: Caudales Medios del Río Pita.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA														
UNIDAD ATENCION AL USUARIO														
CAUDALES MEDIOS MENSUALES (m3/s)														
SERIES MENSUALES DE DATOS HIDROLOGICOS														
NOMBRE: PITA AJ SALTO CODIGO: H158														
PERIODO: 1950 - 2011 LATITUD: 0 34 21.00 S LONGITUD: 78 25 59.00 W ELEVACION: 3550														
Años	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept.	octubre	nov.	dic.	suma	media
1998	4.619	6.147	7.147	7.083	4.469	3.444	3.387	2.938	2.785	3.220	3.451	2.495	<b>51.185</b>	<b>4.265</b>
1999	2.936	3.508	3.383	3.533	3.278	2.668	2.795	3.527	3.469	2.879	2.773	3.454	<b>38.203</b>	<b>3.184</b>
2000	3.210	3.233	3.598	3.345	3.483	3.129	2.981	2.765	2.979	2.581	2.196	1.899	<b>35.399</b>	<b>2.950</b>
2001	2.907	2.739	3.149	2.919	2.794	2.935	3.139	3.233	3.026	3.026	2.824	3.047	<b>35.738</b>	<b>2.978</b>
2002	2.866	2.537	3.176	3.201	3.155	3.190	3.054	3.050	2.712	2.599	3.139	3.100	<b>35.779</b>	<b>2.982</b>
2003	3.291	3.023	3.087	3.094	3.301	3.136	3.106	2.656	3.019	3.121	3.054	3.206	<b>37.094</b>	<b>3.091</b>
2004	2.799	2.397	2.435	2.925	3.036	2.849	2.875	2.908	2.572	2.920	2.921	3.075	<b>33.712</b>	<b>2.809</b>
2005	2.861	2.831	3.073	2.951	2.911	3.174	2.757	2.784	2.579	3.015	3.115	3.447	<b>35.498</b>	<b>2.958</b>
2006	3.063	3.033	3.398	3.246	3.051	3.129	3.125	2.901	2.565	2.932	2.914	3.441	<b>36.798</b>	<b>3.067</b>
2007	3.733	4.619	3.307	3.039	3.345	2.944	2.793	2.492	2.763	5.307	3.575	4.016	<b>41.933</b>	<b>3.494</b>
2008	3.378	3.397	3.344	3.327	3.295	3.074	2.926	2.821	2.888	3.113	4.515	3.042	<b>39.120</b>	<b>3.260</b>
2009	3.274	3.296	3.382											
<b>Media</b>	2.595	2.697	2.591	2.650	2.650	2.490	2.551	2.423	2.392	2.505	2.513	2.423	<b>30.342</b>	<b>2.528</b>
<b>Mín.</b>	0.747	0.863	0.906	0.970	0.970	0.830	0.866	0.872	0.827	0.864	0.766	0.753	<b>10.234</b>	<b>0.747</b>
<b>Máx.</b>	6.758	6.880	7.147	7.083	7.083	5.227	4.821	4.382	4.216	5.307	4.515	4.293	<b>67.712</b>	<b>7.147</b>

Tabla 3.1.3: Caudales Máximos del Río Pita

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA														
UNIDAD ATENCION AL USUARIO														
CAUDALES MÁXIMOS INSTANTANEOS (m3/s)														
SERIES MENSUALES DE DATOS HIDROLOGICOS														
NOMBRE: PITA AJ SALTO CODIGO: H158														
PERIODO: 1950 - 2011 LATITUD: 0 34 21.00 S LONGITUD: 78 25 59.00 W ELEVACION: 3550														
Años	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept.	octubre	nov.	dic.	suma	media
1998	5.295	7.000	7.365	7.365	7.000	6.066	4.076	3.165	3.165	5.082	4.771	2.910	63.260	5.272
1999	4.270	3.981	3.887	5.295	5.841	3.252	5.295	7.000	7.000	3.793	3.518	4.270	57.402	4.784
2000	4.468	5.295	4.771	4.076	5.295	3.518	3.340	3.079	4.270	2.994	2.352	2.128	45.586	3.799
2001	3.340	2.910	4.076	3.252	3.252	3.793	3.518	3.793	3.793	3.793	3.079	3.518	42.117	3.510
2002	3.165	2.910	3.609	3.793	4.076	3.793	4.076	3.609	2.910	3.793	3.518	4.076	43.328	3.611
2003	4.270	3.340	3.428	3.700	4.076	3.609	3.518	2.910	3.700	3.793	3.428	3.793	43.565	3.630
2004	3.079	2.746	2.910	3.252	3.793	3.518	3.340	3.252	3.165	3.252	3.252	4.076	39.635	3.303
2005	3.165	4.076	4.076	3.887	3.340	4.076		3.252	3.609	3.518	3.609	3.793		
2006	3.340	3.252	3.981	3.700	3.252	3.793	3.609	3.252	2.994	3.252	3.252	3.793	41.470	3.456
2007	4.468	5.841	4.076	3.793	3.887	3.165	3.165		3.165	7.000	4.076	4.468		
2008	3.793	3.609	3.609	3.609	3.518	3.340	3.079		3.079	3.609	5.295	3.518		
2009	3.700	3.518	4.270											
<b>Media</b>	3.619	3.939	3.757	3.931	3.794	3.972	4.493	3.748	3.258	4.130	3.456	3.367	45.470	3.789
<b>Mín.</b>	1.302	2.027	1.710	1.960	1.653	2.352	2.323	1.894	1.598	1.492	1.831	1.259		1.259
<b>Máx.</b>	6.880	7.144	7.365	7.612	7.000	6.674	13.640	7.144	7.000	8.186	5.295	4.913		13.640

Al no existir estaciones de medición de caudales en el Río Sta. Clara, se tomó un porcentaje de los datos del Río Pita, mediante las siguientes consideraciones:

- La cuenca que genera el Río Sta. Clara, es mucho más pequeña que la que genera el Río Pita; por tanto la influencia de los parámetros hidrológicos es menor, lo que ocasiona que el caudal sea menor.
- En base a simulaciones anteriores, además de los antecedentes históricos, se comprueba que la influencia de los flujos de lodo del volcán Cotopaxi sobre el Río Sta. Clara es a partir de un desbordamiento que existe en el Río Pita, precisamente en el sector conocido como La Caldera.
- Además, por medio de la huella existente del desbordamiento de La Caldera hacia el Río Santa Clara -resultado de la última erupción del volcán Cotopaxi-, podemos decir que:

El porcentaje del caudal considerado para el Río Sta. Clara a partir del desbordamiento existente en el Río Pita, será de un 30% a 40%.

### **3.2. RECORRIDO DEL FLUJO DE LODO**

El recorrido de los flujos de lodo del volcán Cotopaxi por la cuenca norte, se inicia en los ríos Pita y El Salto; el Pita es el resultado de la unión de pequeñas vertientes que son alimentadas por la fusión de los glaciares que constituyen la

parte norte y nororiental del Cotopaxi.

(<http://publiespe.espe.edu.ec/articulos/vulcanismo/flujo-de-lodos/infocoto.htm>).

Aguas abajo el Río Pita se une con El Salto a unos 14 km de una cascada de casi 40 m de altura, y circula entre los volcanes Sincholagua, Rumiñahui y Pasochoa (Aguilera y Toulkeridis, 2005).

Aguas abajo, los lahares llegan a través del Pita al sector conocido como La Caldera, cuya condición morfológica forma un recodo de casi 90 grados. En este punto, los flujos chocan contra un acantilado de roca y dan paso la formación de un remanso que rápidamente asciende hasta rebasar la parte superior del recodo (Aguilera y Toulkeridis, 2004); es entonces que parte del volumen de los lahares se desbordan hacia la izquierda y toman la dirección de Pilloco y Sangolquí (<http://publiespe.espe.edu.ec/articulos/vulcanismo/flujo-de-lodos/infocoto.htm>), a lo largo del Río Sta. Clara, mismo que desciende desde el Pasochoa, y una vez que parte del volumen de los flujos de lodo se desvían, recorren hacia el Valle de Los Chillos aumentando el riesgo. (Aguilera y Toulkeridis, 2005).

Debido a la formación del recodo y a la interposición de una pared vertical de al menos 30 m de altura, formada por un antiguo cuerpo de lava, el Río Pita cambia violentamente de dirección y después de aproximadamente 200 m el río rodea el obstáculo y retoma su dirección original. (Aguilera y Toulkeridis, 2005).

Tanto el Pita como el Sta. Clara desembocan en el Río San Pedro, el cual cruza a través del valle de Tumbaco y origina el Río Guayllabamba, que constituye la cuenca media del Esmeraldas, terminando su recorrido en el Océano Pacífico.

La descripción del recorrido de los flujos de lodo del volcán Cotopaxi para la cuenca norte, previamente expuesta, es el resultado de los antecedentes históricos y de una investigación realizada por la Escuela Politécnica del Ejército y la Universidad de Pisa, que mediante un modelo matemático conocido como SIM-LAHAR, determinó las áreas afectadas por el riesgo de lahares del Cotopaxi.

<b>RIO PITA</b>			
<b>Construcciones e infraestructura</b>	<b>Altura Máxima -metros-</b>	<b>Tiempo Arribo -minutos-</b>	<b>Afectación</b>
Bocatoma Pita-Tambo	19	14	Sumergida
Puente Cashapamba	6	22	Sumergido
Urbanización La Colina	10-12	25	Parcialmente inundada
Playa Chica	1	30	Parcialmente inundada
El Triángulo	4-7	31	Sumergido
Puente Vía al Tingo	(7)-15	32	Sumergido

Ref. El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha, 2004

Figura 3.2.1: (SIM-LAHAR) Resumen datos de salida del Río Pita. Fuente: Aguilera y Toulkeridis, 2005.

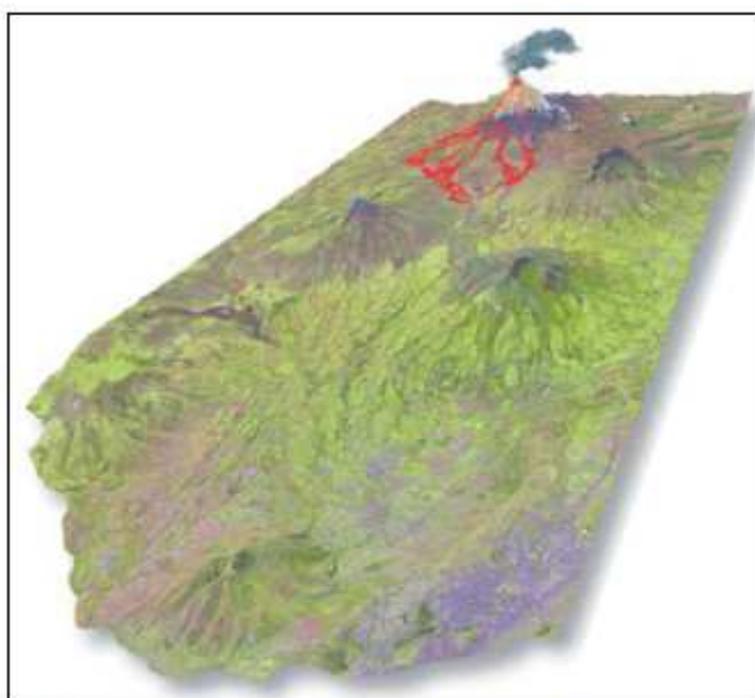
<b>RIO SANTA CLARA</b>			
<b>Construcciones e infraestructura</b>	<b>Altura Máxima (*) -metros-</b>	<b>Tiempo Arribo -minutos-</b>	<b>Afectación</b>
Puente San Fernando	(17)	23	Sin daño
Central Santa Rosa	21	23	Sumergida
Puente Loreto	9	24	Sumergido
Hacienda Chillo Cia.	3-4	25	Inundada
Selva Alegre	8	25	Parcialmente inundado
Colegio Juan de Salinas	5	28	Inundado
El Choclo	3-5	30	Inundado
Avenida Luis Cordero	10	30	Parcialmente inundada
Puente El Aguacate	6	31	Sumergido
Fábrica Santa Bárbara	(7)	31	Sin daño
Ciudadela Yaguachi	(2)	31	Parcialmente inundada
ESPE	(2)	35	Parcialmente inundada
Academia de Guerra	1-6	35	Inundada
San Rafael	8	35	Parcialmente inundado

Ref. El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha, 2004

Figura 3.2.2: (SIM-LAHAR) Resumen datos de salida del Río Sta. Clara. Fuente: Aguilera y Toulkeridis, 2005.

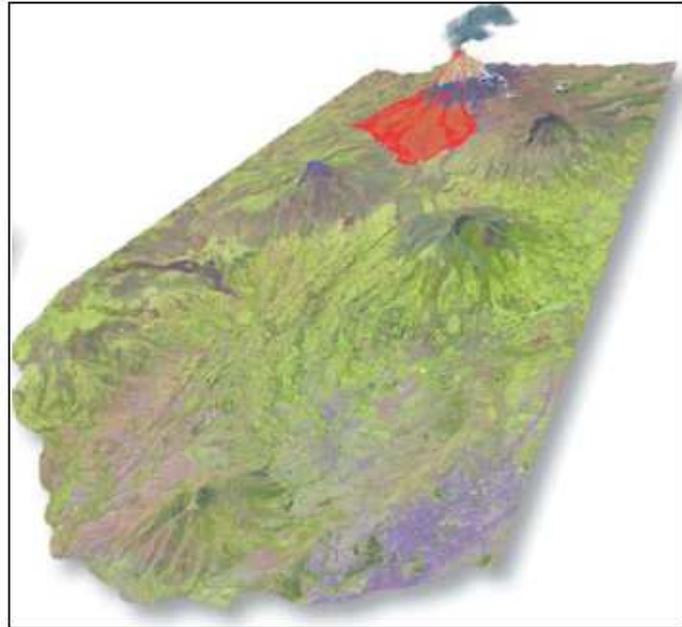
A continuación se presenta imágenes que muestran el posible escenario de la formación de los lahares para la cuenca norte, con base en los diferentes volúmenes y tiempos de arribo, a partir del modelo SIM-LAHAR.

Para ello se resaltó que los eventos de un volumen de por lo menos 25 millones de metros cúbicos no pueden dejar el entorno del altiplano que se encuentra ubicado al pie del volcán. Además para que se produzca un desbordamiento en el sector de La Caldera, se hace necesario que el lahar posea un volumen mayor al de 40 millones de metros cúbicos. (Aguilera y Toulkeridis, 2005).



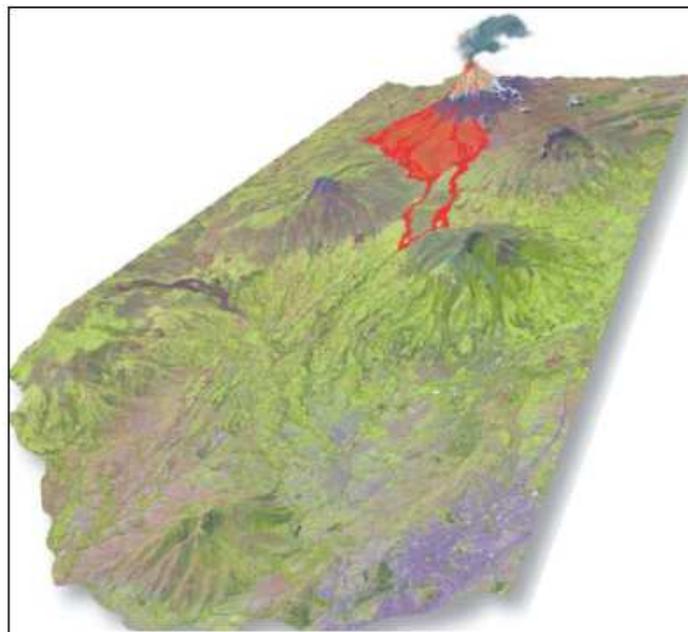
Ref: El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha, 2004

Figura 3.2.3: Inicio de los lahares, casi 20 millones de m<sup>3</sup>. Fuente: Aguilera y Toulkeridis, 2005.



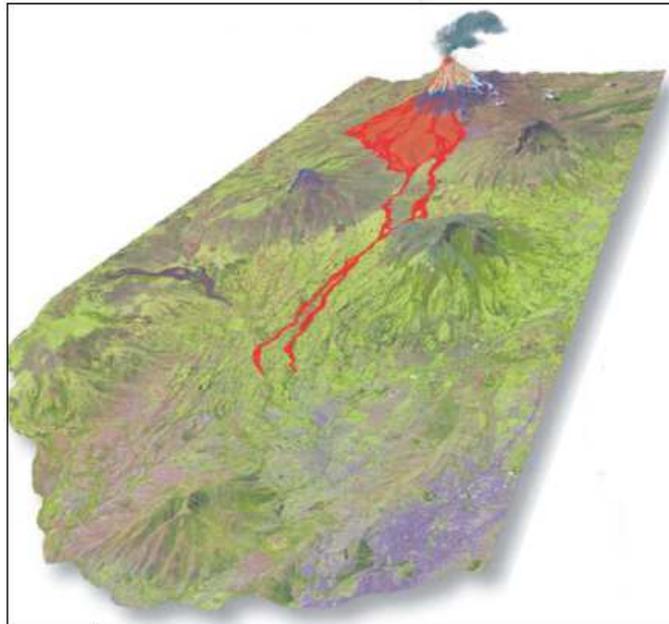
Ref: El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha, 2004

Figura 3.2.4: Formación lahares, casi 25 millones de  $m^3$ . Fuente: Aguilera y Toulkeridis, 2005.



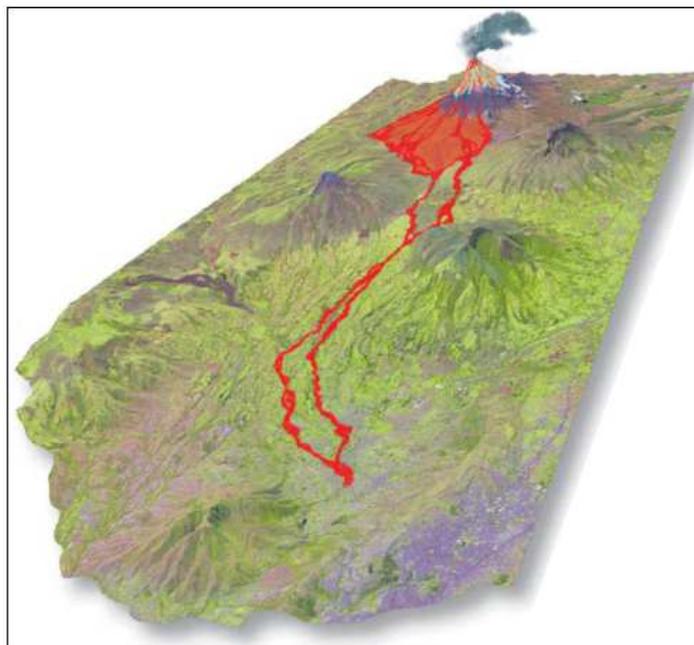
Ref: El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha, 2004

Figura 3.2.5: Más de 40 millones de  $m^3$ . Luego de 6 a 15 minutos. Fuente: Aguilera y Toulkeridis, 2005.



Ref: El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha, 2004

Figura 3.2.6: Más de 40 millones de  $m^3$ . Luego de 16 a 28 minutos. Fuente: Aguilera y Toulkeridis, 2005.



Ref: El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha, 2004

Figura 3.2.7: Más de 40 millones de  $m^3$ . Luego de 29 a 35 minutos. Fuente: Aguilera y Toulkeridis, 2005.

### 3.3. DATOS TOPOGRÁFICOS

La topografía tiene como objeto estudiar todos los procedimientos para realizar la representación gráfica de la superficie de la tierra, en pequeñas y grandes extensiones tomando en cuenta todos los detalles que rodean la misma. Mediante esta herramienta, se puede graficar los perfiles transversales de los ríos, que resultan de mucha importancia, porque son indispensables para la modelación de los flujos de lodo, ya que el programa HEC-RAS utiliza esta información como input.

En lugares geográficos donde existen ríos de montaña la topografía puede ser obtenida con cualquier equipo topográfico como: nivel de ingeniero, teodolito, estación total, etc.; dependiendo de la facilidad en la adquisición de los mismos, de la velocidad con la que se desee obtener los datos y el tipo de terreno. Por otro lado, cuando hablamos de ríos de llanura, la obtención de datos se puede realizar mediante una batimetría, cuya secuencia de despliegue describo a continuación:

- Se determina el tramo del río por donde se desenvolverá el modelaje hidráulico, tomando en cuenta que estos tramos siempre son paralelos a la zona donde se radica una ciudad o donde existen campos de producción.
- A continuación se debe obtener una topografía de detalle en cada una de las orillas del río. Para facilitar las labores de batimetría debemos realizar dos polígonos abiertos.

- Con los polígonos abiertos se pueden formar transversales con las cuales se facilita la obtención de la topografía. Es recomendable además que en el dibujo, estén bien detalladas las curvas de nivel.
- Para obtener la topografía submarina se utiliza el batímetro, que es un instrumento electrónico que emite ondas sonoras, las mismas que viajan por el agua a una velocidad de 1700 m/s y cuando tocan el fondo de los cauces revotan hacia la superficie y se obtiene la geometría del fondo.
- El recorrido de la canoa a lo largo del río es por trayectorias rectilíneas y formando triángulos, de esta manera se facilita el dibujo de las curvas de nivel en el fondo del cauce del río.
- Por cada cruce de la canoa existirán datos topográficos del cruce.

Es necesario indicar que la exactitud de los resultados dependerá del número de puntos de muestreo que se tengan para la misma; es decir, que si tenemos un mayor número de datos de perfiles transversales para cualquier río, mejor resultados tendrá la simulación.

A continuación se muestran un ejemplo de los datos de los perfiles transversales de los ríos Pita y Sta. Clara.

Tabla 3.3.1: Perfil Transversal del Río Pita Punto 1 Aguas Arriba.

<b>PERFILES TRANSVERSALES RÍO PITA</b>		
<b>PUNTO 70</b>		
<b>PUNTO</b>	<b>DISTANCIA HORIZONTAL</b>	<b>ALTURA</b>
1	0.000	3835.560
2	20.400	3836.410
3	45.000	3836.560
4	59.300	3835.730
5	76.100	3834.790
6	87.800	3834.210
7	100.200	3833.340
8	111.500	3833.600
9	118.700	3826.720
10	129.300	3825.260
11	130.000	3822.390
12	135.800	3818.190
13	145.800	3816.640
14	146.000	3815.490
15	151.700	3814.410
16	152.000	3813.620
17	163.700	3812.200
18	174.100	3812.530
19	188.700	3815.570
20	213.300	3815.660
21	222.200	3816.720
22	246.100	3819.170
23	253.500	3820.540
24	255.300	3821.520
25	255.500	3822.230
26	286.300	3825.820
27	291.500	3827.440
28	316.500	3827.940
29	319.000	3829.290
30	381.000	3829.620
31	404.000	3839.060
32	424.000	3848.800
33	451.200	3859.250
34	474.000	3864.620
35	504.300	3879.250

Con los datos de cota y distancia horizontal, se obtiene la gráfica de cada perfil transversal.

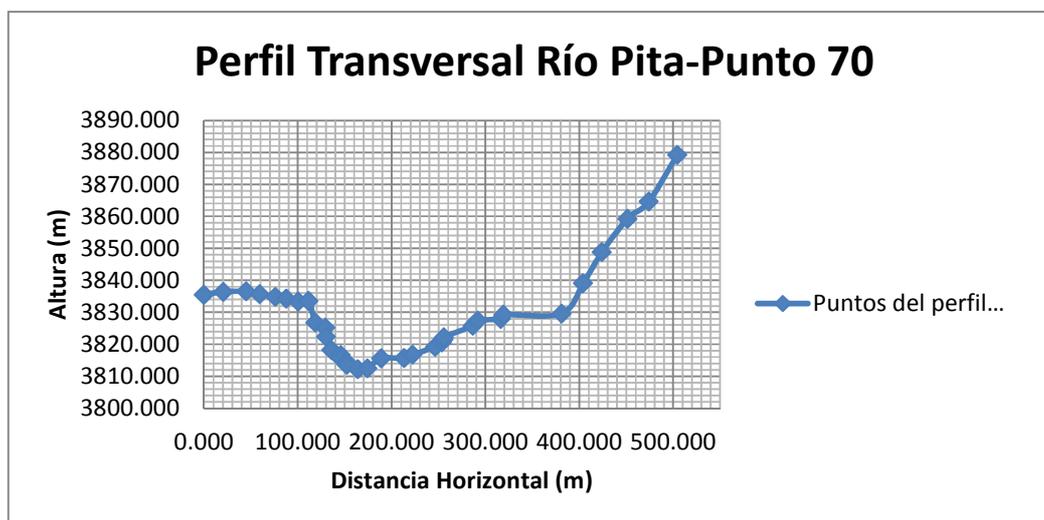


Figura 3.3.1: Perfil Transversal del Río Pita en el primer punto aguas arriba.

Tabla 3.3.2: Perfil Transversal del Río Sta. Clara. Aguas abajo.

PUNTO 6		
PUNTO	DISTANCIA HORIZONTAL	ALTURA
1	0.000	2487.600
2	104.690	2484.400
3	144.670	2480.000
4	170.750	2474.000
5	190.850	2474.000
6	235.030	2480.000
7	261.100	2483.000
8	307.460	2486.000
9	337.520	2490.000
10	379.520	2493.000

A continuación se muestra la gráfica del perfil transversal del Río Sta. Clara en el Punto 6, el cual se encuentra cerca a la desembocadura con el río San Pedro.

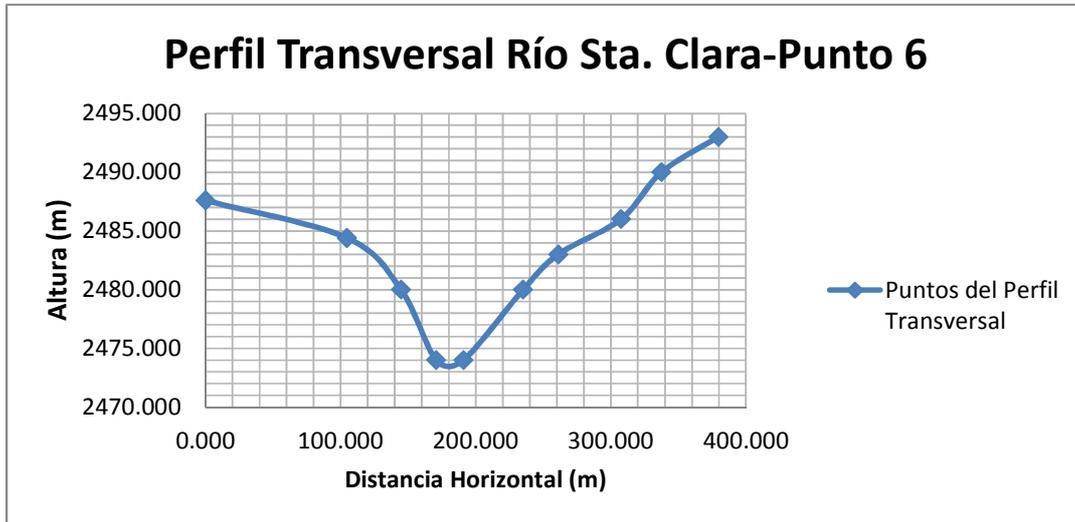


Figura 3.3.2: Perfil Transversal del Río Sta. Clara en el sexto punto aguas abajo.

### 3.4. DATOS HIDRÁULICOS

Para determinar los datos hidráulicos se necesita en primer lugar, conocer el área y el volumen total del glaciar. Una vez obtenida esta información, se determina el área y el volumen del glaciar relacionado con la cuenca norte, y de esta manera, bajo el concepto de los hidrogramas de flujo, se determina el caudal que se introducirá como dato en el programa HEC-RAS para iniciar la simulación.

Una vez obtenido el caudal, procedemos a calcular el coeficiente de Manning, el mismo que establece las condiciones y comportamientos físicos de los flujos al momento de una erupción volcánica.

