

**DETERMINACIÓN PRELIMINAR DE LA AMENAZA POR FLUJOS DE LODO
PROVENIENTES DE LA QUEBRADA CUSCUNGO Y DEL RIO PASTO EN LA
UNIVERSIDAD DE NARIÑO SEDE TOROBAJO MEDIANTE MODELAMIENTOS
NUMÉRICOS Y ANALÍTICOS**

OSCAR FABIAN FRANCO PANTOJA

JHON WILMER SILVA MORENO

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2017**

**DETERMINACIÓN PRELIMINAR DE LA AMENAZA POR FLUJOS DE LODO
PROVENIENTES DE LA QUEBRADA CUSCUNGO Y DEL RIO PASTO EN LA
UNIVERSIDAD DE NARIÑO SEDE TOROBAJO MEDIANTE MODELAMIENTOS
NUMÉRICOS Y ANALÍTICOS**

OSCAR FABIAN FRANCO PANTOJA

JHON WILMER SILVA MORENO

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil**

Director:

PhD. Gustavo Córdoba Guerrero

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2017**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado son responsabilidad exclusiva de los autores.”

Artículo 1º del acuerdo No. 324 del 11 de octubre de 1966, emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”

Artículo 13º del Acuerdo N. 005 de 2010 emanado del Honorable Consejo Académico.

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

San Juan de Pasto, Noviembre de 2017

RESUMEN

El centro de la ciudad de Pasto está ubicado a 9 km del volcán Galeras. Aunque actualmente existe una nueva versión del mapa de amenazas volcánica del volcán Galeras realizado por el Servicio Geológico colombiano (2015) el POT municipal sigue basándose en la anterior versión realizada por INGEOMINAS (1997), en donde la mayor parte de la ciudad se encuentra en zona de amenaza baja por fenómenos provenientes de este volcán, sin embargo, los sectores aledaños a la quebrada Mijitayo y al Río Pasto en el sector norte de la ciudad están en el área de amenaza media por considerarse que sería la trayectoria de flujos de lodo secundarios a lo largo de los cauces de estos ríos. La Universidad de Nariño, se encuentra adyacente al río Pasto, sobre el cual se ha establecido un rango de doscientos metros sobre el eje del río INGEOMINAS (1997), por donde se pudiera dirigir este flujo de lodo, este margen fue adoptada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) como una zona buffer. Contrario al mapa de amenaza actual, en la tercera versión esta zona no se hizo mediante modelamientos, ni teniendo en cuenta el control ejercido por la topografía sobre el flujo.

En este trabajo se realizó un análisis a manera de ejercicio académico contemplando parámetros de la mecánica de fluidos y la hidráulica de canales abiertos aplicada a flujos con sedimentos.

Además, por la ladera oriental del volcán Galeras desciende la quebrada Cuscungo hasta la calle 18 donde se canaliza hasta desembocar en el río Pasto en inmediaciones con la Universidad de Nariño. Para esto se utilizó un el software TITAN 2D, con el cual se modeló la trayectoria del flujo afectado por la topografía de la zona, la fricción y la gravedad.

ABSTRACT

Pasto downtown's is located 9 km from the Galeras volcano. According to the map of volcanic threat, this city is in an area of low threat by phenomena from the volcano and according to the threat's map, the areas like Mijitayo and Rio Pasto in the north of the city are in the area of medium threat, by some flows of mud, whose causes are those causes. The University of Nariño is located near to Pasto's river, therefore has been affected by sludge flow as indicated on the map of threat. INGEOMINAS (1997). The Colombian Geological Service (SGC) has established a range of one hundred meters on each side of cause, through which could conduct this flow mud. This approach ignores the effect exerted by topography on flow control, which is necessary to study, because the topography of the area makes it very difficult to get a flow that can support the strip as shown in the map of threats QMS. In addition, close to University's campus, descends from the top of the volcano the gorge's Cuscungo, this is not registered in the map of threats, but it could be affected the University of Nariño and to near community, in case the mudflow occurs in the stream.

To get a specific area of involvement with these potential flows from the Rio Pasto and / or gorge's Cuscungo, made a number of statistical studies in which the probability that a set point can be reached, a number of times was modeled in 100 events, for this was used of the software Titan 2d, developed by the Geophysical Mass Flow Group of Buffalo's university (USA). The model used is a stack TITAN2D has a battery with granular material that sliding downhill by gravity

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	12
1. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA EN ESTUDIO.....	15
1.1. VOLCÁN GALERAS	15
1.1.1. Actividad del Volcán Galeras.	16
2. PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL PASTO 2015	18
3. MARCO CONCEPTUAL.....	19
3.1. FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA	19
3.2. FUNDAMENTOS HIDRÁULICOS.....	19
3.2.1. Tipos de canales.....	20
3.2.2. Características geométricas de la sección transversal de un canal.....	21
3.2.3. Flujo En Canales Abiertos.....	22
3.2.4. La fórmula de Chezy.....	22
3.3. FLUJOS	24
3.4. FLUJOS DE LODO	27
3.4.1. Formación y disposición de flujos de lodo.....	28
3.5. CONCEPTO DE PROBABILIDAD.....	29
3.5.1. Frecuencia absoluta de un suceso (fi)	30
3.5.2. Frecuencia relativa de un suceso (hi)	30
3.6. MUESTREO MONTE CARLO (MMC) e HIPERCUBO LATINO (LHS)	30
3.7. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL (DEM).....	31
3.8. SOFTWARE TITAN2D.....	32
3.9. GNU OCTAVE	33
3.10. VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL POR FLUJOS DE LODO	34
4. MODELAMIENTO DE FLUJOS DE LODO EN LA QUEBRADA CUSCUNGO	37
4.1. PARÁMETROS DEL MODELAMIENTO	38
4.1.1. Modelo de elevación digital DEM.....	39
4.1.2. Tiempo máximo de simulación y número de pasos.	40
4.1.3. Angulo de fricción interno.....	40
4.1.4. Ángulo de fricción basal	41

4.1.5. Localización de las pilas.	42
4.1.6. Volumen de la pila.	43
4.1.7. Concentración del flujo de lodo.	45
4.2. RESULTADOS.....	48
4.2.1. Detalle de probabilidad y estructuras en zona de estudio.....	51
4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	52
5. VERIFICACIÓN HIDRÁULICA DEL FLUJO DE LODO.	54
5.1. CONSIDERACIONES GENERALES	54
5.2. ANÁLISIS DEL PERFIL DEL FLUJO	57
5.2.1. Chequeo de la posibilidad de sobrelevación del flujo.	58
5.3. PRINCIPIOS DE CONTINUIDAD Y CONSERVACIÓN DE LA MASA.	59
5.3.1. Parámetros de la ecuación de Manning.....	59
5.3.2. Determinación de la rugosidad (n) en la sección.	60
5.3.3. Cálculo de caudales en las secciones.	61
5.3.4. Análisis del principio de continuidad en el Cauce	62
5.3.5. Superposición de Caudales en áreas transversales.	62
5.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	67
6. IDENTIFICACIÓN DE LAS EDIFICACIONES VULNERABLES.	69
7. CONCLUSIONES	72
8. RECOMENDACIONES.....	73
9. COROLARIO	74
10. BIBLIOGRAFÍA.....	75
11. ANEXOS.....	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Resumen registro de eventos eruptivos de Galeras 1.	16
Tabla 1.2 Resumen registro de eventos eruptivos de Galeras 2.	17
Tabla 3.1 Tipología de estructurales.	36
Tabla 4.1 Ángulos de fricción basal.	42
Tabla 4.2 Relación eventos eruptivos del volcán Galeras en 2009.	44
Tabla 4.3 Procesamiento de datos para obtener el espesor ponderado.	47
Tabla 5.1 Características hidráulicas secciones transversales.	61
Tabla 5.2 Caudales calculados para cada uno de los chequeos.	62
Tabla 5.3 Chequeo en la sección Hospital infantil. $Q= 3546 \text{ m}^3/\text{s}$	65
Tabla 5.4 Chequeo sección Universidad de Nariño $Q= 908.656 \text{ m}^3/\text{s}$	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación geográfica del Volcán Galeras.	15
Figura 3.1 Tipos de canales.....	20
Figura 3.2 Elementos geométricos de la sección.....	21
Figura 3.3 Ecuaciones básicas a un volumen finito de control en un canal.	24
Figura 3.4 Perfil de velocidades tipo tapón.	27
Figura 3.5 Esquema formación, transporte y depósito de flujo de lodo.	29
Figura 3.6 Descripción gráfica de un mapa.	32
Figura 3.7 Tipologías estructurales, presión de impacto y daño.	35
Figura 4.1 Quebrada Cuscungo.....	37
Figura 4.2 Modelo de elevación digital de la quebrada Cuscungo.....	39
Figura 4.3 Ángulos de fricción.....	41
Figura 4.4 Simulación preliminar del flujo.	43
Figura 4.5 Isópacas Volcán Galeras.	45
Figura 4.6 Determinación de la cuenca de la quebrada Cuscungo.....	46
Figura 4.7 Tramos para cálculo del espesor de ceniza ponderado.....	46
Figura 4.8 Representación de espesores para cálculo de volúmenes.....	47
Figura 4.9 Distribución por LHS.	48
Figura 4.10 Comparación de distribuciones de probabilidad.	50
Figura 4.11 Detalle para distribución 1.	51
Figura 4.12 Detalle para distribución 2.	52
Figura 5.1 Sección río Pasto en Universidad de Nariño Sede Torobajo.	55
Figura 5.2 Sección río Pasto sector del Hospital Infantil Los Ángeles.	56
Figura 5.3 Franja de 100 metros a lado y lado de río Pasto sección UDENAR.	57
Figura 5.4 Sección transversal incrementando altura del flujo.....	63
Figura 5.5 Caudal calculado en el sector Universidad de Nariño.....	64
Figura 5.6 Caudal calculado sector Hospital Infantil.	64
Figura 5.7 Caudal de sector Universidad de Nariño en Hospital infantil.	65
Figura 5.8 Caudal de sector Hospital Infantil en Universidad de Nariño.	66
Figura 5.9 Posible zona de inundación en el sector del Hospital Infantil.	67
Figura 5.10 Posible zona de inundación en la Universidad de Nariño.	68
Figura 6.1 Mapa de Vulnerabilidad estructural.....	70
Figura 6.2 Identificación de la vulnerabilidad por flujo de lodos.	71

LISTA DE ANEXOS

ANEXO No. 1 Cálculo del coeficiente de resistencia "C"	81
ANEXO No. 2 Ángulo de fricción y volumen asignado.....	83
ANEXO No. 3 Caracterización tipológica.....	84
ANEXO No. 4 Cálculo características sección sector Hospital Infantil.....	88
ANEXO No. 5 Cálculo características sección sector Universidad de Nariño.....	89
ANEXO No. 6 Mapa de amenaza volcánica galeras.....	90

INTRODUCCIÓN

Los flujos de lodo están considerados entre los fenómenos volcánicos más peligrosos. Su alta densidad, combinada con su fluidez, los hace capaces de arrancar y destruir virtualmente todo lo que encuentran a su paso, los ríos representan un medio catalizador que los hace avanzar decenas de kilómetros. Cuando finalmente se detienen, pueden producir depósitos de material de decenas de metros de altura, y en ciertos casos han enterrado poblaciones completas o ha cambiado el curso de grandes ríos. Los depósitos de flujos representan también un gran peligro para la vida ya que suelen ser profundos y blandos y en algunos casos muy calientes como para cruzarlos, entonces las personas pueden quedar atrapadas en áreas vulnerables sin posibilidad de huir o de recibir ayuda UNDR0 (1987).

La Universidad de Nariño sede Torobajo se encuentra ubicada al noroccidente de la ciudad de Pasto en el departamento de Nariño, sobre la calle 18 en la vía que de esta ciudad conduce hacia el municipio de Nariño y a una distancia de 6.6 kilómetros del cráter del volcán Galeras. En 2013, se estableció que la población universitaria entre estudiantes, docentes, personal administrativo y de servicios generales supera las 9000 personas. El campus universitario se encuentra bordeado por el río Pasto en su flanco nororiental, y el cual transportaría los flujos de lodo provenientes de la quebrada Mijitayo y Midoro, razón por la cual su cauce se encuentra dentro del área determinada como amenaza alta por el Mapa de Amenaza Volcánica del Volcán Galeras en su actualización 2015. Por otro lado, desde las laderas del Volcán Galeras desciende la Quebrada Cuscungo o también llamada Quebrada el Chilco la cual bordea por el lado occidental del campus universitario hasta desembocar en el río Pasto, y a pesar que en la nueva versión del mapa de amenazas no se encuentra dentro del área de amenaza por flujos de lodo en este trabajo se realizó a manera de estudio académico una simulación a este fenómeno natural con el fin de observar el comportamiento del flujo en el hipotético caso que llegara a ocurrir.

Aunque ya existe una versión actualizada del Mapa de Amenazas del Volcán Galeras, el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) municipal sigue basándose en la versión de 1997, en la cual se delimitó una franja de 100 metros a lado y lado del cauce del río Pasto como zona de amenaza media por ser una posible trayectoria de flujos de lodos provenientes del Volcán Galeras (ver anexo 1), por lo tanto el POT municipal realiza restricciones en cuanto a la habitacionalidad y uso de las edificaciones en esta zona. Parte de la Universidad de Nariño se encuentra dentro de esta franja, específicamente el bloque 1.

En el presente trabajo se realizaron modelamientos numéricos para determinar la amenaza por flujos de lodo provenientes de la quebrada Cuscungo. Para esto se utilizó el código TITAN 2D, que a pesar que es un programa diseñado para modelar

flujos granulares secos, ha sido empleado en el modelamiento de lahares y flujos de lodo con muy buenos resultados Murcia y otros (2008); Procter y otros (2010). También se analizó más detalladamente el comportamiento hidráulico que tendría un flujo de lodo que se desplace por el cauce del río Pasto, así como los casos en los que dicho flujo alcanzaría a inundar al menos 100 metros a cada lado de su cauce, para esto se utilizaron parámetros de la hidráulica de canales abiertos aplicados a flujos con sedimentos.

La primera parte de esta investigación plantea realizar una aproximación a la amenaza producida por flujos de lodo en la cuenca de la quebrada Cuscungo al oriente del cono activo del volcán Galeras. En la segunda parte se realizó a manera de ejercicio académico un estudio hidráulico del alcance de la inundación sobre el río Pasto en la zona del campus universitario. Para aplicar los conceptos de la hidráulica de canales abiertos se consideraron las limitaciones respectivas al pasar de un flujo de agua a un flujo de lodo. Por último, se muestra un estimativo de vulnerabilidad cualitativa de las estructuras de la Universidad de Nariño por flujos de lodo mediante el método empleado por Moriano et al (2016) en la población de Santiago Xalitzintla en México y se comparó con las áreas probables de inundación obtenidas en este trabajo para flujos de provenientes de la Quebrada Cuscungo.

Finalmente, se plasmaron los resultados y conclusiones obtenidos en la investigación.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

OBJETIVO GENERAL

Estudiar la amenaza por flujos de lodo provenientes de la quebrada Cuscungo y del río Pasto en la universidad de Nariño sede Torobajo mediante modelamientos numéricos y estudios analíticos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.** Obtener el conocimiento necesario para el manejo del software TITAN 2D y Grass GIS.
- 2.** Determinar los parámetros de entrada a través de datos secundarios para el modelamiento digital en el software TITAN 2D.
- 3.** Obtener un modelo de elevación digital de la zona de estudio.
- 4.** Identificar las zonas y edificaciones con mayor vulnerabilidad ante la amenaza por flujos de lodo en la Universidad de Nariño sede Torobajo.
- 5.** Realizar un estudio de los posibles flujos de lodo provenientes de la Quebrada Cuscungo y dado la ocurrencia del evento proponer la probabilidad de que este fenómeno afecte peligrosamente las instalaciones de la Universidad de Nariño sede Torobajo.
- 6.** Investigar que tan factible es que un flujo de lodo fluya en una franja de 100 metros a lado y lado del río Pasto en la zona de la Universidad de Nariño sede Torobajo.

1. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA EN ESTUDIO

1.1. VOLCÁN GALERAS

El volcán Galeras, se localiza en el Departamento de Nariño, aproximadamente a 9 km al occidente de la plaza central de la Ciudad de San Juan de Pasto, capital de este departamento, en las coordenadas $1^{\circ} 13' 43,8''$ de latitud norte y $77^{\circ} 21' 33,0''$ de longitud oeste y con una altura de 4276 msnm, de acuerdo con el Catálogo de Volcanes Activos del Mundo (CAVW) de la Asociación Internacional de Vulcanología y Química del Interior de la Tierra IAVCEI (1975).



Figura 1.1 Ubicación geográfica del Volcán Galeras. (Zona de estudio. Imagen tomada de Google Earth).

De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Volcán Galeras pertenece a los volcanes del tipo estratovolcán, de composición predominantemente andesítica, presenta una forma cónica y se emplaza dentro de una estructura más antigua (anfiteatro), destruida al occidente. Presenta erupciones características tipo Vulcaniano, con columnas eruptivas que pueden alcanzar entre 6 y 12 Km. Galeras es considerado como uno de los volcanes más activos, ya que presenta una alta tasa de períodos de actividad en comparación con lapsos de tiempo en los que permanece en reposo.

1.1.1. Actividad del Volcán Galeras. El SGC INGEOMINAS (1997) estima en cerca de 4500 años la edad del volcán Galeras, durante los cuales identificaron seis episodios eruptivos importantes, registrados en los años: 4500, 4000, 2900, 2300 y 1100 años A.C. y la erupción de 1866.

Desde febrero de 1989 cuando se instaló la primera estación sismológica para la vigilancia, el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto ha monitoreado la actividad del volcán Galeras. El actual ciclo de reactivación se detectó instrumentalmente hacia mediados del 2004. Durante este ciclo el volcán ha registrado un total de 18 erupciones explosivas (ver Tabla 1.1 y tabla 1.2) entre agosto de 2004 y enero de 2010. Del total de estas erupciones, 10 de ellas se registraron en el 2009 entre los meses de febrero y noviembre INGEOMINAS (2009).

Tabla 1.1 Resumen registro de eventos eruptivos de Galeras 1. (Agosto de 2004 y enero de 2008 INGEOMINAS).

Fecha (dd-mm-aa)	Hora Local (hh:mm)	Volumen mínimo calculado (miles de m ³)
11/08/2004	11:49 p. m.	1200
12/08/2004	12:02 a. m.	
21/11/2004	3:44 p. m.	665
24/11/2004	2:46 a. m.	700
8/07/2006	4:48 p. m.	80
12/07/2006	10:58 a. m.	310
17/01/2008	8:06 p. m.	1100
Total volumen mínimo emitido por erupciones 2004-2008}		4055

Fuente Servicio Geológico Colombiano.

<http://www.sgc.gov.co/Pasto/Publicaciones/Informes-tecnicos/Informe-Mensual.aspx>

Tabla 1.2 Resumen registro de eventos eruptivos de Galeras 2.
(Febrero de 2009 y enero de 2010).

Erupciones explosivas Volcán Galeras 2009 - 2010		
Fecha (dd-mmm-aa)	Hora local (hh:mm)	Volumen mínimo calculado (m^3)
14-Feb-09	07:10 p.m.	285000
20-Feb-09	07:04 a.m.	1431000
13-Mar-09	03:55 p.m.	852000
24-Abr-09	07:32 p.m.	1000000
24-Abr-09	08:09 p.m.	
29-Abr-09	10:15 a.m.	63000
7-Jun-09	07:18 a.m.	35000
8-Jun-09	06:38 a.m.	2214000
30-Sep-09	09:14 a.m.	2014000
20-Nov-09	08:37 p.m.	453000
2-Ene-10	07:43 p.m.	3560000
Total volumen mínimo emitido por erupciones 2009 - 2010		11907000

Fuente Servicio Geológico Colombiano.

<http://www.sgc.gov.co/Pasto/Publicaciones/Informes-tecnicos/Informe-Mensual.aspx>

2. PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL PASTO 2015

El Plan de Ordenamiento Territorial es un instrumento técnico y normativo para ordenar el territorio municipal. Comprende el conjunto de objetivos, directrices, políticas, estrategias, metas, programas, actuaciones y normas, destinadas a orientar y administrar el desarrollo físico del territorio y la utilización del suelo. (Ley 388 / 1997)

Mediante el Acuerdo 004 del 14 de abril del 2015, el Concejo Municipal de Pasto aprobó el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) para el municipio, en el cual se plasmaron todo tipo de estudios y argumentos que se han utilizado para tomar decisiones acerca del crecimiento y desarrollo de la ciudad tanto a corto como a mediano y largo plazo.

En el capítulo II del Título III del POT se establece que el municipio de Pasto incorpora en este POT la gestión del riesgo, basándose en los principios de la ley 1523 de 2012.

Según el POT y con base en la ley 1523 de 2012 se define la gestión del riesgo con un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible.

Uno de los determinantes y soportes para la conformación del componente de gestión del riesgo en el POT se encuentra el Mapa de Amenaza Volcánica Galeras Tercera Versión de 1997, elaborado por el Servicio Geológico Colombiano. Dentro de las áreas de riesgo del municipio de Pasto emitidas por el POT, entre otras, se encuentra el área en condición de riesgo por flujo de lodo secundario, por la cual existen restricciones tanto en habitacionalidad como en uso de las edificaciones en los sectores comprendidos entre la Av. Panamericana, Calle 18 Torobajo y Av. Mijitayo.