### **3.4.1. ÁREA Y VOLUMEN DEL GLACIAR DEL VOLCÁN COTOPAXI**

Desde hace varios años se ha hecho evidente la disminución de los glaciares en varias zonas del mundo, debido entre otras, al calentamiento global que presenta el planeta. En el caso de los nevados de la región andina, este fenómeno se ha reportado desde los primeros años del siglo XX (Samaniego et al; 2011).

#### **3.4.1.1. ÁREA DEL GLACIAR PARA LA CUENCA NORTE**

Las primeras estimaciones del tamaño del glaciar del volcán Cotopaxi fueron realizadas en 1983 por Ekehart Jordan, quien estableció una nomenclatura que se la mantiene ahora, en la que se divide al glaciar en 19 porciones.

Bajo esta interpretación se pueden distinguir los diferentes deshielos que afectarán a los diferentes drenajes del volcán en caso de una erupción. Es así que los glaciares del 1 al 6, ubicados en los flancos norte y este del volcán, afectarían el drenaje norte; los glaciares del 7 al 9 afectan el drenaje oriental; y los glaciares del 10 al 19 al drenaje sur (Samaniego et al; 2011).

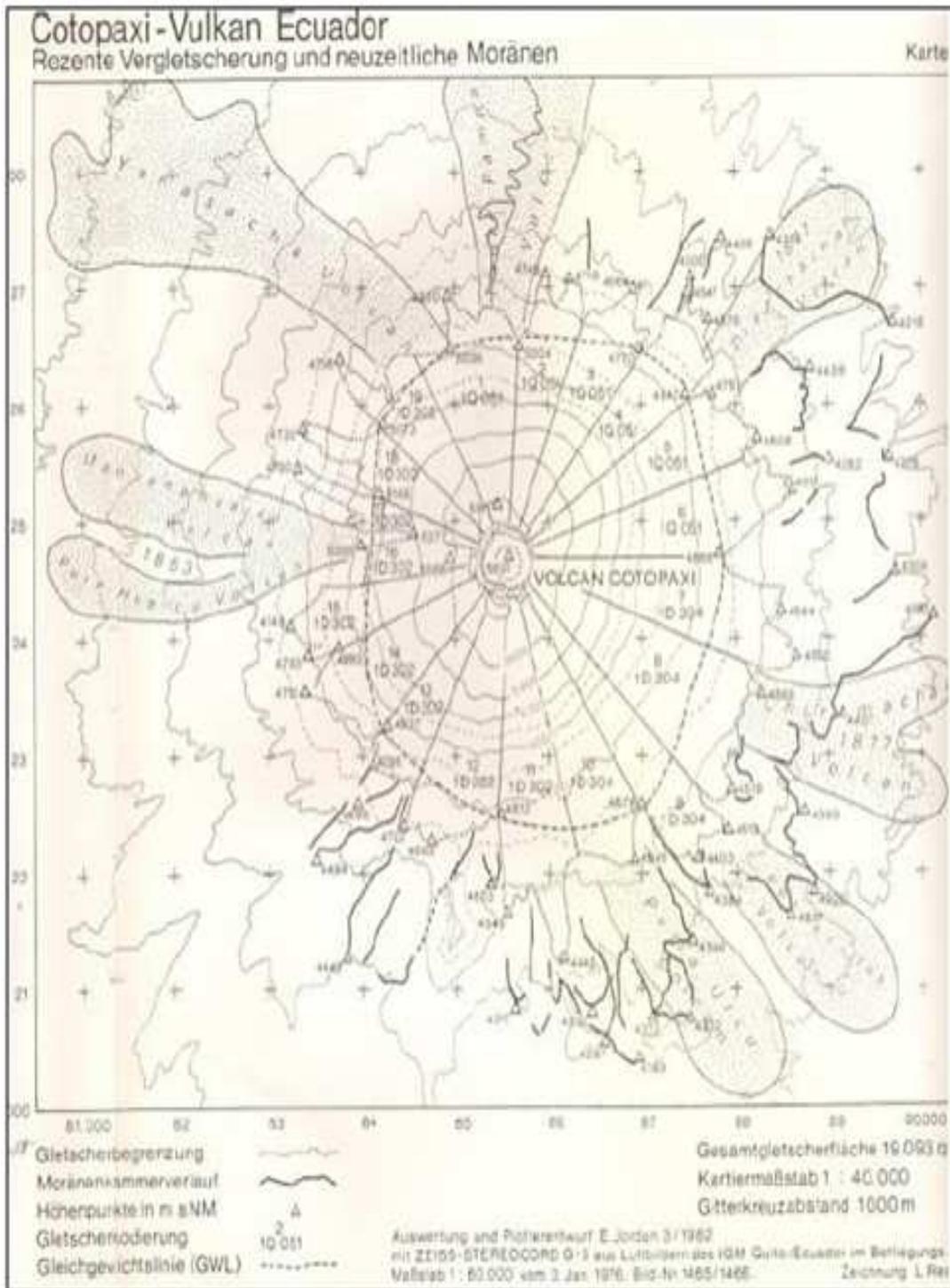


Figura 3.4.1.1.1: Distribución del área de los glaciares del Cotopaxi según Jordan. Fuente:

Samaniego et al, 2011.

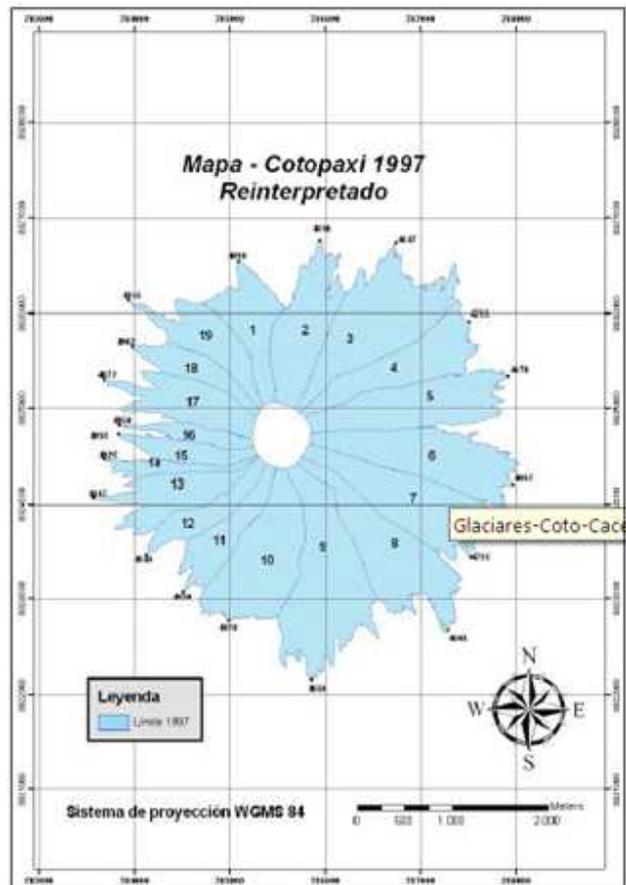


Figura 3.4.1.1.2: Distribución del área de los glaciares del Cotopaxi según Cáceres.

Fuente: Samaniego et al, 2011.

Con base en el trabajo realizado por Jordan y posteriores investigaciones efectuadas por instituciones estatales e internacionales, se obtuvieron datos suficientes para establecer, de una manera cuantitativa, el porcentaje de disminución del área de cada uno de los 19 glaciares del volcán Cotopaxi, así como determinar una tasa de reducción anual. Para efectuar esta proyección se tomó como base los períodos comprendidos entre 1976 hasta 1997 y desde 1997 hasta año 2006, permitiendo además concluir que entre 1997 hasta el año 2011, la tasa de reducción se ha mantenido constante (Samaniego et al; 2011).

Tabla 3.4.1.1.1: Estimación de las áreas y reducción del glaciar del volcán Cotopaxi.

Número	Nombre	Área (km <sup>2</sup> ) 1976	Área (km <sup>2</sup> ) 1997	Área (km <sup>2</sup> ) 2006	%Reducción 1976-1997	%Reducción 1997-2006	%Reducción/Año 1997-2006	Proyección 2011 (km <sup>2</sup> )
1	Sindipamba	1.437	0.865	0.752	39.8	13.1	1.5	0.697
2	Carero Machay	0.975	0.771	0.58	20.9	24.8	2.8	0.500
3	Potrerillos	0.983	0.773	0.531	21.4	31.3	3.5	0.439
4	Pucahuaycu Norte	1.204	0.889	0.675	26.2	24.1	2.7	0.585
5	Mudadero	1.171	0.726	0.721	38.0	0.7	0.1	0.718
6	Cajas	1.363	0.934	0.765	31.5	18.1	2.0	0.688
7	Tamboyacu	1.535	1.26	0.912	17.9	27.6	3.1	0.772
8	Manantial	2.009	1.182	1.027	41.2	13.1	1.5	0.952
9	Tambo	1.165	0.893	0.581	23.3	34.9	3.9	0.468
10	Churrumihurco	1.349	0.995	0.634	26.2	36.3	4.0	0.506
11	Simarrones	1.585	1.268	0.987	20.0	22.2	2.5	0.865
12	El Picacho	1.404	1.067	0.776	24.0	27.3	3.0	0.658
13	Saquimala	1.118	0.801	0.393	28.4	50.9	5.7	0.282
14	San Lorenzo	1.192	0.74	0.723	37.9	2.3	0.3	0.714
15	Capuli-Huaycu	0.776	0.435	0.286	43.9	34.3	3.8	0.232
16	Pucahuaycu Oeste	0.427	0.35	0.271	18.0	22.6	2.5	0.237
17	Chanchunga Sur	0.382	0.32	0.304	16.2	5.0	0.6	0.296
18	Chanchunga Norte	0.712	0.428	0.372	39.9	13.1	1.5	0.345
19	Yanasacha	0.957	0.735	0.545	23.2	25.9	2.9	0.467

Ref: Samaniego Pablo, et al, LOS POSIBLES ESCENARIOS ERUPTIVOS DEL VOLCÁN COTOPAXI, 2011.

Mediante la tabla (3.4.1.1.1) podemos observar que para el año 1976 el área total del glaciar llegaba a los 21.74 km<sup>2</sup>, mientras que para el 2006 el área disminuyó hasta los 11.84 km<sup>2</sup> lo que nos da un porcentaje de reducción correspondiente al 45.53%. Cabe recalcar que este porcentaje de reducción no es homogéneo y además varía en el tiempo.

Tabla 3.4.1.1.2: Resultados del área del glaciar para el 2011.

Drenaje	Área (km <sup>2</sup> )			
	1976	1997	2006	2011
Norte	7,13	4,96	4,02	3,6
Oriental	4,71	3,34	2,52	2,2
Sur	9,90	6,78	5,29	4,6
<b>TOTAL</b>	<b>21,74</b>	<b>15,07</b>	<b>11,84</b>	<b>10,42</b>

De esta manera, el área correspondiente al drenaje norte del volcán es de 3.6 km<sup>2</sup>.

### 3.4.1.2. VOLUMEN DEL GLACIAR PARA LA CUENCA NORTE

Una vez obtenido el área total correspondiente a la cuenca norte del Cotopaxi, es necesario determinar el volumen del glaciar, mismo que en caso de una erupción, afectaría dicha cuenca mediante la formación de lahares, los cuales seguirán su curso a través del Río El Salto y particularmente el Río Pita.

Existen varias técnicas para conseguir el volumen de un glaciar, una de estas por ejemplo, es la utilización del GPR (Ground Penetrating Radar) o Radar de Penetración del Suelo. Técnica que consiste en enviar ondas electromagnéticas

desde un aparato emisor hacia otro receptor, ambos instalados sobre la superficie del glaciar. Estas ondas electromagnéticas miden el espesor del glaciar dependiendo del tiempo en que la señal tarde en llegar al suelo desde el emisor y regrese hacia el receptor. (Samaniego et al; 2011).

Otra manera es considerar los eventos físicos que ocasionan la fusión del glaciar al momento de una erupción volcánica. Para esto nos basamos en eventos anteriores como las erupciones del volcán St. Helens (1980), Nevado del Ruiz (1985) en las que se ha establecido que el flujo piroclástico funde el glaciar en un rango de 5 m como mínimo y 15 m como máximo, dependiendo de la diferencia de nivel.

Por lo tanto tenemos lo siguiente:

$$V = A * P \qquad \text{Ecuación 3.1.1.2.1}$$

Donde V es el volumen del glaciar; A es el área del glaciar y P es la cantidad de metros que se funden.

Como queremos analizar un evento extremo, tomaremos como valor para P el correspondiente a 15 m. y para A, el valor ya determinado para el área de la cuenca norte.

$$V = 3.6 * 1000 * 1000 * 15$$

$$V = 54000000 \text{ m}^3 \approx 54 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Por lo tanto este valor corresponde al volumen total que afecta a la cuenca norte del volcán y que se distribuirá por los ríos El Salto y Pita.

### **3.4.1.2.1. ÁREA Y VOLUMEN PARA EL RÍO PITA**

#### **3.4.1.2.2. DETERMINACIÓN DEL ÁREA**

Una vez definido el área y el volumen correspondiente a la cuenca en análisis, se procede a calcular el área y el volumen que se movilizarán a través de los drenajes del Río Pita y El Salto, para obtener el caudal de entrada para la simulación.

Para determinar el área, se procede de la siguiente manera:

- A partir de las cartas geográficas IGM 1:25000, se determina el área de glaciar que se desplaza hacia el Río Pita y El Salto. Este proceso es similar al utilizado para encontrar la cuenca que forma un río cualquiera.
- Debido a que las cartas fueron elaboradas en enero de 1976, el área del glaciar que muestran las mismas son mucho mayores a las que se presentan en la actualidad, en vista de la reducción que se presenta cada año por el calentamiento global. Por esta razón se montó sobre las cartas geográficas la reinterpretación de la figura (3.3.1.1.2) elaborada por el Ing. Bolívar Cáceres. Así, se puede observar con más claridad cuáles de los 6 glaciares que afectan a la cuenca norte y aportarán a los ríos Pita y El Salto.
- Una vez determinados las porciones de glaciares para cada río, se suman las áreas de cada uno de ellos con los valores que se encuentran en la tabla (3.3.1.1.3.)

Con base en este procedimiento ilustrado en el Anexo H, se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 3.4.1.2.2.1: Áreas de glaciar que se dirigen hacia el Río Pita y Salto

Número	Nombre	Río	Área 2011 (km <sup>2</sup> )	Área para cada río
1	Sindipamba	Salto	0,70	1,20
2	Carero Machay	Salto	0,50	
3	Potrerillos	Pita	0,44	1,74
4	Pucahuaycu Norte	Pita	0,59	
5	Mudadero	Pita	0,72	
6	Cajas	-	-	-
<b>Total</b>				<b>2,94</b>

Como se puede observar en la tabla, los glaciares de Sindipamba y Carero Machay con un área total de 1.20 km<sup>2</sup> se trasladan hacia el Río El Salto; mientras que los glaciares Potrerillos, Pucahuaycu Norte y Mudadero con un área total de 1.74 km<sup>2</sup> se dirigen hacia el Río Pita.

A pesar de que el glaciar No. 6, correspondiente a Cajas, afecta una parte de la cuenca norte, no tiene influencia en ninguno de los dos drenajes, por lo que no se toma en cuenta su área.

Finalmente, debido a que aguas abajo el Río EL Salto desemboca en el Pita y por ende su área y volumen se junta con el mismo, se tiene un área total de 2,94 km<sup>2</sup>, que se utilizará como dato para desarrollar la presente simulación.

### **3.4.1.2.3. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN**

Para obtener el volumen que transita a lo largo del cauce del Pita, se realizó el mismo procedimiento explicado en el numeral 3.1.1.2, por medio de la ecuación (3.3.1.2.1):

$$V = 2.94 * 1000 * 1000 * 15$$

$$V = 44100000 \text{ m}^3 \approx 44.1 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

### **3.4.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL PARA EL RÍO PITA**

Una vez completado el cálculo del volumen que se traslada hacia el drenaje del Río Pita, se procede a calcular el caudal que se moviliza por el mismo. Este procedimiento se lo hace a partir de hidrogramas de flujo, en los que se grafica el caudal en función del tiempo.

Estos hidrogramas, a diferencia de los utilizados para comparar los tiempos de descarga y caudales máximos de corrientes o cuenca hidrográficas, tienen como función representar el volumen del glaciar que se va movilizar por los diferentes drenajes o ríos. Por convención se los representa con una forma triangular, razón por la cual, tienen un solo pico en el que se encuentra el caudal máximo, ubicado a  $\frac{1}{4}$  del tiempo, desde el inicio hasta el final de la descarga.

Como el volumen que se moviliza por el río es un dato calculado, y que corresponde al área bajo la curva del hidrograma, falta determinar el tiempo en que este volumen se desplaza desde el inicio de la erupción hasta que llega al sector para el cual se desea realizar el estudio o análisis. Para esto, nos basamos en la información existente de los datos históricos, pues es la única fuente para acceder a este dato. Por lo tanto, a través de estos antecedentes se concluye, que el tiempo de llegada de los flujos de lodo hacia el sector del Valle de Los Chillos es de aproximadamente 30 minutos.

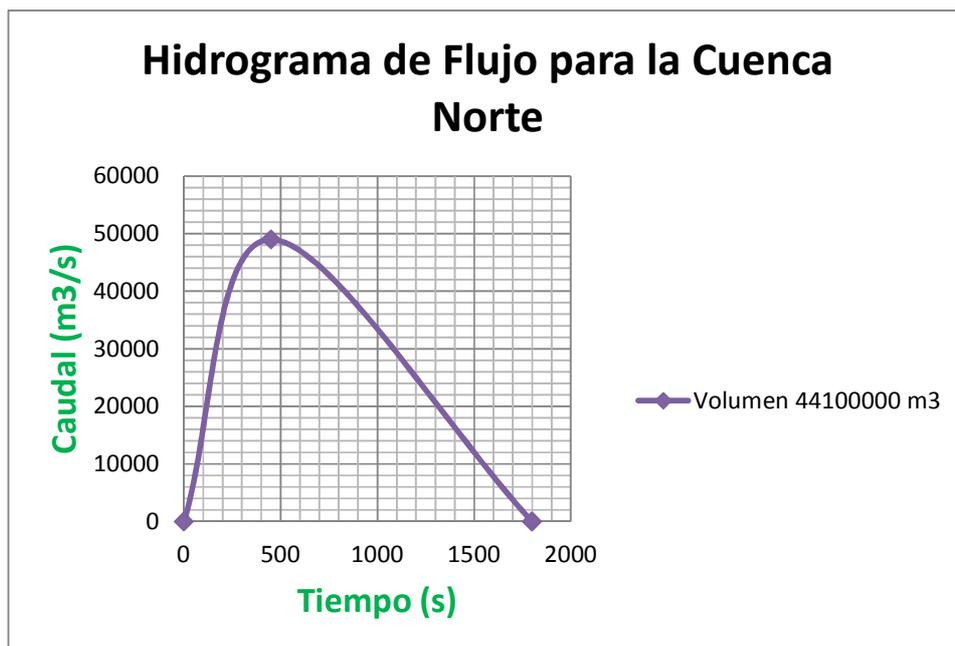


Figura 3.4.2.1: Hidrograma de Flujo para la Cuenca Norte del Volcán Cotopaxi

En el cuadro (3.3.2.1.) se puede observar la representación gráfica del hidrograma que se utiliza para el cálculo del caudal. En las ordenadas está representado el tiempo en segundos y en las abscisas el caudal en metros cúbicos por segundo.

De manera convencional se ha establecido que el pico se encuentra a ¼ del tiempo total, correspondiente a 450 segundos y que el área bajo la curva es de 44100000 m<sup>3</sup>. Se procede a calcular el caudal mediante la siguiente expresión:

$$V = (Q \cdot t) / 2 \quad \text{Ecuación 3.3.2.2}$$

Donde V es el volumen; Q corresponde al caudal; y t representa el tiempo de descarga y es igual a 1800 segundos.

Despejando el caudal y resolviendo la ecuación, tenemos:

$$Q = 2V / t$$

$$Q = 2 \times 44100000 \text{ m}^3 / 1800 \text{ s}$$

$$Q = 49000 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Este valor será el utilizado para realizar la simulación de los flujos mediante la utilización del programa computacional HEC-RAS.

Tabla 3.4.2.1: Resumen de cálculos hidráulicos.

<b>Resumen de Cálculos Hidráulicos</b>		
	<b>Total</b>	<b>Río Pita</b>
<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	3,6	2,94
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	54000000	44100000
<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	49000	

### **3.4.3. COEFICIENTE DE MANNING**

El coeficiente “n” de Manning es variable y debe ser calibrado para cada cálculo que se realice y, donde sea posible, obtener datos de perfiles hidráulicos. En caso de no tener información al respecto, se deberá utilizar valores establecidos para otros ríos, que tengan características similares, o utilizar datos experimentales.

Este coeficiente es de mucha importancia al momento de realizar cálculos hidráulicos; depende de una amplia variedad de factores como: rugosidad de la superficie, vegetación en el canal, tamaño y forma del canal, erosión, irregularidades del canal, temperatura, material en suspensión, etc.

Desafortunadamente para el caso de simulaciones como la del presente proyecto, este coeficiente pierde mucha veracidad, ya que se indica principalmente las características físicas de los canales por donde circula un fluido y no las características propias del mismo. Para el caso de lahares o flujos de lodo, se debe buscar otro tipo de coeficiente, que simule de alguna manera, las condiciones físicas de un flujo denso.

Por otra parte, este coeficiente es necesario para la simulación de los lahares del volcán, pues es uno de los datos de partida que requiere el programa HEC-RAS para poder realizar el modelamiento matemático. Por lo tanto, para poder obtener dicho coeficiente nos basamos en la literatura y proyectos realizados anteriormente, como por ejemplo, para el caso de la erupción del volcán Nevado del Ruiz, se especificó un valor del coeficiente de resistencia de 0.04 a 0.07 (Pierson, et al, 1990). La Secretaría Técnica de Gestión de Riesgos en un trabajo

conjunto con el Gobierno Provincial de Tungurahua, el Gobierno Provincial de Chimborazo y la Unidad de Gestión de Riesgos (UGR), establecieron un coeficiente de resistencia de 0.05 a 0.085 para la simulación de los flujos de lodo del volcán Tungurahua; y para el caso del volcán Cotopaxi, la Escuela Politécnica Nacional (EPN), en un trabajo desarrollado en el año 2004, utilizaron un coeficiente de resistencia de Manning de 0.04 a 0.09 (Galárraga y Coello-Rubio; 2009).

En base a estos trabajos se puede observar, que el coeficiente de Manning para flujos de lodo varía entre 0.04 a 0.09, valores que toman en consideración, las características físicas de los flujos de lodo generados por una erupción volcánica.

Es así que para el presente proyecto se realizaron interacciones con cada uno de los diferentes coeficientes, desde 0.04 a 0.09, con la finalidad de ajustar el modelo y mediante los resultados obtenidos, escoger el coeficiente que más se ajuste a los valores de respuesta generados por anteriores simulaciones, como por ejemplo los expuestos por SIM-LAHAR, donde no se toma en consideración el coeficiente de Manning, sino el coeficiente de disipación de energía ( $S_f$ ) (Aguilera et al; 2004).

Una vez realizado este proceso, se concluyó que el coeficiente que más se ajusta a las características señaladas es el de 0.09, por lo cual se lo toma como dato de entrada para la presente simulación.

Entonces tenemos:

$$n = 0.09$$

## **CAPÍTULO IV**

### **4. SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS DE LODO**

#### **4.1. CONDICIONES DE ENTRADA**

Calculados los datos de caudales, coeficientes de Manning, y con los perfiles transversales de los ríos que forman parte del análisis, se procede a realizar la simulación de los lahares del volcán Cotopaxi con el modelo HEC-RAS.

Para desarrollar esta simulación debemos tomar en cuenta los siguientes pasos o procesos a seguir:

- Creación de un nuevo proyecto.
- Introducción de los datos geométricos (perfiles transversales y longitudinales).
- Introducción de datos hidráulicos (caudales, coeficientes de Manning o condiciones de contorno).
- Corrida del programa –simulación-.
- Análisis de resultados.

Estos cinco pasos resumen la metodología a seguir a la hora de utilizar el programa HEC RAS.

#### 4.1.1. CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO

Una vez instalado el programa es muy probable que al momento de ejecutarlo aparezca la siguiente ventana:



Figura 4.1.1.1: Restricción por uso del separador decimal.

HEC RAS 4.1 trabaja bajo la configuración americana. Si aparece este mensaje, significa que el computador posee dentro de su configuración regional la coma (,) como separador de decimales y al punto (.) como separador de miles; por lo tanto, es necesario cambiar esta configuración para ejecutar el programa. Así, el separador de decimal es el punto (.) y el separador de miles el espacio. (Nanía y Molero, 2007).

Después de haber cambiado la configuración regional del ordenador y ejecutar el programa, aparecerá la ventana principal.

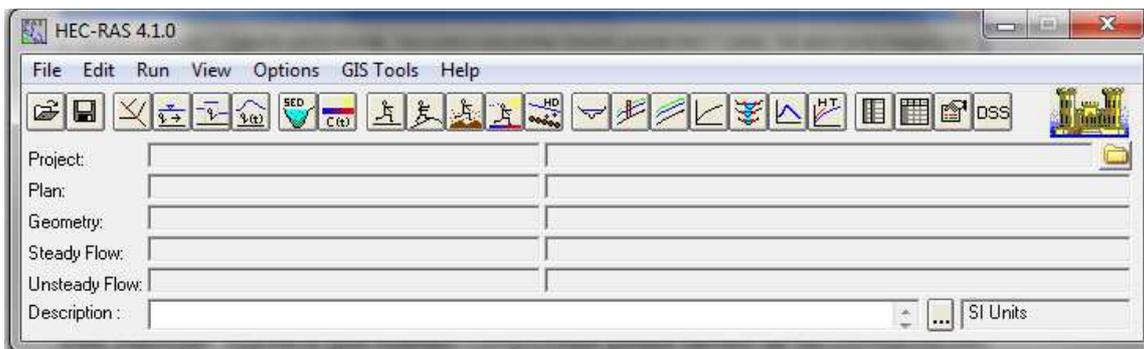


Figura 4.1.1.2: Ventana principal del HEC-RAS

Esta ventana controla todo el programa. Desde ella se introducen todos los datos necesarios para realizar la simulación hidráulica que se desee.

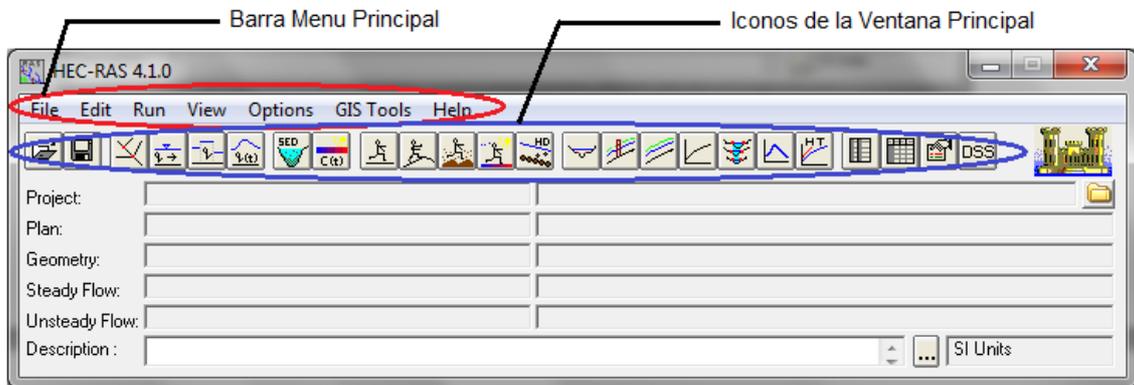


Figura 4.1.1.3: Barra de Menú Principal e Iconos de la ventana principal

Cada ícono, como opción de la barra de Menú Principal del programa, genera nuevas ventanas en las que se introducen datos o se visualizan resultados, aparte que permiten acceder a cualquier tipo de información, de una manera rápida y sencilla.

Las opciones FILE, EDIT, RUN, VIEW, OPTIONS, GIS TOOLS y HELP; que se encuentran dentro del Menú Principal, contienen sub-menús, que permiten desarrollar poco a poco la simulación deseada.