Parte de la Universidad de Nariño sede Torobajo, se encuentra dentro de esta área de amenaza por flujo de lodos secundarios.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1. FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA

Los fenómenos de remoción en masa (FRM), comprenden una gran variabilidad y complejidad de movimientos de material geológico debido a la fuerza de la gravedad, que hace del tema un asunto difícil y a veces vago de tratar como conjunto. Más aún, en ocasiones se alude a este como proceso erosivo, no obstante, la diferencia fundamental de que en el caso de la erosión exista un agente (agua, viento, hielo, hombre) capaz de arrancar y transportar el material, igualmente se utiliza en forma general el término “deslizamiento”, que en el sentido estricto de su significado solo correspondería a algunos tipos de FRM, y el mecanismo como una caída de rocas, un flujo de lodos o una subsidencia del terreno. Los FRM comprenden todo movimiento lateral debajo de material geológico debido a fuerzas de la gravedad incluyendo los flujos de lodo a lo largo de los cauces cuando el material que colapsa y se mezcla con la corriente de agua, como es el caso de las llamadas avenidas torrenciales Castro y otros (2001), estos últimos también pueden ser producidos por actividad sísmica, y por sedimentación de los flujos piroclásticos provenientes de una erupción volcánica combinados con fuertes y prolongados periodos de precipitación.

En ciertas condiciones, un edificio volcánico puede colapsar catastróficamente, produciendo avalanchas de escombros extremadamente móviles que se aceleran pendiente abajo y viajan a velocidades mayores que 360 m/s por distancias de decenas de kilómetros, Sieber (1984).

El movimiento en masa más lento es la denominada reptación del suelo. Con este término se define el movimiento lento y casi continuo del suelo, vertiente abajo.

Puesto que puede producirse en vertientes de muy escaso desnivel, la reptación del suelo es la forma más común de movimiento de masas. Al mismo tiempo, sin embargo, es el proceso más inadvertido, aunque el ladeo cuesta abajo, de los árboles y la acumulación de materiales en torno a cercas de roca son testimonio de su existencia Reed (2000).

3.2. FUNDAMENTOS HIDRÁULICOS

Al movimiento de un fluido se le llama flujo. Los flujos en canales abiertos se refieren al movimiento en presencia de una superficie libre, donde la presión sobre la superficie libre del fluido es igual a la presión atmosférica. El factor primordial en el análisis de flujos en canales abiertos es la localización de la superficie libre, la cual

se desconoce de antemano (a priori). La superficie libre asciende y desciende en respuesta a perturbaciones del flujo, Caicedo (2012).

Contrario a los conductos cerrados, en los que el agua llena el conducto, en un canal abierto siempre existe una superficie libre en contacto con el aire exterior normalmente considerada como referencia de presión cero (Ver figura 3.1). Esto por una parte facilita el análisis, al eliminar el término de presión, pero por otra lo complica ya que, la forma de la superficie es desconocida y la profundidad cambia al cambiar las condiciones. Para este trabajo el cauce del río Pasto se trabajó como un canal abierto de sección variable de las cuales mediante un levantamiento topográfico se podrá establecer la geometría, sus parámetros y se podrá analizar todas las propiedades hidráulicas para posteriormente obtener los respectivos caudales.

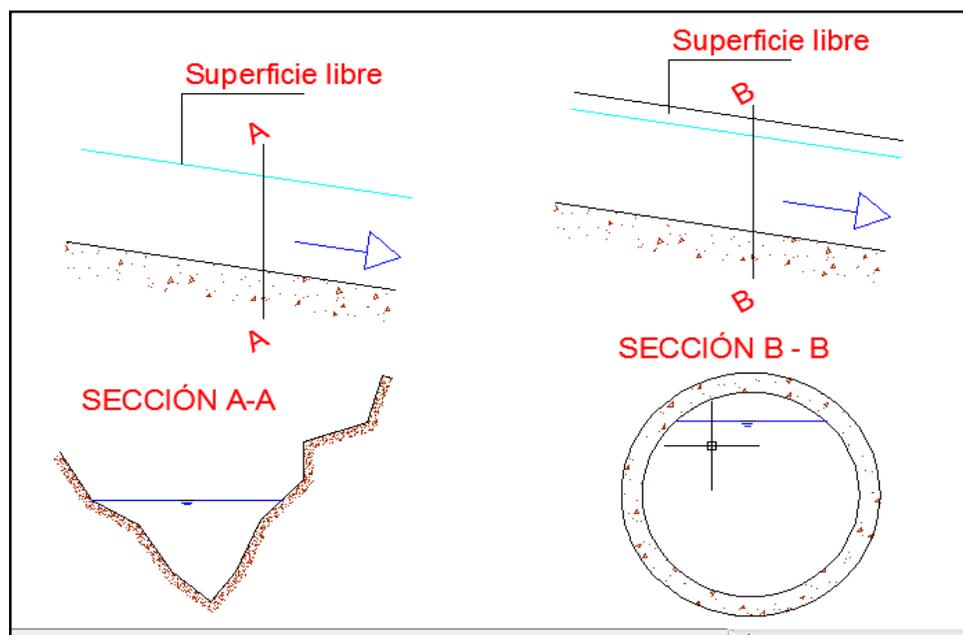


Figura 3.1 Tipos de canales.
a) Canal abierto. b) Canal cerrado

3.2.1. Tipos de canales: los canales pueden ser naturales o artificiales, ya sean de sección transversal abierta como cerrada.

Los canales artificiales son aquellos construidos por el hombre por motivos de riego, drenaje, para convertir una vía en navegable o como parte de una presa hidroeléctrica, cunetas de drenaje, canaletas de rebose o cunetas.

Los canales naturales incluyen todos los cursos de agua que existen naturalmente sobre la tierra, un ejemplo de estos canales son las quebradas, ríos y acequias. Las

propiedades de un canal natural son muy irregulares, estos parámetros pueden variar tanto espacialmente como temporalmente; por lo tanto, en algunos casos pueden hacerse suposiciones empíricas razonablemente consistentes con observaciones y experiencias reales Chow (1982).

Los principales parámetros que deben tenerse en cuenta en el análisis del flujo en canales abiertos son la geometría del canal (ancho, pendiente, rugosidad), las propiedades del flujo (densidad, viscosidad) y los parámetros de flujo (profundidad de flujo) Chanson (2002).

3.2.2. Características geométricas de la sección transversal de un canal: la sección transversal de un canal puede adoptar diferentes formas desde trapezoidal hasta rectangular, pasando por formas poligonales, parabólicas, semicirculares, etc.

Los elementos geométricos son propiedades de una sección del canal que pueden ser definidas por la geometría de la sección y la profundidad del flujo (h), El término sección se refiere a un corte transversal del canal tomado en forma perpendicular a la dirección del flujo.

Por lo general, las secciones en los canales naturales son muy irregulares y pueden variar desde aproximadamente una parábola a una aproximación del trapecio, por lo cual no es posible establecer todos los elementos en base a la profundidad, pero si se puede establecer relación entre los diferentes elementos, figura 3.2.

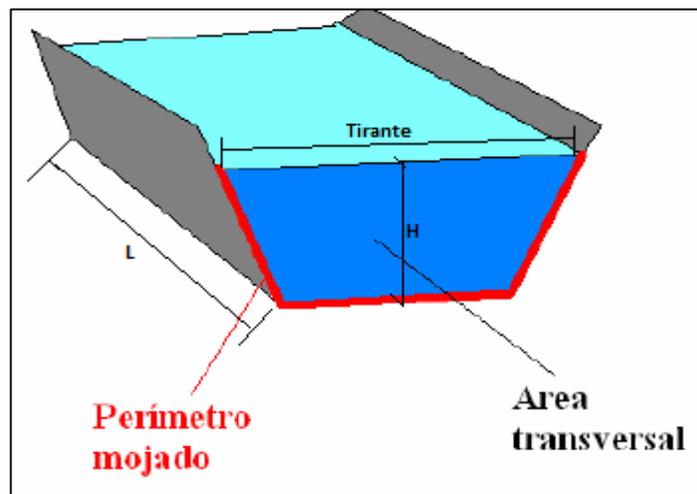


Figura 3.2 Elementos geométricos de la sección.

3.2.3. Flujo En Canales Abiertos: un canal abierto es una conducción abierta a la atmósfera en el que el líquido fluye sometido a la presión atmosférica y movido por la pendiente del propio canal, los canales estarán definidos por una serie de características que le son propias, que son las que se citan a continuación:

- Profundidad máxima, Calado (y).- Es la altura de la lámina de agua en una sección transversal. Hay que medirlo respecto a un plano de referencia que usualmente se coloca en la cota inferior de la sección transversal o solera.
- Área mojada (A).- Es la superficie de la sección transversal que ocupa el agua.
- Anchura superior de la sección (B).- Se define como la anchura de la superficie libre de fluido en el canal.
- Calado medio (y_m).- Es el cociente entre el área mojada del canal y la anchura superior de la sección (A/B).
- Perímetro mojado. Es la longitud de la pared del canal que está en contacto con el agua.
- Radio hidráulico (R_h).- Es la relación existente entre el área mojada y el perímetro mojado del canal.
- Pendiente del canal (S_o).- Se define como la altura que desciende el canal por metro lineal, se puede expresar en % y en tanto por mil.

3.2.4. La fórmula de Chezy: la fórmula de Chezy permite obtener la velocidad del fluido en régimen permanente en canales, esta expresión es la siguiente:

$$v = C * \sqrt{R_h * S_o} \quad (3.1)$$

En donde C es coeficiente de resistencia (fricción) que se puede calcular mediante las fórmulas que se presentan a continuación:

$$C = \frac{23 + \frac{0,00155}{S} + \frac{1}{n}}{1 + \frac{n}{\sqrt{R}} \left(23 + \frac{0,00155}{S} \right)}$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad \text{Manning}$$

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}} \quad (3.2)$$

Donde n y m son coeficientes que aparecen tabulados y que dependen del material con el que esté constituido el canal ver Anexo 1.

Fórmula de Manning. Determinación de caudales en canales abiertos: de todas las fórmulas utilizadas para la determinación del coeficiente C, la que aparece marcada como fórmula de Manning es la que más se usa en la práctica. Si se sustituye dicha expresión en la fórmula de Chezy (Eq. 3.1), se obtiene para la velocidad la siguiente expresión Muñoz J (2005)

$$v = \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * S_0^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

Ecuación de continuidad: el flujo de masa del agua a través de una sección de un canal es ρVA , donde ρ es la densidad del líquido, V es la velocidad media en la sección y A es su área hidráulica. Cuando el flujo sigue la dirección del eje del canal según la coordenada curvilínea equis (x) sobre el fondo (figura 3.3), y no hay aportaciones o salidas de líquido en el trayecto, la forma matemática de la ecuación de continuidad para el flujo unidimensional permanente en toda su longitud es:

$$\frac{\partial(\rho VA)}{\partial x} = 0 \quad (3.4)$$

Es decir, el flujo de masa no cambia al variar equis (x), En un flujo a superficie libre ρ es constante (incompresible) y se puede eliminar la ecuación anterior, es decir

$$\frac{\partial(VA)}{\partial x} = 0 \quad (3.4)$$

Que al integrar entre dos secciones 1 y 2 que limitan al volumen de control de la figura 3.3, resulta:

$$V1 * A1 = V2 * A2 = \text{Constante} \quad (3.5)$$

Es decir, el gasto o caudal $Q = V * A$ se mantiene constante en todo el canal, Cuando haya condiciones de flujo diferentes se debe establecer la ecuación de continuidad particular del caso que se trate Sotelo (2002). Este principio es muy importante cuando se realizan modelamientos tanto de inundaciones como de flujos de lodo, puesto que el caudal en las secciones del canal debe mantenerse constante. Para el caso de este trabajo se compararán los caudales en dos secciones en diferentes sectores de la ciudad que están señalados en el POT como áreas de riesgo por flujos de lodos secundarios.

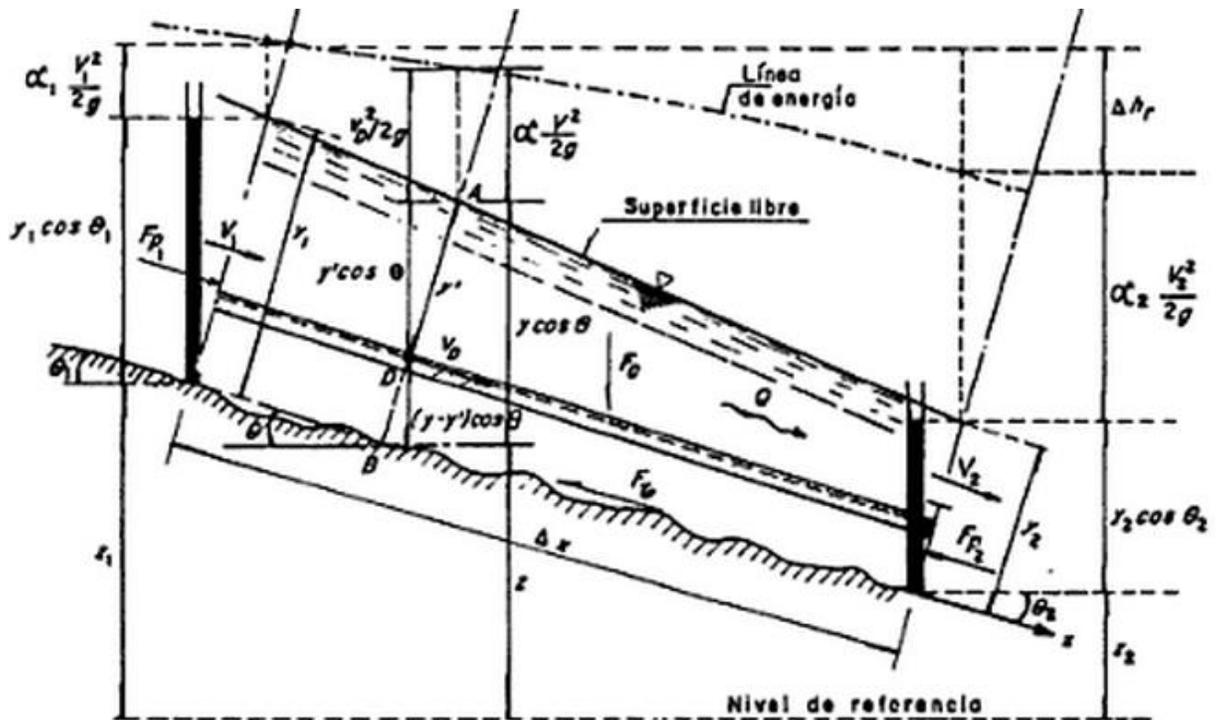


Figura 3.3 Ecuaciones básicas a un volumen finito de control en un canal. Sotelo (2002).

Las anteriores expresiones han sido creadas para aplicarlas en flujos de agua, sin embargo, en algunas investigaciones científicas como las de Xu y otros (1979), se han empleado estas ecuaciones en flujos de avalanchas teniendo en cuenta consideraciones específicamente al asignar el coeficiente de rugosidad. Por lo tanto, para aplicar los conceptos arriba expuestos se siguen las recomendaciones que se describen más adelante en (numeral 5.3).

3.3. FLUJOS

Concepto físico de un flujo. Las tres ecuaciones fundamentales que rigen toda la mecánica de fluidos son: la ecuación de continuidad, la ecuación de la cantidad de movimiento, y la ecuación de la conservación de la energía, este conjunto de ecuaciones también se denomina ecuaciones de Navier-Stokes. No existe una solución general a dicho conjunto de ecuaciones debido a su complejidad, por lo que para cada problema concreto de la mecánica de fluidos se estudian estas ecuaciones buscando simplificaciones que faciliten la resolución del problema. En algunos casos no es posible obtener una solución analítica, por lo que se suele recurrir a soluciones numéricas generadas por computador.

La forma más general de clasificación de los flujos depende de si el fluido es newtoniano o no newtoniano y de si es compresible o incompresible. Cuando la sustancia presenta una resistencia muy pequeña o nula a la deformación son llamados fluidos newtonianos y cuando presentan una mayor resistencia se llaman fluidos no newtonianos. De similar manera, aquellos fluidos que presentan una insignificante variación de la densidad respecto al tiempo se denominan fluidos incompresibles y cuando las variaciones en el tiempo no se pueden despreciar se llaman compresibles Duarte y otros (2004).

Existe también un área de estudio llamada Reología, la cual se realiza desde dos puntos muy diferentes, la formación de fracturas (deformación no continua) hasta el flujo de materiales viscosos (deformación continua). Entre las ramas que estudia la reología están los flujos donde no domina la viscosidad, sino la fricción que es descrita por el modelo de Mohr-Coulomb, en la cual el esfuerzo cortante se considera proporcional a la tensión normal, como se puede ver más adelante. Es importante recordar que este tipo de fenómenos de flujo de mezcla agua sedimento son sumamente complejos ya que involucran grandes volúmenes de agua, roca, residuos y suelo. Un modelo matemático es sólo una aproximación al problema y cada variable que se toma posee cierto grado de incertidumbre Sheridan y otros, (2005)

Modelo de Savage-Hutter. El modelo de avalanchas de Savage y Hutter (1989) es un modelo dinámico de profundidad promedio de un flujo granular (domina la fricción sobre la viscosidad) que supone preservación de la densidad, poca profundidad del flujo, deslizamiento tipo Coulomb con un ángulo de fricción basal, comportamiento interno tipo Mohr-Coulomb con un ángulo de fricción interno, y un perfil cuasi-uniforme de velocidades a través de la profundidad de la avalancha.

- Preservación de la densidad.

Esta hipótesis se refiere a que el flujo sea incompresible. La compresibilidad se refiere al cambio de volumen de una sustancia que está sujeta a un cambio de la presión que se ejerce sobre ella. Se dice que un flujo es incompresible cuando la densidad permanece aproximadamente constante a lo largo de todo el flujo. Por lo tanto, el volumen de todas las porciones del fluido permanece inalterado sobre el curso de su movimiento Duarte y otros (2004).

$$\rho = \rho_0 = \text{constante} \quad (3.6)$$

- Poca profundidad del flujo.

Savage y Hutter (1989) definieron cantidades diferentes con respecto a las direcciones X y Y, con esto L es la longitud del deslizamiento y H es la profundidad. Ellos observaron que la relación $\varepsilon = [H/L]$ era pequeña. Esta definición es diferente

de las llamadas Aguas Poco Profundas, en las cuales la relación a tener en cuenta es b/H , donde b es el ancho del canal. Sin embargo, en ambos casos se asume que la aceleración vertical se puede despreciar.

- Deslizamiento tipo Coulomb con un ángulo de fricción basal.

Todos los modelos clásicos de avalancha describen el esfuerzo de corte basal como una combinación de una fuerza normal que depende del término de Coulomb y una velocidad que depende de términos viscosos.

Cortante basal = termino de Coulomb + términos viscosos

$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi + \eta_c(dV/dy) \quad (3.7)$$

Dónde:

T = Resistencia al cortante en la base del flujo

C = Cohesión

ϕ = Ángulo de fricción interna

η_c = Coeficiente de viscosidad

- Comportamiento interno tipo Mohr-Coulomb con un ángulo de fricción interno.

Savage y Hutter (1989) asumen que la pila de material granular se comporta como un material no cohesivo tipo Morh-Coulomb descrito por un ángulo de fricción interna constante. Esto se producirá en un punto sobre un elemento plano cuando:

$$|S| = N * \tan \phi \quad (3.8)$$

Dónde:

$|S|$ = Esfuerzo cortante

N = Esfuerzo normal

ϕ = Angulo de fricción interna

- Perfil cuasi-uniforme de velocidades a través de la profundidad de la avalancha.

Melosh (1986) estudió los datos de campo de deslizamientos de tierra muy grandes y concluyó que la evidencia sugiere que estos resbalan sobre una capa basal delgada. Esto se puede asimilar al perfil de velocidades tipo tapón que se mueve sobre una zona de flujo laminar como se indica en la Figura 3.4. Así, el perfil de velocidad se espera que sea muy uniforme y cerca de la velocidad real en todas partes menos en la misma base.

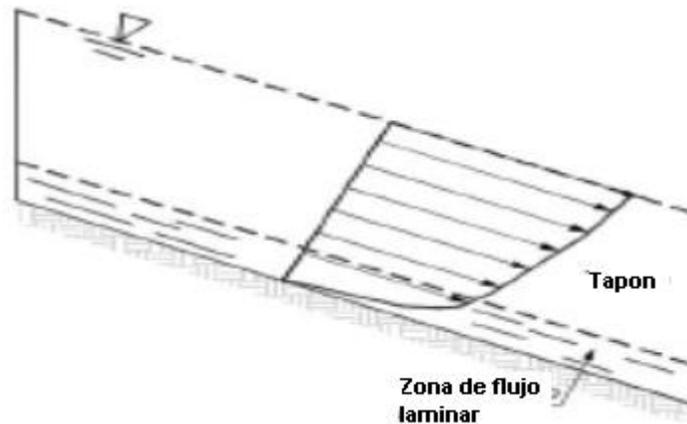


Figura 3.4 Perfil de velocidades tipo tapón.

3.4. FLUJOS DE LODO

Son movimiento de masas de suelo (flujos de lodo o tierra), derrubios (coladas de derrubios o *debris flow*) o bloques rocosos (colada de fragmentos rocosos) con abundante presencia de agua donde el material está disgregado y se comporta como un fluido, sufriendo una deformación continua sin presentar superficies de ruptura definida. El agua es el principal agente desencadenante, por la pérdida de resistencia a que da lugar en materiales poco cohesivos. Principalmente, afectan a suelos arcillosos susceptibles que sufren una considerable pérdida de resistencia al ser movilizados. Estos movimientos poco profundos en relación a su extensión, presentan una morfología tipo glaciar, y pueden tener lugar en laderas de bajas pendientes (incluso menores a 10°) Vallejo (2002).

De acuerdo con experimentos de Xingkui y Ning (1989), un fluido se convierte en un "slurry" (suspensión de partículas sólidas en un líquido, especialmente agua, con sustancias finamente divididas como cemento, yeso o partículas de arcilla) homogéneo a una concentración de partículas finas de solamente 90 kg/m³. A medida que la concentración aumenta, la estructura de los sedimentos se floclula rápidamente y la viscosidad aumenta fuertemente, formando una especie de cohesión de la mezcla suelo-agua.

Los flujos de lodos pueden causarse por los siguientes eventos:

- **LLUVIA CRÍTICA:** las precipitaciones intensas son las responsables de la mayor parte de los deslizamientos de taludes inestables. Dependiendo de las características físicas y geotécnicas de los taludes, el evento "lluvia" que puede generar un deslizamiento tiene unas condiciones propias para cada caso particular. Esta lluvia que está asociada a un deslizamiento de determinada magnitud en un sitio particular se conoce como "lluvia crítica" y se define por su intensidad, duración y frecuencia Crosta y otros (2003).

- **SISMOS:** un sismo puede generar un flujo de lodo, cuando por causa del fenómeno natural se producen deslizamientos de las laderas en cauces naturales y los materiales de dichos deslizamientos alimentan el caudal sólido de la corriente, o forman presas naturales que luego se rompen y producen olas de gran magnitud. Las características de las avalanchas dependen tanto de los volúmenes del deslizamiento como de la capacidad de las corrientes para transportarlos. Suárez (2009)
- **VOLCANES:** los flujos de lodo y rocas se originan cuando un volcán coronado con un casquete de hielo explota y produce un deshielo parcial o total del casquete; o cuando se forma un depósito volcánico el cual puede ser generado al ser lanzados al aire materiales piroclásticos como rocas o ceniza que caen de nuevo a la tierra y por el rápido arrastre lateral de estos sobre la superficie del suelo se acumulan en las cuencas de los ríos INGEOMINAS (1997).

3.4.1. Formación y disposición de flujos de lodo.

Tramo inicial de formación de flujo de lodo: el material expulsado por un evento volcánico permite la formación de un flujo de lodo, el cual al tomar contacto con el agua fluye sobre el terreno. En estas condiciones el caudal total y la viscosidad se incrementan a medida que el flujo se acumula y se dirige hacia las corrientes principales de drenaje (Ver figura 3.5).

Tramo de transporte de lodos y de incremento de volúmenes de sólidos: Una vez que el caudal entra al cauce su comportamiento hidráulico queda definido por las ecuaciones de continuidad, energía y cantidad de movimiento en canales. Generalmente el incremento en el volumen del flujo se debe principalmente a la incorporación del material suelto que se encuentra en el cauce. (Ver figura 3.5).

Tramo de transporte y depósito de material sólido: a continuación del tramo de alta pendiente se presenta un tramo de transición en el cual la pendiente disminuye con respecto a la sección inicial. En este tramo se combinan los procesos de transporte del flujo de lodo y de depósito inicial de material sólido. (Ver figura 3.5)

Tramo final de depósito de sólidos: el tramo de entrega corresponde al tramo final de la corriente, donde la pendiente del cauce es baja, y desemboca en una planicie inundable que se prolonga hasta su entrega a un río o al mar. En la parte baja de la cuenca se deposita parte del material y se disminuye la velocidad del flujo. (Ver figura 3.5).

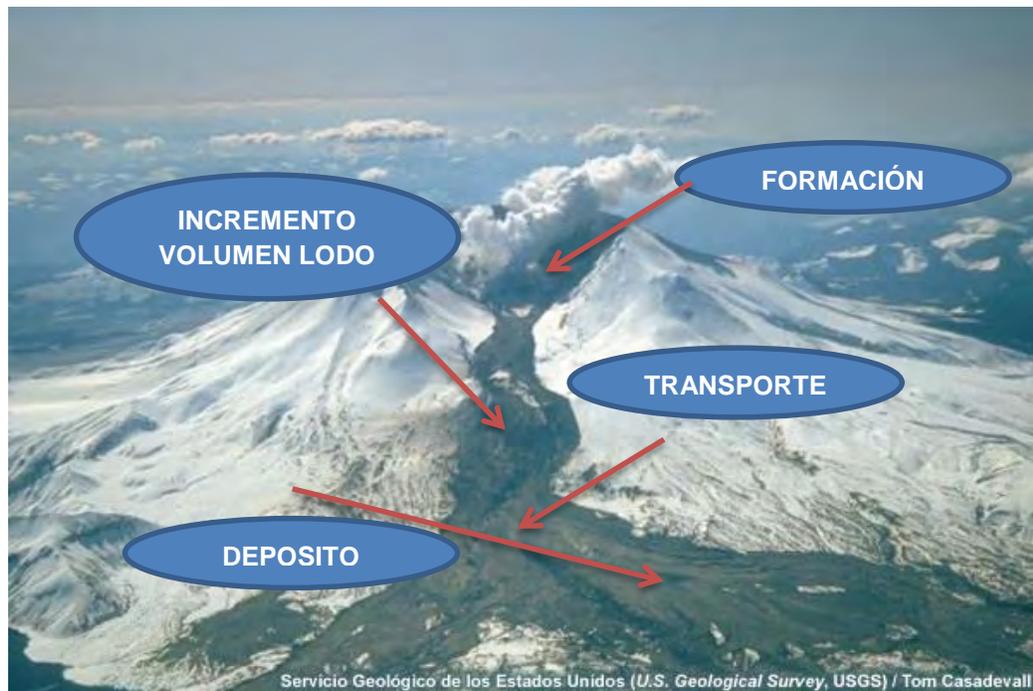


Figura 3.5 Esquema formación, transporte y depósito de flujo de lodo.

Para modelar flujos de lodo, las ecuaciones de hidráulica son aproximadas. Sin embargo, si el flujo tiene un importante componente de fricción, se puede modelar usando programas para flujos friccionantes como el TITAN2D, reduciendo las fricciones basal e interna Argoty (2010).

Para el caso de la ecuación de Manning, se puede emplear en flujos de lodo, si se contempla tanto la fricción del canal como de las partículas en el coeficiente de fricción n , Du y otros (1980).

3.5. CONCEPTO DE PROBABILIDAD

La probabilidad maneja un espacio de muestra que es la presentación e interpretación de resultados aleatorios que se dan en un estudio planeado o en una investigación científica.

La posibilidad que se presente un evento resultante de tal experimento estadístico se evalúa por medio de un conjunto de número reales llamados pesos o probabilidades que caen en el rango de 0 a 1. A cada punto en el espacio muestral se le asigna una probabilidad tal que la suma de todas las probabilidades sea igual a 1. Si se tiene la razón para creer en un cierto punto muestral tiene una gran posibilidad de ocurrir cuando el experimento se lleva a cabo, la probabilidad que se le asigne deberá ser cercana a 1. Por el contrario, si se le asigna una probabilidad cercana a 0 en un punto muestral es muy posible que no ocurra.

A la probabilidad de que un evento B se dé, cuando se sabe que otro evento A se ha presentado, se llama probabilidad condicional y se la escribe $P(B/A)$. Esta expresión, por lo común se lee “la probabilidad de que B ocurra dado que ocurrió A”, o simplemente “la probabilidad de B dado A”.

En el estudio de la probabilidad se maneja la media de la variable aleatoria X o la media de distribución de probabilidad X, y se expresa como μ_x o simplemente μ cuando está claro que la variable aleatoria se refiere. También es común entre la estadística referirse a una media como la esperanza matemática o el valor esperado de la variable aleatoria X y se expresa como $E(X)$.

La distribución continua de la probabilidad más importante en todo el campo de la estadística es la distribución normal o también llamada distribución gaussiana. Su gráfica que recibe el nombre de curva normal, es una curva en forma de campana, la cual describe en forma aproximada, muchos fenómenos que ocurren en la naturaleza, la industria y la investigación. Las mediciones físicas en áreas tales como los experimentos meteorológicos, los estudios acerca de las lluvias y las mediciones sobre partes manufacturadas se explican con una distribución normal en una forma más adecuada. Además, los errores en las mediciones científicas se aproximan hasta límites extremadamente pequeños gracias a la distribución normal, Walpole y otros (1999).

3.5.1. Frecuencia absoluta de un suceso (f_i): es el número de veces que aparece dicho suceso cuando se repite un experimento aleatorio determinada cantidad de veces (n veces).

3.5.2. Frecuencia relativa de un suceso (h_i): es la frecuencia absoluta dividida entre el número de veces que se realiza el experimento. En ocasiones el número de estados posibles del sistema es tan elevado que hace imposible calcular valores promedio sumando sobre todos los estados, por lo que se opta por tomar una muestra y estimar los valores promedio a partir de ella. Los valores muestreados se obtienen a partir de las distribuciones de probabilidad de cada variable. La solución a un problema planteado se estima analizando los valores de la muestra a través de métodos estadísticos como el Muestreo de Monte Carlo (MMC) o el Hipercubo Latino (LHS)

3.6. MUESTREO MONTE CARLO (MMC) e HIPERCUBO LATINO (LHS)

El método de Monte Carlo (MMC) es una técnica de análisis numérico que se basa en el uso de secuencias de números aleatorios para muestrear los valores de las variables de probabilidad de un problema determinado.

El método de muestreo Hipercubo Latino (LHS) es similar al MMC con la diferencia básica que las clases son tratadas como estratos y los números pseudo aleatorios se reparten en una distribución proporcional a los elementos de cada muestra entre los estratos establecidos. Pilger y otros (2005) realizó un enfoque profundo en los

métodos de simulación y el aumento de su eficiencia, presentando una propuesta de sustituir el método de Monte Carlo por la técnica de muestreo Hipercubo Latino (LHS) que refleja una mayor precisión y velocidad que el método proporciona para cualquier modelo de incertidumbre Martins y otros (2012).

Normalmente el método LHS permite reducir en uno o más órdenes de magnitud la cantidad de corridas necesarias para obtener una determinada representatividad, en comparación con un MMC Baron y Nuñez (1999). Principalmente por esta ventaja se empleó este método para la presente investigación.

3.7. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL (DEM)

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados.

En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos. INEGI (2015). Para el presente trabajo se utilizaron dos tipos de formatos, el formato raster y el formato vectorial.

El formato raster se fundamenta en la división del área de estudio en una matriz de celdillas, generalmente cuadradas. Cada una de estas celdillas recibe un único valor que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la misma. Este formato, por tanto, cubre la totalidad del espacio, este hecho supone una ventaja fundamental ya que pueden obtenerse valores de forma inmediata para cualquier punto del mismo.

Al contrario de lo que ocurre con el formato raster, el formato vectorial define objetos geométricos (puntos, líneas y polígonos) mediante la codificación explícita de sus coordenadas (Ver figura 3.6). Los puntos se codifican en formato vectorial por un par de coordenadas en el espacio, las líneas como una sucesión de puntos conectados y los polígonos como líneas cerradas (formato orientado a objetos) o como un conjunto de líneas que constituyen las diferentes fronteras del polígono (formato Arco/nodo).

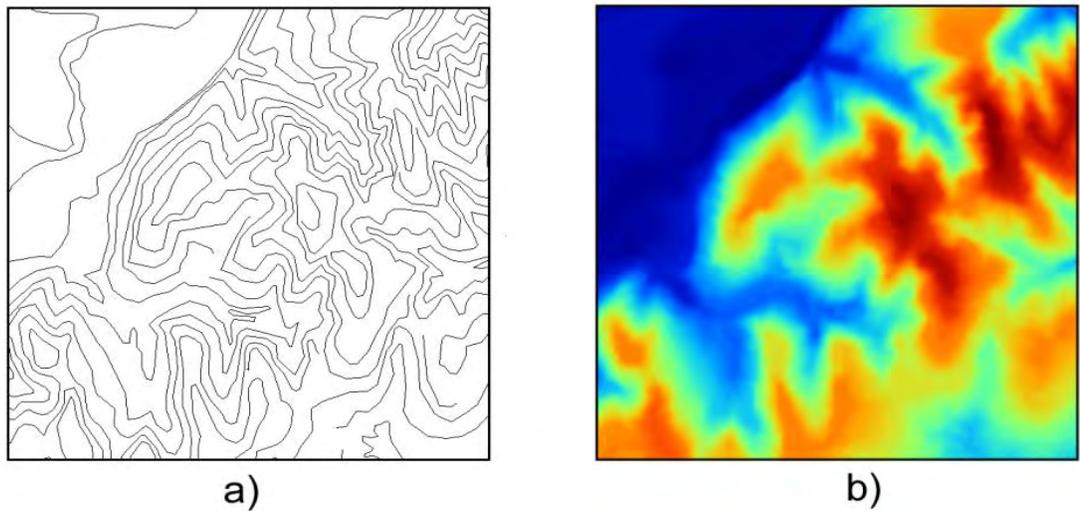


Figura 3.6 Descripción gráfica de un mapa.
 ((a) Formato vectorial, donde se muestra curvas de igual nivel y (b) Raster donde cada pixel muestra la altura media del mismo).

3.8. SOFTWARE TITAN2D

El programa TITAN2D está diseñado para simular flujos granulares secos como avalanchas de escombros y flujos piroclásticos sobre modelos de elevación digital del terreno natural, y no posee la capacidad de adicionar agua al flujo, sin embargo, la combinación correcta de parámetros puede lograr una simulación con un comportamiento similar al de los flujos de lodo. TITAN2D combina simulaciones numéricas de un flujo con datos de elevación digital del terreno natural soportados a través de la interfaz gráfica de un sistema de información geográfica (SIG).

En la literatura se puede encontrar diversos artículos, tesis y documentos donde se ha utilizado TITAN2D para simular flujos de lodo, entre otras investigaciones se pueden encontrar: Mount Rainier - Estados Unidos Stinton y otros (2004); Volcán Nevado de Toluca - México Grieco y otros (2007); Volcán Popocatepetl - México Muñoz y otros (2004); Volcán Misti - Perú Delaite y otros (2004); Volcán Cotopaxi - Ecuador Williams (2006) y Volcán Ruapehu - Nueva Zelanda Procter y otros (2010).

El programa TITAN2D se basa en un modelo de profundidad promedio para medio continuo incompresible, en el cual se cumplen las leyes de Coulomb para un flujo granular de "aguas poco profundas".

Las ecuaciones de conservación de masa y momento se resuelven con un término de fricción tipo Coulomb para la interacción entre los granos al interior del flujo y entre el material granular y la superficie basal. El sistema hiperbólico de ecuaciones

resultante se resuelve mediante un esquema de Godunov, paralelo y de malla adaptativa Geophysical Mass Flow Group (2007).

El Message Passing Interface (MPI) [<http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/>] Interfaz de Programadores de Aplicaciones (API, por sus siglas en inglés), permite el uso de múltiples procesadores, incrementando así el poder de cómputo, disminuyendo el tiempo de procesamiento y permite el uso de grandes conjuntos de datos.

Adaptar la grilla permite la concentración de la capacidad de procesamiento en las regiones de especial interés. El refinamiento de la malla capta las características del complejo flujo en el borde de la corriente, así como los lugares donde la topografía cambia rápidamente. Una malla no refinada se aplica cuando los valores de la solución son relativamente constantes o pequeños, esto para mejorar aún más la eficiencia computacional.

El modelo utilizado en TITAN2D, supone una pila de material granular, que se desliza cuesta abajo por acción de la gravedad. La fricción entre partículas, y entre las partículas y la superficie de tierra hacen que la pila se resista a este movimiento. Las ecuaciones que gobiernan este modelo, la conservación de la masa y la conservación del momento, se resuelven usando una solución aproximada por métodos numéricos, por ejemplo, volúmenes finitos, etc. Los resultados directos de TITAN2D son profundidad de flujo y momento. Estos pueden entonces ser utilizados para calcular, en diferentes puntos, las variables observables, como altura previa, área de inundación y el tiempo de flujo.

TITAN2D opera a través de una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, por sus siglas en inglés) escrita en lenguaje Python. A través de esta interfaz el usuario introduce los parámetros necesarios para ejecutar correctamente el programa, tales como dimensiones de pila, coordenadas de partida de la pila, ángulos de fricción interna y basal, y el tiempo de simulación. La simulación se calcula sobre un modelo de elevación digital (DEM) de la región deseada y los resultados se pueden visualizar a través del visualizador de TITAN2D, u otros paquetes de software de visualización. Los visualizadores de TITAN2D están diseñados para presentar a los usuarios una clara representación de las diversas propiedades del flujo, así como la altura de pila y la magnitud de la velocidad. Las propiedades incorporadas en los elementos de datos que constituyen la malla poligonal están codificadas por colores y se aplican como una textura sobre el terreno Geophysical Mass Flow Group (2007)

3.9. GNU OCTAVE

GNU Octave es un lenguaje de alto nivel interpretado, destinado principalmente para cálculos numéricos. Proporciona capacidades para la solución numérica de problemas lineales y no lineales, y para realizar otros experimentos numéricos. También proporciona amplias capacidades de gráficos para la visualización y manipulación de datos. Octave se utiliza normalmente a través de

su interfaz de línea de comandos interactiva, pero también puede ser utilizado para escribir programas no interactivos.

En este trabajo se utilizó para determinar la probabilidad de llegada del flujo para la zona en estudio, utilizando las matrices de coordenadas y alturas que arroja el TITAN 2D. Partiendo de esta nube de puntos que representa la topografía del flujo, es decir las coordenadas XYZ, donde X es la latitud, Y la longitud y Z la altura del flujo sobre el terreno natural en ese punto. Se realiza un procesamiento numérico a través de una rutina en Octave. Con este, se analiza cada punto geográfico del modelamiento y se determina cuantas veces, en las 100 simulaciones, llegó a ese mismo punto el flujo con una altura igual o superior a 0.20 m. Para esta investigación esta altura es suficiente para considerarla peligrosa en los primeros niveles de las edificaciones de la universidad, ya que por la carga de rocas y escombros puede generar lesiones y afectar la ocupacionalidad o funcionamiento de las instalaciones de la Universidad.

Es decir, para cada XY de la grilla del DEM, se evalúa si Z es mayor o igual a 0.20 m, se cuenta, hasta terminar de evaluar este punto para cada evento. Al número de eventos que cumplieron la condición anterior se le llama n. Al final se determina la probabilidad frecuencial en ese punto siendo $p = n/100 \times 100$. Esto se hace para los miles de puntos de la grilla. Al final, se obtiene una grilla con un resultado de la probabilidad frecuencial para cada coordenada.

El procedimiento anterior sin la ayuda de un software como Octave sería imposible de analizar por la gran cantidad de datos que hay que procesar, por lo tanto en este trabajo fue indispensable la implementación de rutinas que automaticen la generación de valores aleatorios de volumen de pila y ángulo de fricción basal, y para obtener la probabilidad a partir de los datos de altura del flujo arrojados por TITAN2D. Las rutinas empleadas fueron desarrolladas por el Grupo de Investigación GRAMA de la Universidad de Nariño las cuales por aún no estar patentadas no se tiene permiso para su publicación en este trabajo.

3.10. VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL POR FLUJOS DE LODO

La Vulnerabilidad se define como el grado de daño de uno o varios elementos, como resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, se considera además la vulnerabilidad como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto a ser afectado o de ser susceptible a sufrir una pérdida Sandi (1983), UNDRO (1987), Barbat y Pujades (2004), Moriano *et al* (2016).

Según Moriano *et al* (2016) en la actualidad no se cuenta con suficientes estudios que permitan estimar el comportamiento exacto de las estructuras sometidas a fuerzas ejercidas por flujos de gravedad (lahares, flujos piroclásticos, deslizamientos, entre otros). En la dicha investigación se presenta una compilación de estudios que contemplan el daño total que tienen diferentes estructuras ante la

presión de impacto por flujos de gravedad, en donde las características de cada tipología dependen del material empleado en su construcción y de cuánto aportan éstos a su resistencia.

En la figura 3.7 se muestra la recopilación de información de las investigaciones realizadas por Valentine (1998); Spence et al (2004); Zanchetta et al (2004).