- FILE: Permite crear, guardar, abrir y borrar un proyecto con extensión prj, que es la que utiliza el programa para ejecutarse; además, mediante esta opción se puede importar y exportar los diferentes archivos.
- EDIT: Se utiliza para realizar el ingreso y edición de datos geométricos, flujo permanente, flujo no permanente y sedimentos.
- RUN: Realiza la ejecución o corrida de los datos ingresados al programa.

- VIEW: Permite visualizar los resultados de manera gráfica y de manera tabular. Estos resultados muestran las secciones transversales de los ríos, perfiles de superficie de agua, perspectivas tridimensionales, curvas de gasto o caudales, tablas de perfiles, tablas de secciones transversales así como también un resumen de notas y advertencias.
- OPTIONS: Proporciona al usuario la posibilidad de cambiar las opciones del programa “setup”, que vienen predefinidas, como por ejemplo el sistema de unidades.

Para el HEC-RAS, la creación de un nuevo proyecto involucra el desarrollo de una serie de archivos de datos que se asocian a un determinado sistema fluvial.

Para comenzar un nuevo proyecto se utiliza la opción FILE/NEW PROJECT, en la que se asigna la dirección donde se va a guardar el proyecto y el nombre que va a tener el mismo. Es conveniente generar una carpeta, que contenga todos los archivos que se van a utilizar para la simulación, así como los archivos que generará el programa durante la misma. También es recomendable que dicha carpeta no tenga una dirección muy extensa, con el fin de evitar errores, sobre todo a la hora de importar o exportar archivos.

En el caso del presente proyecto, la carpeta que contendrá los archivos tiene por nombre “Simulación Lahares Volcán Cotopaxi”, que se encuentra dentro del Disco Local “C”. Dentro de esta se encuentran dos carpetas adicionales, que contienen la simulación de los ríos Pita y Santa Clara, denominadas “Simulación Río Pita” y “Simulación Río Santa Clara”. Los nombres de los archivos con extensión “.prj” que se crearon para realizar las diferentes simulaciones de los diferentes ríos, llevan por nombre “Simula\_Pita.prj” y “Simula\_Río\_SantaClara.prj”.

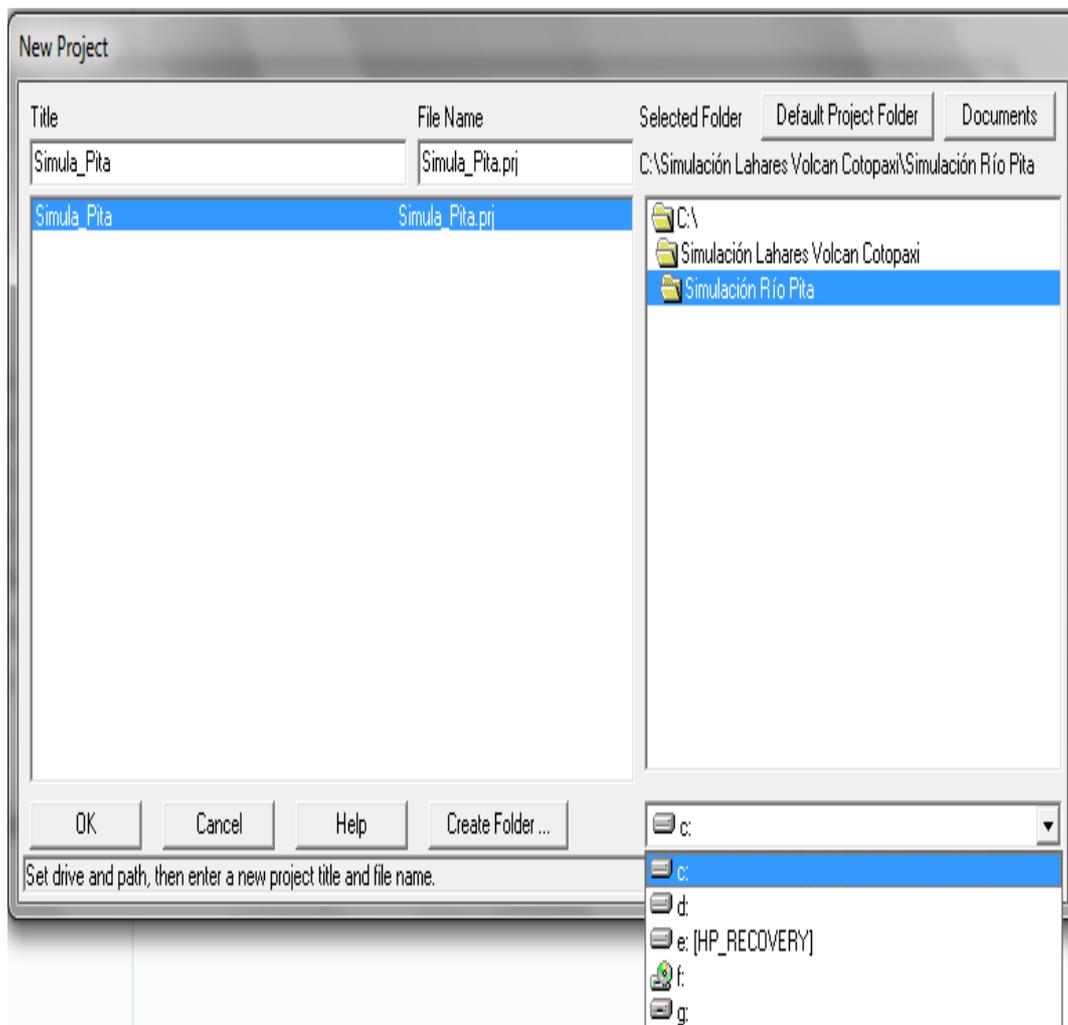


Figura: 4.1.1.4: Ventana para crear un nuevo proyecto.

HEC-RAS no reconoce los espacios al momento de dar un nombre al proyecto, pero se puede separar las palabras mediante la utilización del guión bajo ( \_ ), es decir que si nuestro modelo lleva por nombre “Simula Pita” en la ventana debe escribirse de la siguiente manera “Simula\_Pita” como es el caso actual, o simplemente unido “SimulaPita”. Además el nombre del proyecto debe tener un máximo de 19 caracteres, de lo contrario eliminará los demás.

#### 4.1.2. INTRODUCCIÓN DE DATOS GEOMÉTRICOS

Una vez que se da el nombre al nuevo proyecto, se procede a introducir los datos geométricos de los ríos (perfiles longitudinales y transversales).

Para realizar el esquema fluvial de los ríos que forman parte del análisis del presente proyecto mediante la plataforma HEC-RAS, se utiliza la opción EDIT/ENTER GEOMETRIC DATA. El esquema fluvial debe graficarse desde aguas arriba hacia aguas abajo en la dirección positiva del flujo con la opción "River Reach" (Tramo de Río). Esta opción convierte al puntero en un lápiz que permite dibujar la sección longitudinal de cualquier canal. Luego se identifica a los ríos con un máximo de 32 caracteres; y a los tramos del sistema fluvial con un máximo de 12 caracteres. En el caso de tener tramos adicionales, estos deben conectarse mediante puntos de unión. (Nanía y Molero, 2007).

Ahora bien, y debido a que se necesita graficar el perfil longitudinal de los ríos de manera adecuada, lo más cercano a la realidad; y sobre todo que deben estar georeferenciados para un posterior análisis, -para el presente proyecto- se utilizaron dos plataformas o programas adicionales para realizar esta tarea, estos son los programas "ArcGis" y "HEC-geoRAS", este último es un software desarrollado por la "US Army Corps of Engineers" y que permite conjugar el trabajo entre la plataforma GIS y RAS, mediante la exportación e importación de archivos.

#### 4.1.2.1. BREVE INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA ARCGIS

ArcGis es un programa que resulta de la unión de un conjunto de software utilizados en el área de Sistemas de Información Geográfica (SIG), en donde se conjugan varias aplicaciones para poder editar, analizar, capturar, diseñar, tratar, publicar e imprimir cualquier tipo de información geográfica que se requiera. (<http://es.wikipedia.org/wiki/ArcGIS>).

Dentro de esta plataforma se encuentran herramientas como **ArcMap**, **ArcCatalog**, **ArcToolbox**, **ArcScene** y **ArcGlobe** que permiten un correcto desempeño al momento de realizar las tareas mencionadas anteriormente.

Además contiene extensiones adicionales como: **ArcView**, **ArcEditor** y **ArcInfo** los cuales se reparten comercialmente bajo tres niveles de licencias y según el orden creciente de funcionalidades y coste. (<http://es.wikipedia.org/wiki/ArcGIS>).

Toda esta gama de herramientas construidas para un adecuado trabajo en el Sistema de Información Geográfica, fue desarrollada por el Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales (Environmental Systems Research Institute) o ESRI (siglas en inglés). Fundada en 1969 por Jack Dangermond, que anteriormente se dedicaba a desplegar trabajos de consultoría de territorio.

Desde sus inicios, ArcGis ha evolucionado con el pasar de los años, teniendo a su haber varias versiones que mejoran notablemente su interfaz gráfica y la facilidad del manejo por parte del usuario. Entre estas versiones o cambios podemos mencionar: ArcGis9.0, ArcGis9.1, ArcGis9.2, ArcGis9.3, ArcGis9.3.1 y ArcGis10 que se utilizó para el presente proyecto.

#### 4.1.2.1.1. DESCRIPCIÓN DE LAS APLICACIONES COMUNES

Para el presente proyecto, dentro de todo el conjunto de herramientas que contiene el software ArcGis, se utilizaron tres aplicaciones separadas, pero que trabajan conjuntamente entre sí. Estas son:

- **ArcMap 10:** Permite visualizar, examinar y editar información geográfica. Esta herramienta es la principal a la hora de trabajar con mapas. Además permite abrir desde su plataforma aplicaciones como el ArcToolbox y ArcCatalog. Su interfaz gráfica se divide en dos partes principales: La Tabla de Contenidos, que permite observar el nombre de los archivos o capas (Layers); y el Área de Visualización, que sirve para observar los datos espaciales de cada mapa. (Pedregal Belén, 2009).

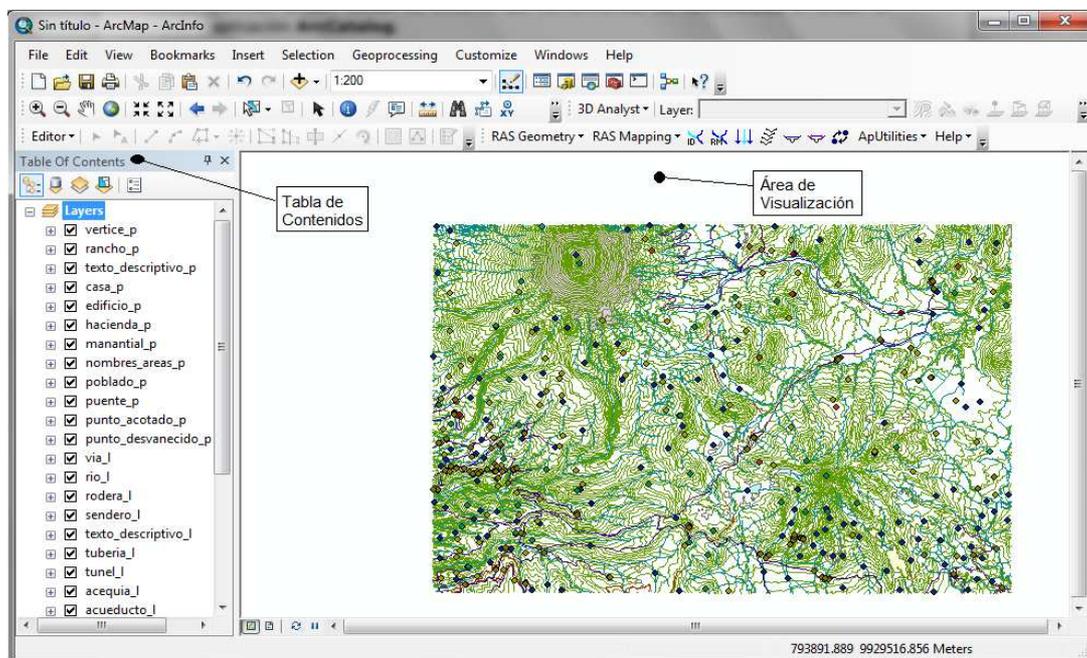


Figura 4.1.2.1.1.1: Interfaz gráfica de la aplicación ArcMap y sus ventanas principales.

- **ArcCatalog 10:** Con esta aplicación podemos organizar los datos geográficos generados en el programa; además, navegar por el ordenador del usuario en una intranet y también por internet. ArcCatalog mediante sus diferentes herramientas, faculta la posibilidad de generar capas vacías para modificarlas o editarlas en ArcMap. Igualmente se puede abrir ArcMap desde el propio ArcCatalog o viceversa. En el caso de ArcMap 10, la aplicación de ArcCatalog se abre al lado derecho del área de visualización y para poder navegar en esta aplicación se requiere primero conectar las carpetas que se van a utilizar durante el desarrollo de cualquier trabajo (Pedregal Belén, 2009).

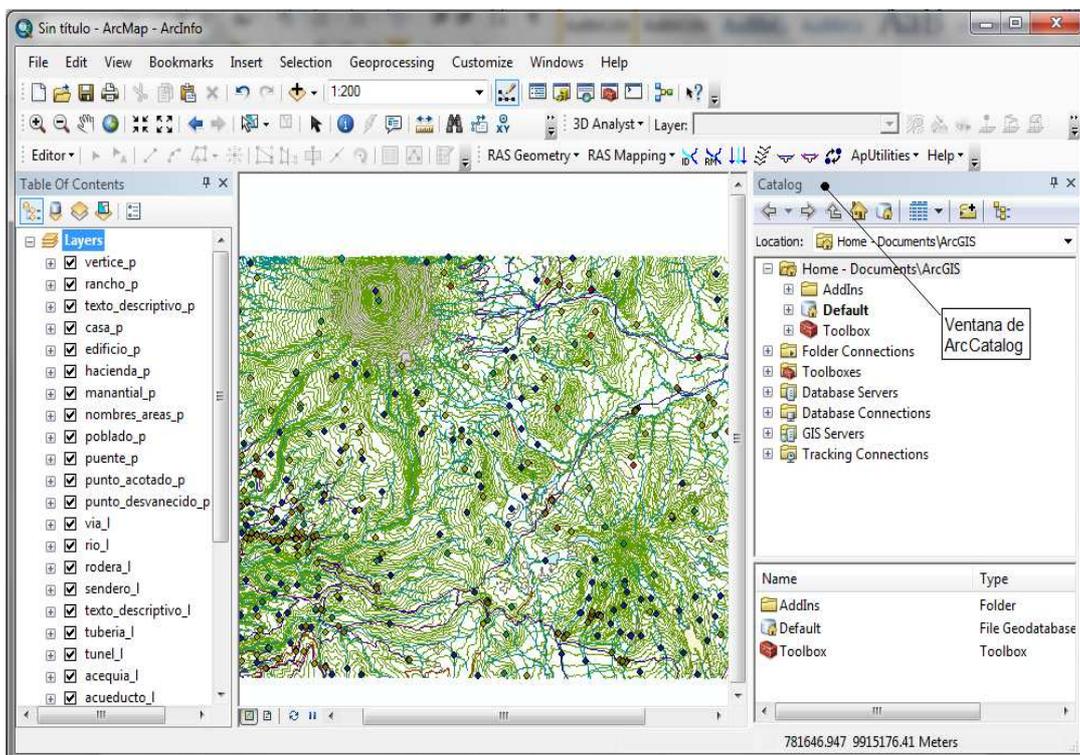


Figura 4.1.2.1.1.2: Vista de la ventana ArcCatalog lanzada desde la aplicación ArcMap.

- **ArcToolbox 10:** Es una aplicación que contiene herramientas para establecer información en base del estudio y tratamiento de los datos geográficos. La cantidad de herramientas para el trabajo por parte del usuario depende como se mencionó anteriormente del tipo de licencia en tres niveles, de menor a mayor: ArcView, ArcEditor y ArcInfo; y de las funcionalidades y coste. Al igual que la aplicación anterior, se puede lanzar ArcToolbox desde ArcMap, que para el caso de la versión 10, se abre como una ventana independiente dentro de la ventana principal de ArcMap 10. (Pedregal Belén, 2009).

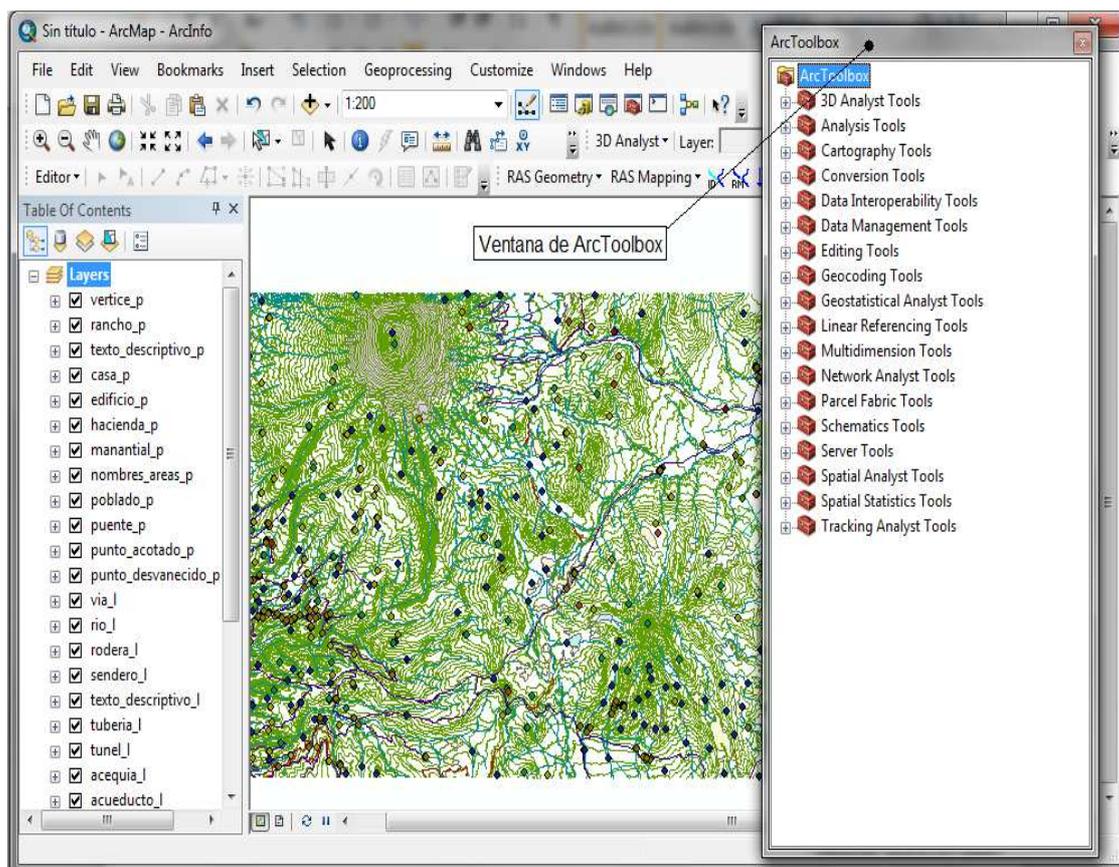


Figura 4.1.2.1.1.3: Vista de la ventana ArcToolbox lanzada desde la aplicación ArcMap.

Para el caso particular del presente proyecto, la herramienta utilizada dentro de la aplicación ArcToolbox, fue “TIN Management” y dentro de esta se utilizó la opción “Create TIN”. Estas herramientas se encuentran dentro de la opción “3D Analyst Tools” en la ventana de ArcToolbox. Esto debido a que para la utilización del programa “HEC-geoRAS” era necesario generar un “TIN” en los mapas utilizados y por donde existe el cruce de los ríos en análisis.

Una Red de Triangulación Irregular (Triangular Irregular Network) o TIN (siglas en inglés), se utilizan para generar superficies en 3D a partir de bases de datos llamados “Shapefiles”. Para ello es necesario tener información de datos cartográficos que contengan elevaciones, altitudes o curvas de nivel, levantamientos topográficos, datos previamente grabados con dispositivos GPS, etc. La generación de un TIN es únicamente compatible con ArcGis y se almacenan en un directorio del mismo nombre. (Pedregal Belén, 2009).

El proceso de generar superficies en 3D en base a un TIN, consiste en generar elevaciones mediante la formación de triángulos a partir de los datos de elevaciones que contiene nuestro archivo “Shape”.

No es recomendable utilizar como datos de altitudes, sistemas de coordenadas geográficas, sino, sistemas de coordenadas proyectadas. Igualmente, tener funciones como la pendiente, la línea de visión y el volumen pueden lanzar resultados equivocados, sobre todo cuando las unidades XY se expresan en medidas angulares. (<http://help.arcgis.com>).

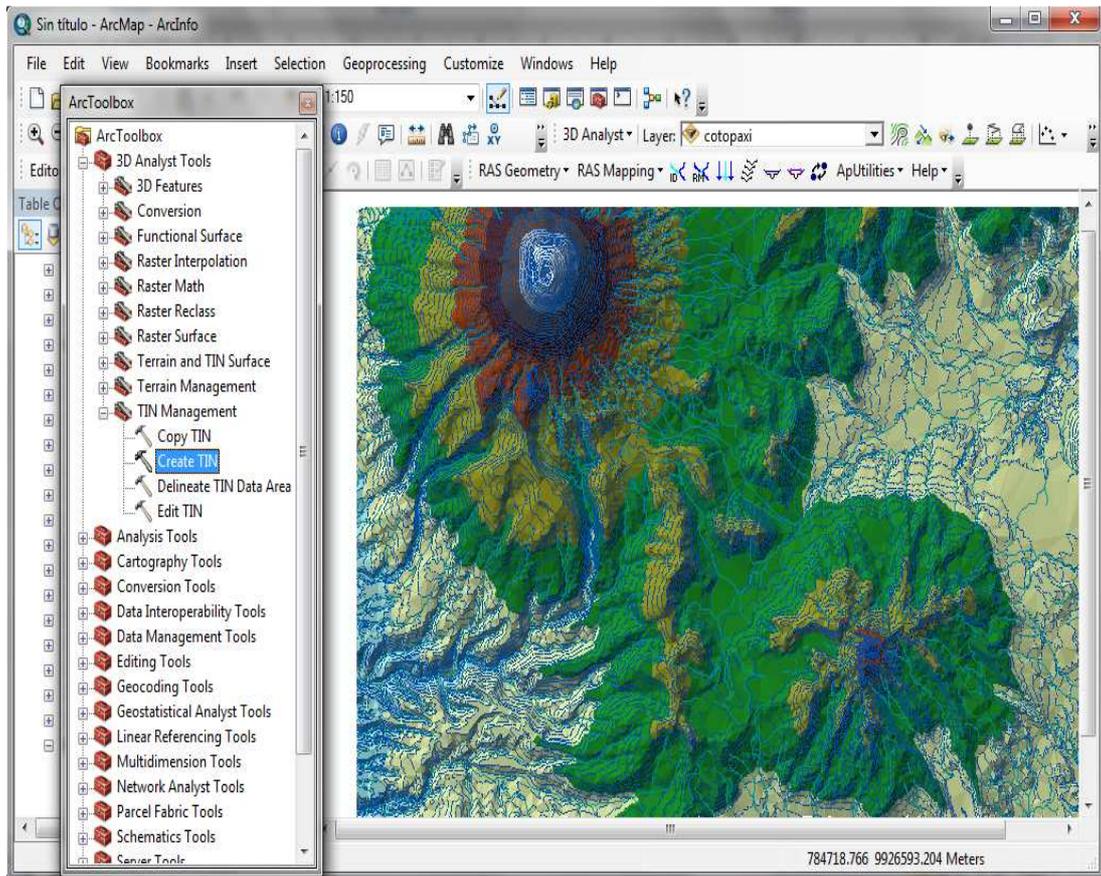


Figura 4.1.2.1.4: Vista del modelamiento 3D del Mapa Volcán Cotopaxi generado a partir de un TIN. Escala 1:50000.

#### 4.1.2.2. FUNCIONALIDAD DEL PROGRAMA HEC-geoRAS

HEC-geoRAS es un programa que se utiliza para procesar datos geospaciales en la plataforma ArcGis, mediante la interfaz gráfica de usuario (GUI), la cual una vez instalada, funciona como una barra de herramientas que debe ser activada en la aplicación ArcMap. También se puede ejecutar en la plataforma ArcView.

Existen dos versiones de software que pueden ser descargados gratuitamente desde la página web del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos y debido a

que se utilizó la última versión del programa ArcGis, se debe utilizar la última versión del programa HEC-geoRas, es decir, la versión 10 y no la “4.3 update”, pues esta es compatible solo para versiones anteriores.

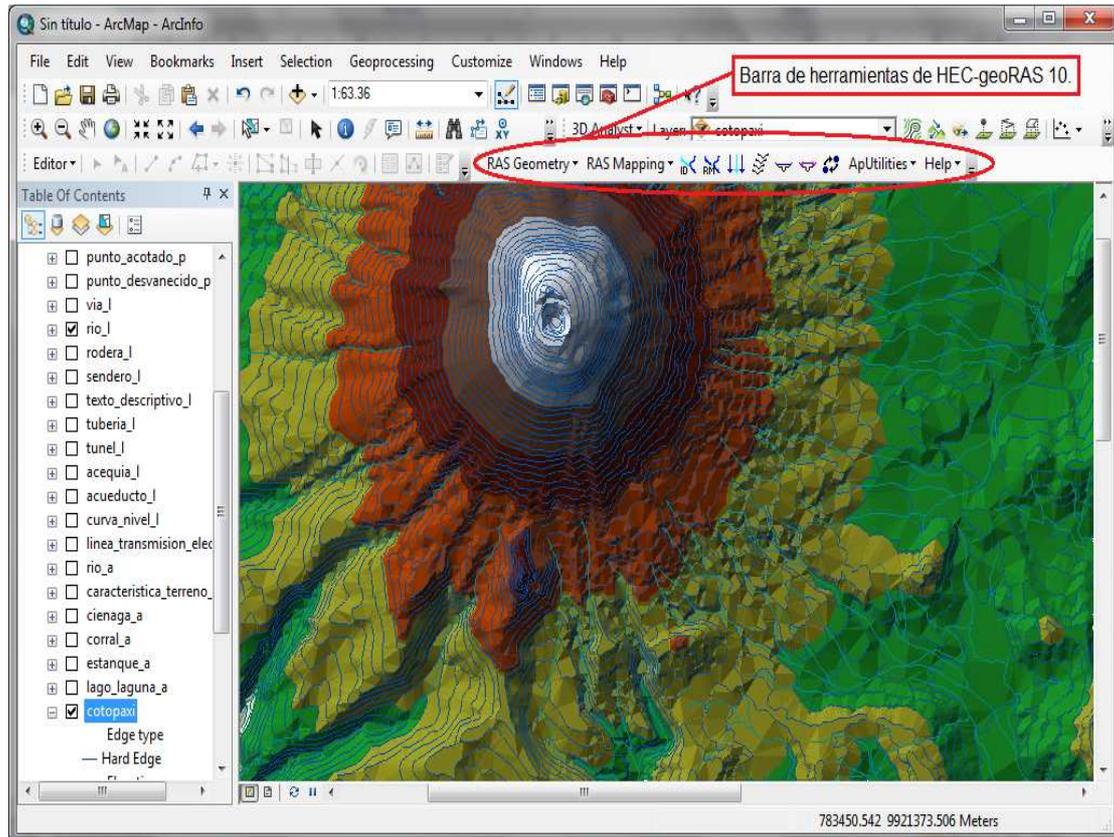


Figura 4.1.2.2.1: Vista de la barra de herramientas de HEC-geoRAS activada en la aplicación ArcMap.