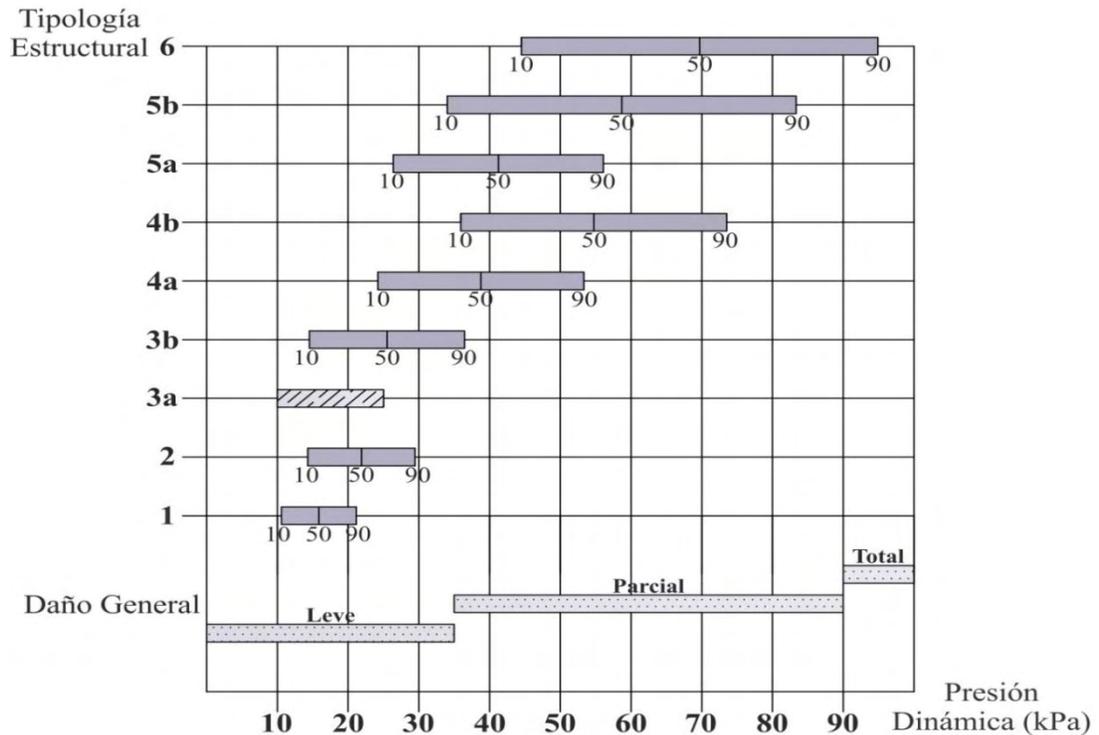


Figura 3.7 Tipologías estructurales, presión de impacto y daño.

En Moriano et al (2016). En donde Las tipologías 1 - 6 representan lo propuesto por Valentine (1998) (color gris). Los atributos que se encuentran en cada tipología (10%, 50%, 90%) reflejan el porcentaje de probabilidad de destrucción total. La tipología 3a muestra lo expuesto por Spence et al (2004) (líneas inclinadas), referente a construcciones reforzadas. En la parte inferior se muestra una escala de daño general en las estructuras propuesta por Zanchetta et al (2004) (rectángulos punteados) clasificado en leve, parcial y total.

Una de las investigaciones examinadas en el estudio de Moriano et al (2016) es la de Spence et al (2004) en la cual se propone que las estructuras reforzadas son afectadas con presiones dinámicas entre 10 a 25 kPa. En este estudio se estiman rangos de daño en las construcciones (valores de resistencia para edificios y elementos de construcción) sometidas a presiones de flujos de gravedad en el área del volcán Vesubio. Otra investigación que relaciona daño y sobrepresión es la de Zanchetta et al (2004) en donde se estudia lo ocurrido en mayo de 1998 en Italia,

donde flujos de escombros generados por deslizamientos debido a fuertes precipitaciones inundaron cerca de 1.4 km². En este estudio se concluyó que, para presiones dinámicas menores de 35 kPa, el daño en las construcciones es de leve a moderado. Por el contrario, el daño es grave cuando la sobrepresión se encuentra entre 35 a 90 kPa. Finalmente, para presiones dinámicas mayores a 90 kPa todos los tipos de estructuras analizadas en Zanchetta et al (2004) sufren devastación completa. Finalmente, el estudio de Moriano *et al* (2016) se basa en la información proporcionada por Valentine (1998) en la cual se proponen rangos de probabilidad de destrucción total de seis tipologías estructurales ante presiones dinámicas, en cada tipología se contempla tanto los elementos individuales como ventanas, puertas, muros, techos, y pisos y la totalidad de la estructura.

En la tabla 3.1, se describe las características de cada tipología estructural, así como el valor de presión dinámica capaz de incidir hasta en un 90% de destrucción total.

Tabla 3.1 Tipología de estructurales.
Propuestas por Valentine (1998).

TIPOLOGÍA	CARACTERIZACION	PRESION DIMAMICA
1	Marco: Viviendas individuales, Casas Adosadas, Apartamentos y Hoteles con o sin sótano. Muros: Madera. Composición de estuco. Revestimiento de metal ladrillo y aplacado en piedra. Techo: Plano o inclinado compuesto por tejas.	22 Kpa
2	Mampostería no Reforzada: Viviendas individuales, casas adosadas, apartamentos y hoteles con o sin sótanos. Muros: Ladrillo, ladrillo con respaldo de bloques de hormigón o piedra. Piso: Vigas de madera o de acero, piso de concreto liviano. Techo: Madera o Tejas.	29 Kpa
3b	Mampostería Reforzada: Edificios comerciales, residenciales y oficinas. Muros: Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero.	37 Kpa
4a 4b	Estructura de acero: De varios apartamentos o construcciones de 4 a 10 pisos, Muro: Ligeros y pesados. Partes interiores: Madera o pernos metálicos con yeso o placas de yeso o bloques de concreto. 4a) Muros exteriores pesados. 4b) Muros exteriores livianos.	55-75 Kpa
5a 5b	Estructura de acero: De varias oficinas o construcciones institucionales de 4 a 10 pisos. Muro: Ligeros y pesados. Partes interiores: Madera o pernos metálicos con yeso o placas de yeso, bloques de concreto. 5a) Muros exteriores pesados. 5b) Muros exteriores livianos.	55-83 Kpa
6	Edificios de mampostería monumental con 2 o 5 pisos con o sin estructura. Muros: Ladrillo o concreto. Estructura: Concreto reforzado o muros de carga	95 Kpa

4. MODELAMIENTO DE FLUJOS DE LODO EN LA QUEBRADA CUSCUNGO

La quebrada Cuscungo se encuentra al noroccidente de la ciudad de Pasto, no posee registros de caudales ni caracterización detallada, se ubica al nororiente del cráter del volcán Galeras. Basándose en imágenes satelitales y reconocimientos de campo se pudo estimar que tiene una longitud aproximada de 7.5 km desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Pasto. Según trabajos de campo ejecutados para esta investigación se identificó que su caudal aproximado es de 0.5 m³/s, la pendiente media del cauce de la quebrada es de 10.3%, su profundidad en el cauce natural varía entre 0.5 y 1.2 metros y el ancho del canal natural de la quebrada es en promedio de 1 m, la línea roja en la figura 4.1 muestra el eje del cauce de la quebrada Cuscungo.



Figura 4.1 Quebrada Cuscungo.
Imagen extraída de Google Earth.

A partir del concepto que un modelo es una representación de una realidad con el propósito de estudiarla, siendo el modelo una simplificación muy útil de la realidad y que la elaboración de un modelo numérico para simular el comportamiento de un fenómeno natural como un flujo de lodo, es de importancia fundamental para prever sus impactos sobre el territorio; a diferencia de la reconstrucción de los eventos históricos, que resulta sumamente útil como elemento de calibración, el enfoque del modelo permite incluir la situación actual y, por lo tanto, una cuantificación más adecuada de la peligrosidad, con el propósito de evitar que se subestime o se exagere la magnitud del fenómeno, lo que resulta fundamental para las actividades de prevención de desastres naturales Narváez y otros (2005).

Se debe tener en cuenta que lo que se pretendió hacer en este trabajo es un modelo aproximado a manera de ejercicio académico y no una predicción exacta, sin embargo, se empleó datos reales para que la aproximación del modelo sea lo más acertada posible.

Aunque no es posible predecir en qué momento se producirá un flujo de lodos en la quebrada, en caso de producirse tendrán que presentarse simultáneamente los siguientes factores Suárez (2009):

- Susceptibilidad geológica: deben existir los materiales susceptibles a desprenderse y moverse.
- Susceptibilidad topográfica: deben existir las condiciones de pendiente, ancho y propiedades del canal que permitan la ocurrencia de una avalancha.
- Posibilidad de un evento activador: deben existir las condiciones para que se pueda producir un evento activador de la avalancha, lluvias extraordinarias, deshielo, sismos, etc. Suárez (2009).

A pesar de que en la quebrada Cuscungo no se ha determinado con exactitud si exista o no susceptibilidad geológica, de llegar a existir se cumplirían estas tres condiciones se pudiera generar una amenaza por flujos de lodo o avalanchas. En el caso de la caída de ceniza se estaría incrementando esta susceptibilidad geológica.

Por lo anterior es que esta investigación se propuso realizar un modelamiento basado en el concepto de probabilidad condicional, es decir que el modelo representa el alcance del flujo en caso de que ocurriera el evento, más no expresa que tan probable sea que ocurra.

Al carecer de información geológica para determinar la susceptibilidad y los volúmenes propensos a entrar a formar parte del flujo, este trabajo se basó en aproximaciones por lo que los resultados obtenidos no se deben tomar como predicciones exactas sino como puntos comparativos para futuras investigaciones.

Para esta simulación se utilizó el código TITAN2D desarrollado por Geophysical Mass Flow Group de la universidad de Bufalo Nueva York USA.

4.1. PARÁMETROS DEL MODELAMIENTO

Como se verán a continuación, entre los parámetros de entrada necesarios para realizar una simulación con TITAN2D se destacan la topografía, el volumen del flujo a simular, el tiempo de simulación, el ángulo de fricción interno, el Angulo de fricción basal; la localización y dirección inicial del flujo a simular Sheridan y otros (2005).

4.1.1. Modelo de elevación digital DEM: según Stevens (2002), el desarrollo de un DEM apropiado provee la base para el modelamiento del flujo; en este sentido, un DEM con mayor resolución (5-30 m) genera representaciones más precisas, teniendo en cuenta que el DEM puede alterar significativamente los resultados de las simulaciones. Por ejemplo, en la simulación de flujos piroclásticos en el Mt Tanaraki, Nueva Zelanda se empleó un DEM con dimensión de celda de 20 m Procter y otros (2010), mientras que para el volcán Cerro Machín se empleó un DEM con resolución de 50 m Murcia (2010). Para las simulaciones en el Galeras, se empleó un DEM con una resolución de 15 m (Ver figura 4.2), el cual fue desarrollado en la Universidad de Búfalo por la Ph.D Christine Kimball. El DEM, necesario para ser usado en TITAN2D, fue refinado empleando herramientas de sistema de información geográfica, en este caso por el programa GRASS GIS, que soporta información tipo Raster como vectorial y posee herramientas de procesamiento digital de imágenes. El sistema de georeferenciación requerido es UTM - WGS84, siendo la zona 18N la que corresponde al área de estudio.

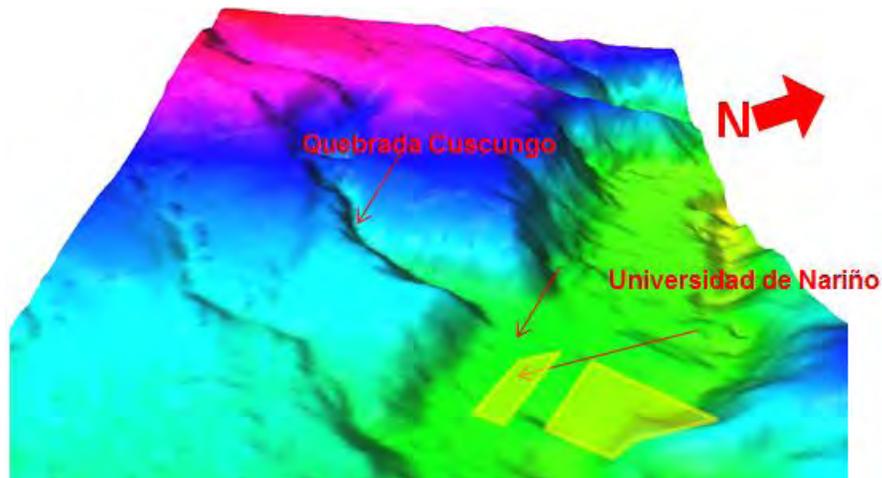


Figura 4.2 Modelo de elevación digital de la quebrada Cuscungo.

4.1.2. Tiempo máximo de simulación y número de pasos: estos valores, son la cuantificación necesaria para que el material fluya hasta un tiempo determinado por una cantidad específica de segundos (tiempo máximo de simulación) o un número específico de pasos computacionales (número máximo de pasos); la simulación se detiene cuando alguno de estos dos umbrales es superado. La importancia de estos valores radica en la necesidad de detener el flujo cuando la velocidad sea muy baja (flujo casi en reposo) para no desperdiciar tiempo de cálculo, o de dejarlo avanzar hasta que se alcance el equilibrio estático. La definición de este parámetro está directamente relacionado a la velocidad promedio final del flujo, en donde diferentes experimentos han evidenciado que su avance es mínimo cuando la velocidad es menor a 4 m/s Murcia y otros (2010). En el presente trabajo, se determinó experimentalmente realizando pruebas numéricas y observando a que tiempo el flujo alcanzaba su equilibrio estático, con lo que se determinó que el tiempo óptimo para la simulación serían 600 segundos.

4.1.3. Angulo de fricción interno: este valor corresponde a un parámetro físico directamente relacionado con la evolución del flujo volcánico. Su definición representa la fricción resultante de la interacción entre las partículas dentro del flujo, como se puede observar en la figura 4.3 a. Geophysical Mass Flow Group (2007). Su valor parece no tener mayor influencia ni en el recorrido del flujo ni en su distribución, como lo demostró Sheridan y otros (2005).

El volcán Galeras no posee información detallada de los ángulos de fricción interno ni de reposo de los depósitos de flujo de lodos. Aunque no existe un valor específico, Procter y otros (2010) sugieren un valor de 30°, utilizado por Macías y otros (2008) para realizar simulaciones de flujos piroclásticos en el volcán Chichón, México; mientras que Schilling (1998) y Dorta y otros (2007) lo calibraron utilizando tiempos de viaje y áreas de inundación de flujos conocidos. Para el presente trabajo se empleó, el valor utilizado por Argoty (2010), de 33° en todas las simulaciones para materiales provenientes del Volcán Galeras en modelamientos de flujos de lodo en el Río Barranco.

4.1.4. Ángulo de fricción basal: este valor corresponde a la pendiente mínima que debe tener una superficie inclinada para que el material colocado sobre ésta, se deslice por su propio peso desde su posición estática (Ver figura 4.3 b) Geophysical Mass Flow Group (2007). Su valor, aunque puede ser variable, puede calcularse a partir del coeficiente de Heim H/L , que es un factor que permite determinar hasta qué distancia puede llegar un flujo piroclástico en función de la altura máxima que alcanzó la columna eruptiva antes de colapsarse Heim (1932), con base en el registro geológico, o a través de valores específicos para cada superficie. Por ejemplo, para el volcán Cerro Machín este valor fue definido en 15° , de acuerdo a experimentaciones del GMFG Geophysical Mass Flow Group (2007) y a la distribución final de los depósitos Murcia y otros (2010); para el volcán Chichón, México, de $10-12^\circ$ para recrear los flujos ocurridos en la erupción de 1982 Macías y otros (2008); y para el Mt Taranaki, Nueva Zelanda, entre 15 y 25° . Para el caso de volcán Galeras, estos valores se definieron por correlación de valores obtenidos experimentalmente para diferentes superficies Stinton y otros (2004; ver tabla 4.1) en donde las superficies con depósitos glacio-fluviales ($9-17^\circ$), son las más semejante a las superficies encontradas en las laderas del volcán Galeras. García y otros (2011)

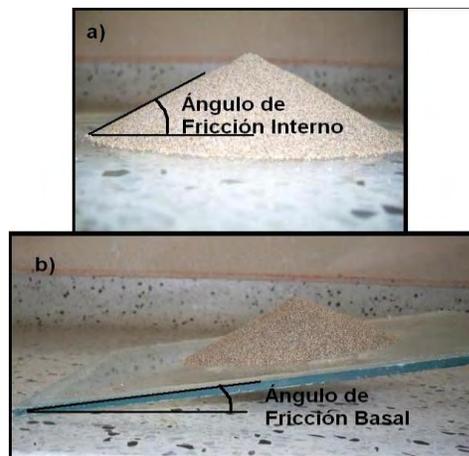


Figura 4.3 Ángulos de fricción.

a) Ángulo de fricción interno. b) Ángulo de fricción basal. Tomado de Argoty, (2010).

En este trabajo se realizaron en total 200 simulaciones, 100 para cada combinación. Para las primeras 100 simulaciones se trabajó realizando una combinación aleatoria de los valores de fricción basal en un rango entre 9° y 17° García y otros (2011) usando el método de Muestreo del Hipercubo Latino mencionado anteriormente, que equivaldría a unas 1000 simulaciones con el método de Montecarlo. Y para las otras 100 simulaciones se trabajó con un ángulo de fricción constante de 10° el utilizado por Argoty (2010) para flujos de lodo en el volcán Galeras.

Tabla 4.1 Ángulos de fricción basal.
Propuestos por Stinton (2004) para diferentes tipos de material.

Material / Superficie	Coeficiente de fricción basal	Ángulos de fricción basal
Hielo glaciario y nieve	0.037-0.50	2-26°
Depósitos aluviales	0.10-0.20	6-11°
pendientes con vegetación	0.21-0.75	12-37°
Depósitos fluvio-glaciares	0.15-0.30	9-17°
Roca fresca	0.38-0.95	21-44°

4.1.5. Localización de las pilas: la localización de la pila son las coordenadas dentro del DEM en las cuales comienza la simulación del flujo. Este punto debe estar en un área de susceptibilidad geológica, es decir, dentro de la zona de influencia donde podría presentarse un depósito de material volcánico. Además, debe existir el factor topográfico para que el flujo se mueva por gravedad, para el presente trabajo se decidió ubicar el punto de inicio del flujo, dentro del cauce natural de la quebrada Cuscungo.

En las simulaciones preliminares se utilizaron las coordenadas 243187.062 E, 135238.693 N. (UTM - WGS84, zona 18N). Este punto no representa el origen de la cuenca. Está ubicado aproximadamente en la mitad del recorrido considerando que en este sitio se habría recogido suficiente material para alcanzar el volumen propuesto, pero se encontró que el DEM poseía una particularidad que podría producir alteraciones en los resultados, ya que en una zona boscosa de la cuenca de la quebrada se presentaba como una irregularidad topográfica, que podría deberse a que el satélite que genera el modelo toma dichos árboles como un terreno de mayor elevación, lo que produce que se genere una barrera topográfica y que se vea interrumpido el flujo. Ver figura 4.4.

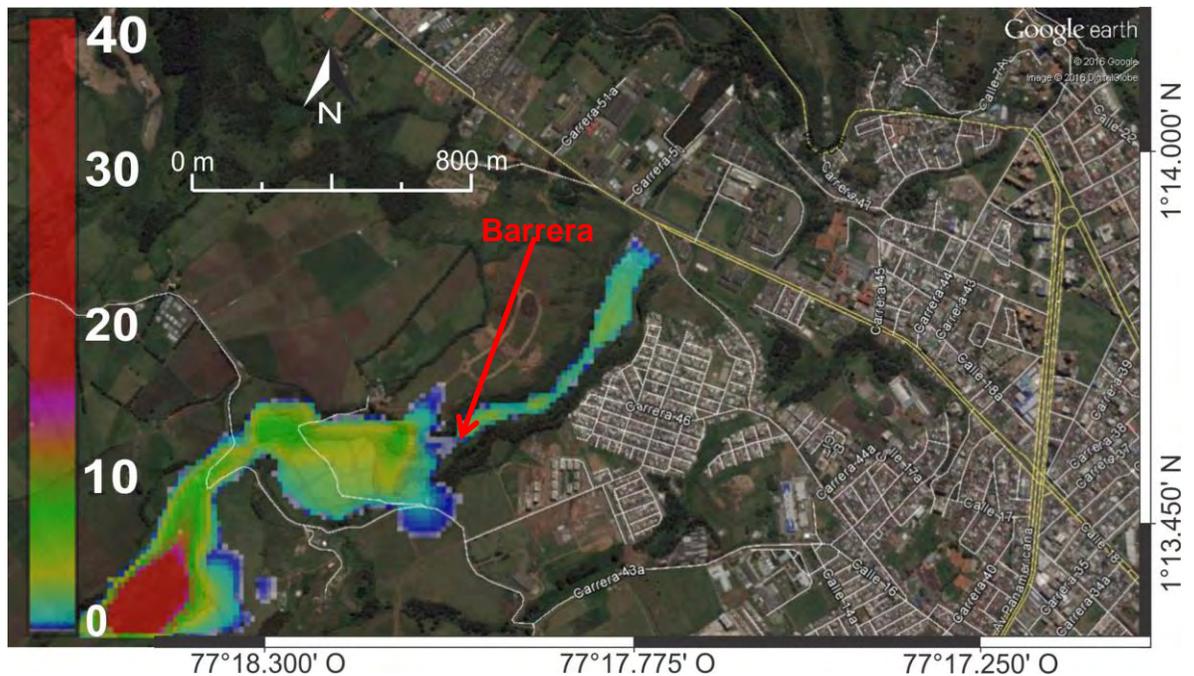


Figura 4.4 Simulación preliminar del flujo.

Teniendo en cuenta la consideración anterior, se decidió ubicar las coordenadas de la pila en un punto inmediatamente posterior (aguas abajo) a la barrera topográfica presentada pero igualmente dentro del cauce de la quebrada. Aunque en este punto el flujo llevaría unas condiciones de tamaño, geometría y velocidad determinarlas llevaría un arduo trabajo humano y computacional que para este ejercicio académico no fue posible realizarlas, por lo que se optó por realizar los modelamientos realizando variaciones en el volumen de la pila así como en el ángulo de fricción basal del material para obtener una amplia gama de resultados abarcando un gran número de posibilidades de generación del flujo y de esta manera simplificar el trabajo. Las nuevas coordenadas fueron 244094.024 E, 135704.48 N (UTM - WGS84, zona 18N). Con esta nueva ubicación de la pila, se efectuaron los modelamientos finales.