HEC-geoRas permite realizar la organización de datos geométricos para la importación de datos a HEC-RAS. Para esto, el archivo de importación debe disponer de un modelo digital existente (DTM) de un sistema fluvial en formato TIN. El usuario mediante esta plataforma genera una serie de temas necesarios al

desarrollo de la línea de datos geométricos para HEC-RAS. Estos temas previamente generados son por ejemplo, la línea central del flujo de un río o canal natural (Stream Centerline), los principales bancos del canal (Bank Lines), los circuitos de flujo ( Flow Path Centerlines), así como también las líneas de corte o perfiles transversales ( XS Cut Lines). (<http://www.hec.usace.army.mil>).

Concluida la formación de estos temas, se procede a la exportación de archivos al programa HEC-RAS, para empezar con la introducción de datos hidráulicos necesarios para desarrollar la simulación que el usuario necesite.

#### **4.1.2.3. MANEJO DEL PROGRAMA ARCGIS 10 Y HEC-geoRAS 10 PARA LA EXPORTACIÓN DE DATOS GEOMÉTRICOS A HEC-RAS**

Para empezar con la generación de los datos geométricos para la simulación en el software HEC-RAS, se necesita contar con los mapas en modelo digital (DTM), que contenga dentro de sus datos SHAPE, el sistema fluvial de los ríos en análisis, para este caso el río Pita y Santa Clara. Igualmente, es preciso que contenga la información de las diferentes curvas de nivel, para la generación del archivo TIN.

Para este caso en particular, se utilizaron tres mapas digitalizados en escala 1:50000 por donde cruzan los ríos en estudio. Estos mapas corresponden a las áreas de Sincholagua, Pintag y Sangolquí y fueron otorgados por la Carrera de Geográfica perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Tierra y la Construcción de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE).

Cada uno de estos mapas contiene basta información de cada zona como los poblados, acueductos, senderos, carreteras, etc., pero se utilizó únicamente la información correspondiente a los ríos y curvas de nivel necesaria para la exportación de archivos. Además se encuentran correctamente georeferenciados, permitiendo que una vez hecha la simulación, se pueda observar correctamente las áreas de inundación.

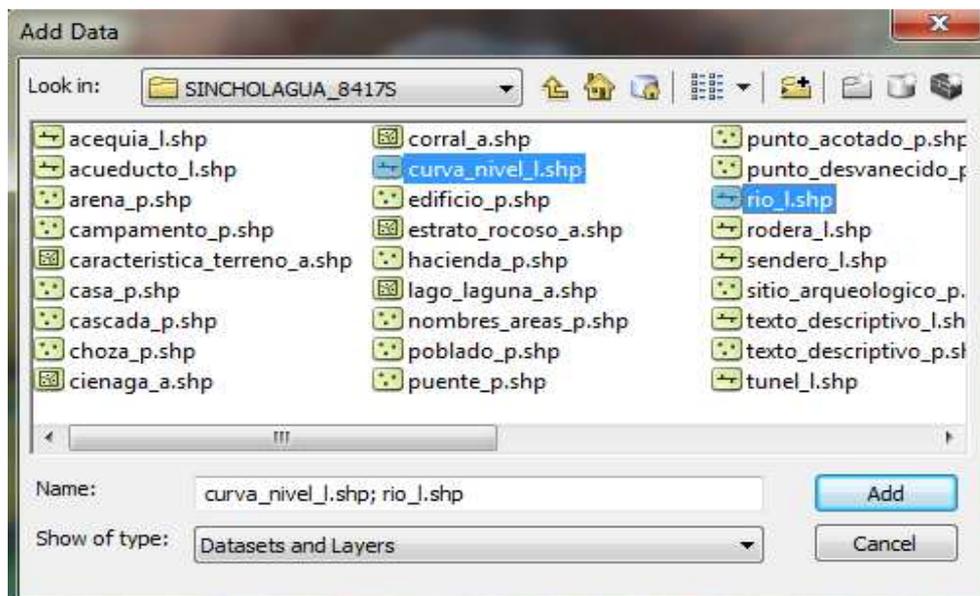


Figura 4.1.2.3.1: Base de datos del mapa digital de la zona de Sincholagua y selección de las capas correspondientes a las curvas de nivel y ríos de la zona.

Nótese que en la **Figura 4.1.2.3.1**, el archivo SHAPE que contiene toda la información sobre las curvas de nivel lleva el nombre “curva\_nivel\_l.shp” y, el que contiene toda la información de todos los ríos, es el archivo “rio\_l.shp”. Esto es igual para cada uno de los mapas de cada una de las zonas.

Con la obtención de los mapas digitalizados se procede a seleccionar de cada uno de ellos las capas de curvas de nivel, es decir los archivos “curva\_nivel\_I.shp”. Debido a la georeferenciación, se irán abriendo uno a continuación de otro dentro del área de visualización de ArcMap. Pero como cada uno de ellos contiene una base SHAPE diferente, a pesar de tener el mismo nombre, al momento de generar el archivo TIN, tendremos que hacerlo para cada mapa abierto. Esto provoca problemas con la herramienta de HEC-geoRAS cuando necesitemos crear la topología del río que cruza por los diferentes mapas, ya que HEC-geoRAS reconoce únicamente un archivo TIN.

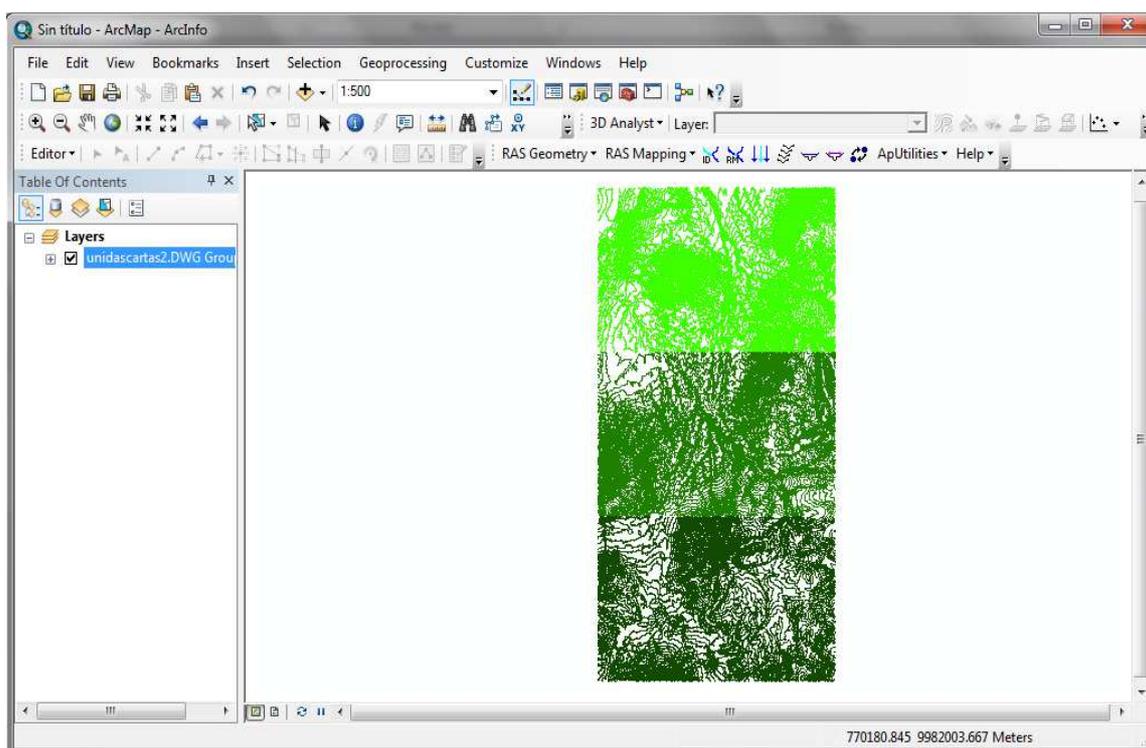


Figura 4.1.2.3.2: Vista del archivo “unidascartas2.dwg”, en el área de visualización de la aplicación ArcMap. Escala 1:50000

Para solucionar este inconveniente, se procedió primero a exportar las curvas de nivel de cada uno de ellos hacia el programa AutoCad 2011, una vez exportados, se los unió y se los importó de nuevo como archivo “.dwg”. De esta manera se permite formar un solo archivo TIN para los tres mapas juntos y sin ninguna dificultad, pues ArcMap puede abrir sin problemas archivos de la plataforma AutoCad. Este archivo lleva como nombre “unidascartas2.dwg”, como se observa en la **Figura 4.1.2.3.2.**

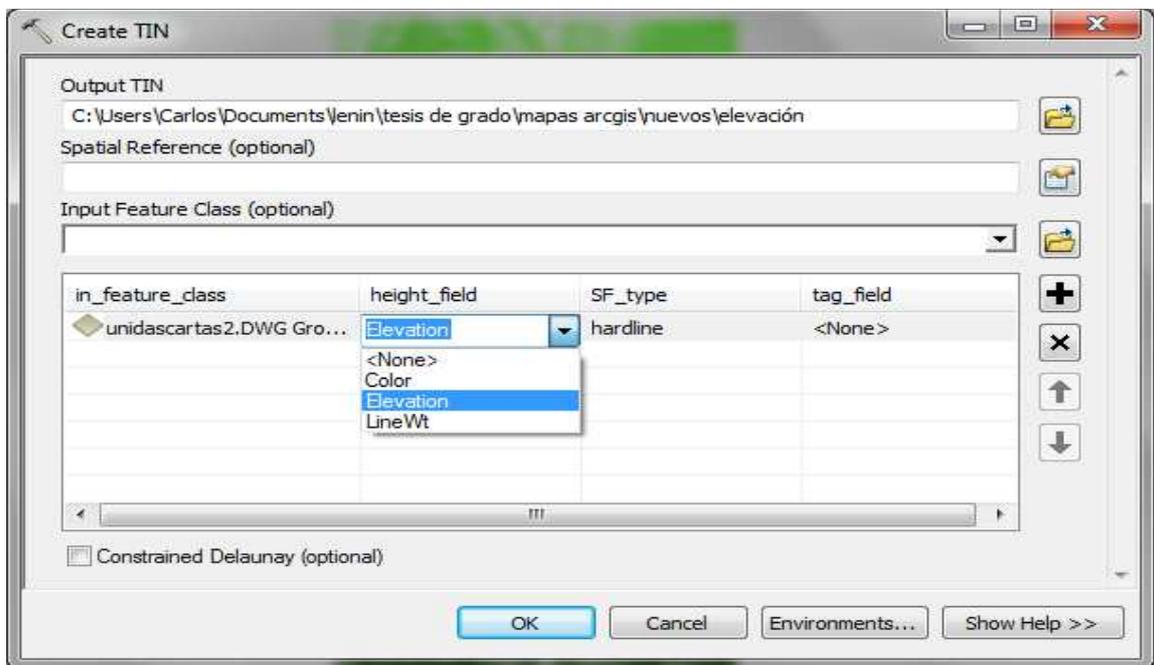


Figura 4.1.2.3.3: Vista de la ventana “Create TIN”, donde se muestra la dirección, el nombre y la altura de campo del archivo TIN que se va a crear.

Una vez abierta la capa “unidascartas2”, se procede a crear el archivo TIN para formar la superficie 3D del terreno en base a las curvas de nivel. Para esto, se lanza desde la aplicación ArcMap, la aplicación ArcToolbox, y escogemos la

opción “Create TIN” que se encuentra dentro de la opción “TIN Management” en la herramienta “3D Analyst Tools”. Tal cual muestra la **Figura 4.1.2.3.3**.

Esta opción abrirá una ventana en la cual debemos dar la dirección y el nombre del archivo TIN que se va a crear. En el presente proyecto de tesis, este archivo lleva el nombre de “Elevación”.

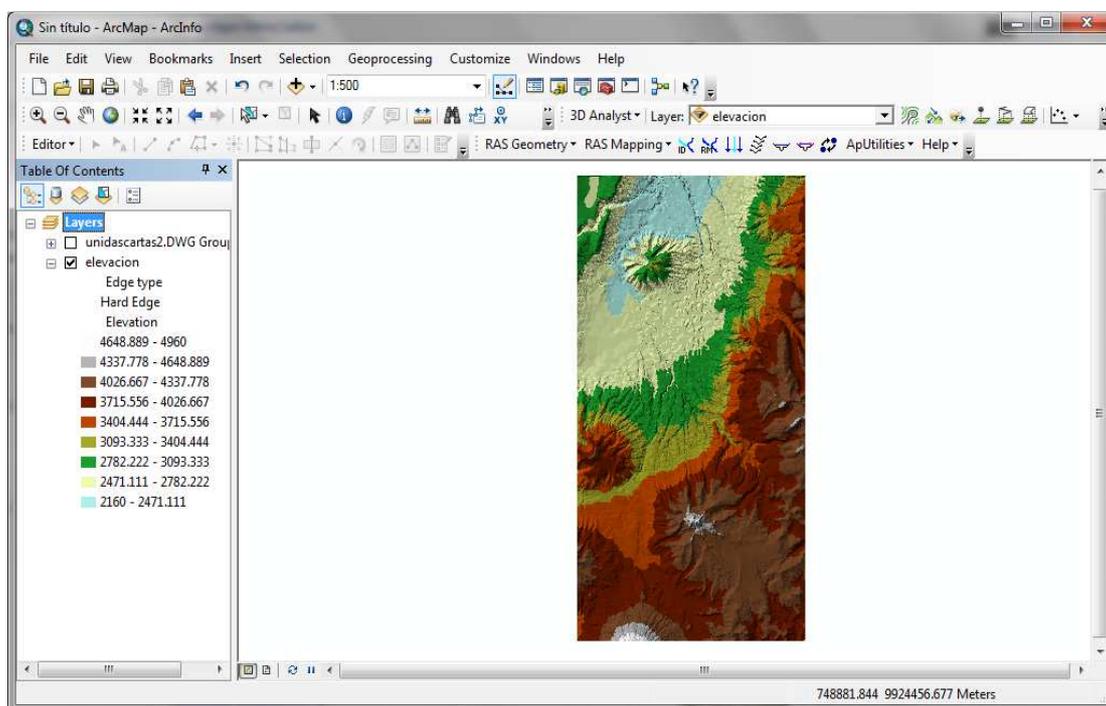


Figura 4.1.2.3.4: Vista del archivo TIN, creado a partir de la capa “unidascartas2.dwg” que contiene los mapas de las áreas de Sincholagua, Pintag y Sangolquí unidas. Escala 1:50000

Además se debe seleccionar en la opción Clase de Entidad de Entrada (Input Feature Class), la capa que contiene las curvas de nivel. Para el caso del archivo “unidascartas2.dwg”, esta capa lleva por nombre predefinido “polyline”, de esta

manera en la opción Altura de Campo (Height Field) podemos seleccionar el nombre de la opción donde se encuentran los datos de alturas de las curvas de nivel necesarias para realizar la triangulación que genera el modelamiento 3D. Esta opción lleva por nombre "Elevation".

Formado el modelamiento 3D de toda el área en estudio, se procede a añadir las capas que contienen la información de los ríos de cada uno de los mapas, es decir el archivo "rio\_l.shp", capas que se ubicarán en la tabla de contenidos de la aplicación ArcMap. Una vez concluida esta tarea, se selecciona los ríos que serán parte del análisis del presente proyecto, de tal manera que formamos una guía por donde se dibujará el eje central del río y los demás temas de datos geométricos que el programa HEC-RAS necesita como información para la simulación de los lahares del volcán Cotopaxi.

Para seleccionar cada dato de los ríos Pita o Santa Clara, se debe escoger la opción "Abrir Tabla de Atributos" (Open Attribute Table), que se encuentra al hacer clic derecho en la capa correspondiente a cada archivo "rio\_l.shp" previamente abierto en la tabla de contenidos.

En la siguiente imagen se muestra el eje del cauce del río Pita, a partir de la selección de cada dato ubicado en la tabla de atributos de los diferentes archivos SHAPE "rio\_l.shp". El río empieza desde su nacimiento aguas arriba, en las coordenadas "UTM" (791686,222 9931468,15 metros) hasta su desembocadura en el río San Pedro, aguas abajo, en las coordenadas "UTM" (782388,745 9967806,097 metros).

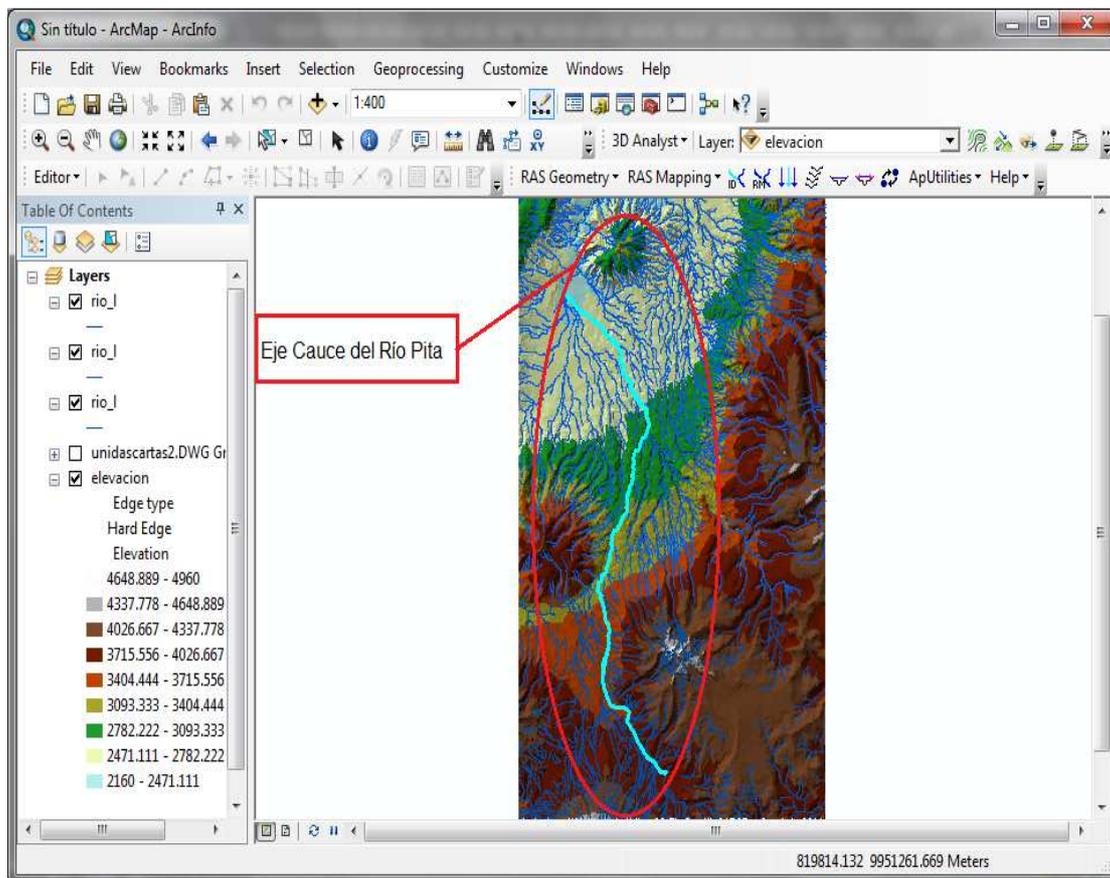


Figura 4.1.2.3.5: Vista del cauce del río Pita en el área de visualización de la aplicación ArcMap, creada mediante la selección de datos de la tabla de atributos de cada archivo.

Finalizado este proceso se empieza a trabajar con la barra de herramientas del programa HEC-geoRAS, para ello se debe guardar con un nombre el trabajo que estamos desarrollando en la aplicación ArcMap, de lo contrario, HEC-geoRAS no podrá ejecutarse. Para el presente proyecto se guardaron dos archivos diferentes, uno para el río Pita cuyo nombre es “Simula\_pita” y otro para el río Sta. Clara cuyo nombre es “Simula\_SantaClara”.

#### 4.1.2.3.1. MÉTODO DE USO DEL PROGRAMA HEC-geoRAS

Un procesamiento hidráulico con el programa HEC-geoRas consta de tres pasos:

- Pre-procesamiento de datos.
- Ejecución del modelo en HEC-RAS, y
- Post-procesamiento o visualización de los resultados.

Como sucede en el caso actual, es común el uso de un documento o mapa único para manejar un solo proyecto, pero esto acaba con las clases de entidad, pues se crean demasiadas capas en un solo mapa. Esto dificulta la visualización de las entidades que se utilizaron para el pre-procesamiento, de las entidades que contienen los datos de visualización. Para solucionar este problema HEC-geoRAS emplea tramas de datos independientes para poder estructurar correctamente el pre y post-procesamiento de datos, los cuales en el caso de "HEC-geoRas 10" se generan automáticamente, pero en el caso de "HEC-geoRas 4.3 update", es necesario crear manualmente un marco de datos mediante la opción "ApUtilities" en la barra de herramientas de esta versión del programa. Por lo tanto, en la opción "ApUtilities" se selecciona la opción "Add New Map" (Añadir Nuevo Mapa) y se da un nombre a la trama de datos (data frame) que vamos a generar, para que HEC-geoRAS introduzca todos los datos geométricos que forman parte del pre-procesamiento. (Merwade Venkatesh, 2010).

Una vez que se da el nombre del proyecto en la aplicación ArcMap, se empieza con la introducción de datos geométricos que forman parte del pre-procesamiento hidráulico. Todos y cada uno de ellos se encuentran en la barra de herramientas

del programa HEC-geoRAS, en la opción “RAS Geometry” (Geometría RAS) y dentro de ella, en la opción “Create RAS Layers” (Crear Capas RAS).

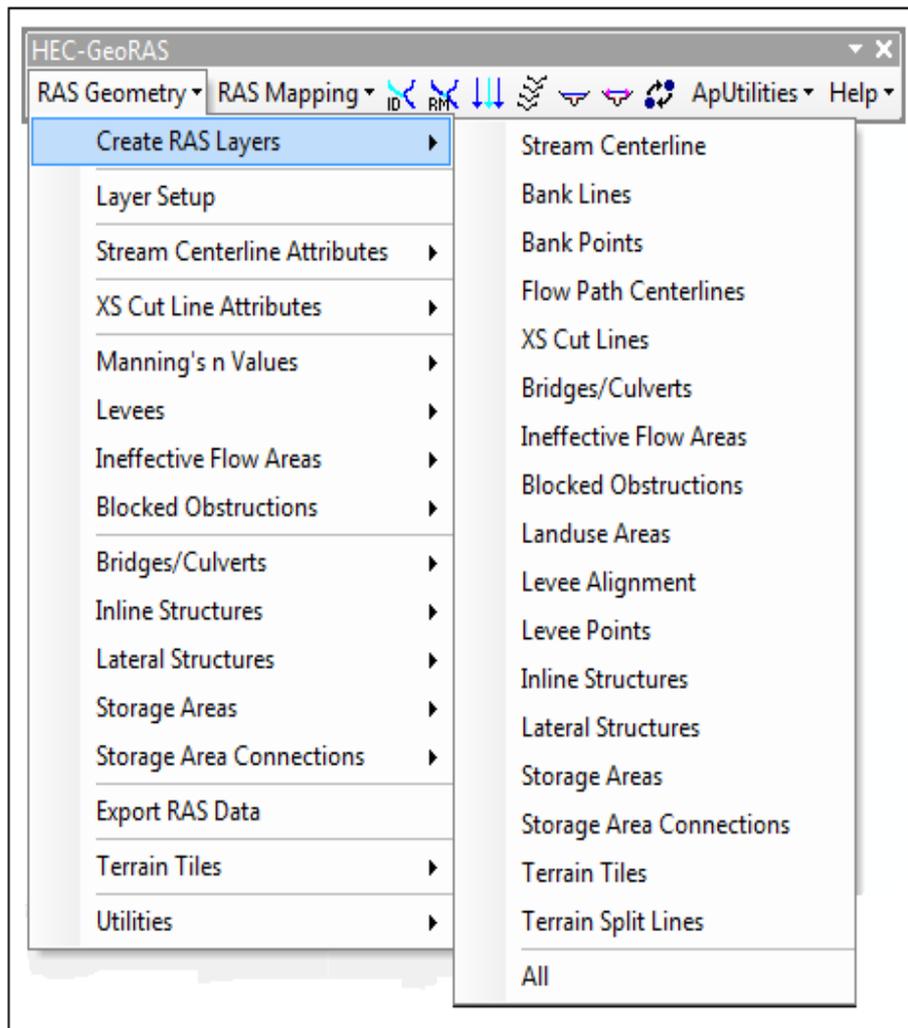


Figura 4.1.2.3.1.1: Vista de las capas geométricas para el pre-procesamiento de datos hidráulicos abierta desde la barra de herramientas de HEC-geoRAS.

Como se puede observar en la **Figura 4.1.2.3.1.1.**, existen varias capas geométricas que podemos introducir como datos para el pre-procesamiento de HEC-geoRAS y que serán exportados al programa HEC-RAS. Cada uno de ellos

depende del tipo de análisis que se quiera realizar al momento de desarrollar la simulación del cauce de un río. Para el caso presente, se utilizaron las cuatro primeras capas, que son las fundamentales para realizar cualquier tipo de simulación hidráulica.

Es posible crear todas estas capas a la vez mediante la opción "All", que aparece en la parte inferior de la pestaña "Create RAS Layers", para luego ir dando a cada una de ellas las diferentes propiedades; pero es recomendable ir generando una capa a la vez, de tal forma que se evite posibles errores al momento de exportar los datos al programa HEC-RAS.

#### **4.1.2.3.1.1. DIGITALIZACIÓN DE LA CORRIENTE CENTRAL (STREAM CENTERLINE)**

Empezamos con la formación de la primera capa, llamada "Stream Centerline" (Corriente Central); esta capa es la que formará el eje central del cauce del río y establecerá el alcance del nivel fluvial. Una vez seleccionada, se abrirá una ventana donde introduciremos el nombre a la capa, en este caso "Río\_Pita" e inmediatamente aparecerá la capa en la ventana de tabla de contenidos de la aplicación ArcMap y un mensaje donde se informa que la capa se ha generado exitosamente.

Generada la capa debemos dibujar la misma sobre la guía del cauce central que se formó con anterioridad mediante la tabla de atributos de cada archivo "rio\_l.shp". Para ello escogemos la opción "Start Editing" (Empezar Edición); que se encuentra en la barra de herramientas "Editor" de la aplicación ArcMap. Se

selecciona la capa "Rio\_Pita" que aparecerá en la ventana "Create Features" (Crear Funciones), además en la ventana "Construction Tools" (Herramientas de Construcción), seleccionamos la opción "Line" (Línea) y procedemos a dibujar la capa sobre el cauce del río previamente señalado, empezando desde aguas arriba hacia aguas abajo del cauce.

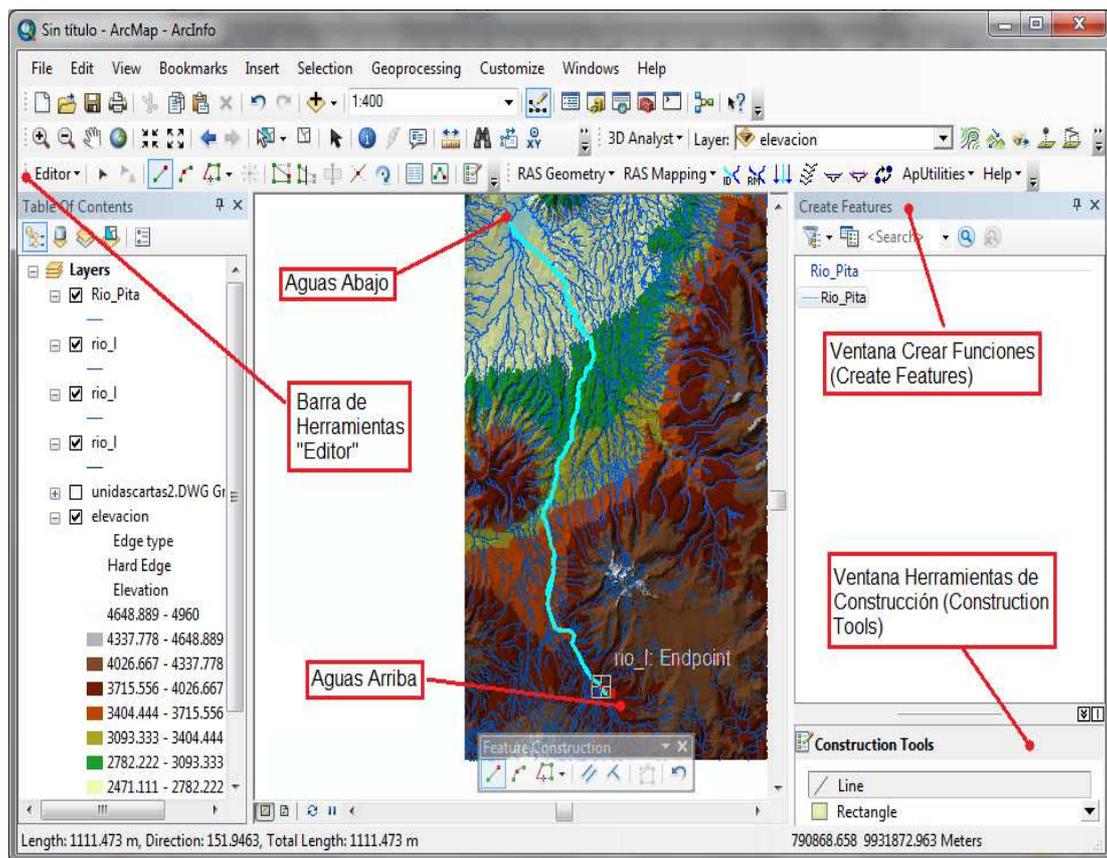


Figura 4.1.2.3.1.1.1: Vista de la Barra de Edición, Ventana Crear Funciones, Ventana Herramientas de Construcción y formación de la capa "Rio\_Pita" como corriente central del flujo, dibujada desde aguas arriba hacia aguas abajo del cauce.

Una vez que se termina de dibujar la capa "Stream Centerline", debemos guardarla utilizando la opción "Save Edits" (Guardar Ediciones) que se encuentra

en la barra de herramientas “Editor” de ArcMap y luego se debe parar la edición mediante la opción “Stop Editing” (Detener la Edición) que se ubica en la misma barra de herramientas.

Finalizado el proceso de digitalización de la capa “Stream Centerline”, se debe nombrar la misma. HEC-RAS debe tener un nombre único para cada río o tramo de río que se dibuje. Por lo tanto para dar el nombre a la capa, debemos emplear la opción “Assign RiverCode and ReachCode to River” (Asignar Código del Río y Código del Tramo del Río) que se encuentra en la barra de herramientas del programa HEC-geoRAS. Una vez que escogemos esta opción, se debe dar un clic sobre la capa recién formada. En ese momento aparecerá una ventana donde daremos el nombre del río y el tramo al cual pertenece. Para el caso del presente proyecto, se nombró al río como “Río\_Pita” y al tramo como “Completo”, debido a que se dibujó una sola capa desde aguas arriba hacia aguas abajo del cauce.

Dado el nombre a la capa, a continuación se debe asignar los diferentes atributos o propiedades de la misma, para ello seleccionamos en la barra de herramientas de HEC-geoRAS, la pestaña “Stream Centerline Attributes” (Atributos de la Corriente Central) que se encuentra dentro de la pestaña “RAS Geometry”.

Como se puede observar en la **Figura 4.1.2.3.1.1.2.**, existen tres atributos que se deben seleccionar. En el caso del primero, es decir del atributo “Topology” (Topología) se abrirá una ventana donde deberemos seleccionar el nombre de la capa “Stream Centerline”, para nuestro caso “Rio\_Pita”; y el nombre del archivo TIN que formamos en un principio, para este caso “Elevación”.

En el caso del último atributo, correspondiente a “Elevations” (Elevaciones), aparecerá una ventana que indicará que no es necesario generarlo para trabajar

con HEC-RAS, por lo tanto queda a disposición del usuario la formación o no del mismo.

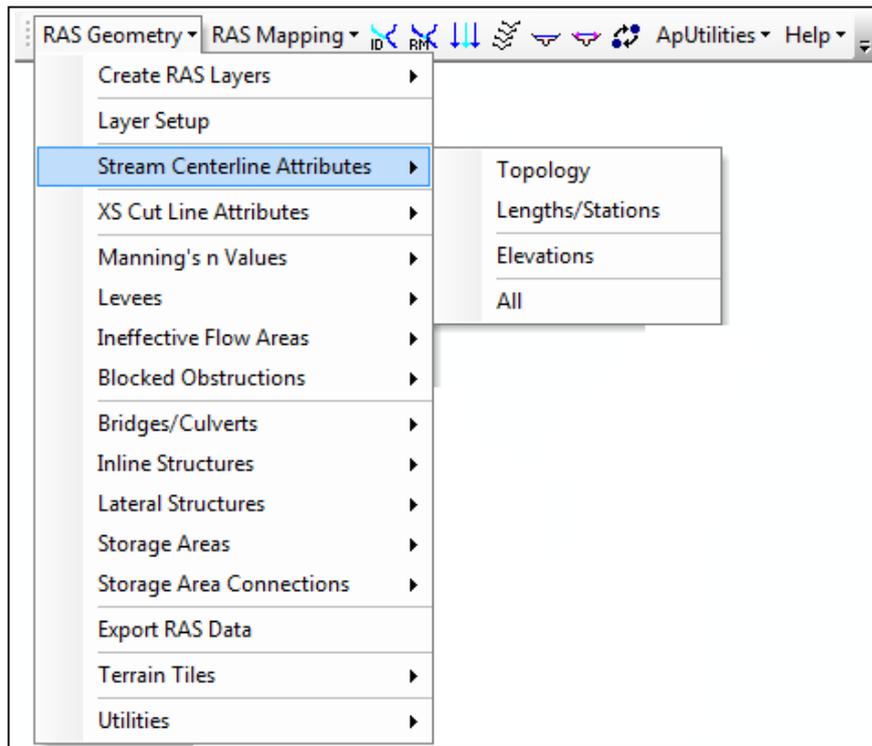


Figura 4.1.2.3.1.1.2: Vista de las opciones de atributos de la capa “Stream Centerline”.

#### 4.1.2.3.1.2. DIGITALIZACIÓN DE LOS BANCOS DEL RÍO (BANKS LINES)

La capa “Banks Lines” (Bancos del Río) se la utiliza para diferenciar el canal principal del río de las zonas de inundación o desbordamiento. También permite distinguir las áreas del flujo izquierda y derecha, del eje central del río.

De esta manera se puede dar los diferentes valores correspondientes al coeficiente de Manning en los diferentes perfiles transversales. (Merwade Venkatesh, 2010).

Para crear esta capa se debe repetir el proceso de la capa anterior, escogiendo en la pestaña “Create RAS Layers”, la opción “Banks Lines”. De la misma manera aparecerá una ventana donde se debe dar el nombre a la capa, la cual para el presente proyecto se la llamó “Bancos”. Luego se repite el proceso de edición de la capa formada, por medio de la barra de herramientas “Editor” de la aplicación ArcMap.

No existe una secuencia lógica para dibujar los bancos del río, pero se recomienda hacerlo de aguas arriba hacia aguas abajo, empezando por el lado izquierdo y concluyendo con el lado derecho en el sentido del movimiento del flujo, simplemente por mantener una metodología ordenada durante el desarrollo de cualquier proyecto.

Para dibujar cada uno de los bancos del río se debe tomar en consideración el caudal normal del mismo, es decir, marcar las zonas por donde regularmente corre el agua en épocas normales y no en épocas de inundación o estiaje.

Como esta capa no necesita atributos especiales, la misma concluye una vez que se guarda y se detiene la edición.

#### **4.1.2.3.1.3. DIGITALIZACIÓN DE LOS CIRCUITOS DE FLUJO (FLOW PATH CENTERLINES)**

La capa trayecto o circuitos de flujo contiene tres tipos de líneas: desbordamiento izquierdo, derecho y central. Estas líneas sirven para determinar las longitudes de alcance de inundación aguas abajo entre las secciones transversales, el canal principal y las áreas bancarias. Además permite al programa HEC-geoRAS,

calcular las distancias entre los diferentes perfiles transversales. (Merwade Venkatesh, 2010).

Para formar esta capa, nuevamente debemos dirigirnos a la pestaña “Create RAS Layers” y escoger la opción “Flow Path Centerlines” (Circuitos de Flujo). De igual manera que en las dos capas anteriores, aparecerá una ventana donde se da el nombre a la capa, que para este caso se la nombró “Circuitos”.

Una vez que se da el nombre a la capa, el programa nos preguntará si queremos establecer a la capa “Rio\_Pita” correspondiente a la corriente central, como la trayectoria central del flujo. Ya que al momento de dibujar la corriente central se lo hizo aproximadamente por el centro cauce del río, se la estableció como circuito central, de tal manera que solo queda dibujar los circuitos izquierdo y derecho.

En el caso de no querer establecer la corriente central como trayectoria o circuito central del río, se deberá dibujar la misma.

Para digitalizar las capas se debe repetir el proceso explicado anteriormente por medio de la barra “Editor” de la aplicación ArcMap.

Nuevamente no existe una secuencia lógica para dibujar cada uno de los circuitos, pero se recomienda utilizar el mismo procedimiento de la capa anterior, es decir, desde aguas arriba hacia aguas abajo, dibujando primero el circuito izquierdo y después el derecho en el sentido de la corriente del flujo y teniendo en cuenta que cada uno de los circuitos debe estar ubicado dentro de las llanuras de inundación.

Ya digitalizado cada uno de los circuitos y una vez que se guardó y se detuvo su edición; se debe dar la ubicación de cada uno de ellos, de tal manera que el programa reconozca cuál es el circuito izquierdo y cuál el derecho.

Para realizar esta tarea nos dirigimos a la opción “Select Flowpath and Assign LineType Attributes” (Seleccionar Patrones de Flujo y Asignar Atributos del Tipo de Línea), que se encuentra en la barra de herramientas del programa HEC-geoRAS. Luego se da clic sobre cualquiera de los circuitos y se abre una ventana donde escogeremos el lado al que corresponde, es decir que para el circuito derecho escogeremos la opción “Rigth” (Derecho) y para el izquierdo la opción “Left” (Izquierdo).

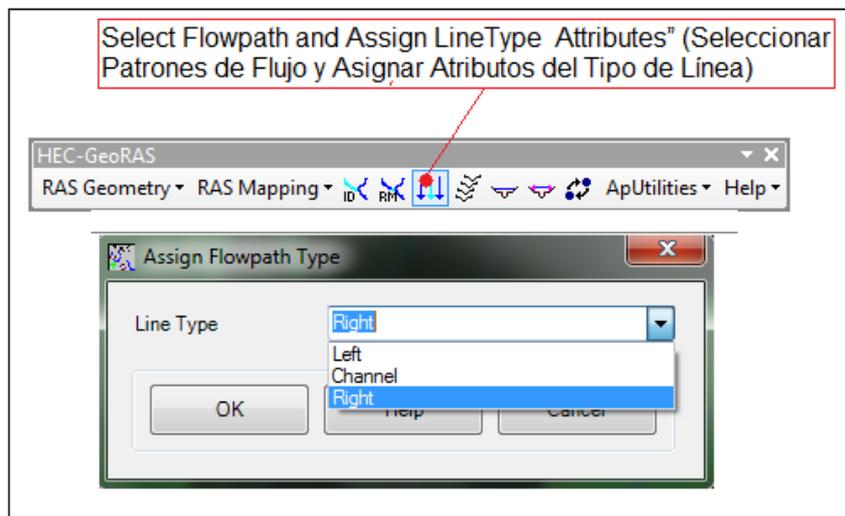


Figura 4.1.2.3.1.3.1: Vista de ubicación del icono “Select Flowpath and Assign LineType Attributes” en la barra de herramientas de HEC-geoRAS y su ventana de atributos.

Es así que se concluye con la introducción de datos geométricos que forman parte del esquema fluvial o perfil longitudinal de los ríos Pita y Santa Clara; y una vez que se exporten estos datos al programa HEC-RAS, se trabajará con un esquema totalmente georeferenciado, lo cual permitirá realizar un análisis de inundación más exacto.

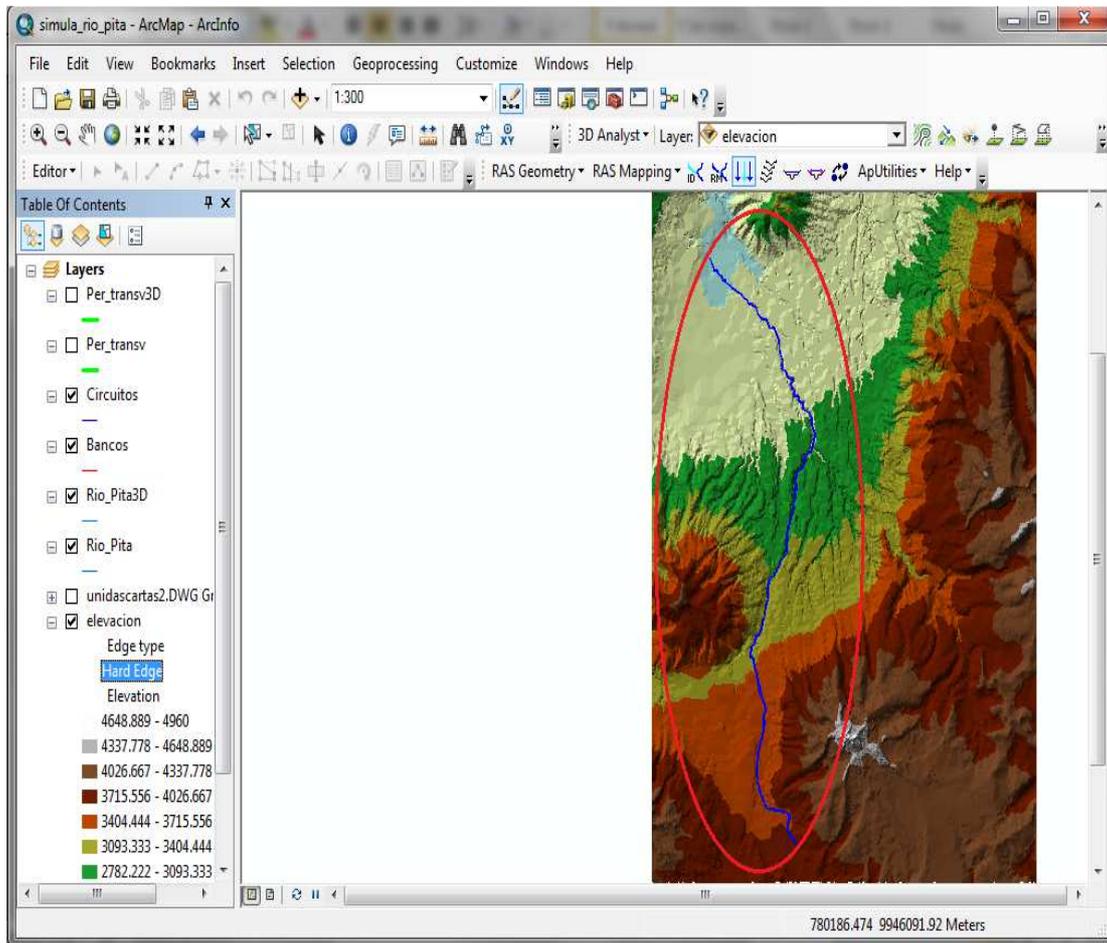


Figura 4.1.2.3.1.3.2: Esquema fluvial del río Pita esquematizado a partir de las diferentes capas de HEC-geoRAS en el área de visualización de la aplicación ArcMap. Escala 1:50000.

#### 4.1.2.4. GENERACIÓN DE LOS PERFILES TRANSVERSALES

Las secciones transversales de los ríos son uno de los elementos fundamentales para trabajar con el programa HEC-RAS. Estas líneas de corte sirven para extraer datos de elevación, para crear un perfil del suelo a partir del canal del flujo y para

introducir los diferentes valores del coeficiente de Manning en las diferentes áreas del canal. (Merwade Venkatesh, 2010).

Nuevamente existen dos maneras de introducir la información de los perfiles transversales al programa HEC-RAS. Una es mediante la utilización de las plataformas ArcGis y HEC-geoRAS y la otra, mediante la introducción de los datos medidos en el campo, utilizando las herramientas que contiene la propia plataforma del programa HEC-RAS.

En el presente proyecto se utilizó cada una de las diferentes metodologías a fin de comprobar todas las ventajas y desventajas que posee cada programa, permitiendo desarrollar una simulación con excelentes resultados.

Como el presente trabajo enfoca de manera descriptiva la utilización de cada metodología, a continuación, se explica la manera de realizar el proceso de creación de perfiles transversales con cada uno de los diferentes métodos.

#### **4.1.2.4.1. DIGITALIZACIÓN DE LOS PERFILES TRANSVERSALES (XS CUT LINES) CON EL PROGRAMA HEC-geoRAS**

Para generar los perfiles transversales mediante HEC-geoRAS, nuevamente recurrimos a su barra de herramientas, seleccionando la opción “XS Cut Lines” (XS Líneas de Corte) que se encuentra dentro de la pestaña “Create RAS Layers” en el menú “RAS Geometry”.

Se abrirá una ventana donde se debe dar el nombre a la capa, que para el presente caso se la nombró “Perv\_Transv”. Luego, repetimos el proceso ya indicado con la barra de edición de ArcMap, seleccionamos la capa a editarse y

dibujamos cada uno de los perfiles transversales tomando en consideración los siguientes puntos: 1) Deben ser digitalizadas perpendicularmente a la dirección del flujo, es decir, perpendicularmente a cada una de las capas que se dibujaron con anterioridad y que forman parte del esquema fluvial del río; 2) Se debe considerar el tamaño de la extensión de la posible inundación para poder dibujar cada uno de los perfiles; 3) Cada perfil debe ser digitalizado de izquierda a derecha, mirando siempre hacia aguas abajo del río; 4) En el caso de querer introducir una estructura como un puente, por ejemplo, se debe dibujar un perfil aguas arriba, otro aguas abajo y por supuesto, uno donde se va a dibujar la estructura. (Merwade Venkatesh, 2010).

Se pueden dibujar cuantos perfiles se deseen, sin necesidad de tener previamente la disponibilidad de los datos topográficos tomados en el campo. Esto debido a que se generó un mapa tridimensional por medio de la formación de un archivo TIN, el cual genera elevaciones a partir de la información de las curvas de nivel que contiene cada archivo "shapefile" como se mencionó con anterioridad.

Una vez concluido el proceso de edición, es necesario dar los diferentes atributos a la capa recién formada. Para ello en la barra de HEC-geoRAS, dentro de la pestaña "RAS Geometry" vamos a la pestaña "XS Cut Lines Attributes" (XS Atributos de Líneas de Corte) y escogemos cada una de las opciones que se encuentran dentro de ella.

De esta manera se termina la introducción de todos los datos geométricos necesarios para la simulación dentro del programa HEC-RAS.

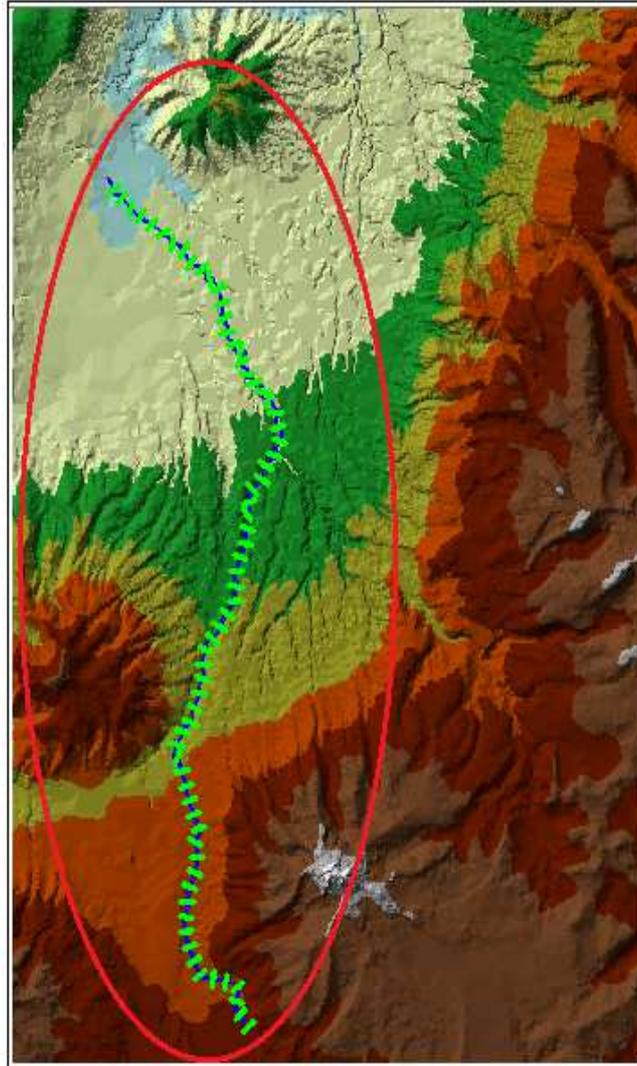


Figura 4.1.2.4.1.1: Vista del Río Pita con todas las capas o datos geométricos dibujados en ArcMap. Escala 1:50000

#### **4.1.2.4.1.1. EXPORTACIÓN DE LOS DATOS GEOMÉTRICOS**

Ya que se tiene toda la información geométrica que forma parte del pre-procesamiento de datos. Se debe exportar los mismos al programa HEC-RAS para proceder con la respectiva simulación.

Por lo tanto, es importante asegurarnos primeramente que todas y cada una de las capas que acabamos de digitalizar sean las que se van a exportar. Para ello, dentro de la pestaña “RAS Geometry” seleccionamos la opción “Layer Setup” (Opciones de Capa). Se abrirá una ventana donde se encuentra cada una de las capas que se han formado. En caso de que una de ellas no se encuentre activada, se debe activarla para que sea exportada en conjunto con las otras capas ya creadas.

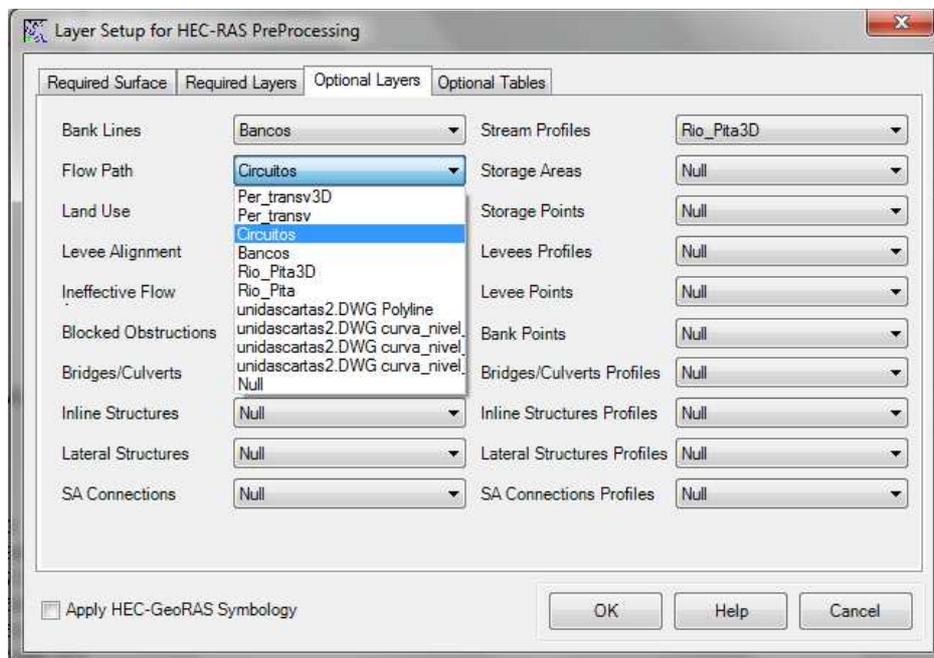


Figura 4.1.2.4.1.2: Vista de la ventana “Layer Setup” y activación de la capa Circuitos.

Luego de haber comprobado que todas las capas digitalizadas están activadas. Se procede a la exportación de cada una de ellas hacia el programa HEC-RAS. Por lo tanto, en la pestaña “RAS Geometry” seleccionamos la opción “Export RAS Data” (Exportar datos RAS). Se abrirá una ventana donde daremos el nombre del

archivo y la ubicación del mismo. De esta manera empieza el proceso de exportación de datos que dura aproximadamente un minuto.

Es posible que al momento de exportar los archivos ocurra un error que hace referencia a un archivo (ESRI XML), y se suspenda la exportación de los datos como se muestra en la siguiente figura.

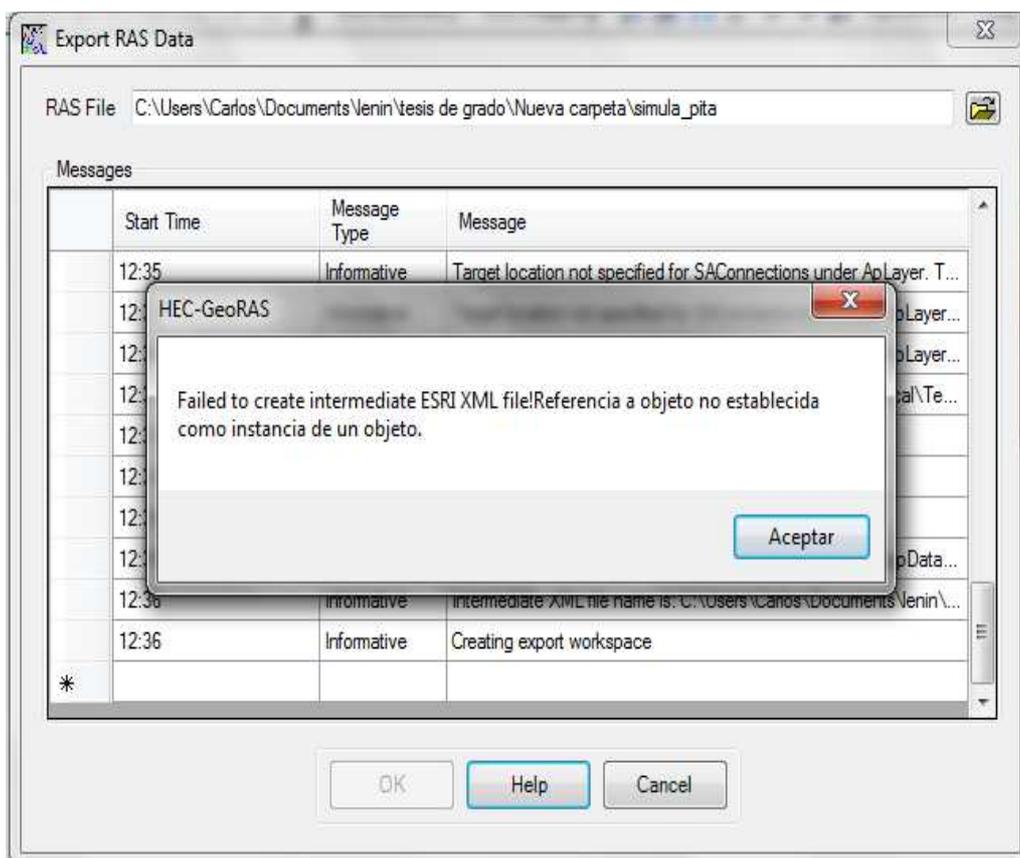


Figura 4.1.2.4.1.3: Error en la exportación de datos geométricos al programa HEC-RAS por falla en el archivo (ESRI XML).

Este error sucede por la generación de archivos temporales. Por lo cual se recomienda que antes de empezar con el proceso de digitalización de las capas,

se borren todos los archivos temporales que el ordenador genera durante la utilización de los diferentes programas, aperturas de ventanas e incluso por la utilización del internet. También es recomendable borrar nuevamente los archivos temporales una vez concluido la digitalización de los datos geométricos, es decir, antes de la exportación de los mismos.

En el caso de tener este error se debe repetir todo el proceso de digitalización desde el inicio, es decir, desde la apertura de la aplicación de ArcMap.

Exportados los datos, abrimos el programa HEC-RAS y el documento donde generaremos la simulación, para este caso "Rio\_Pita".