4.1.6. Volumen de la pila: el volumen de la pila es un parámetro bastante discutido, ya que además del material depositado por erupciones y es propenso a desestabilizarse, se debe tener en cuenta el incremento en el volumen debido al agua y al arrastre de partículas al paso de su trayectoria. Al no existir un estudio de estabilidad de taludes en el sector y al no poderse predecir el volumen de ceniza que se depositaría, aquí se recurrió a la estimación de volúmenes con base en las cantidades de material expulsado y depositado en la cuenca durante las erupciones registradas.

Teniendo en cuenta que definir un rango de volúmenes simulados es un método que abarca y compensa la incertidumbre acerca del volumen de eventos posibles

Procter y otros (2010), se realizó las simulaciones en el volcán Galeras, se definieron valores con base en los volúmenes reportados por el SGC para los depósitos de caídas de cenizas en 2009, que fue el año con más actividad eruptiva y con registro de isópacas sobre la zona de estudio (Ver tabla 4.2). La metodología utilizada para determinar este rango se basa en el cálculo del volumen de ceniza depositado en la cuenca, mediante el espesor ponderado, durante un evento conocido, y el del volumen de ceniza reportado durante la erupción que más material expulsó en el mismo año, considerando la misma relación entre material depositado y material expulsado del evento conocido.

Tabla 4.2 Relación eventos eruptivos del volcán Galeras en 2009.

Fecha (dd-mmm-aa)	Hora local (hh:mm)		Volumen Total de material Reportado [m ³]
14-feb-09	07:10	p.m.	285,000
20-feb-09	07:04	a.m.	1,431,000
13-mar-09	03:55	p.m.	852,000
24-Apr-09	07:32	pm	1,000,000
29-Apr-09	10:15	a.m.	63,000
07-jun-09	07:18	a.m.	35,000
08-jun-09	06:38	a.m.	2,214,000
30-sep-09	09:14	a.m.	2,014,000
20-nov-09	08:37	p.m.	453,000

Fuente: (<http://www.sgc.gov.co/getattachment/6445ce4e-c44f-4916-9188-8be5ae848e93/Febrero-2009.aspx>)

Si se toma como base las isópacas de la erupción del 14 de febrero (ver figura 4.5) que fue la única orientada hacia el área en estudio y con registro de isópacas, se puede estimar el volumen de ceniza depositado sobre la cuenca y que formaría parte de un flujo de lodo en caso de que ocurra.

En la figura 4.5, se observa el material expulsado y su distribución en el terreno, con un volumen reportado de cerca de 285000 m³, del cual aproximadamente el 30% es ceniza y el 70% bloques proyectados balísticamente alrededor de la cima INGEOMINAS (2009).

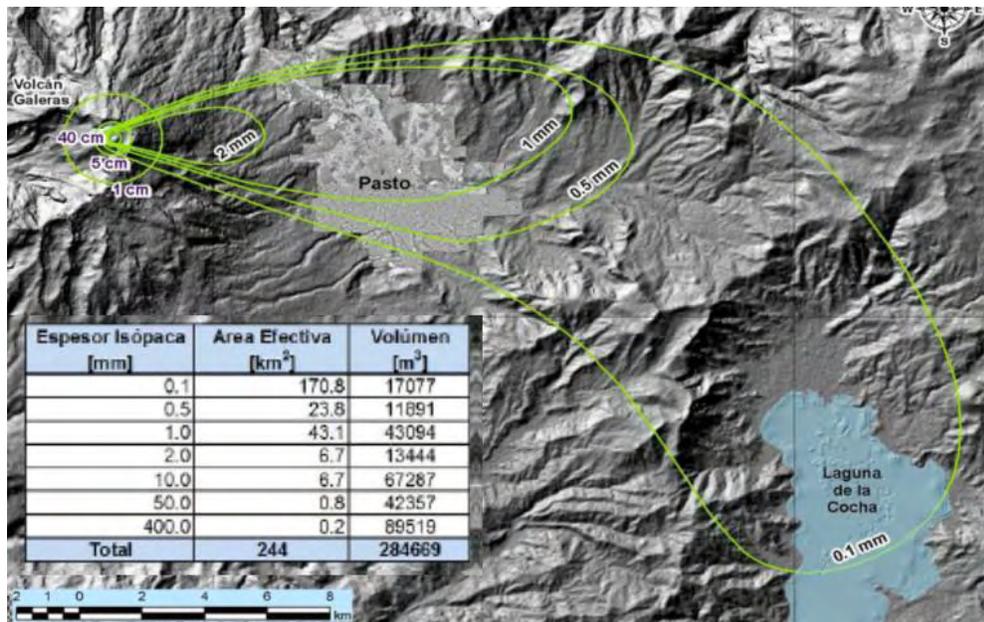


Figura 4.5 Isópacas Volcán Galeras.

Erupción 14 de febrero de 2009 donde se muestran la caída de ceniza sobre el área de estudio. INGEOMINAS (2009).

4.1.7. Concentración del flujo de lodo: para estimar el volumen del flujo de lodo, se recurre a lo mencionado por Suárez (2009), donde afirma que un flujo de lodos tiene una concentración entre 20% y 60% de sólidos. Para esta investigación se adopta una concentración de sólidos del 40%, por ser el valor medio entre el rango mencionado, esto quiere decir que del volumen total del flujo de lodo el 40% corresponde a material sólido, en este caso ceniza; y el 60% restante será agua. Además, no se tiene en cuenta el material erosionado por el flujo, ni el material propenso a desestabilizarse debido a que no hay un estudio que pueda determinar la magnitud en que estos materiales pudieran entrar a formar parte del flujo.

La cuenca de la quebrada, posee un área aproximada de 2144000 m², este se calculó trazando el área de la cuenca en un plano topográfico identificando la divisoria de agua mediante la ayuda de un software de diseño asistido por computadora (Ver figura 4.6).

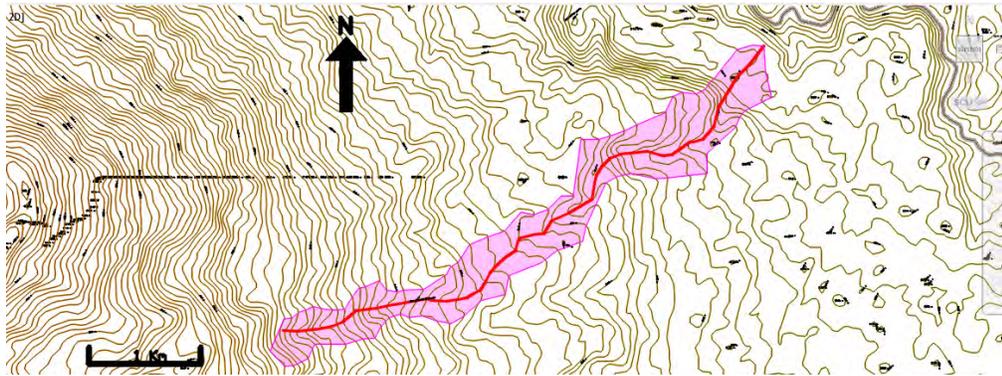


Figura 4.6 Determinación de la cuenca de la quebrada Cuscungo. El área en color magenta representa la cuenca de la quebrada y la línea roja representa el eje del cauce.

Para calcular el volumen de ceniza que cayó sobre la cuenca durante la erupción del 14 de febrero de 2009, se recurre a estimar el espesor de ceniza ponderado sobre la cuenca. Para esto se determina las longitudes y espesores para cada tramo de la Isópacas sobre la quebrada (Ver figura 4.7)

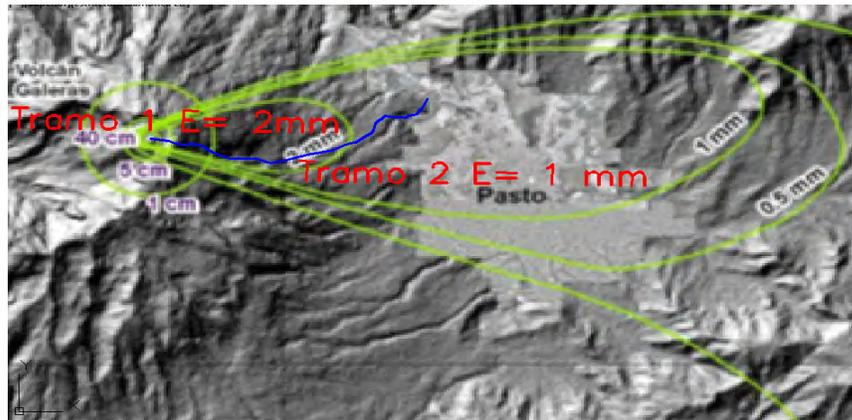


Figura 4.7 Tramos para cálculo del espesor de ceniza ponderado. INGEOMINAS (2009). El tramo 1 va desde el cráter hasta donde termina la isópaca de 2 mm, y el tramo 2 desde el límite de la isópaca de 2 mm hasta la desembocadura de la quebrada en el río Pasto.

Con los datos obtenidos en el análisis gráfico, se procede a calcular el espesor ponderado de ceniza, para lo cual se multiplica la longitud de cada tramo por su espesor correspondiente de acuerdo a la isópaca, posteriormente se realiza la suma de los productos obtenidos y se divide esta suma entre la longitud total del cauce. El valor obtenido es el espesor ponderado, el cual posteriormente se multiplica por el área de la cuenca y se obtiene el volumen de ceniza depositado (ver tabla 4.3). Puesto que el flujo está compuesto por ceniza y agua (ver figura 4.8), se calcula el

volumen total utilizando la concentración adoptada, en este caso 40%. Ver sección (4.1.7).

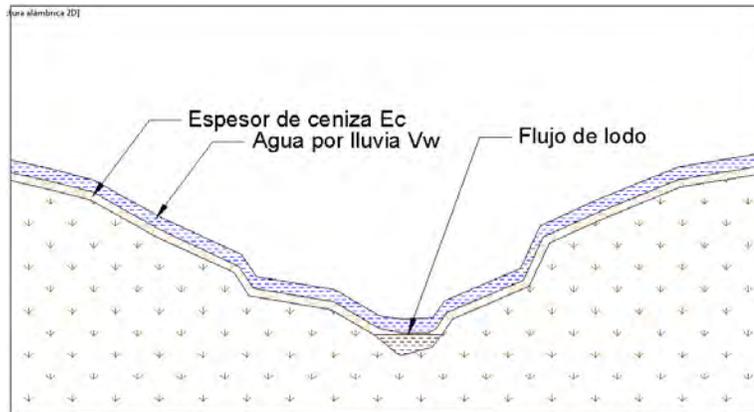


Figura 4.8 Representación de espesores para cálculo de volúmenes.

Tabla 4.3 Procesamiento de datos para obtener el espesor ponderado.

	Espesor de Ceniza E (mm)	Longitud del cauce en cada tramo L (m)	E*L (m*mm)
Tramo 1	2	5037.17	10074.34
Tramo 2	1	2462	2462
Sumatoria	3	7499.17	12536.34
Calculo del espesor ponderado			
Espesor Ponderado de ceniza sobre cuenca $E_c = \frac{\sum(E*L)}{\sum L}$ (mm)			1.7

Con el espesor ponderado se procedió a realizar el cálculo del volumen de ceniza (V_{c1}) y el volumen del flujo de lodo (V_{t1}) que se hubiera producido por la erupción del 14 de febrero de 2009

Para esto se tiene los siguientes datos:

Área de la cuenca $A_c = 2144000 \text{ m}^2$

Espesor ponderado de ceniza en la cuenca $E_c = 1.7 \text{ mm} = 0.0017 \text{ m}$

Se obtiene el volumen de ceniza V_{c1} en la cuenca:

$$V_{c1} = E_c * A_c = 0.0017 \text{ m} * 2144000 \text{ m}^2 = 3584 \approx 3600 \text{ m}^3$$

Si se asume que el flujo tiene una concentración (C) del 40% (concentración promedio para flujos de lodos 4.1.7) de ceniza, se puede establecer el volumen total del flujo de lodo (V_{t1}) que ocurriría a partir del volumen de ceniza depositado en la cuenca en la erupción del 14 de febrero de 2009.

$$V_{t1} = V_{c1} / C = 3600 \text{ m}^3 / 0.4 = 9000 \text{ m}^3$$

Luego se puede obtener la relación (R) entre el volumen de ceniza expulsado en la erupción del 14 de febrero de 2009 y el volumen total de material expulsado (Ve1) en esta misma erupción.

$$R = V_{c1}/V_{e1}=3600/285000=1.26\%$$

Asumiendo que en el evento del 8 de junio de 2009 se mantiene la relación anterior entre el material expulsado (Ve2) y la ceniza que cae sobre la cuenca, se puede obtener el volumen de ceniza (Vc2), que caería sobre la cuenca.

$$V_{c2}=R*V_{e2}=1.26\%*2214000 \text{ m}^3=27896 \text{ m}^3 \approx 28000 \text{ m}^3$$

Asumiendo la concentración del 40%, se tiene que:

$$V_{t2}= V_{c2}/C=28000\text{m}^3/0.4= 70000 \text{ m}^3$$

De acuerdo con los datos obtenidos en el proceso, se estableció un rango de volumen entre 9000 m³ y 70000 m³, se realiza una distribución aleatoria empleando el método de Muestreo Hipercubo latino, tanto para el volumen como para la fricción basal (Ver figura 4.9), con lo que se obtienen diferentes combinaciones de volumen y ángulos de fricción que abarcan 100 escenarios mostrados en el anexo 2. Con este método probabilístico se trata de reducir la incertidumbre por parámetros no contemplados en el modelo.

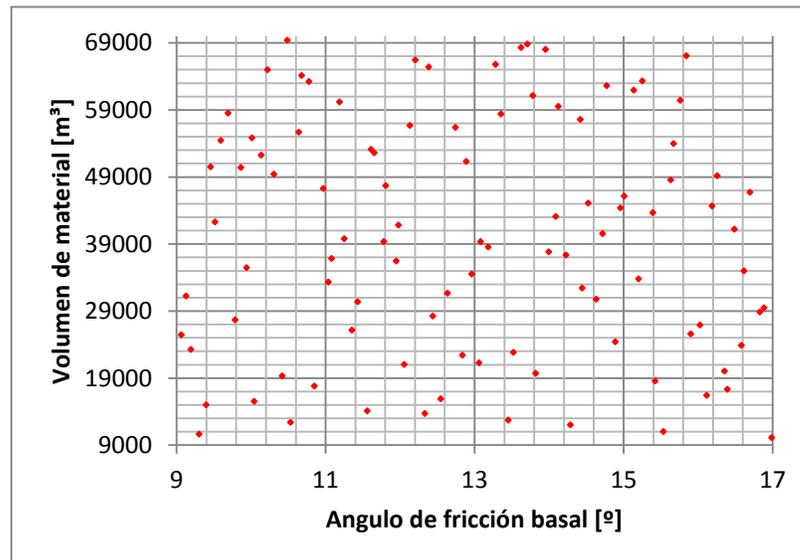


Figura 4.9 Distribución por LHS.
Ángulo de fricción basal vs volumen de la pila.

4.2. RESULTADOS

En esta sección se obtienen los resultados de la investigación con los parámetros propuestos en el numeral 4.1. Se realiza la distribución de la probabilidad tanto para los eventos con ángulo de fricción basal constante (Distribución 1), como para los eventos con la fricción basal variable (Distribución 2). Posteriormente se visualiza

los resultados sobre una imagen satelital de Google Earth y se determinan las edificaciones donde llegaría el flujo con mayor frecuencia, según el estudio.

Modelamientos.

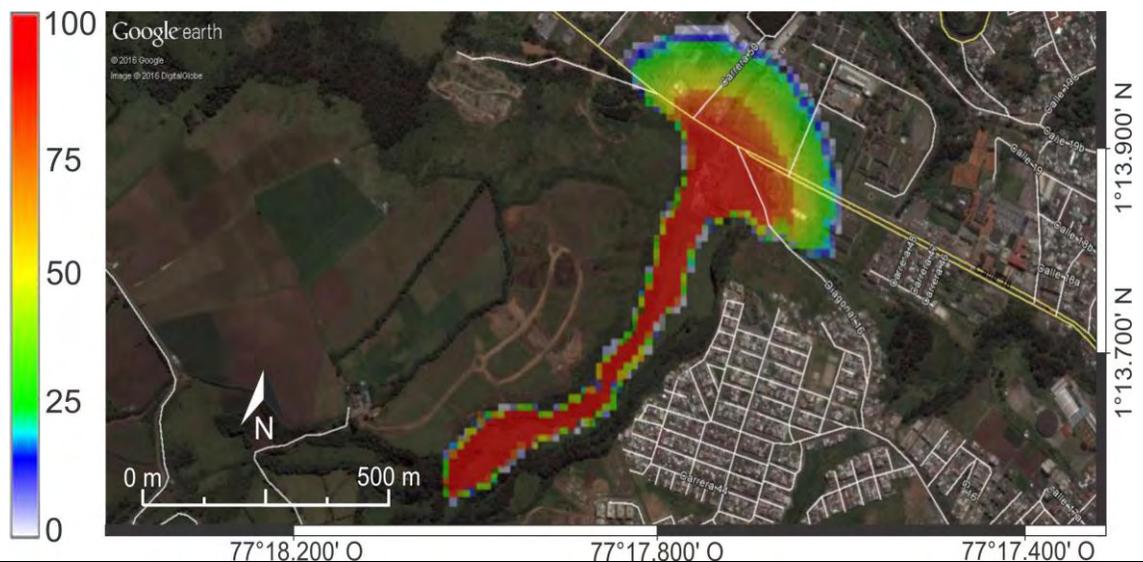
Se realizaron en total 200 simulaciones de acuerdo a las consideraciones especificadas anteriormente, es decir 100 simulaciones con un volumen variable y un grado de fricción basal de 10^0 y 100 simulaciones con volumen variable y ángulo de fricción variable (Ver anexo 2).

Cálculo de la probabilidad frecuencial.

Teniendo como datos de salida por parte del TITAN2D, una nube de puntos que representa la topografía del flujo, es decir las coordenadas XYZ, donde X es la latitud, Y la longitud y Z la altura del flujo sobre el terreno natural en ese punto. Se realiza un procesamiento numérico a través de una rutina en el software Octave. Con este, se analiza cada punto geográfico del modelamiento y se determina cuantas veces, en las 100 simulaciones, llegó a ese mismo punto el flujo con una altura igual o superior a 0.20 m, que como se mencionó anteriormente, para esta investigación esta altura es suficiente para considerarla peligrosa en los primeros niveles de las edificaciones de la universidad, ya que por la carga de rocas y escombros puede generar lesiones y afectar la ocupacionalidad y el normal funcionamiento de las instalaciones de la Universidad.

Es decir, para cada XY de la grilla del DEM, se evalúa si Z es mayor o igual a 0.20 m, se cuenta, hasta terminar de evaluar este punto para cada evento. Al número de eventos que cumplieron la condición anterior se le llama n. Al final se determina la probabilidad frecuencial en ese punto siendo $p = n/100 \times 100$. Esto se hace para los miles de puntos de la grilla. Al final, se muestra una gráfica con la distribución de la probabilidad, donde los puntos con mayor probabilidad se muestran de color rojo y los de menor de color Azul (Ver figura 4.10), luego en las figuras 4.11 y 4.12, se muestra en detalle las distribuciones y se determinan las estructuras alcanzadas.

Distribución 1 Fricción Basal Constante de 10°



Distribución 2 Fricción Basal Variable entre 9° y 17°

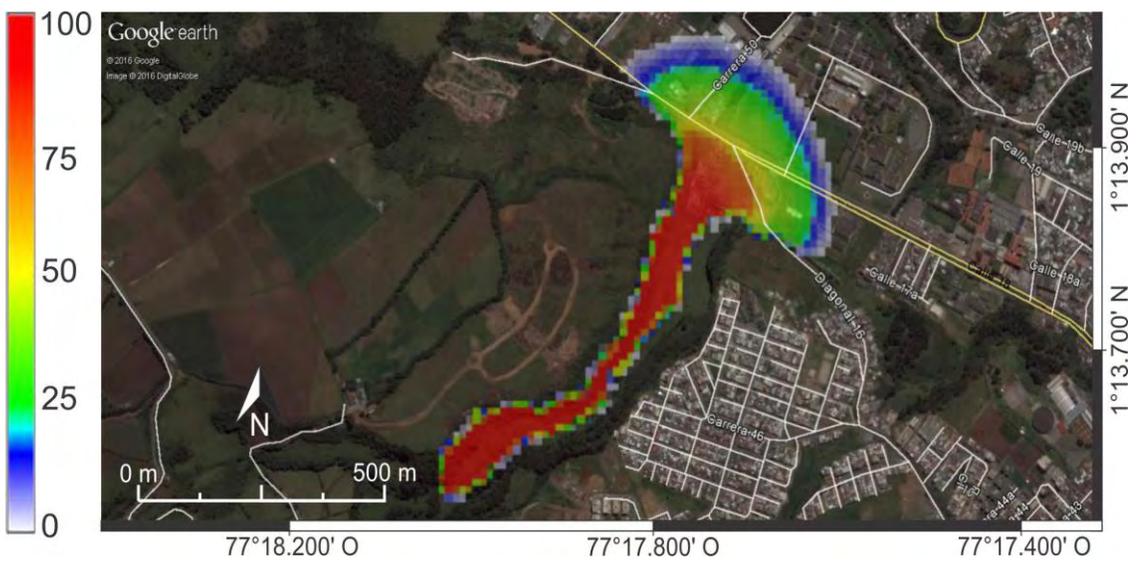


Figura 4.10 Comparación de distribuciones de probabilidad.