Para introducir los datos exportados, abrimos la ventana EDIT/ENTER GEOMETRIC DATA. Abrimos la opción "File" (Archivo), abrimos la pestaña "Import Geometry Data" (Importar Datos Geométricos) y seleccionamos la opción "GIS Format" (Formato GIS).

Aparecerá una ventana donde primeramente se deberá escoger el sistema de unidades y donde se verificará que todos los datos geométricos han sido exportados. Echo esto, aceptamos la importación de los datos geométricos, concluyendo de esta manera el pre-procesamiento de datos para la respectiva simulación. Por lo cual únicamente nos queda introducir la información hidráulica como coeficientes de Manning en cada uno de los perfiles transversales, los coeficientes de contracción y expansión, así como también los caudales previamente calculados.

#### **4.1.2.4.2. INTRODUCCIÓN DE LOS PERFILES TRANSVERSALES MEDIANTE EL PROGRAMA HEC-RAS**

Otra manera de introducir los perfiles transversales es mediante la utilización de la plataforma HEC-RAS, para ello es fundamental que se tenga ingresado primero el perfil longitudinal del río que se va a analizar.

Concluido el esquema fluvial, el siguiente paso es el ingresar las secciones transversales de cada uno de los ríos. Para ello utilizamos el icono “Cross Section” (Corte Transversal), que se encuentra en la ventana GEOMETRIC DATA.

En esta ventana mediante la opción “Add New Cross Section” (Añadir Nueva Sección Transversal) damos la referencia relativa, estación o nombre de cada una de las secciones transversales mediante números, de tal manera que resulte fácil identificar cada uno de ellos. El programa coloca cada sección empezando siempre desde aguas arriba del tramo que hayamos seleccionado hacia aguas abajo. En la misma ventana damos las cotas (Elevation) y las abscisas (Station) de cada perfil, así como los coeficientes de Manning para la sección izquierda, derecha y media; también se procede a indicar los coeficientes de expansión y contracción como las distancias en la que se ubica cada perfil con respecto al anterior ubicado aguas arriba.

En la siguiente figura se muestra uno de los esquemas de secciones transversales para el río Pita graficada desde la ventana “Cross Section Data”. En ella se puede apreciar el río, el tramo y la estación.

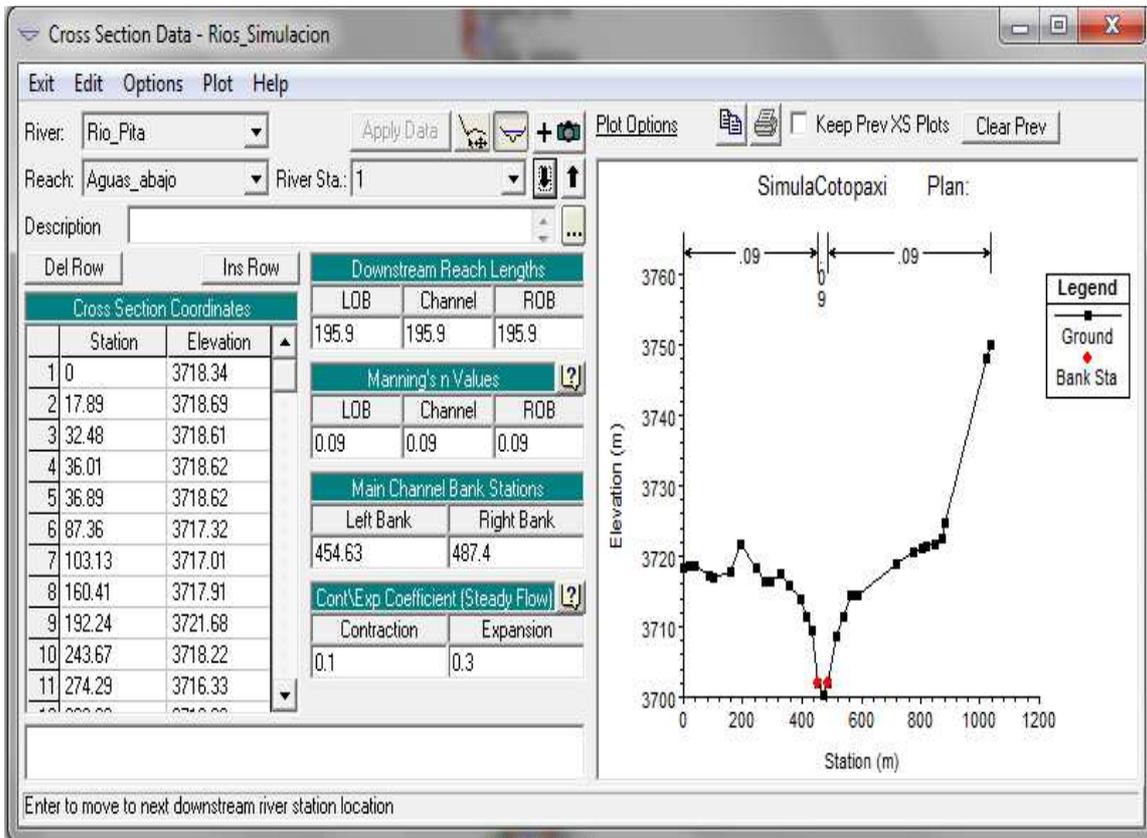


Figura 4.1.2.2: Primera sección transversal del Río Pita vista desde la ventana “Cross Section” del programa HEC-RAS.

Es importante recordar que para dar la estación, (referencia relativa o nombre de cada sección transversal) se debe empezar de mayor a menor número, para el presente proyecto se cuenta con 70 secciones transversales para el Río Pita, por lo tanto el primer perfil a introducir será el que se encuentre encabezando el flujo aguas arriba y por consiguiente su estación será la número 70, la que le sigue será la 69, etc.

Terminado el ingreso de todos los datos de las secciones transversales para cada uno de los ríos y tramos, se procede a introducir los datos adicionales para el flujo hidráulico, como son los caudales y las condiciones del flujo.

#### 4.1.3. INTRODUCCIÓN DE CAUDALES Y CONDICIONES DE FLUJO

Establecidos los coeficientes de Manning y los coeficientes de expansión y contracción de cada perfil transversal, los mismos que se introducen desde la ventana "Cross Section", se procede a introducir los caudales y condiciones de flujo.

Por lo cual se debe analizar primeramente a qué tipo de flujo corresponde la simulación que vamos a realizar, si es un flujo permanente o no permanente; pues de ello dependerá el tipo de dato a ser ingresado.

Para nuestro caso se estableció un flujo permanente tanto para el río Pita como para el Santa Clara, esto debido a que se consideró que las condiciones de velocidad de escurrimiento en cualquier punto del flujo no cambian con el tiempo.

Tomando en cuenta esta consideración, procedemos a la introducción de los datos hidráulicos respectivos. Es así que nos dirigimos a la ventana EDIT/ENTER ESTEADY FLOW DATA (Flujo de Datos Constantes). En esta ventana se introducen los caudales previamente calculados en ( $m^3/s$ ); se pueden añadir cuantos caudales se requieran dependiendo del tipo de proyecto que se vaya a desarrollar. Para nuestro caso corresponde introducir un caudal único cuyo valor es de  $49000 m^3/s$ . Se debe introducir al menos un caudal para cada tramo, en el caso de tener varios de ellos en el sistema fluvial. Además, al colocar el caudal en la primera sección transversal aguas arriba, el programa reconoce el mismo y lo coloca para todas las secciones transversales que lo siguen aguas abajo.

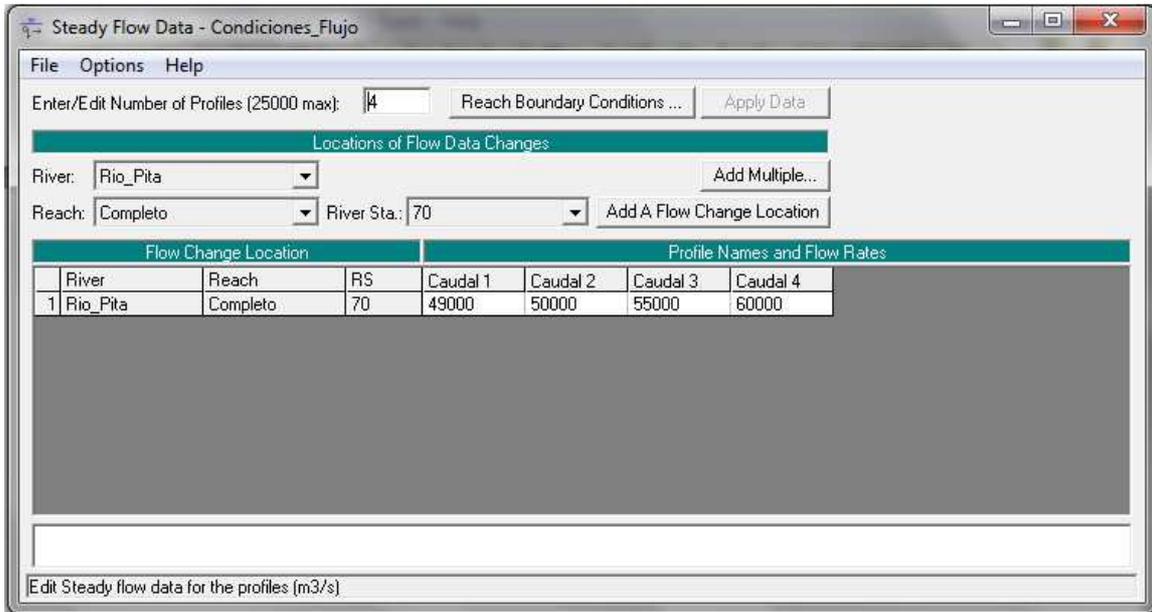


Figura 4.1.3.1: Vista de la Ventana “Steady Flow Data” (Flujo de Datos Constantes) y la introducción de varios caudales en (m<sup>3</sup>/s)

Introducidos los caudales, debemos indicar las condiciones de contorno. En la ventana EDIT/ENTER ESTEADY FLOW DATA, seleccionamos la opción “Reach Boundary Conditions” (Condiciones de Contorno). Las condiciones de contorno se deben dar de acuerdo al tipo de régimen del flujo, por lo tanto debemos decidir, si el flujo es sub-crítico, súper-crítico o mixto.

Para el presente proyecto se consideró un régimen mixto, por lo cual se debe introducir las condiciones de contorno tanto aguas arriba como aguas abajo del cauce.

Las condiciones de contorno que el programa admite son las siguientes:

- **“Known W.S.” (Nivel de Agua Conocido):** Esta condición es adecuada cuando se conoce algún nivel en una sección transversal. Es importante

recordar que el programa exige un nivel, por lo cual hay que añadir un calado más la cota más baja de la sección.

- **“Normal Depth” (Calado Normal):** Esta condición es adecuada para circunstancias donde el flujo se aproxime al uniforme.

Se debe introducir la pendiente del tramo de influencia.

- **“Rating Curve” (Curva de Gasto):** Esta condición se usa cuando existe una sección de control que tiene relación entre el calado y un caudal fijo.
- **“Critical Depth” (Calado Crítico):** Si existe alguna sección de control. Esta opción de condición no requiere ningún dato adicional. (Nanía Leonardo y Molero Emilio, 2007).

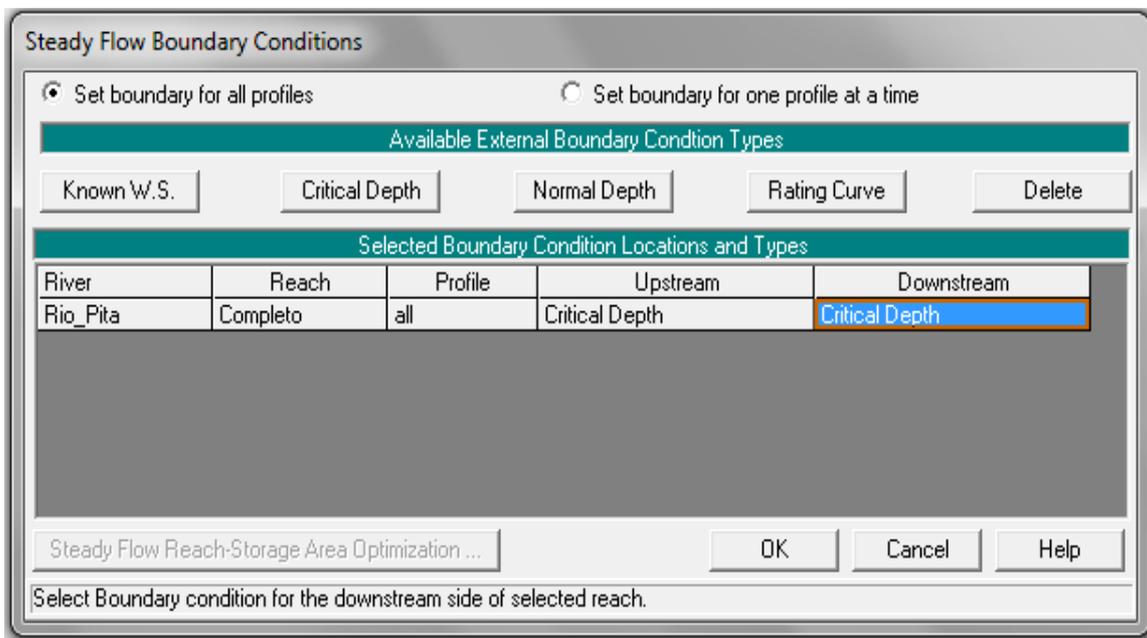


Figura 4.1.3.2: Vista de la ventana “Boundary Conditions” (Condiciones de Contorno), donde se muestra la selección de la condición de Calado Crítico tanto aguas arriba como aguas abajo del cauce.

Establecida las condiciones de contorno, en base al régimen y al tipo de calado que dispongamos, se procede a realizar la corrida de la simulación para los lahares del volcán Cotopaxi que se movilizan por el cauce del río Pita.

Por lo tanto en la barra de herramientas de la ventana principal del programa HEC-RAS, seleccionamos la opción “Run” (Correr), y escogemos la opción “Steady Flow Analysis” (Análisis de Flujo Permanente). En esta ventana solo nos queda seleccionar la opción “Mixed” (Mixto) y proceder a la corrida del programa para revisar los resultados de las zonas inundadas.

Cabe recalcar que todo el procedimiento descrito en el presente capítulo, es el mismo que se utilizó para realizar la simulación de los lahares del volcán Cotopaxi que se desplazan por el cauce del río Santa Clara.

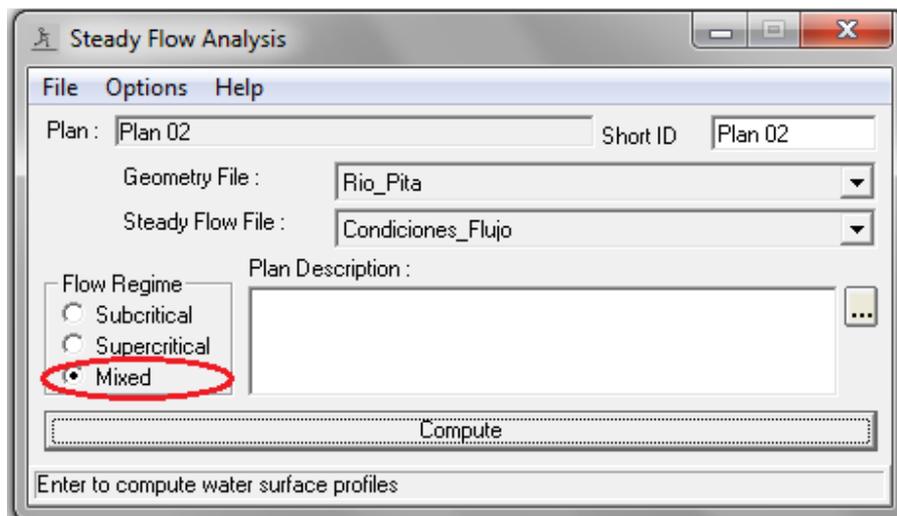


Figura 4.1.3.3: Vista de la ventana “Steady Flow Analysis” (Análisis de Flujo Permanente), antes de ejecutar la corrida del programa y selección del régimen mixto.

## 4.2. PARÁMETROS DE SALIDA

Corrida la simulación con todos los datos geométricos e hidráulicos ingresados, se obtienen los datos de salida, que el programa HEC-RAS los despliega como resultados.

Dentro de ellos se pudo observar que existe una incongruencia entre la pendiente del río en estudio y la pendiente del flujo formada por los caudales que se introdujeron para la simulación.

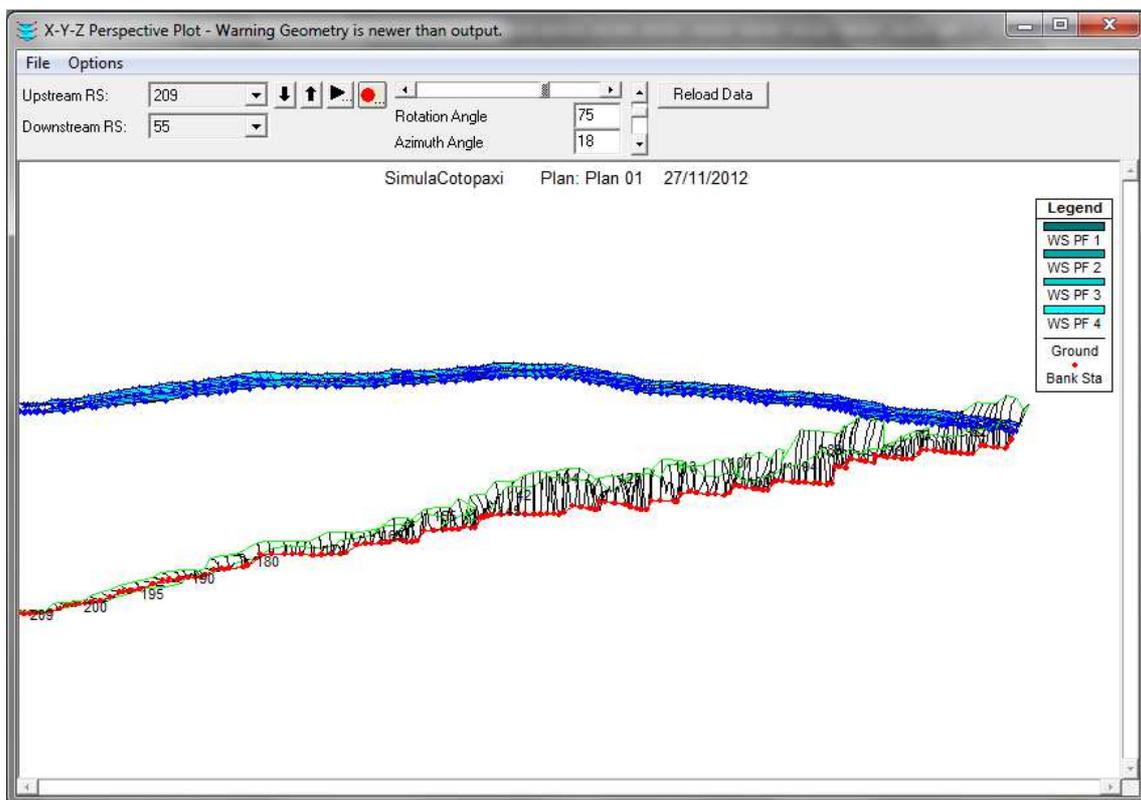


Figura 4.2.1: Desfase de la pendiente del río pita con respecto a la pendiente del flujo establecida por los caudales introducidos vista desde la ventana "Perspective Plot"

(Gráfico en Perspectiva) del programa HEC-RAS.

Por lo tanto, los resultados de la primera corrida son totalmente equivocados, debido a que el programa está elevando la inundación desde la cota más baja hasta la cota más alta que se encuentra aguas arriba, lo que semeja una especie de represa y da como resultado una inundación en el Valle de los Chillos de casi 1000 metros de altura; como se puede observar en la siguiente figura.

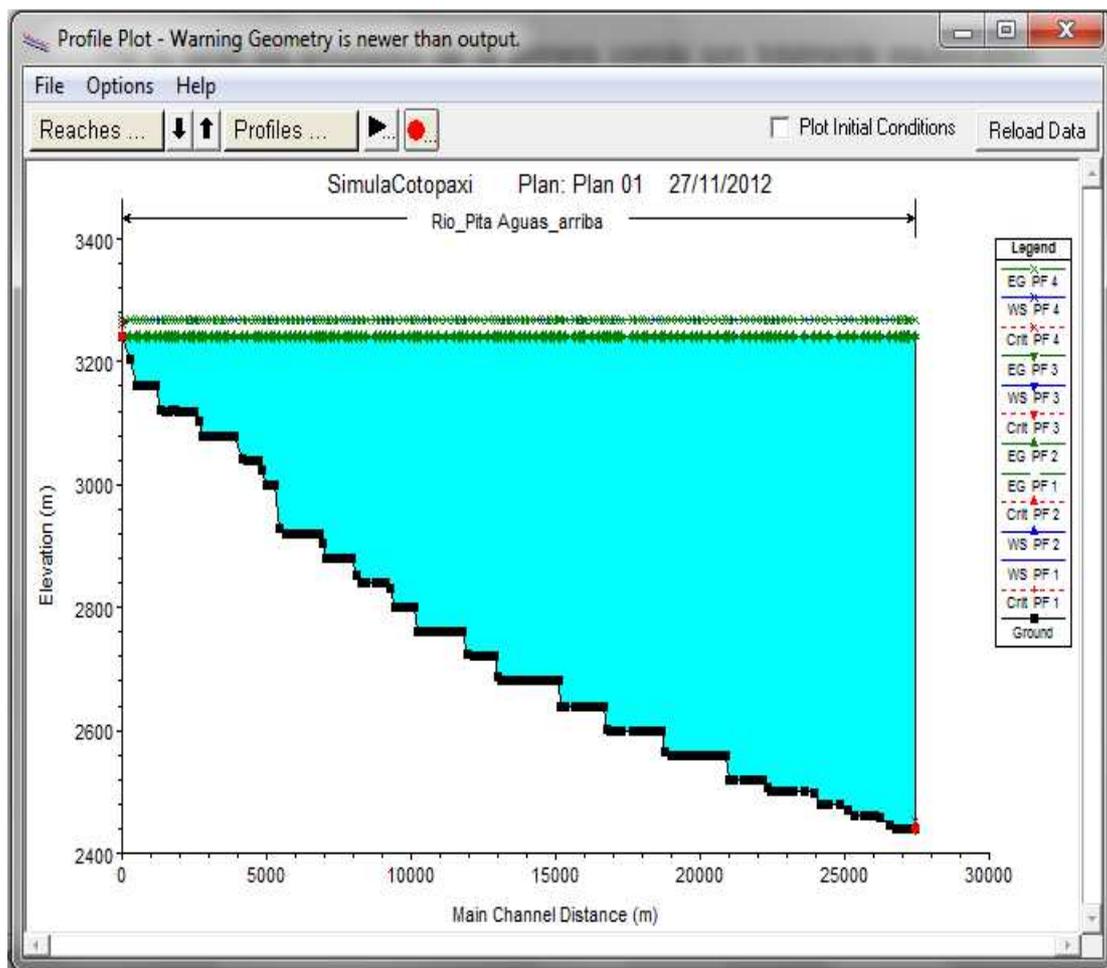


Figura 4.2.2: Ilustración del corte longitudinal del río Pita donde se observa el embalse de la inundación como resultado de la simulación vista desde la ventana "Profile Plot" del programa HEC-RAS.

Ya que los resultados obtenidos en una primera corrida no concuerdan en lo absoluto con una posible realidad frente a una eventual erupción. Se debe realizar un ajuste del modelo e interpretar el porqué del error manifestado actualmente por el programa HEC-RAS.

#### **4.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO**

Debido a que se utilizó más de una plataforma para poder desarrollar el presente proyecto. Se estudió el procedimiento desarrollado en cada una de ellas y se reajustó el modelo hidráulico, obteniendo finalmente resultados adecuados y que se asemejan a una posible realidad frente a una eventual erupción. Además se pudo interpretar el porqué de los datos erróneos y así brindar una explicación de los mismos.

Como señalamos con anterioridad, era indispensable contar con un sistema fluvial que se encontrara georeferenciado, por lo tanto se tuvo que utilizar tanto el programa ArcGis y su aplicación ArcMap como el programa HEC-geoRAS.

Ahora bien, recordemos que HEC-geoRAS permite digitalizar todos los datos geométricos que el programa HEC-RAS requiere para su funcionamiento, es así que sin necesidad de tener la topografía real de los perfiles transversales, se puede digitalizar cuantos se deseen, ya que se cuenta con los mapas tridimensionales en formato TIN, que se crean en la aplicación de ArcMap.

Si bien esto genera una ventaja, pues no es necesario medir en el terreno los perfiles transversales de un río, en este caso generó una desventaja al momento de obtener los resultados finales.

Esto se debe a que se utilizaron mapas digitales en escala 1:50000, por lo cual al momento de crear el archivo TIN, no se pudo establecer una triangulación adecuada entre cada una de las curvas de nivel, sobre todo en el cauce de cada uno de los ríos, pues en algunos casos, al digitalizar los perfiles transversales en las zonas más cercanas a su desembocadura en el río San Pedro, se obtuvo como perfil transversal una línea recta.

Esto no quiere decir que las herramientas que ofrecen los programas ArcGis y HEC-geoRAS sean ineficientes, si no que para su utilización, es preciso contar con mapas digitales con escalas mucho más grandes, especialmente en los sectores donde se encuentran los cauces de los ríos.

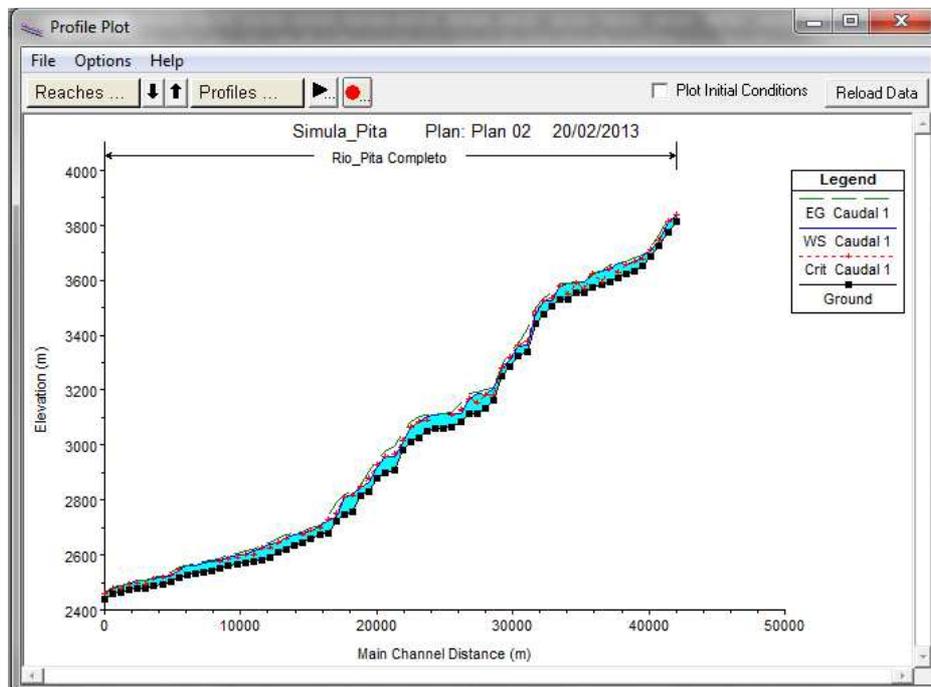


Figura 4.3.1: Ilustración del corte longitudinal del calibrado, donde se observa la pendiente del flujo de lodo en concordancia con la pendiente del río Pita como resultado de la simulación vista desde la ventana "Profile Plot" del programa HEC-RAS.

Es así que una vez que se encontró el problema principal que dio los resultados erróneos a la primera corrida. Se optó por exportar al programa HEC-RAS, únicamente el esquema fluvial de cada uno de los ríos y mediante la opción “Cross Section” introducir cada uno de los perfiles transversales medidos en el terreno, que se tenían como base de datos para el presente proyecto.