Se puede observar que en la distribución 1 el flujo alcanzaría mayores valores de probabilidad, arrojando una mayor área con probabilidad de llegada de más del 25%, mientras que la distribución 2 es más conservadora, ya que algunos flujos por tener una fricción mayor no alcanzan a llegar muy lejos lo que reduce el área alcanzada con una probabilidad mayor al 50%.

4.2.1. Detalle de probabilidad y estructuras en zona de estudio: en esta sección se analizan en detalle la distribución 1 (Ver figura 4.11) y la distribución 2 (Ver figura 4.12), donde se ubican las estructuras que podría ser alcanzadas y se establece la probabilidad de ser inundadas por un flujo de lodo con una altura mayor o igual a 0.2 metros.

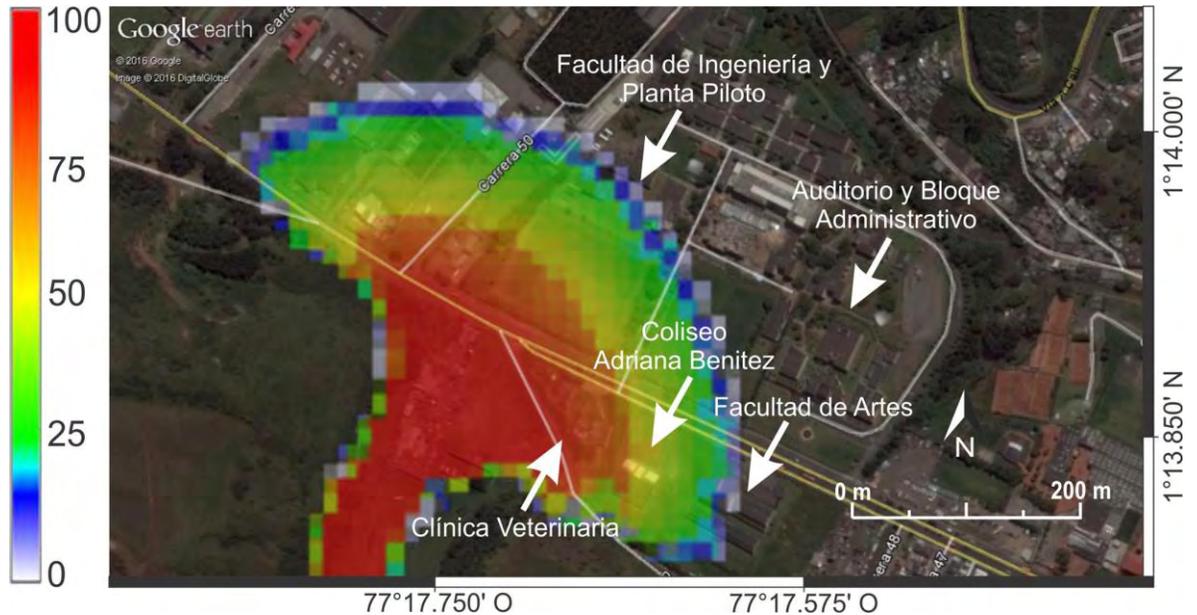


Figura 4.11 Detalle para distribución 1.

Se aprecia que la clínica veterinaria es la estructura de la universidad que se encuentra ubicada en una zona donde la probabilidad de llegada del flujo supera el 90% y el coliseo Adriana Benítez se encuentra en la zona donde existe una probabilidad de llegada del flujo de más del 60%, mientras que la facultad de arte y el bloque de ingeniería están en la zona donde la probabilidad de llegada del flujo es del 20%.

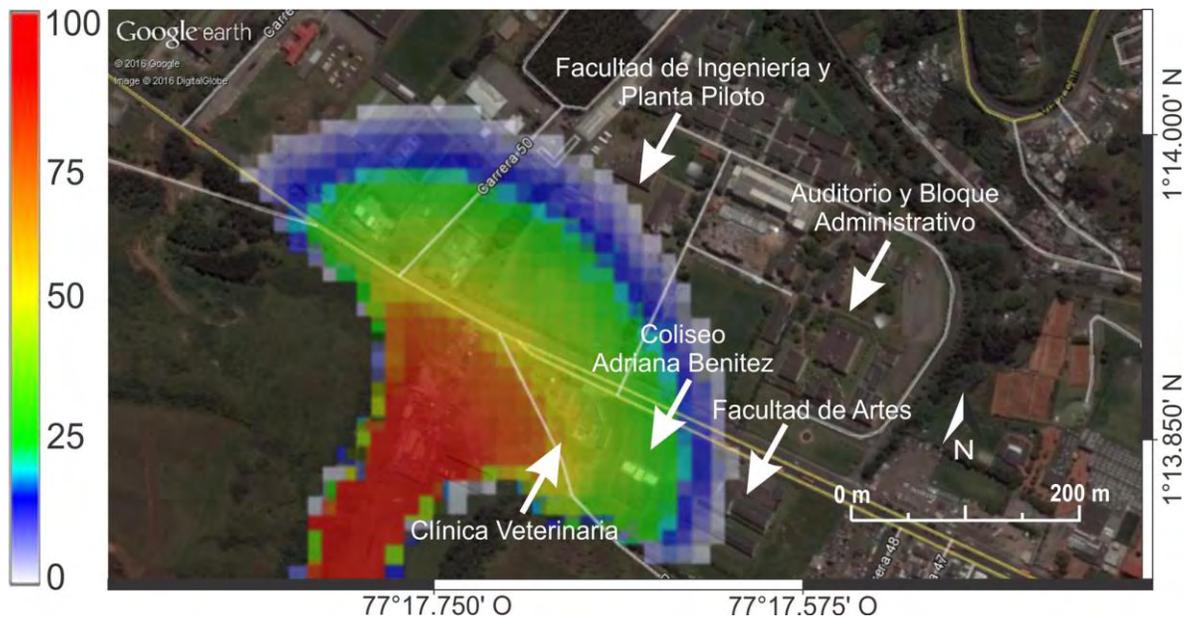


Figura 4.12 Detalle para distribución 2.

En esta imagen se observa que la zona donde está la clínica veterinaria tiene una probabilidad de llegada del flujo mayor al 60%, mientras que el coliseo Adriana Benítez se encuentra en una zona donde existe una probabilidad de llegada del flujo menor del 30%, mientras que la facultad de arte y el bloque de ingeniería están en la zona donde la probabilidad de llegada del flujo es menor del 5%.

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la distribución 2 (Ver figura 4.12), debido a que se tiene un rango de 9 a 17° para la fricción basal, se presentan menores valores de probabilidad de llegada del flujo, por lo tanto, el área crítica en colores naranja y rojo es menor en comparación a la obtenida en la distribución 1 (Ver figura 4.12). Esto se presenta debido a que el 85% de las simulaciones en la distribución 1 cuentan con un ángulo de fricción mayor al de la distribución 2, lo que refleja la importancia de este parámetro en los modelamientos.

Según los resultados la estructura a la cual llegaría más veces el flujo es la clínica veterinaria, es decir, en la distribución 1 (ángulo de fricción basal igual a 10°) llegaría con una probabilidad mayor al 90% (Color rojo), mientras que en la distribución 2 (ángulo de fricción aleatorio) la estructura sería alcanzada con una probabilidad menor del 60% (Color naranja amarillento). De igual manera el coliseo Adriana Benítez, sería alcanzado en la distribución 1 con una probabilidad del 75% (Color naranja), mientras que en la distribución 2 tendría una probabilidad menor del 30% (Color Verde) de ser alcanzado.

Por otra parte, la facultad de artes, la facultad de ingeniería y la planta piloto, serían alcanzadas en la distribución 1 con una probabilidad del 20% (Color cian), mientras que en la distribución 2 serían alcanzadas con una probabilidad menor del 5% (Color azul-blanco).

Para obtener conclusiones y recomendaciones en esta investigación y asumiendo una posición del lado de la seguridad ante el fenómeno de flujos de lodo, se tomará como base los resultados de la distribución 1 (Ver Figura 4.11), ya que es el escenario más crítico entre los estudiados.

Para lo anterior, se define que entre las estructuras con más probabilidad de ser alcanzadas por el flujo se destacan la clínica veterinaria y el coliseo Adriana Benítez, por ser las más cercanas al cauce de la quebrada y ser las primeras que serían alcanzadas por el flujo.

La Facultad de Artes, Facultad de Ingeniería y la Planta Piloto se encuentran también dentro de la zona que sería alcanzada por el flujo, pero con una probabilidad mucho menor. Por otra parte, el flujo no alcanzaría a llegar a estructuras como el bloque 1, el bloque 3, el bloque 2, la Facultad de Medicina, la Unidad de Microbiología, la Biblioteca, el Bloque administrativo ni al Bloque de Derecho.

En esta investigación no se está obteniendo la frecuencia absoluta de la ocurrencia del evento, sino que se trabajó con probabilidad condicional, es decir la frecuencia con la que llega un flujo con una altura de 0.2 m a un mismo punto en 100 escenarios distintos en caso de que ocurra un flujo de lodos.

5. VERIFICACIÓN HIDRÁULICA DEL FLUJO DE LODO.

En este capítulo a manera de ejercicio académico se procede a estudiar la zona de nororiental del campus universitario Torobajo por la cual se ubica el cauce del río Pasto y de acuerdo al Mapa de Amenaza Volcánica del Volcán Galeras 2015 se encuentra en zona de amenaza alta por ser la trayectoria que tomarían los flujos de lodos provenientes de las quebradas Mijitayo y Midoro.

Aunque en la actual versión del mapa de amenaza se reduce el área de amenaza media, el POT municipal toma como referencia la anterior versión donde se establecía un ancho de 100 metro a lado y lado del cauce del río, por esta razón se presentan restricciones en cuanto a la habitacionalidad y uso de las edificaciones sobre esta franja. Es por eso que en este trabajo y a manera de ejercicio académico se estudia dicha zona un flujo de lodos secundarios, además se hacen comparaciones de caudales con otro sitio, específicamente en la zona aledaña al hospital infantil para observar las propiedades de continuidad del flujo.

El campus universitario se encuentra bordeado por el río Pasto en su flanco nororiental, y el cual transportaría los flujos de lodo provenientes de la quebrada Mijitayo y Midoro, razón por la cual su cauce se encuentra dentro del área determinada como amenaza alta por el Mapa de Amenaza Volcánica del Volcán Galeras en su actualización 2015

Para esto se estudió el perfil del flujo en la zona de interés y se realizó el chequeo del principio de continuidad y conservación de la masa en la franja.

En este estudio se asume que el flujo de lodo se comportaría como un fluido hidráulico con baja concentración de sedimentos, teniendo en cuenta que este proviene de la quebrada Mijitayo y desemboca en el Río Pasto en el sector del Hospital Infantil, por lo que se diluiría con el caudal de agua que el río aportaría.

Teniendo en cuenta que el flujo poseería una baja concentración de sedimentos, y que tendría un comportamiento newtoniano, se realizó las verificaciones aplicando el modelo de Manning ya que es el más adecuado para analizar este tipo de fluidos, además de ser el que más se asemeja a la realidad del flujo en estas condiciones Suárez (2009).

Para implementar el modelo de Manning es necesario conocer las características del cauce y determinar una serie de parámetros para realizar las evaluaciones pertinentes y constituir los resultados de manera numérica y gráfica.

5.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Como condición inicial, este análisis está regido estrictamente por la topografía, sin embargo, como se aplican ecuaciones de la hidráulica de canales abiertos a un caso de inundación con flujo de lodo hay que tener en cuenta que el flujo se va comportar

de manera diferente al agua, y para poder aplicar la ecuación de Manning fue necesario contemplar esta diferencia en el coeficiente de rugosidad como se muestra en el literal 5.3.

Para este análisis se establecieron dos puntos sobre el río Pasto, en los cuales se obtuvieron las respectivas secciones transversales a partir de un plano topográfico planimétrico del río Pasto elaborado por la Alcaldía de Pasto con curvas de nivel cada 1 metro. Con estas se obtendrán los parámetros dados por la geometría de la sección.

La primera sección o punto está ubicado en la Sede Torobajo de la Universidad de Nariño, con ubicación Geográfica Latitud $1^{\circ}13.974'N$, Longitud $77^{\circ}17.513O$ y elevación 2498 m.s.n.m (ver Figura 5.1) donde se presenta taludes de gran altura con pendientes pronunciadas adyacente al cauce. La segunda sección o punto se ubica en el sector del Hospital Infantil Los Ángeles debido a que en este sector desemboca la quebrada Mijitayo y además tiene condiciones topográficas diferentes a la primera sección, presentando un relieve mucho más plano, con lo que se buscó realizar una comparación del comportamiento del flujo para diferentes condiciones topográficas del canal. Esta segunda sección se ubica en Latitud $1^{\circ}13.466'N$, Longitud $77^{\circ}16.789'O$ y elevación 2511 m.s.n.m (ver figura 5.2).

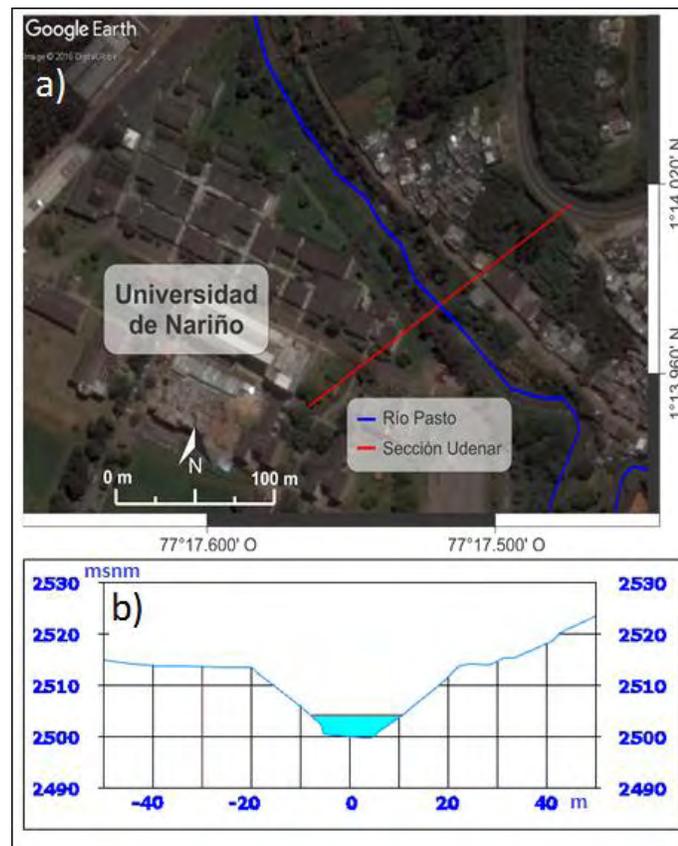


Figura 5.1 Sección río Pasto en Universidad de Nariño Sede Torobajo. (-a ubicación sección transversal imagen Google Earth.-b sección transversal.)

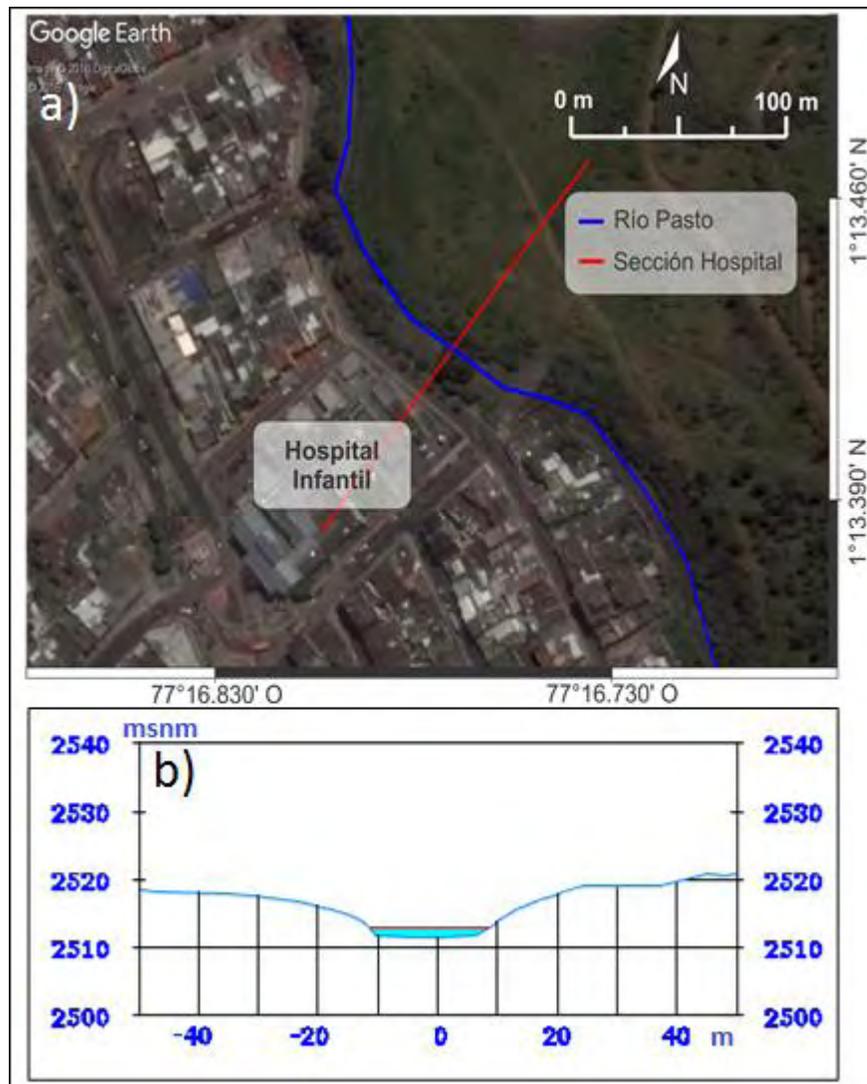


Figura 5.2 Sección río Pasto sector del Hospital Infantil Los Ángeles.
 (-a sección transversal. -b ubicación sección transversal imagen Google Earth.)

Para el análisis del flujo se hace un chequeo en cuanto al cumplimiento de la ecuación de continuidad y conservación de la masa en las secciones en los puntos ya seleccionados mencionados en el párrafo anterior. Para esto se utilizó la ecuación de Manning, por lo que será necesario establecer parámetros a partir de la geometría de la sección y la rugosidad o naturaleza del canal. Con estos datos se podrá obtener el caudal en el punto 1 y verificar por el criterio de continuidad y conservación de la masa si este caudal es el mismo en el punto 2 y viceversa.

5.2. ANÁLISIS DEL PERFIL DEL FLUJO

La topografía de la zona se obtuvo a partir de trabajos realizados por la Alcaldía de Pasto y de un modelo de elevación digital.

Al observar la sección transversal sobre el sector de la Universidad de Nariño se aprecia diferentes alturas en los taludes a ambos lados del cauce como se muestra en la figura 5.3. La franja adoptada por el POT establece 100 metros a lado y lado del eje del río Pasto, en esta zona la topografía del sector restringe el alcance de dichas distancias especialmente en el lado derecho aguas abajo del río. Sin embargo y a manera de ejercicio académico se procede a verificar diferentes casos de la hidráulica donde se pueda generar un flujo que alcance abarcar la zona de amenaza adoptada. Cabe mencionar que los resultados aquí obtenidos no se comparan ni remplazan los estudios realizados por los entes nacionales como el SGC o por la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo, por lo tanto, deben este trabajo como un ejercicio meramente académico.

En la figura 5.3, se observa una inclinación del flujo, similar al fenómeno de sobrelevación que se presenta en las curvas de los canales abiertos. La única manera que se de esta condición es en una curva con un radio reducido y una velocidad y caudal desproporcionado como se ve en la sección 5.2.1 donde se evalúa el fenómeno según la ecuación propuesta por Martin (2002).

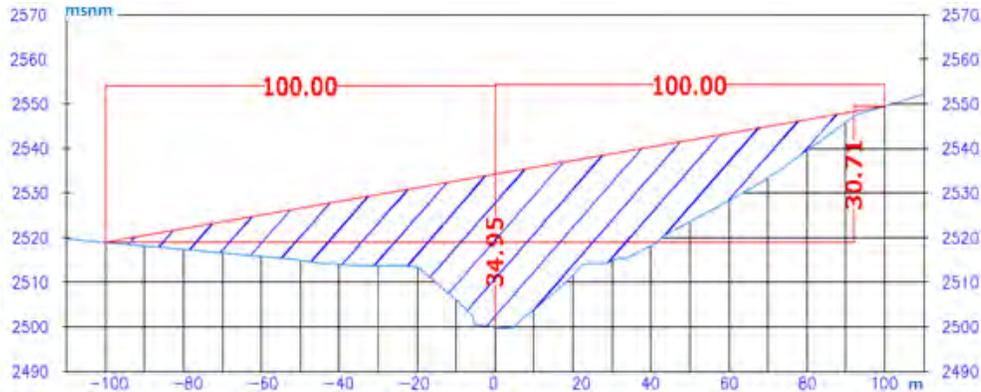


Figura 5.3 Franja de 100 metros a lado y lado de río Pasto sección UDENAR. Nótese la diferencia de altura donde la margen derecha quedaría 30.7 metros por encima del nivel de la margen izquierda.

5.2.1. Chequeo de la posibilidad de sobrelevación del flujo: en las curvas de un canal abierto ya sea artificial o natural se presenta el fenómeno sobrelevación de la superficie de un flujo, este es causado por la fuerza centrífuga. Si se asume que exista un flujo por el río Pasto, tal que el flujo alcance un ancho de 200 metros, el flujo tendría que presentar una sobrelevación ya que la topografía del sector presenta una restricción en uno de los lados del río, por lo cual se procede a verificar si es físicamente posible que dicha sobrelevación pudiera llegar a suceder.