De esta manera se corrigió el desfase que existía entre la pendiente de los ríos y la pendiente del flujo generada por los caudales ingresados, tal como se en la **Figura 4.3.1**. Además como se cuenta con el esquema fluvial georeferenciado es posible realizar un análisis adecuado en las áreas de inundación, cumpliendo de esta manera el objetivo deseado, de la calibración y actualización de los lahares o flujos de lodo que desciendes a través de los ríos Pita y Santa Clara.

## CAPÍTULO V

### 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Calibrado el modelo, con valores coherentes de acuerdo a los caudales ingresados en el programa, se presenta a continuación el análisis de los datos expuestos que resultarían de una posible erupción del volcán Cotopaxi, tomando en cuenta la disminución del volumen del glaciar.

Para realizar el análisis, se consideró las diferentes zonas por las que transita tanto el Río Pita como el Río Sta. Clara; es decir, las zonas de Sincholagua, Píntag y Sangolquí y, desde sus cabeceras hasta la desembocadura en el Río San Pedro en el sector de El Triángulo, en el Valle de Los Chillos.

De esta manera se pueden utilizar los mapas digitales proporcionados por la Carrera de Geográfica del Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE).

Para el caso del Río Pita, que nace en las faldas del volcán Cotopaxi, se estudió las tres zonas antes mencionadas; y para el Río Santa Clara, que desciende del Pasochoa, se analizó las zonas de Píntag y Sangolquí.

## 5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL CAUCE DEL RÍO PITA

Tomando en cuenta que existen diferentes puntos de control o perfiles transversales en las diferentes zonas previamente establecidas, se presenta a continuación una lista de cada uno de los puntos, con sus respectivas coordenadas, desde aguas arriba hacia aguas abajo.

Tabla 5.1.1: Perfiles transversales o puntos de control del Río Pita en la zona de Sincholagua.

ZONA	PUNTO DE CONTROL	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
		Longitud	Latitud
SINCHOLAGUA	70	78° 24' 3.70" W	0° 36' 3.36" S
	69	78° 24' 14.43" W	0° 35' 46.35" S
	68	78° 24' 25.11" W	0° 35' 29.34" S
	67	78° 24' 36.82" W	0° 35' 12.95" S
	66	78° 24' 39.91" W	0° 34' 55.58" S
	65	78° 24' 40.21" W	0° 34' 37.15" S
	64	78° 24' 59.44" W	0° 34' 31.48" S
	63	78° 25' 19.28" W	0° 34' 28.99" S
	62	78° 25' 34.00" W	0° 34' 19.26" S
	61	78° 25' 43.67" W	0° 34' 1.61" S
	60	78° 25' 50.94" W	0° 33' 42.92" S
	59	78° 25' 54.56" W	0° 33' 23.13" S
	58	78° 25' 54.44" W	0° 33' 2.95" S
	57	78° 25' 54.13" W	0° 32' 42.83" S
	56	78° 25' 46.34" W	0° 32' 24.27" S
	55	78° 25' 39.61" W	0° 32' 5.37" S
	54	78° 25' 39.22" W	0° 31' 45.36" S
	53	78° 25' 36.47" W	0° 31' 25.78" S
	52	78° 25' 39.39" W	0° 31' 6.60" S
51	78° 25' 47.44" W	0° 30' 48.59" S	
50	78° 25' 52.64" W	0° 30' 29.29" S	

Tabla 5.1.2: Perfiles transversales o puntos de control del Río Pita en la zona de Píntag.

ZONA	PUNTO DE CONTROL	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		PUNTO DE CONTROL	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
		Longitud	Latitud		Longitud	Latitud
PINTAG	49	78° 25' 58.12" W	0° 30' 10.10" S	31	78° 24' 24.51" W	0° 24' 46.63" S
	48	78° 26' 3.42" W	0° 29' 50.79" S	30	78° 24' 22.24" W	0° 24' 31.67" S
	47	78° 26' 8.65" W	0° 29' 34.53" S	29	78° 24' 22.04" W	0° 24' 13.17" S
	46	78° 25' 59.79" W	0° 29' 17.33" S	28	78° 24' 10.15" W	0° 23' 58.28" S
	45	78° 25' 47.35" W	0° 29' 5.42" S	27	78° 24' 2.43" W	0° 23' 40.40" S
	44	78° 25' 41.78" W	0° 28' 46.01" S	26	78° 23' 48.75" W	0° 23' 27.31" S
	43	78° 25' 35.05" W	0° 28' 27.08" S	25	78° 23' 46.63" W	0° 23' 8.25" S
	42	78° 25' 31.14" W	0° 28' 7.59" S	24	78° 23' 40.23" W	0° 22' 49.35" S
	41	78° 25' 28.74" W	0° 27' 48.38" S	23	78° 23' 46.63" W	0° 22' 30.53" S
	40	78° 25' 26.27" W	0° 27' 28.69" S	22	78° 23' 53.38" W	0° 22' 12.88" S
	39	78° 25' 13.69" W	0° 27' 13.69" S	21	78° 24' 6.65" W	0° 22' 3.94" S
	38	78° 25' 2.21" W	0° 26' 57.24" S	20	78° 24' 16.56" W	0° 21' 52.59" S
	37	78° 24' 52.94" W	0° 26' 39.55" S	19	78° 24' 24.33" W	0° 21' 38.03" S
	36	78° 24' 44.48" W	0° 26' 22.87" S	18	78° 24' 33.83" W	0° 21' 22.04" S
	35	78° 24' 42.36" W	0° 26' 2.97" S	17	78° 24' 37.89" W	0° 21' 10.47" S
	34	78° 24' 40.92" W	0° 25' 43.85" S	16	78° 24' 48.07" W	0° 20' 55.86" S
	33	78° 24' 33.09" W	0° 25' 25.37" S	15	78° 24' 55.47" W	0° 20' 40.26" S
32	78° 24' 27.66" W	0° 25' 6.44" S	14	78° 25' 2.42" W	0° 20' 22.33" S	

Tabla 5.1.3: Perfiles transversales o puntos de control del Río Pita en la zona de Sangolquí.

ZONA	PUNTO DE CONTROL	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
		Longitud	Latitud
SANGOLQUÍ	13	78° 25' 3.60" W	0° 20' 2.93" S
	12	78° 24' 39.53" W	0° 19' 44.58" S
	11	78° 25' 26.20" W	0° 19' 35.51" S
	10	78° 25' 39.40" W	0° 19' 21.32" S
	9	78° 25' 53.92" W	0° 19' 8.35" S
	8	78° 26' 8.22" W	0° 18' 54.65" S
	7	78° 26' 24.32" W	0° 18' 42.80" S
	6	78° 26' 39.38" W	0° 18' 30.34" S
	5	78° 26' 56.78" W	0° 18' 20.17" S
	4	78° 27' 11.63" W	0° 18' 8.46" S
	3	78° 27' 26.07" W	0° 17' 55.03" S
	2	78° 27' 37.08" W	0° 17' 43.72" S
	1	78° 27' 46.64" W	0° 17' 27.10" S

Tabla 5.1.4: Indicativo de las alturas de inundación considerados para señalar la afectación de los diferentes sectores.

ALTURA DE INUNDACIÓN	AFECTACIÓN
Cota de Sector > Cota de Inundación	Sin Inundación
0 m - 5 m	Parcialmente Inundado
5 m - 10 m	Inundado
Altura de Inundación > 10 m	Sumergido

### 5.1.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LA ZONA DEL SINCHOLAGUA

Para realizar el análisis de la zona del Sincholagua, se identificaron las áreas cercanas al cauce del Río Pita, que podrían resultar afectadas por los lahares generados por el volcán Cotopaxi. De esta manera se señala lo siguiente:

- Para el área de Chan, ubicada aguas arriba del nacimiento del Río Pita, no existe peligro aparente, pues este sector se encuentra a 3870 m.s.n.m. y la altura máxima de desborde para el punto control 70 alcanza los 3839 m.s.n.m., existiendo un desborde de 4 m en este punto de control sin que afecte el área señalada.
- En la zona de Jatunloma, ubicada a 3686 m.s.n.m., a poca distancia del punto de control 65, en el que la altura máxima de crecida alcanza 3668 m.s.n.m., se puede establecer que no existe inundación. Ahora bien, en el punto control 66, ubicado a 609 m aguas arriba de Jatunloma, la cota de inundación alcanza los 3664 m.s.n.m., es decir 2 m más abajo del área en cuestión; por lo tanto, debido a que los resultados son aproximados y que la distancia entre los diferentes puntos de control es relativamente corta comparada con el caudal existente, se establece que el área Jatunloma quedaría parcialmente inundada.
- Para el caso del campamento Proaño, ubicado a 3677 m.s.n.m. cerca del punto de control 62, donde la altura máxima de crecida es de 3640 m.s.n.m., se establece un área sin inundación. Además en el punto de

control 63 ubicado aguas arriba de Proaño, la altura de inundación llega a 3662 m.s.n.m., 15 m más abajo.

- En el caso de Chicalhuaycu y Jatunturu, ubicados frente a frente a 3675 m.s.n.m. y 3655 m.s.n.m. respectivamente, tienen como punto de control, el perfil transversal 60, que llega a una altura máxima de inundación de 3622 m.s.n.m. Por lo tanto en estas áreas tampoco habrá inundación.
- A la zona de Diablito Loma, ubicada a 3535 m.s.n.m. le corresponde el punto de control 54, en el que se ha determinado una altura de inundación de 3525 m.s.n.m., igual a la del punto de control 55, ubicado aguas arriba; en consecuencia no llega la inundación.
- Para la zona de Tabla Loma, ubicado a 3476 m.s.n.m. se encuentra entre los puntos de control 53 y 52, en los que se ha determinado una cota máxima de inundación de 3477 m.s.n.m. y 3664 m.s.n.m. respectivamente. La notable diferencia entre las alturas de inundación en esos puntos de control, se debe a que en el punto 52 existe una cascada que afecta a la pendiente del río; sin embargo, en vista que aguas arriba, precisamente en el punto 53, la altura de inundación sobrepasa la altura en la que se encuentra la zona Tabla Loma, se le considera parcialmente inundada.
- En la zona de Panzapamba, ubicado a 3579 m.s.n.m., tiene como punto de control el perfil transversal 53, antes mencionado, por lo que se la considera sin inundación.
- La zona de El Salto, ubicada a 3382 m.s.n.m., tiene el punto de control 50, en el que la cota de inundación llega a los 3308 m.s.n.m., sin inundación.

Tabla 5.1.1.1: Resumen de la de Afectación en el Área de Sincholagua.

ZONA	ÁREA	PUNTO DE CONTROL	AFECTACIÓN
<b>SINCHOLAGUA</b>	Chan	70	Sin Inundación
	Jatunloma	66 - 65	Parcialmente Inundado
	Proaño	62	Sin Inundación
	Chilcahuaycu	60	Sin Inundación
	Jatunturu	60	Sin Inundación
	Diablito Loma	54	Sin Inundación
	Tabla Loma	53 - 52	Inundado
	Panzapamba	53	Sin Inundación
	El Salto	50	Sin Inundación

### 5.1.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LA ZONA DE PÍNTAG

- Para el caso de la zona de la Bocatoma, ubicada a 3515 m.s.n.m., a la que le corresponde el punto de control 48, con una altura de inundación de 3204 m.s.n.m., se puede decir que no existe inundación. Esto se debe principalmente a que los puntos de control 49 y 48, tienen una diferencia de altura, con respecto a la base del río, de 112 metros y 156 metros respectivamente.
- A la zona de Los Alisales, 3339 m.s.n.m., le corresponde los puntos de control 44 y 43, en los que la inundación llega a la cota 3116 m.s.n.m. y 3114 m.s.n.m. respectivamente; por consiguiente en este sector tampoco existe inundación. Un asentamiento humano ubicado en la cota 3188 m.s.n.m., que se encuentra mucho más cerca del cauce del río, tampoco

resultaría afectado, pues en cada perfil transversal, la altura que alcanza el flujo es de 33 metros y 50 metros respectivamente, que impide el desborde.

- El sector de la Virgen, ubicado a 3116 m.s.n.m. se encuentra entre los puntos de control 42 y 41, en los que se ha determinado una altura de inundación que llega a la cota 3112 m.s.n.m. Dado que existe una diferencia de apenas 4 m de altura, que se la podría considerar como variable, debido al rango de error que presenta el modelo hidráulico. Se considera esta área como parcialmente inundada.
- El área de Tanipamba a 3162 m.s.n.m., tiene como punto de control el perfil transversal 40, en el que la inundación llega solo a la cota 3104 m.s.n.m., por lo que no existe inundación. Sin embargo, existe un poblado colina abajo, ubicado a 3097 m.s.n.m. en las coordenadas geográficas **78° 25' 18,24" W; 0° 27' 8,14" S**; en donde si existe peligro de inundación, por lo que se considera al sector como inundado.
- Rumipamba, ubicado en la cota 3040 m.s.n.m., tiene como puntos de control los perfiles 38 y 37, en los que se ha determinado alturas de inundación que llegan a las cotas 3067 m.s.n.m. y 3004 m.s.n.m. respectivamente. Dado que para el punto de control 38 la altura de inundación es mayor que la altura del sector en análisis, se puede hablar de una inundación total. Sin embargo, la misma no existe, pues los perfiles transversales indican que no hay desborde del flujo hacia Rumipamba. Esto se debe a que el sector se encuentra protegido por la montaña que genera cada uno de los puntos de control, los cuales llegan a los 3132 m.s.n.m. y 3061 m.s.n.m. antes de empezar a descender hacia la ubicación del sector.

- Al área de Santa Ana, ubicado a 2880 m.s.n.m., le corresponde el punto de control 27, el cual posee una altura de inundación que alcanza los 2705 m.s.n.m. Por lo tanto en este sector no existe inundación.
- En San Miguel, ubicado en la cota 2851 m.s.n.m., cuyo punto de control es el perfil transversal 25, no queda inundado, porque en este punto los flujos de lodo alcanzan la cota de 2679 m.s.n.m.
- En la zona de Huasac, a 2871 m.s.n.m., no existe peligro de inundación, ya que en el punto de control 24, la onda de crecida del lahar llega solo hasta la cota 2675 m.s.n.m.
- El sector de Los Corrales, ubicado en la cota 2770 m.s.n.m., también se encuentra fuera de peligro, porque en el perfil transversal 20, la inundación llega solo a la cota 2625 m.s.n.m. Esto incluye además, a los poblados que se encuentran colina abajo del sector en análisis, aledaños a los puntos de control 19 y 18, pues el más cercano al río, que se encuentra en las coordenadas geográficas **78° 24' 22,93" W; 0° 21' 41,29" S** y está ubicado a 2626 m.s.n.m.; no tendría inconveniente con las alturas de inundación correspondientes a cada punto de control, las cuales alcanzan los 2615 m.s.n.m. y 2602 m.s.n.m.
- El punto de control 17 corresponde al sector conocido como LA CALDERA, en el que, como se menciona en el "Capítulo III", la condición morfológica del cauce del río origina un recodo de casi 90 grados, en el que los flujos de lodo se frenan y forman un remanso que asciende hasta rebasar el labio superior de la margen izquierda que según el actual modelo hidráulico tiene 37 m de altura.

Es así como ocurre el desbordamiento de los lahares hacia el cauce del Río Santa Clara, con un incremento del riesgo para el Valle de Los Chillos.

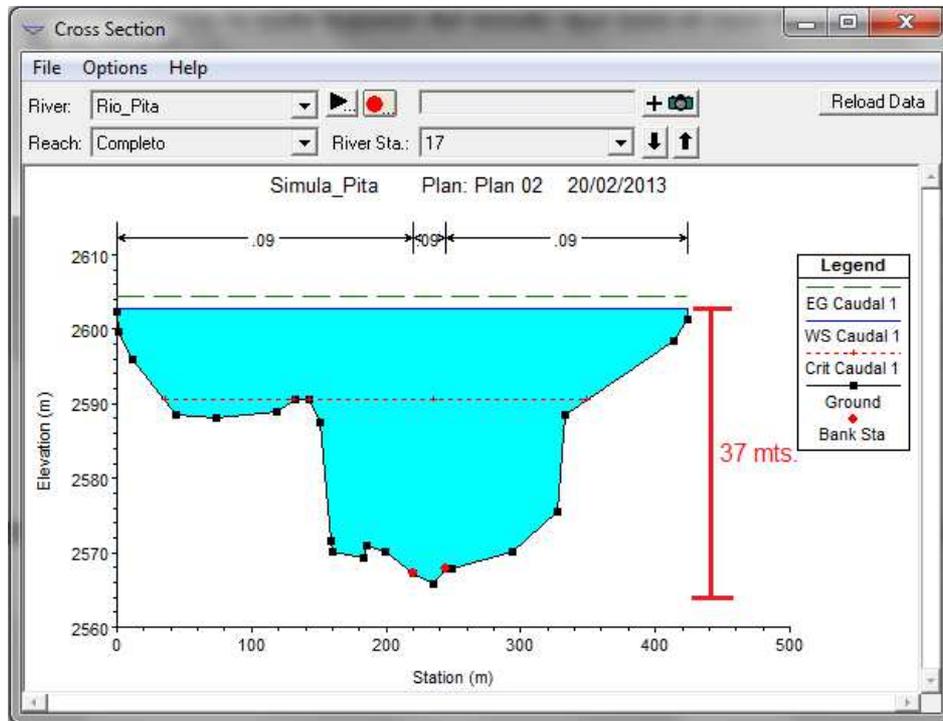


Figura 5.1.2.1: Vista del punto de control 17 desde la ventana “Cross Section” del programa HEC-RAS, correspondiente al sector de la Caldera e indicación de los 37 metros de embalse en el punto.

El peligro es inminente para los poblados que se encuentran dentro del curso del desbordamiento hacia el río Santa Clara, precisamente para los poblados ubicados en las coordenadas geográficas:

- **78° 24' 49,01"W; 0° 21' 41,29"S**
- **78° 25' 33,57"W; 0° 21' 33,80"S**
- **78° 25' 22,24"W; 0° 21' 18,58"S**

De tal manera que el sector de la Caldera, se considera como área inundada.

- Finalmente en el caso de la Urb. Los Pirineos 2 y el Club Los Cerros, ubicados en la cota 2584 m.s.n.m., no corren peligro alguno, pues el punto de control 14 correspondiente a estos sectores, tiene como altura de inundación 2576 m.s.n.m. Sin embargo, ya que estos sectores se encuentran entre el cauce de ambos ríos, posteriormente se volverá a analizar los mismos, en base a los resultados expuestos por los puntos de control del Río Santa Clara.

Tabla 5.1.2.1. Resumen de Análisis de Afectación en la Zona de Píntag.

ZONA	ÁREA	PUNTO DE CONTROL	AFECTACIÓN
<b>PINTAG</b>	Bocatoma	48	Sin Inundación
	Los Alisales	44 - 43	Sin Inundación
	La Virgen	42 - 41	Parcialmente Inundada
	Tanipamba	40	Inundado
	Rumipamba	38 - 37	Sin Inundación
	Santa Ana	27	Sin Inundación
	San Miguel	25	Sin Inundación
	Huasac	24	Sin Inundación
	Los Corrales	20	Sin Inundación
	La Caldera	17	Inundado
	Urb. Los Pirineos 2*	14	Sin Inundación
	Club Los Cerros *	14	Sin Inundación

\* Se debe realizar análisis con los puntos de control correspondientes al Río Santa Clara

### 5.1.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LA ZONA DE SANGOLQUÍ

Para la presente zona se indica el siguiente análisis:

- Para los poblados aledaños al sector de Santa Anita, cuyo punto más bajo se encuentra ubicado a 2531 m.s.n.m., tiene como puntos de control los perfiles transversales 12, 11, y 10; los cuales llevan alturas de inundación que alcanzan los 2563 m.s.n.m., 2559 m.s.n.m. y 2548 m.s.n.m. Se considera esta zona como sumergida y es área de alto riesgo, ya que además de las casas ubicadas cerca al sector, se encuentra también la institución educativa “Liceo del Valle”.
- El Rancho, ubicado a 2518 m.s.n.m., correspondiente al punto de control 9, en donde existe una altura de inundación de 2520 m.s.n.m., se establece como parcialmente inundado.
- En el sector de La Colina, ubicada a 2506 m.s.n.m., les corresponde el punto de control 7, el cual tiene una altura de inundación que llega a los 2512 m.s.n.m., por lo tanto se considera un área inundada.
- En la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE), ubicada a 2509 m.s.n.m., le corresponde el punto de control 6, el mismo que posee una altura de inundación que llega a los 2493 m.s.n.m., por tanto se lo consideraría como sector sin inundación. Sin embargo, este comportamiento se da para el lado SE del río, pero en el caso del lado NE, las urbanizaciones ubicadas frente con frente a la ESPE, es decir cruzando el río, se hallan a 2490 m.s.n.m., por lo cual este sector se lo considera como parcialmente inundado.

- En el sector conocido como El Progreso, el cual posee al costado SE del Río Pita algunas casas y al NE, urbanizaciones ubicadas a 2482 m.s.n.m. y 2479 m.s.n.m. respectivamente, tienen como punto de control, el perfil transversal 5, el cual lleva una altura de inundación que alcanza los 2505 m.s.n.m., que analizado para una extensión de 500 m de ancho de desborde, desde el eje del río hacia el lado SE del mismo, alcanza los 6 m de altura; y para el lado NE del río, considerando una extensión de 300 m de ancho en el desborde, a partir del eje del río, se tiene una altura que alcanza los 4 m. Por lo cual se considera un área inundada.
- En el sector conocido como Playa Chica ubicado a 2475 m.s.n.m.; se establece un análisis igual que en el caso anterior, es decir, para ambos costados del río. Por lo tanto, para el costado NE con una extensión de 322 m de ancho en el desborde medidos a partir del eje del río, tenemos una altura de 3 m de flujo; y para el caso del costado SE, con una extensión de 300 m de ancho en el desborde medidos a partir del eje del río, tenemos una altura de 3,33 metros de flujo. Por lo cual, para el primer caso, el flujo llegaría hasta el área de la Urbanización Playa Chica 2 y en el segundo caso, el flujo llegaría hasta las puertas de entrada de la del Conjunto Valle Verde, afectando al centro comercial San Luis Shopping. El sector se establece como parcialmente inundado.  
  
En el caso de este sector, el punto de control corresponde al perfil 4, que posee una altura de inundación que llega a los 2492 m.s.n.m.
- EL Triángulo, ubicado a 2464 m.s.n.m., posee como punto de control el perfil transversal 3, en donde se adquiere una altura de inundación que

alcanza los 2487 m.s.n.m.; de igual manera se establece un análisis en cuanto a la extensión que podría alcanzar los flujos por el desbordamiento existente en este punto. Entonces tenemos:

Para el caso del lado SE, es decir a partir del puente de la Av. Ilaló hacia Conocoto, los flujos poseen una extensión de 1200 m medidos desde el eje del río y alcanzan una altura de 6 m.

Para el caso del lado NE, es decir del puente de la Av. Ilaló hacia El Tingo, los flujos poseen una extensión de 1000 m medidos desde el eje del río y alcanzan igualmente una altura de 6 m. Debido a esto, se considera el sector como inundado.

- El punto de control 1, que posee una altura de inundación que llega a los 2458 m.s.n.m., corresponde a la desembocadura con el Río San Pedro, a 2443 m.s.n.m. De esta manera tenemos que:

Para el lado SE del río, es decir hacia el sector de La Armenia, el flujo posee una extensión de desborde de 300 m y alcanza una altura de 5 m.

Para el caso del lado NE, el flujo posee una extensión de desborde de 300 m y alcanza una altura de 4 m. Por lo cual se considera este punto como parcialmente inundado.

Tabla 5.1.3.1: Resumen de Análisis de Afectación en la Zona de Sangolquí

ZONA	ÁREA	PUNTO DE CONTROL	AFECTACIÓN
<b>SANGOLQUÍ</b>	Santa Anita	12 -11- 10	Sumergido
	El Rancho	9	Parcialmente Inundado
	La Colina	7	Inundado
	La ESPE	6	Parcialmente Inundado
	El Progreso	5	Inundado
	Playa Chica	4	Parcialmente Inundado
	El Triángulo	3	Inundado
	Desembocadura en Río San Pedro	1	Parcialmente Inundado

De esta manera se concluye con el análisis correspondiente a los lahares encausados por el cauce del Río Pita.



Figura 5.1.3.1: Vista del Flujo de Lodo que se moviliza por el río Pita desde la ventana "Perspective Plot" del programa HEC-RAS

Cabe señalar, que los sectores donde no existe inundación, no quedan fuera de peligro, pues dadas las características geológicas de erupción del Cotopaxi, la caída de tefra y ceniza serán los fenómenos que afectarán en mayor volumen a estas zonas.

## 5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL CAUCE DEL RÍO SANTA CLARA

De igual manera que el análisis anterior, se presenta a continuación los puntos de control o perfiles transversales con sus respectivas coordenadas y la indicación de la zona a la cual pertenecen.

Tabla 5.2.1: Perfiles transversales o puntos de control del Río Santa Clara en la zona de Píntag.

ZONA	PUNTO DE CONTROL	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
		Longitud	Latitud
PINTAG	24	78° 25' 14.38" W	0° 21' 37.28" S
	23	78° 25' 15.64" W	0° 21' 25.91" S
	22	78° 25' 14.98" W	0° 21' 14.80" S
	21	78° 25' 22.18" W	0° 21' 4.93" S
	20	78° 25' 37.04" W	0° 20' 57.63" S
	19	78° 25' 40.06" W	0° 20' 48.64" S
	18	78° 25' 45.34" W	0° 20' 37.45" S
	17	78° 25' 53.49" W	0° 20' 28.72" S
	16	78° 26' 2.74" W	0° 20' 20.78" S
	15	78° 26' 10.73" W	0° 20' 11.45" S
	14	78° 26' 19.75" W	0° 20' 3.20" S

Tabla 5.2.2: Perfiles transversales o puntos de control del Río Santa Clara en la zona de Sangolquí

ZONA	PUNTO DE CONTROL	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
		Longitud	Latitud
SANGOLQUÍ	13	78° 26' 28.40" W	0° 19' 54.51" S
	12	78° 26' 34.98" W	0° 19' 44.15" S
	11	78° 26' 43.86" W	0° 19' 35.83" S
	10	78° 26' 52.66" W	0° 19' 23.31" S
	9	78° 26' 58.08" W	0° 19' 16.66" S
	8	78° 26' 55.48" W	0° 19' 4.96" S
	7	78° 26' 54.44" W	0° 18' 53.43" S
	6	78° 27' 0.89" W	0° 18' 43.01" S
	5	78° 27' 5.34" W	0° 18' 32.05" S
	4	78° 27' 11.23" W	0° 18' 24.63" S
	3	78° 27' 17.82" W	0° 18' 16.64" S
	2	78° 27' 27.09" W	0° 18' 12.47" S
	1	78° 27' 34.36" W	0° 18' 12.64" S

### 5.2.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LA ZONA DE PINTAG

Para el análisis realizado en el cauce del Río Pita, se consideraron áreas que resultarían afectadas por los flujos de lodo del volcán Cotopaxi en cada una de las zonas establecidas. Además se debe indicar, que se tomó en consideración los porcentajes del 30% y 40% señalados en el Capítulo III, debido al desbordamiento que existe en el sector de La Caldera y en donde los flujos de lodo toman la dirección hacia el Río Santa Clara. Estos caudales corresponden a 14700 m<sup>3</sup>/s y 19600 m<sup>3</sup>/s respectivamente. Por lo tanto tenemos lo siguiente:

- El Barrio Carlos Gavilanes, cuyo punto más bajo está ubicado a 2620 m.s.n.m., posee el punto de control 24, cuyas alturas máximas llegan a 2640 m.s.n.m. (con el 30%) y 2645 m.s.n.m. (con el 40%); por lo cual se considera esta área como sumergida.
- El Club Los Chillos -densamente poblado- a 2586 m.s.n.m., lleva como punto de control el perfil transversal 22, el cual contiene una altura de inundación que alcanza los 2608 m.s.n.m. (con el 30%) y 2611 m.s.n.m. (con el 40%); razón por la cual se considera al sector como sumergido.
- El Club Los Cerros y la Urbanización Los Pirineos 2, los cuales precisaban un nuevo análisis en base a los resultados obtenidos para el Río Santa Clara; les corresponde el punto de control 21, en donde existe una altura de inundación que llega a los 2547 m.s.n.m. (con el 30%) y 2549 m.s.n.m. (con el 40%). Por consiguiente se establece como área sin inundación, 2584 m.s.n.m.
- Al sector de Selva Alegre, ubicado a 2538 m.s.n.m., le corresponde el punto de control 18, en donde los lahares alcanzan alturas de inundación que llega a los 2546 m.s.n.m. (con el 30%) y 2548 m.s.n.m. (con el 40%); de tal manera que este sector se establece como inundado.
- El Colegio Juan de Salinas que educa a cerca de 3000 estudiantes está ubicado a 2515 m.s.n.m., posee como punto de control, el perfil transversal 15, el cual alcanza alturas de inundación que llegan a los 2529 m.s.n.m. (con el 30%) y 2532 m.s.n.m. (con el 40%); estableciendo esta área como sumergida.

- El sector del Choclo, a 2520 m.s.n.m., lleva el punto de control 14, en donde las alturas de inundación llegan a los 2526 m.s.n.m. (con el 30%) y 2528 m.s.n.m. (con el 40%). Por tanto, se establece el área como inundada.

Tabla 5.2.1.1: Resumen de Análisis de Afectación en la Zona de Píntag.

ZONA	ÁREA	PUNTO DE CONTROL	AFECCIÓN
<b>PINTAG</b>	Barrio Carlos Gavilanes	24	Sumergido
	Club Los Chillos	22	Sumergido
	Club Los Cerros	21	Sin Inundación
	Urb. Los Pirineos 2	21	Sin Inundación
	Selva Alegre	18	Inundado
	Colegio Juan de Salinas	15	Sumergido
	El Choclo	14	Inundado

## 5.2.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LA ZONA DE SANGOLQUÍ

Para la zona de Sangolquí, debido a los lahares que se movilizan por el cauce del Río Santa Clara, se presenta el siguiente análisis:

- En la Empresa Eléctrica Quito, ubicada a 2509 m.s.n.m., se tiene una altura de inundación que llega a los 2523 m.s.n.m. (para el 30%) y 2524 m.s.n.m. (para el 40%). En este punto se hace un análisis considerando la extensión del desborde que alcanzaría el flujo de lodo en el caso de una erupción; por lo cual tenemos que:

En base al caudal correspondiente al 30%, el lado SE del río, es decir el lado que corresponde al Estadio de la Liga Cantonal Rumiñahui, en una extensión

300 m medidos a partir del eje del río, el flujo alcanzaría una altura de 4 m; y en el caso del lado NE, considerando una extensión de 260 m medidos a partir del eje del río, la altura del flujo llegaría a los 3,94 m.

Ahora bien, tomando como referencia el caudal correspondiente al 40%, se obtiene que para el caso del lado SE, el flujo llegaría casi a los 5 m de altura; y en el caso del lado NE, el flujo alcanzaría los 4,18 m de altura.

Por consiguiente se considera que el área será inundada, debido a que se toma en consideración el mayor riesgo existente.

- El centro comercial River Mall, ubicado en la cota 2493 m.s.n.m., tiene como punto de control, el perfil transversal 9, en el que la inundación llega a la cota 2508 m.s.n.m. (con el 30%) y 2510 m.s.n.m. (con el 40%). De igual manera se plantea un análisis como en el caso anterior.

Considerando el caudal correspondiente a un 30% de desborde, en el caso del lado SE, con una extensión de 300 m medidos a partir del eje del río, los lahares alcanzan una altura de 3,24 m; y para el caso del lado NE, el flujo alcanza una altura de 2,15 m.

Si se toma en cuenta el caudal para un 40% de desborde, para el caso del lado SE, los lahares tendrían una altura de 3,60 m; y para el caso del lado NE, se alcanzaría una altura de 2,38 m, por lo que se establece que este sector queda parcialmente inundado.

- El Club de Oficiales del Ejército, ubicado a 2494 m.s.n.m., tiene el punto de control 8, con una altura que llega a los 2501 m.s.n.m. (con el 30%) y 2502 m.s.n.m. (con el 40%). Analizando el alcance de los flujos de lodo, se obtiene lo siguiente.

Para el caso del 30% de desborde, el lado SE del río alcanzaría una altura de 1,46 m, con una extensión de 300 m medidos a partir del eje; es decir, hasta las canchas de polo pertenecientes al Club de Oficiales del Ejército y, en el caso del lado NE, el flujo tiene una altura de 1,41 m, con una extensión de 200 m medidos a partir del eje del río; es decir, los árboles que rodean la nueva cancha de fútbol de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE).

Si consideramos el 40% de desborde, en el lado SE, los lahares tendrían una altura de 2 m; y en el lado NE, los lahares tendrían una altura de 1,68 m.

Por lo cual se considera esta área como parcialmente inundada.

- Aguas abajo, para el sector de la ESPE, cuyo edificio central se encuentra en la cota 2500 m.s.n.m., se tiene como punto de control al perfil transversal 7, en el que se ha determinado alturas de inundación que llegan a 2496 m.s.n.m. (con el 30%) y 2498 m.s.n.m. (con el 40%). Así se establece que esta zona queda parcialmente inundada; recalándose que las áreas afectadas dentro del Campus Politécnico, serían las que se encuentren en la cota del edificio central, hasta una distancia de 260 m medidos a partir del eje del río.
- Al Centro Comercial San Luis Shopping, ubicado en la cota 2480 m.s.n.m., le corresponde el punto de control 4, que tiene una cota de inundación de 2486 m.s.n.m. (con el 30%) y 2488 m.s.n.m. (con el 40%). Por consiguiente, se establece esta zona como parcialmente inundada, llegando hasta el cauce del Río San Pedro por el un lado y por el otro, hasta el edificio donde se encuentra el ubicado el local del Megamaxi, dentro del Centro Comercial San

Luis. Se debe recordar además que debido a los lahares que se movilizan por el cauce del río Pita, esta área quedaba totalmente inundada.

- A San Rafael, ubicado en la cota 2460 m.s.n.m., le corresponde el perfil transversal 1, en el que se tiene alturas de inundación que llegan a la cota 2472 m.s.n.m. (con el 30%) y 2473 m.s.n.m. (con el 40%). Al efectuar el análisis respectivo, de acuerdo con las extensiones del flujo, se tiene que:

Para el caso del 30%, por el lado SE, el flujo llegaría a los 4 m con una extensión de 300 m medidos a partir del eje del río; por el lado NE, el flujo alcanzaría los 5 m con una extensión de 83 m.

Para el caso del 40%, el lado SE alcanzaría los 4,3 m de altura y el lado NE los 6 m de altura. Por lo tanto, se considera esta área como inundada.

Tabla 5.2.2.1: Resumen de Análisis de Afectedación en la Zona de Sangolquí.

ZONA	ÁREA	PUNTO DE CONTROL	AFECTACIÓN
<b>SANGOLQUÍ</b>	Empresa Eléctrica Quito	12	Inundado
	River Mall	9	Parcialmente Inundado
	Club de Oficiales del Ejército	8	Parcialmente Inundado
	ESPE	7	Parcialmente Inundado
	San Luis Shopping	4	Parcialmente Inundado
	San Rafael	1	Inundado

Terminado el análisis tanto del Río Pita como del Santa Clara, se presenta a continuación un resumen detallado de las áreas afectadas.

Tabla 5.2.2.2: Resumen de afectación de los lahares por el cauce del Río Pita.

ZONA	ÁREA	VOLUMEN (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	Coef. Manning	MÁX. ALTURA (m)	OBSERVACIÓN	AFECTACIÓN
<i>Sincholagua</i>	Jatunloma	44,1	49000	0,09	4	-	Parcialmente Inundado
<i>Sincholagua</i>	Tabla Loma	44,1	49000	0,09	1	-	Parcialmente Inundado
<i>Píntag</i>	La Virgen	44,1	49000	0,09	1	Se toma en consideración el rango de 5 m de error, debido a que el modelo matemático no es exacto.	Parcialmente Inundada
<i>Píntag</i>	Tanipamba	44,1	49000	0,09	7	La afectación de debe al poblado colina abajo del área de Tanipamba.	Inundado
<i>Píntag</i>	La Caldera	44,1	49000	0,09	4	Se genera un remanso, el cual desborda el flujo en dirección hacia el Río Santa Clara.	Inundado
<i>Sangolquí</i>	Santa Anita	44,1	49000	0,09	32	Ubicación de la institución educativa Liceo del Valle.	Sumergido
<i>Sangolquí</i>	El Rancho	44,1	49000	0,09	2	-	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	La Colina	44,1	49000	0,09	6	-	Inundado
<i>Sangolquí</i>	ESPE	44,1	49000	0,09	3	La afectación se da para las urbanizaciones frente a la universidad.	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	El Progreso	44,1	49000	0,09	6	Los flujos tienen una extensión de 500 y 300 m a cada lado del río.	Inundado
<i>Sangolquí</i>	Playa Chica	44,1	49000	0,09	3,33	Los flujos tienen una extensión de 322 y 300 m.	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	El Triángulo	44,1	49000	0,09	6	Los flujos tienen una extensión de 1200 y 1000 m.	Inundado
<i>Sangolquí</i>	San Pedro	44,1	49000	0,09	5	El flujo tiene una extensión de 300 m a cada lado del río.	Parcialmente Inundado

Tabla 5.2.2.3: Resumen de afectación de los lahares por el cauce del Río Santa Clara.

ZONA	ÁREA	VOLUMEN (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	CAUDAL (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /s)		Coef. Manning	MÁXIMA ALTURA (m)		OBSERVACIÓN	AFECTACIÓN
			30%	40%		30%	40%		
<i>Píntag</i>	Barrio Carlos Gavilanes	44,1	14,7	19,6	0.09	20	25	-	Sumergido
<i>Píntag</i>	Club Los Chillos	44,1	14,7	19,6	0.09	22	25	-	Sumergido
<i>Píntag</i>	Selva Alegre	44,1	14,7	19,6	0.09	8	10	-	Inundado
<i>Píntag</i>	Colegio Juan de Salinas	44,1	14,7	19,6	0.09	14	17	-	Sumergido
<i>Píntag</i>	El Choclo	44,1	14,7	19,6	0.09	6	8	-	Inundado
<i>Sangolquí</i>	Emp. Eléctrica Quito	44,1	14,7	19,6	0.09	4	5	Los flujos tienen una extensión de 300 y 260 m a cada lado del río.	Inundado
<i>Sangolquí</i>	River Mall	44,1	14,7	19,6	0.09	3,24	3,60	Los flujos tienen una extensión de 300 m a cada lado del río.	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	Club de Oficiales	44,1	14,7	19,6	0.09	1,46	2	Los flujos tienen una extensión de 300 y 200 m.	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	ESPE	44,1	14,7	19,6	0.09	4	4	-	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	San Luis Shopping	44,1	14,7	19,6	0.09	2	4	-	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	San Rafael	44,1	14,7	19,6	0.09	5	6	Los flujos tienen una extensión de 300 y 86 m.	Inundado

De esta manera se concluye el análisis respectivo para los ríos Pita y Santa Clara, demostrando una vez más, el potencial peligro que existe para los moradores del Valle de Los Chillos en caso de ocurrir un nuevo evento eruptivo, donde la concentración poblacional incluidos los turistas y estudiantes de la ESPE, llegan aproximadamente a 90.000 personas.

Si bien el presente proyecto de investigación, permitió actualizar y calibrar los flujos de lodo generados por el volcán Cotopaxi, además de determinar las zonas afectadas o inundadas mediante la utilización del programa HEC-RAS; se debe recordar, que uno de los datos considerados para el desarrollo del proyecto, fue el considerar un tiempo de 30 minutos como margen de llegada de los flujos hacia el sector analizado, tiempo que se estableció en base a los antecedentes históricos y anteriores simulaciones realizadas.

Por tanto se puede señalar, que en caso de existir un nuevo ciclo eruptivo, los habitantes del Valle de Los Chillos no podrán evacuar hacia los puntos de seguridad ubicados en la zona, pues según un artículo publicado en agosto del 2012 llamado **“CÁLCULO, ANÁLISIS Y REPRESENTACIÓN DE TIEMPOS DE EVACUACIÓN EN EL VALLE DE LOS CHILLOS FRETE A UNA EVENTUAL ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI”**; indica que el tiempo de evacuación hacia los puntos de seguridad es de 42,63 minutos.

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

- El volcán Cotopaxi tiene una historia eruptiva que demuestra un comportamiento bimodal con erupciones estrombolianas y plinianas, por lo que es uno de los más peligrosos del Ecuador. Además, por ser el origen de tres grandes redes de drenajes que se distribuyen para las zonas norte, este y sur; se incrementa la peligrosidad de los flujos de lodo (lahares), que se generan por fusión de los glaciares, cada vez que ocurre una reactivación volcánica, con la formación de flujos piroclásticos.

Con base en la frecuencia eruptiva estadísticamente determinada, se ha establecido una alta probabilidad de que en el presente, aparezca una reactivación volcánica.

- El programa computacional HEC-RAS (Versión 4.1.0), creado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (US. Army Corps of Engineers), permitió elaborar un modelo hidráulico sobre el comportamiento de los flujos de lodo o lahares generados por el volcán Cotopaxi en una próxima erupción, que para el caso de la cuenca norte, se movilizan por los

ríos Pita y Santa Clara. Adicionalmente, gracias a su interfaz gráfica se puede observar de manera clara, la posible extensión de los flujos.

- Para la elaboración del modelo se consideró una reducción de alrededor del 50% en la extensión del casquete glaciar que cubre la parte más alta del cono volcánico. No obstante, se demuestra que tal reducción no significa, necesariamente, una reducción del volumen de los lahares y, peor aún, del riesgo volcánico. La concientización, la preparación y medidas de mitigación dadas por el hombre para el hombre, pueden ser los únicos factores que pueden inferir en una reducción del riesgo.

El modelo del tránsito de los lahares del Cotopaxi elaborado con el programa SIM-LAHAR, toma como referencia volúmenes de 60 y 70 millones de metros cúbicos para el hidrograma inicial, que en comparación con los 54 millones de metros cúbicos calculados para el presente proyecto, dan como resultado valores prácticamente iguales en algunas zonas y mayores en otras.

- En base a los resultados obtenidos con el modelo elaborado en el programa HEC-RAS, se concluye que el recorrido de los flujos descritos en el “Capítulo III” de este documento, tiene mucha coherencia con el comportamiento conocido de los lahares que se movilizan hacia la cuenca norte, especialmente en el sector conocido como “La Caldera”, en el que se produce un remanso hasta alcanzar una altura superior a los 30 m, que

produce el desbordamiento de una parte del flujo, que se dirige hacia el cauce del Río Santa Clara, incrementando el riesgo para el Valle de Los Chillos.

- La utilización adicional de los programas ArcGis (Versión 10) y HEC-geoRAS (Versión 10), permitieron georeferenciar la red de drenaje. Así se pudo determinar, algunos poblados cercanos a los diferentes cauces, que serían afectados al momento de una erupción y que no han sido tomados en cuenta en anteriores investigaciones.

- Los resultados obtenidos en el presente proyecto demuestran el importante peligro que se deriva de una posible erupción del volcán Cotopaxi. Más aún, cuando las diferentes ciudades aledañas a las diferentes vertientes, han crecido exponencialmente y de manera desordenada.

Esto demuestra una vez más el desinterés de los ahora llamados Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs), que han permitido en las últimas décadas una concentración poblacional sin ninguna planificación que considere los riesgos de una posible erupción del Cotopaxi y que sólo han visto al volcán como la portada de una revista de turismo.

Existen muchos documentos, tesis e investigaciones desarrolladas por diferentes profesionales nacionales y extranjeros, en los que se habla del gran peligro que corren las y los ecuatorianos en caso de existir una reactivación volcánica del Cotopaxi” y que, además, permitieron orientar el correcto desarrollo del presente proyecto, con el que se confirma que los

flujos de lodo o lahares, pueden afectar a un importante porcentaje de la población ubicada en el flanco norte del volcán, sin considerar acciones concretas de prevención y mitigación.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

- Determinar, analizar y comprobar las diferentes zonas de seguridad para los diferentes sectores con peligro de inundación, a partir de los resultados del presente estudio. Hecho esto, se debe socializar la información con los poblados de las diferentes zonas, para establecer las rutas a tomar para llegar a ellas. Para esto se requiere que participen activamente medios de comunicación y todas las instituciones del Estado que de una u otra manera, tienen la obligación de velar por la seguridad de los ecuatorianos que se encuentran asentados en las zonas descritas en el presente trabajo de investigación.
  
- Realizar cursos de capacitación en Comportamiento Humano ante Desastres Naturales en las diferentes instituciones educativas, públicas y privadas; para prevenir el caos que existiría en un posible evento eruptivo. Se debe propender a una máxima cooperación entre los ciudadanos para que no se produzca el atropellamiento que normalmente se presenta en este tipo de eventos que generan situaciones de pánico, disminuyendo en lo posible el impacto del desastre.

- Una vez que se ha informado a la ciudadanía sobre los peligros del desastre natural y que se han indicado los respectivos senderos y zonas de evacuación para su seguridad; de manera franca y abierta, estos organismos deberán realizar simulacros de evacuación en el objetivo de concientizar de la mejor manera la necesidad de estar prevenidos y conocer de manera adecuada el camino a tomar en caso de producirse el desastre natural.
  
- Los diferentes GADs pertenecientes a la región y sectores geográficos señalados en la presente investigación, deberían analizar exhaustivamente el problema y tomar decisiones en torno a la prevención, acciones de auxilio, ayuda en las evacuaciones y sostenimiento físico, médico, alimentario, de vivienda, educativo, etc. de los ciudadanos y ciudadanas afectadas; privilegiando en sus planes, la supervivencia de los sectores más vulnerables y con mayores potencialidades para el desarrollo de la nación.
  
- El Ministerio de Defensa, el Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas en coordinación con las unidades militares asentadas en el perímetro del presente trabajo de investigación, tales como: la Academia de Guerra, el Batallón Cotopaxi, la FAME y la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE), conjuntamente con los grandes centros comerciales, industriales e instituciones de derecho público y privado, deberían asumir de manera

urgente, el liderazgo de un trabajo permanente en difusión y capacitación de la población asentada en las zonas peligrosas.

- En vista de que el presente estudio, presenta en una forma totalmente descriptiva el manejo de los programas ArcGis 10, HEC-geoRAS 10 y HEC-RAS 4.1.0; se recomienda mejorar los mapas digitales de todas las zonas por las que transitan los lahares del Cotopaxi, a escalas inferiores, en lo posible hasta 1:1000; de tal forma que aprovechando toda la capacidad de los programas antes mencionados y sin necesidad de tener que ir al campo a medir nuevamente cada uno de los perfiles transversales, se pueda mejorar el diseño hidráulico, en el objetivo de tener una mayor exactitud en los resultados posteriormente obtenidos. Recordando que ha mayor cantidad de puntos de control, disminuye el porcentaje de error.

De esta manera se podría realizar simulaciones sobre comportamiento de los flujos de lodo, en períodos cortos de tiempo, lo cual permite monitorear constantemente el comportamiento de los mismos, considerando los diferentes porcentajes de disminución del glaciar existente en el volcán.

- En el objetivo claro de hacer simulaciones cada vez más precisas, sobre el comportamiento de los lahares generados por el volcán Cotopaxi hacia los diferentes drenajes. Se recomienda actualizar el coeficiente de Manning en la medida en que se vaya reajustando este valor a condiciones más exactas.

- En base a los resultados obtenidos en el presente proyecto y en vista de que los tiempos de llegada de flujos de lodo son menores a los tiempos de evacuación, se recomienda de manera inmediata, se realicen trabajos conjuntos con las diferentes áreas de la ingeniería; en el objetivo común de llegar a diseñar y construir obras de infraestructura, que permitan de cierta manera, aumentar el tiempo de arribo de los lahares hacia el sector del Valle de Los Chillos. Así mismo, se debe implementar al menos un sistema de alerta temprana. De esta manera, se permitirá a los pobladores ubicados en las zonas de alto riesgo, el poder llegar a los puntos de seguridad previamente establecidos; pues, dado que la densidad poblacional sigue en aumento, esta tarea se vuelve cada vez más difícil de controlar.

### 6.3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, E. y Toulkeridis, T.: 2005, El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha, Sotavento Ed, Quito, Ecuador. pp 1- 29.
- Aguilera, E., Pareschi, M.T., Rosi, M., y Zanchetta, G.: 2004, , Risk from lahars in the northern valleys of Cotopaxi volcano (Ecuador), Natural Hazards n. 33. pp 165.
- Andrade, D., Hall, M., Mothes, P., Troncoso, L., Eissen, J., Samaniego, P., Egred, J., Ramón, P., Rivero, D., y Yepes, H.: 2005, Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi, Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional n. 3. pp 17- 54.
- Barberi, F., Cotelli, M., Frullani, A., Rosi, M., y Almeida, E.: 1995, Chronology and dispersal characteristics of recently (last 5000 years) erupted tephra of Cotopaxi (Ecuador): implications for long-term euptive forecasting, Journal of Volcanology and Geothermal Research n. 69. pp 218-221.
- Galárraga, R., y Coello-Rubio, X.: 2009, Modelación matemática de los flujos de lodo y escombros de origen volcánico secundarios en las quebradas Vascún, Ulba, y Lligua: Volcán Tungurahua, Ecuador. pp 14-15.
- Guerra, V.: 1998, Sistema de Análisis Ríos, US Army Corps of Engineers. pp 1-23.
- Kuriowa, J.: 2010, Introducción al uso del HEC-RAS, Universidad Nacional de Ingeniería. pp 1-2.
- Mothes, P., Hall, M., y Janda, R.: 1998, The enormous chillos valley lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi volcano, Ecuador, Bull Volcanol n. 59. pp 234.
- Nanía, L., y Molero, E.: 2007, Manual básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-geoRAS 3.1.1, Edificio Politécnico, Campus de Fuentenueva, Granada. pp 1-18.
- Pedregal, B.: 2009, Introducción a ArcGIs. pp 1-11.
- Samaniego, P., Ordoñez J., Schilling, S., y Mothes P.: 2011, , Los Posibles Escenarios Eruptivos del Cotopaxi y la Delimitación de Zonas Inundadas por Lahares, IG, USGS, IRD. pp 1-10.
- US Army Corps of Engineers.: 2008, HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual. pp 1-22.
- Venkatesh, M.: 2010, Tutorial on using HEC-geoRAS with ArcGis 9.3, School of Civil Engineering, Purdue University. pp 1-21.
- <http://riesgosycatastrofes1a.wikispaces.com/2.-ANÁLISIS+Y+PLANIFICACIÓN++DE+LOS++RIESGOS>.
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Ceniza\\_volc%C3%A1nica](http://es.wikipedia.org/wiki/Ceniza_volc%C3%A1nica)
- <http://es.wikipedia.org/wiki/ArcGIS>

- <http://es.wikipedia.org/wiki/Lahar>
- <http://help.arcgis.com>
- <http://publiespe.espe.edu.ec/articulos/vulcanismo/flujo-de-lodos/infocoto.htm>
- <http://www.espe.edu.ec/portal/portal/main.do;jsessionid=AB389CF3CE40E6629283082C290000BB?sectionCode=1009>
- <http://www.espe.edu.ec/portal/portal/main.do?sectionCode=1007>
- <http://www.hec.usace.army.mil>
- [http://www.volcanesdecanarias.com/interna/Educacion/edu\\_riesgo.htm](http://www.volcanesdecanarias.com/interna/Educacion/edu_riesgo.htm)

#### 6.4. BIBLIOGRAFÍA:

- Aguilera, E. y Toulkeridis, T.: 2005, El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha, Sotavento Ed, Quito, Ecuador.
- Aguilera, E., Pareschi, M.T., Rosi, M., y Zanchetta, G.: 2004, Risk from lahars in the northern valleys of Cotopaxi volcano (Ecuador), Natural Hazards n. 33.
- Andrade, D., Hall, M., Mothes, P., Troncoso, L., Eissen, J., Samaniego, P., Egred, J., Ramón, P., Rivero, D., y Yepes, H.: 2005, Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi, Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional n. 3.
- Barberi, F., Cotelli, M., Frullani, A., Rosi, M., y Almeida, E.: 1995, Chronology and dispersal characteristics of recently (last 5000 years) erupted tephra of Cotopaxi (Ecuador): implications for long-term euptive forecasting, Journal of Volcanology and Geothermal Research n. 69.
- Braney, M., y Kokelaar, P.: 2002, Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites, Geological Society London Memoir n. 27.
- Cas, R., y Wright, J.: 1987, Volcanic Succesions Modern and Ancient.
- Castro, M., Mothes, P., Hidalgo, H., y Sánchez, A.: 1992, Uso del Modelo HEC-1 para el estudio de los lahares del volcán Cotopaxi, Politécnica Revista de Información Técnico - Científica n. 3.
- Cea, L., y Bladé, E.: 2007, Modelización matemática en el lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable, Grupo GIAMA.
- Galárraga, R., y Coello-Rubio, X.: 2009, Modelación matemática de los flujos de lodo y escombros de origen volcánico secundarios en las quebradas Vascún, Ulba, y Lligua: Volcán Tungurahua, Ecuador.
- Guerra, V.: 1998, Sistema de Análisis Ríos, US Army Corps of Engineers.
- Hall, M., y Mothes, P.: 2007, The rhyolitic-andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador, Bull Volcanol n. 10.

- Jérémy, R., D'Ercole, R., Pigeon, P., y Serrano T.: 2009, Complejidad, incertidumbre y vulnerabilidad: el riesgo asociado al volcán Cotopaxi en el Valle de Los Chillos (Quito-Ecuador), l'Institut Français d'Études Andines n. 3.
- Kuriowa, J.: 2010, Introducción al uso del HEC-RAS, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Lockwood, J., y Hazlet, R.: 2010, Volcanoes: Global Perspectives.
- Mothes, P., Hall, M., y Janda, R.: 1998, The enormous chillos valley lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi volcano, Ecuador, Bull Volcanol n. 59.
- Nanía, L., y Molero, E.: 2007, Manual básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-geoRAS 3.1.1, Edificio Politécnico, Campus de Fuentenueva, Granada.
- Padilla, O., y Bosque, J.: 2012, Cálculo, análisis y representación de tiempos de evacuación en el Valle de Los Chillos frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi, Universidad de Alcalá, Escuela Politécnica del Ejército (ESPE).
- Pedregal, B.: 2009, Introducción a ArcGIs.
- Pierson, T., Janda, R., Thouret, J., y Borrero, C.: 1990, Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars, Journal of Volcanology and Geothermal Research n. 41.
- Pistolesi, M., Cioni R., Rosi, M., Cashman, K., Rossotti, A., y Aguilera, E.: 2013, Evidence for lahar-triggering mechanisms in complex stratigraphic sequences: the post-twelfth century eruptive activity of Cotopaxi Volcano, Ecuador, Bull Volcanol n. 75.
- Ramos, C.L.: 2005, HEC-RAS 3.1 Manual de entrenamiento, UNALM-FIA-DRAT.
- Samaniego, P., Ordoñez J., Schilling, S., y Mothes P.: 2011, , Los Posibles Escenarios Eruptivos del Cotopaxi y la Delimitación de Zonas Inundadas por Lahares, IG, USGS, IRD.
- Sánchez, J.: 2007, Manual introductorio a HEC-RAS, Dpto. Geología Universidad de Salamanca.
- Sodiro, L.: 1877, Relacion sobre la erucion del Cotopaxi acaecida el dia 26 de junio de 1877, Imprenta Nacional, Quito, Ecuador.
- US Army Corps of Engineers.: 2008, HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual.
- US Army Corps of Engineers.: 2011, HEC-geoRAS GIS Tools for support of HEC-RAS using ArcGis, River Analysis System, User´s Manual.
- Venkatesh, M.: 2010, Tutorial on using HEC-geoRAS with ArcGis 9.3, School of Civil Engineering, Purdue University.
- Wolf, T.: 1878, Memoria sobre el Cotopaxi y su ultima eruption acaecida el 26 de junio de 1877, Imprenta del Comercio, Guayaquil, Ecuador.