Según Martin(2002), el valor de esta sobrelevación en un río puede obtenerse con bastante precisión mediante la siguiente ecuación:

$$D_z = \frac{V^2 \times B}{g \times r} \quad (5.1)$$

Dónde:

Dz = sobrelevación [m],

V = velocidad media de la corriente [m/s],

B = ancho del cauce [m],

g = aceleración de la gravedad [m/s²]

r = radio de la curva.

Al evaluar la ecuación 5.1 en la sección del río Pasto en el sector Universidad de Nariño teniendo como datos la gravedad de 9.81m/seg², asumiendo que el caudal en la sección alcance un ancho de 200 metros, con lo cual se consigue una diferencia de niveles de 30.7 metros (ver figura 5.3). La velocidad es obtenida a partir de la geometría de la sección de la siguiente manera:

Según Manning (Ecuación 3.3) se tiene,

$$v = \frac{1}{n} * R_h^{\frac{2}{3}} * S_o^{\frac{1}{2}}$$

Donde

V= Velocidad

n= Coeficiente de rugosidad de Manning

R_h= Radio hidráulico de la sección.

S_o= Pendiente media del canal.

De la geometría de la sección se obtiene que el área mojada es de 3026.9 m², el perímetro mojado es de 219.6 m, con lo que se obtiene un radio hidráulico de 13.78 m. De los criterios propuestos Chow (1982) y Xu y Feng (1979) (Ec 5.2), se obtiene una rugosidad para el flujo de 0.1, y de la topografía se tiene una pendiente media del cauce de 0.016 m/m.

Con los datos anteriores se procede a calcular la velocidad del flujo en la sección.

$$v = \frac{1}{n} * R_h^{\frac{2}{3}} * S_o^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{0.1} * 13.78^{\frac{2}{3}} * 0.016^{\frac{1}{2}} = 7.27 \text{ m/s}$$

Luego reemplazando este valor en la ecuación 5.1 y se tiene:

$$D_z = \frac{v^2 \times B}{g \times r} \quad ; \quad 30.7 = \frac{7.27^2 \times 200}{9.81 \times r}, \text{ despejando } r \text{ se tiene: } r = \frac{7.27^2 \times 200}{9.81 \times 30.7} = 35.1 \text{ m}$$

Es decir que para que se presente una sobrelevación en este tramo del río, asumiendo que exista un caudal tal que el ancho del flujo sea de 200 m, se necesitaría una curva con su lado cóncavo hacia la Universidad de Nariño con un radio de 35.1 m, lo cual por las condiciones geométricas del cauce del río es imposible, ya que en esta zona la trayectoria del río es casi recta, lo que significa que el radio de curvatura tiende a ser infinito.

Con el anterior chequeo se corrobora que en el sector de la Universidad de Nariño es físicamente imposible que se presente el fenómeno de sobrelevación con una altura aproximada de 30 metros.

5.3. PRINCIPIOS DE CONTINUIDAD Y CONSERVACIÓN DE LA MASA.

Se tuvo en cuenta que el flujo no puede llegar a alcanzar un ancho de 100 metros a lado y lado del cauce, se realizó un análisis donde se consideró que por lo menos éste alcanza un ancho de 100 metros en el lado donde el punto que delimita la franja de amenaza tiene la menor altura, es decir donde no existe la restricción topográfica.

5.3.1. Parámetros de la ecuación de Manning: se consideró la ecuación de Manning, y a partir de los datos obtenidos en la sección transversal se procede a obtener de la sección transversal del río los parámetros necesarios para este análisis, es decir, el área hidráulica (A_h), el perímetro mojado (P_m) y el radio hidráulico (R_h). Estos parámetros se obtendrán para los dos puntos especificados en la sección 5.1; el punto a en el tramo contiguo a la Universidad de Nariño sede Torobajo y el punto b en el tramo del río adyacente al Hospital Infantil.

Además de obtener la información de las secciones transversales, se calculó la pendiente del río para ambas ubicaciones, se tomó alturas del cauce a 50 metros aguas arriba y 50 metros aguas debajo de la localización de la sección, teniendo como resultado en el primer escenario de la sección de la Universidad de Nariño una Pendiente del 1.6 % y en la segunda sección en el sector del Hospital Infantil una pendiente promedio de 1.0 %.

5.3.2. Determinación de la rugosidad (n) en la sección: el factor más importante a determinar en este el análisis hidráulico es el número de rugosidad n de Manning, el cual representa la fricción entre el canal y el flujo Suárez (2009). La rugosidad depende de una gran cantidad de elementos entre los que se tienen el material y la forma del fondo del río, el tipo y densidad de vegetación, el régimen de caudales, la geometría del cauce, las irregularidades de la superficie del canal y la meandricidad; debido a esto, estimar un valor para la rugosidad es una tarea compleja y para su determinación se debe recurrir a visitas de campo, manuales, tablas y métodos analíticos CVC (2005).

La rugosidad constituye un parámetro que no puede ser medido en campo directamente, por lo cual su valor debe estimarse durante la calibración si es posible, o determinarse a partir de los resultados arrojados por modelos implementados en otras cuencas con características morfológicas, batimétricas, sedimentológicas y de vegetación similares al río a analizar.

La rugosidad para flujos de lodo es generalmente más alta que para flujo de agua, debido a que por ejemplo Du y otros (1980) indican que las avalanchas de tierra de glaciales tienen una rugosidad superior a 0.45.

Por otro lado Chow (1982) propone que en ríos con secciones irregulares y con un ancho de inundación superior a 30 metros el factor de rugosidad de Manning maneja un rango de 0.035 como mínimo y 0.1 como valor máximo, por lo cual se tienen un rango bastante amplio para asumir en valor de este parámetro.

Según Xu y Feng (1979) el coeficiente de fricción de Manning para flujo de lodos es proporcional al espesor del flujo. Estos autores proponen el siguiente criterio empírico para calcular dicha fricción:

$$n = 0.035 \times h^{0.34} \quad (5.2)$$

Según el criterio anterior a mayor espesor es mayor la cantidad de partículas sólidas y en consecuencia es mayor la disipación de energía potencial debida al movimiento de la carga transportada, y se debe aumentar el valor de rugosidad de Manning para tener en cuenta esta disipación de energía.

En este trabajo, para la asignación del Coeficiente de Manning se asume el criterio empírico propuesto por Xu y Feng (1979) para lo cual h sería la altura máxima entre el fondo del río y la lámina del flujo obtenida de la sección transversal del flujo obtenida a partir del plano topográfico planimétrico con curvas de nivel cada metro. Posterior a la evaluación de la ecuación 5.2 se procede a verificar si el resultado está dentro del rango de coeficientes de Manning para planicies de inundación propuesto por Chow (1982).

Para la sección en el Sector Universidad de Nariño se tiene que la altura del flujo de lodos de 18.93 m (ver figura 5.5) resultó en un Coeficiente de Manning de 0.095.

Para la sección en el Sector Hospital Infantil se tiene que la altura ponderada para el flujo de lodos de 8.35 m (ver figura 5.6) para un Coeficiente de Manning de 0.07 que se encuentra dentro del rango de Chow (1982).

5.3.3. Cálculo de caudales en las secciones.

Secciones a ser evaluadas

Chequeo en punto Universidad de Nariño (Caso 1):

Para este caso, se procede a evaluar los parámetros obtenidos de la sección transversal del flujo (Ver tabla 5.1) en el punto establecido en la Universidad de Nariño sede Torobajo, se consideró que la lámina del flujo alcance 100 metros en la margen izquierda (Lado del cauce de menor altura en la sección topográfica) del río. (Ver numeral 5.1).

Chequeo en punto Hospital Infantil Los Ángeles (Caso 2):

Para este caso, se procede a evaluar los parámetros obtenidos de la sección transversal del flujo (Ver tabla 5.1) en el punto establecido en el cauce del río adyacente al Hospital Infantil los Ángeles, se consideró que la lámina del flujo alcance 100 metros en la margen izquierda (Lado del cauce de menor altura en la sección topográfica) del río. (Ver numeral 5.1).

Tabla 5.1 Características hidráulicas secciones transversales.

ABSCISA		ÁREA MOJADA	PERÍMETRO MOJADO	RADIO HIDRÁULICO	RUGOSIDAD	PENDIENTE
CASO	LOCALIZACIÓN	m ²	m	m	Ec. 5.2 n	m/m
CASO 1	SEC. UDENAR	842.407	149.882	5.620	0.095	0.016
CASO 2	SEC. H. INFANTIL	356.939	143.938	2.480	0.07	0.010

Determinación de caudales: con las características Hidráulicas y parámetros iniciales registrados en la tabla 5.1, se procede a calcular el caudal correspondiente a cada una de las secciones mediante la aplicación de la ecuación de Manning.

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times R_h^{2/3} \times S^{1/2} \quad (5.3)$$

Donde

Q: corresponde al caudal en m³/s.

n: corresponde al coeficiente de rugosidad de Manning.

A: corresponde al Área de la Sección Transversal del Cauce expresada en m².

R_h: corresponde al Radio Hidráulico, está relacionado entre el Área mojada y el Perímetro mojado de la sección Transversal (R_h=A_m/P_m).

S: es la pendiente promedio del Canal expresada en m/m.

En la tabla 5.2, se encuentran los caudales calculados mediante la fórmula de Manning para ambos casos.

Tabla 5.2 Caudales calculados para cada uno de los chequeos.

ABSCISA		ÁREA MOJADA	PERÍMETRO MOJADO	RADIO HIDRÁULICO	RUGOSIDAD	PENDIENTE	CAUDAL
CASO	LOCALIZACIÓN	m ²	m	m	Eq. 5.1 $\frac{1}{n}$	m/m	Ec. 5.3 $\frac{m^3}{s}$
CASO 1	SEC. UDENAR	842.407	149.882	5.620	0.095	0.016	3546.00
CASO 2	SEC. H. INFANTIL	356.939	143.938	2.480	0.07	0.010	908.00

5.3.4. Análisis del principio de continuidad en el Cauce: por principio de conservación de masa se tiene que.

$$Q1 = \frac{1}{n} \times A1 \times RH1^{2/3} \times S^{1/2} = Q2 = \frac{1}{n} \times A2 \times RH2^{2/3} \times S^{1/2}$$

Este análisis se basa en el cumplimiento del principio de continuidad y la conservación de la masa en el cauce del río, es decir que el caudal al largo de este se mantiene constante.

Con los resultados obtenidos en la tabla 5.2 y como se consideró que para efectos de cálculo los aportes de los afluentes aledaños al río Pasto son tan pequeños en relación al caudal que lleva la inundación que se pueden desprestigiar; se evidencia que el caudal del flujo obtenido en la sección de la Universidad de Nariño es cuatro veces el caudal calculado en la sección del Hospital Infantil, por lo cual se puede asegurar que **no se está cumpliendo el principio de continuidad**, que indica que el caudal debe ser el mismo para ambas secciones. (No se han tenido en cuenta los aportes de afluentes por ser caudales desprestigiables en relación con el caudal del posible flujo de lodos)

5.3.5. Superposición de Caudales en áreas transversales: en la sección anterior se comprobó que no se cumple el principio de continuidad a lo largo del cauce del río Pasto para los casos estudiados, ahora, a manera de ejercicio académico, se procedió a realizar un chequeo de la franja que inundaría el flujo asumiendo que este sí cumpliera este principio.

Para este análisis se presentarán los siguientes planteamientos.

Planteamiento del chequeo: se parte del caudal calculado en cada caso (Ver tabla 5.2). En la primera parte, el caudal en la sección de la Universidad de Nariño se lo reemplaza en la sección del hospital infantil, y como se consideró los parámetros hidráulicos propios de esta sección, al modificarse el caudal en la misma sección se aumenta el área y el perímetro mojado, por lo cual se presenta una variación en el alcance del flujo. Estos parámetros y la rugosidad se calculan gráficamente a partir

de un proceso iterativo que se explica más adelante. En la segunda parte, se realiza el mismo procedimiento, pero con la diferencia que en este caso se reemplaza el caudal calculado en la sección del Hospital Infantil (Caso2) y se lo reemplaza en la sección de la Universidad de Nariño.

Proceso Iterativo: cuando se trabaja con un método iterativo se trata de resolver un problema matemático (como una ecuación o un sistema de ecuaciones) mediante aproximaciones sucesivas a la solución, empezando desde una estimación inicial.

Este análisis plantea un método basado en incrementar la altura de la lámina del flujo de lodo (Ver figura 5.4), donde la variable será el perímetro, el área de mojada y el coeficiente de rugosidad de Manning que depende de la variación de la altura. La pendiente del cauce será la propia de cada sección calculada anteriormente. Basándose en lo anteriormente dicho se va incrementando el área hasta que el caudal en esta sección se aproximadamente igual al caudal de referencia de la otra sección. Posteriormente, se procede a determinar el alcance del flujo modificado por la variación del área mojada.

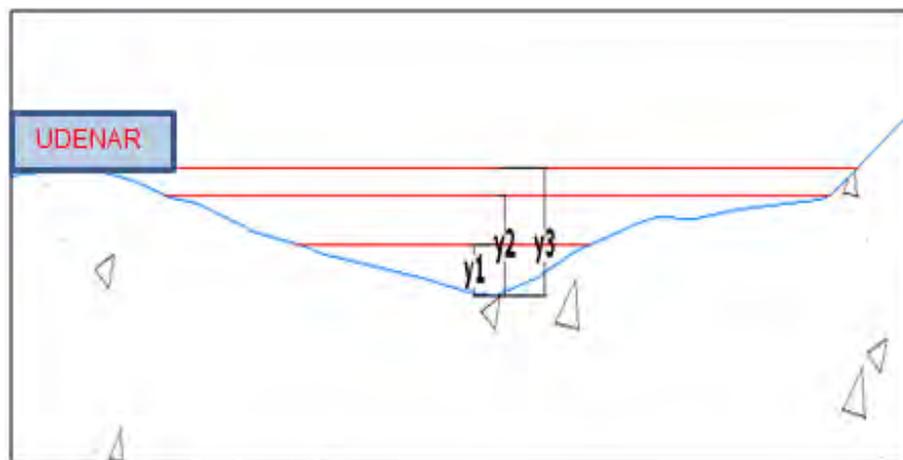


Figura 5.4 Sección transversal incrementando altura del flujo.
(y_1 , y_2 , y_3 son las variaciones en la altura del flujo, para determinar el cálculo del caudal de manera iterativa)

Resultados del Análisis Hidráulico: en esta parte se realiza el chequeo para cada una de las secciones (Ver figura 5.5 y 5.6) de acuerdo a lo mencionado en el numeral 5.3.

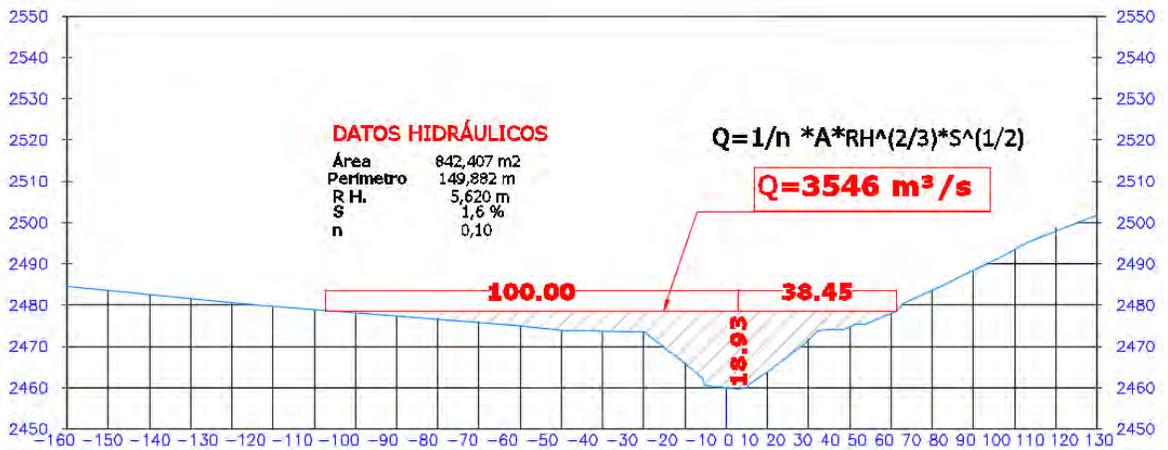


Figura 5.5 Caudal calculado en el sector Universidad de Nariño.

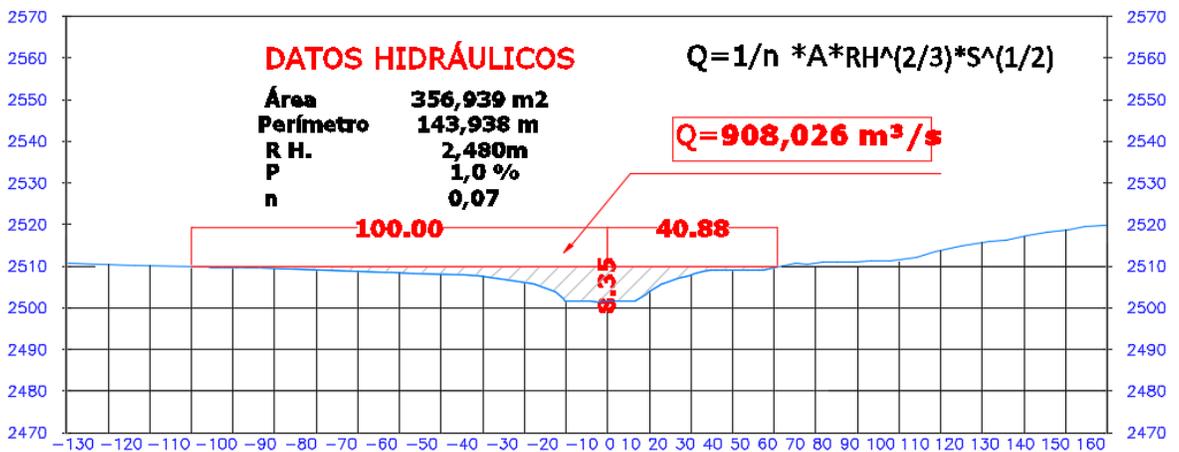


Figura 5.6 Caudal calculado sector Hospital Infantil.

Con los datos obtenidos y presentados en las gráficas 5.6 y 5.7, se procedió a realizar los análisis transponiendo el caudal de cada caso en diferentes secciones.

Primer chequeo: este primer chequeo consiste tomar el caudal calculado en la sección Universidad de Nariño de 3542 m³/s y evaluarlo en la sección transversal del Hospital Infantil; para esto se irá incrementando la altura del flujo de lodo hasta que este caudal calculado corresponda o se aproxime al caudal en referencia. Este proceso se plasma en el Anexo No.4.

En la iteración número 10, se obtiene que para que el principio de la conservación de masa exista, el área mojada será de 1105.2 m², un Radio hidráulico de 4.18 metros y un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.08 para una altura del flujo de 11.75 metros, en la figura 5.7, se muestra las características del flujo en la sección del Hospital Infantil.

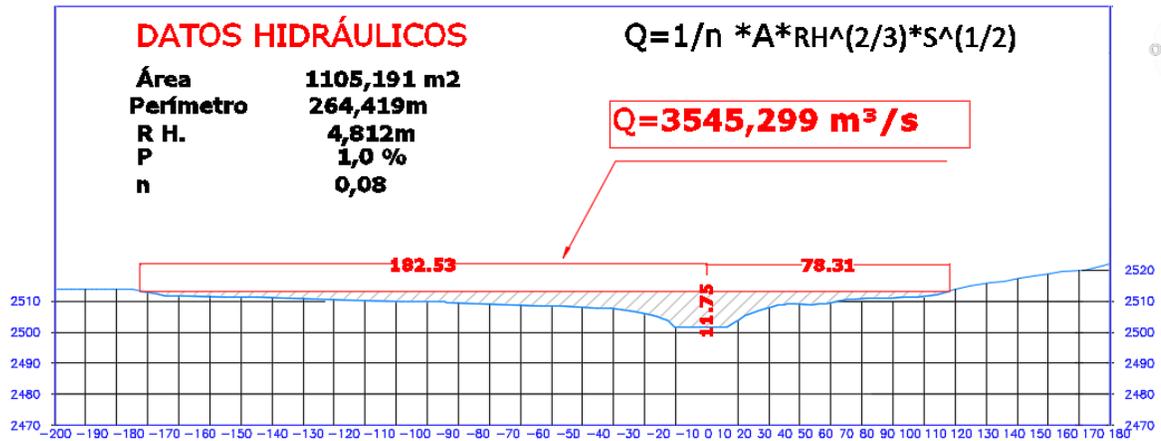


Figura 5.7 Caudal de sector Universidad de Nariño en Hospital infantil.

Como resultado del análisis anterior en la tabla 5.3, se evidencia el aumento y alcance máximo del flujo a ambos lados del cauce para que pueda albergar un caudal de 3546 m³/s en la sección del Hospital Infantil.

Tabla 5.3 Chequeo en la sección Hospital infantil. Q= 3546 m³/s.

ITERACIÓN	ALTURA FLUJO (m)	n	ANCHO MARGEN DERECHA (m)	ANCHO MARGEN IZQUIERDA (m)	CAUDAL (M3/S)
1	10.500	0.08	39.5	79.49	2118
2	11.000	0.08	69.34	160.9	2684
3	12.000	0.08	79.28	183.95	3850
...
....
8	11.800	0.08	78.48	182.81	3606
10	11.750	0.08	78.31	182.53	3546

En la figura 5.7 y tabla 5.3, se observa el alcance del flujo con un caudal estimado de 3546 m³/s se extiende en la margen derecha aproximadamente 183 metros y en la margen izquierda 78.31 metros con una altura del flujo de 11.75 metros.

Segundo chequeo: este segundo chequeo consiste tomar el caudal calculado en la sección del Hospital Infantil 908.026 m³/s y evaluarlo en la sección transversal de la Universidad de Nariño; para esto se irá incrementando la altura del flujo de lodo

hasta que este caudal calculado corresponda o se aproxime al caudal en referencia. Este proceso se plasma en el Anexo No. 5.

En la iteración número 8, se obtiene que para que el principio de la conservación de masa exista, el área mojada será de 190.792 m², un Radio hidráulico de 4.853 metros y un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.08 para una altura del flujo de 9.8 metros, en la figura 5.8 se muestra las características del flujo en la sección de la Universidad de Nariño.

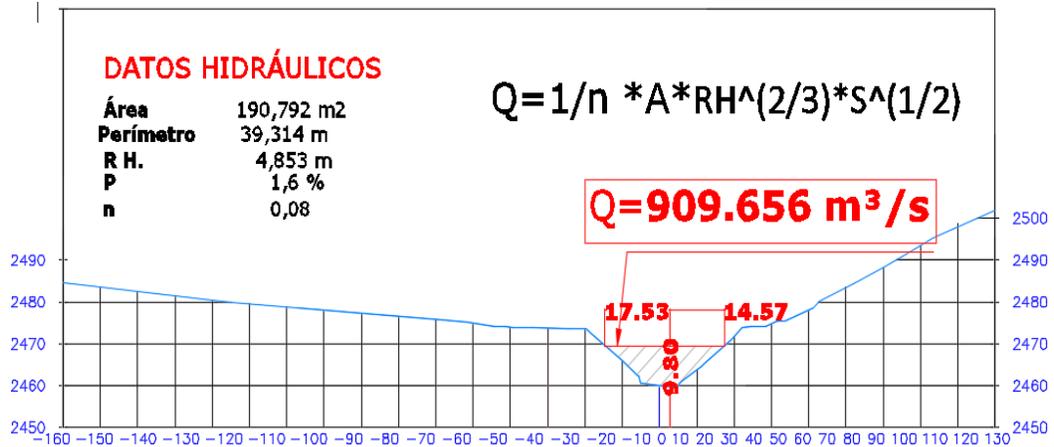


Figura 5.8 Caudal de sector Hospital Infantil en Universidad de Nariño.

Como resultado del análisis anterior en la tabla 5.4, se evidencia el aumento y alcance máximo del flujo a ambos lados del cauce para que pueda albergar un caudal de 906.656 m³/s en la sección del Hospital Infantil.

Tabla 5.4 Chequeo sección Universidad de Nariño Q= 908.656 m³/s.

ITERACIÓN	ALTURA FLUJO (m)	n	ANCHO MARGEN DERECHA (m)	ANCHO MARGEN IZQUIERDA (m)	CAUDAL (M3/S)
1	10.000	0.08	14.83	17.8	944.547
2	9.000	0.07	13.53	16.48	777.308
3	9.500	0.08	14.18	17.22	858.672
...
7	9.700	0.08	14.44	17.4	892.477
8	9.800	0.08	14.57	17.53	909.656

En la figura 5.8 y tabla 5.4, se observa el alcance del flujo con un caudal estimado de 906.3 m³/s que se extiende en la margen derecha aproximadamente 15 metros y en la margen izquierda aproximadamente 18 metros con una altura del flujo de 9.8 metros.

5.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Para que se presente una sobrelevación en el río Pasto en el tramo adyacente a la sede Torobajo de la Universidad de Nariño, se consideró que exista un caudal tal que el ancho del flujo sea de 200 m, se necesitaría una curva con su lado cóncavo hacia la Universidad de Nariño con un radio de 35.1 m, lo cual por las condiciones geométricas del cauce del río es imposible, ya que en esta zona la trayectoria del río es casi recta.

La diferencia de caudales entre el sector de la Universidad de Nariño y el hospital Infantil, suponiendo un evento en el que el flujo de lodo abarque un ancho de 100 m a partir del eje del río hacia su borde de menor elevación topográfica, es de aproximadamente 4 veces. Es decir, el caudal en la sección de la Universidad de Nariño es aproximadamente 3546 m³/s, mientras que el caudal en la sección del hospital infantil es de aproximadamente 910 m³/s. Por lo tanto, en este caso no se estaría cumpliendo el principio de conservación de masa.

En el primer chequeo, en la figura 5.9, se observa la franja que inundaría el flujo en la sección del Hospital Infantil con el caudal obtenido en la sección de la Universidad de Nariño de 3546 m³/s, se abarcó desde el eje del río y aguas abajo hacia la margen derecha un ancho de 78.31 metros y hacia la margen izquierda un ancho de 182.53 metros, con una altura del flujo de 11.75 metros. El flujo en la margen izquierda llegaría hasta la carrera 32B con avenida los Estudiantes.

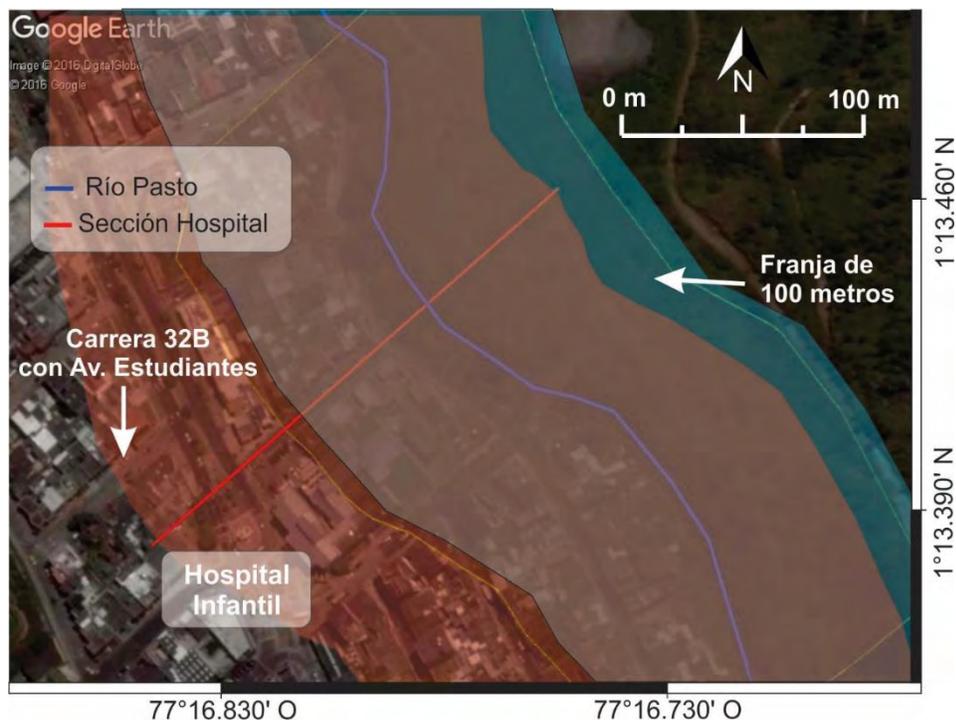


Figura 5.9 Posible zona de inundación en el sector del Hospital Infantil.

Ante la posible amenaza de flujos de lodo, la sección sombreada con color Azul, indica el ancho de la franja de 100 metros de lado y lado del río Pasto propuesta en el POT. La línea de color Azul representa el eje del río, la línea y franja de color Rojo representa el ancho que se puede inundar se evaluó el caudal obtenido en la sección de la Universidad de Nariño, si se respeta el principio de conservación de masa, este ancho tiene una longitud de 260.84 metros.

En el segundo chequeo, en la figura 5.10, se observa la franja que inundaría el flujo en la sección de la Universidad de Nariño con el caudal obtenido en la sección del Hospital Infantil de aproximadamente $910 \text{ m}^3/\text{s}$, se abarcó desde el eje del río y aguas abajo hacia la margen derecha un ancho de 14.57 metros y hacia la margen izquierda un ancho de 17.53 metros, con una altura del flujo de 9.80 metros. El flujo con este caudal ni siquiera alcanzaría a llenar la depresión topográfica del mismo río en esta sección.

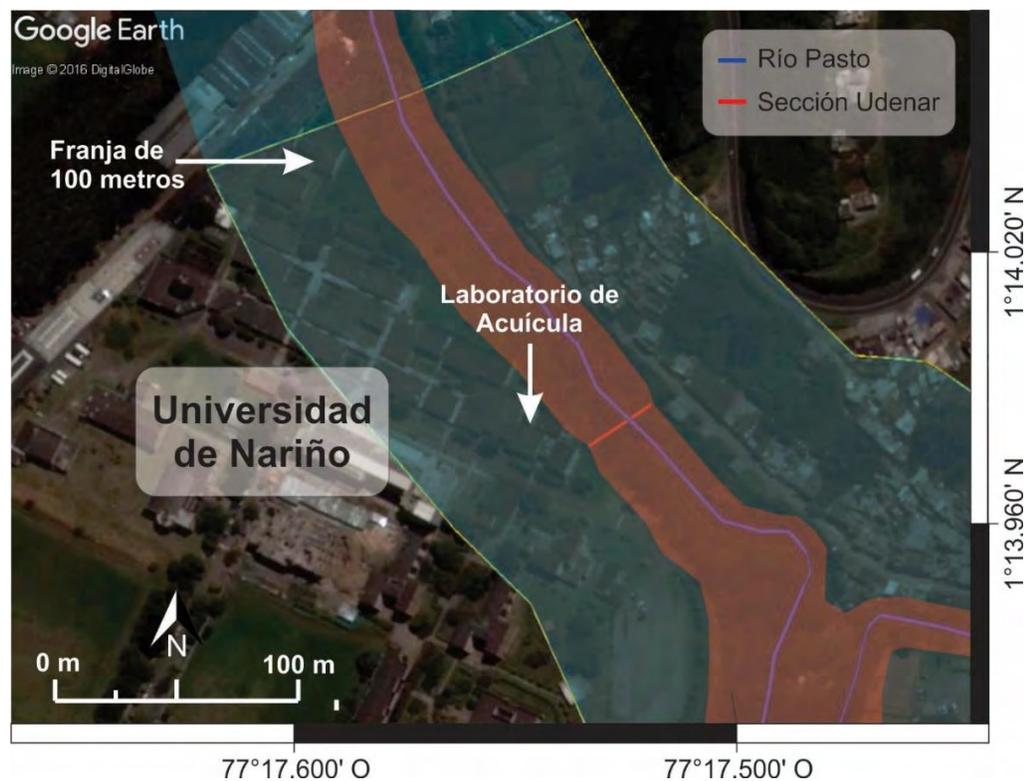


Figura 5.10 Posible zona de inundación en la Universidad de Nariño.

Ante la posible amenaza de flujos de lodo, la sección sombreada con color Azul, indica el ancho de la franja de 100 metros de lado y lado del río Pasto propuesta en el POT. La línea de color Azul representa el eje del río, la línea y franja de color Rojo representa el ancho que se puede inundar se evaluó el caudal obtenido en la sección del Hospital Infantil, si se respeta el principio de conservación de masa, este ancho tiene una longitud de 32.10 metros.

6. IDENTIFICACIÓN DE LAS EDIFICACIONES VULNERABLES.

La clasificación tipológica de las estructuras presentes en la universidad de Nariño sede Torobajo se desarrolló mediante observación (evaluación cualitativa), teniendo en cuenta la descripción que proporciona la tabla 3.1. Donde se describe tanto los materiales empleados en la construcción de las edificaciones como el valor de presión dinámica capaz de impartir un 90% de probabilidad de destrucción total. Se definen se definen 3 niveles de vulnerabilidad

Baja: estructuras mixtas (acero y Concreto) construcción institucional: estructuras que soportan hasta 83 kPa, en esta categoría se encuentra la tipología 5a diseñada con la última norma sismo resistente NSR10, lo anterior genera un grado de confiabilidad mayor para eventos de flujos de lodo

Media: edificaciones en mampostería reforzada: se clasifican todas las estructuras que se identificaron como tipología 3b además estas construcciones soportan presiones dinámicas de hasta 35 kPa.

Alta: mampostería reforzada – caso especial: estructuras con más de 25 años de construcción, cuyos parámetros sismo resistentes no se contemplan en la actual NSR10, soportan sobrepresiones de hasta 29 kPa.

En Anexo No. 3, se resume la clasificación estructural de las construcciones presentes en la universidad y el nivel de vulnerabilidad ante el impacto de presión dinámica por flujos de lodo. En donde para una mejor interpretación se asignaron diferentes colores (Ver tabla 6.1). Así, el color rojo denota vulnerabilidad alta dado que las estructuras expuestas soportarían hasta 29 kPa de sobrepresión, el color naranja se asigna a aquellas tipologías que resisten hasta 35 kPa y su nivel de vulnerabilidad es medio y para aquellas estructuras que soportan alrededor de 83 kPa (color amarillo) se considera que tiene una vulnerabilidad baja

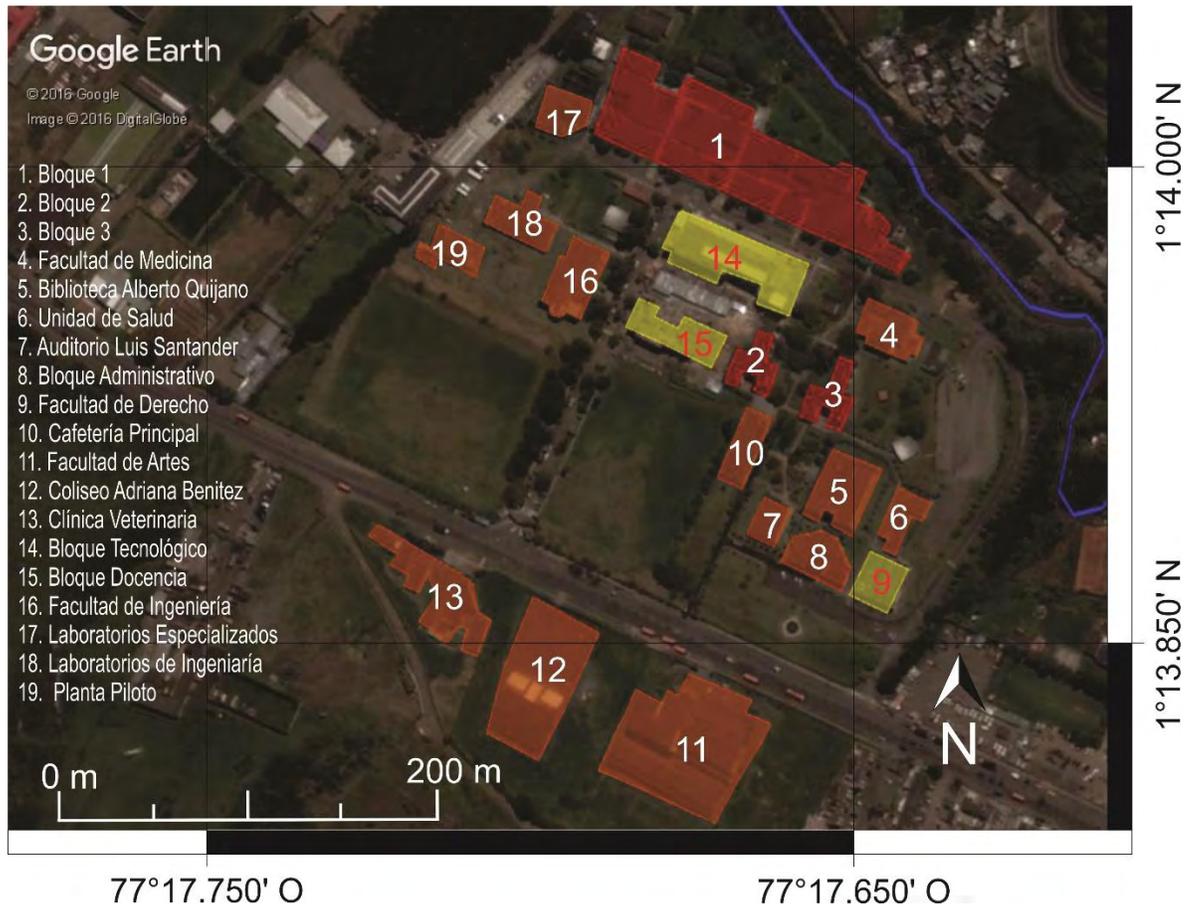


Figura 6.1 Mapa de Vulnerabilidad estructural.

Edificaciones presentes en la Universidad de Nariño – Sede Torobajo. (En color Rojo representa la vulnerabilidad alta, en naranja un grado de vulnerabilidad es media y por último en amarillo un grado de vulnerabilidad Baja).

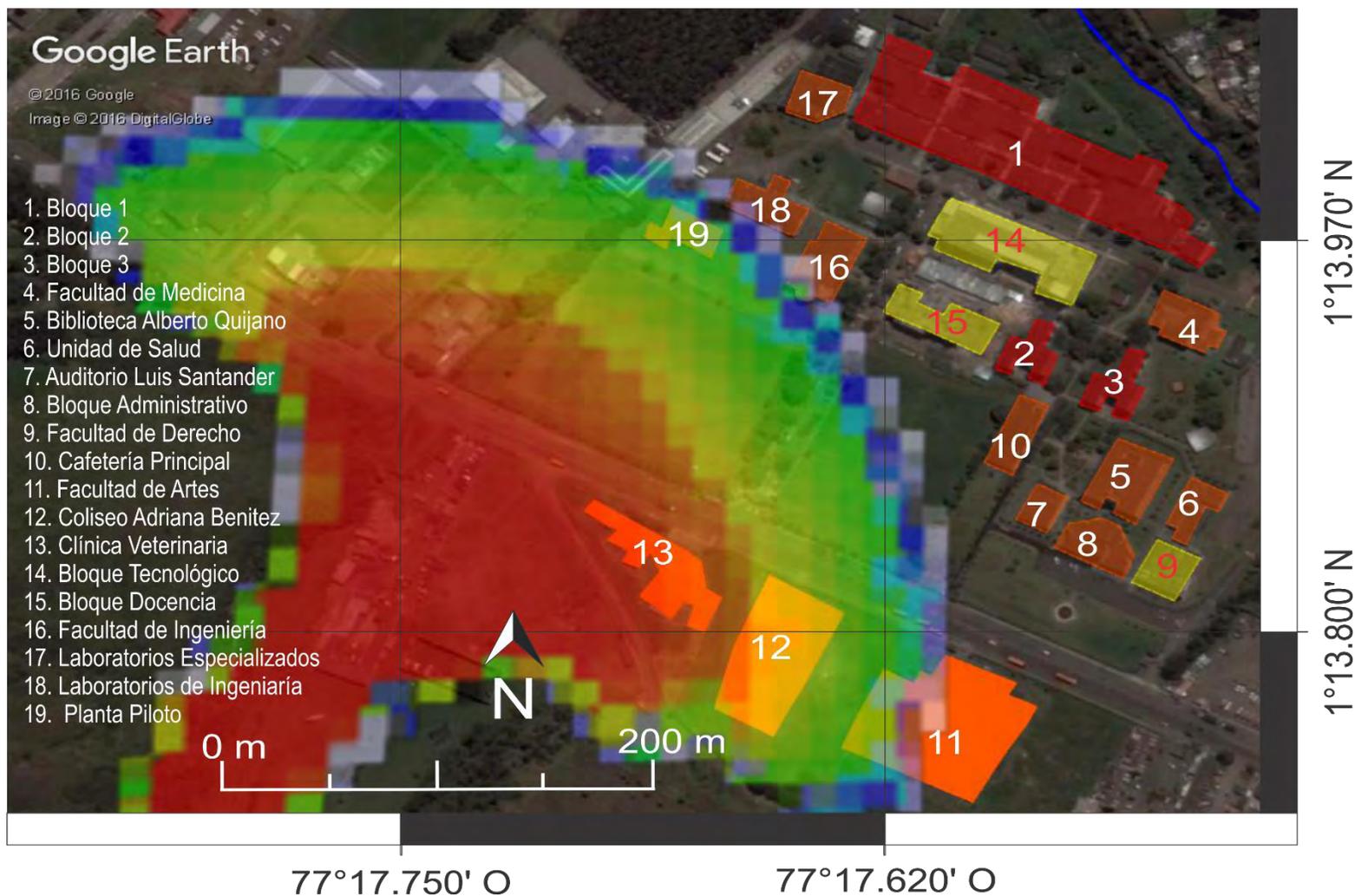


Figura 6.2 Identificación de la vulnerabilidad por flujo de lodos.

Las edificaciones en la sede Torobajo de la Universidad de Nariño mediante una metodología cualitativa, y se resaltan las estructuras que se encuentran sobre la zona de inundación.

7. CONCLUSIONES

El presente trabajo abarca el estudio de la amenaza general por flujos de lodo en la Universidad de Nariño desde dos frentes. El primero se estudió la probabilidad de inundación si el fenómeno se presentara en la quebrada el Cuscungo y el segundo se analizó a manera de ejercicio académico la zona que sería trayectoria de flujo de lodos en el río Pasto en la cual se restringe la habitacionalidad y el uso de las edificaciones por parte del POT tomado como base el Tercera Versión del Mapa de Amenaza del Volcán Galeras realizado por INGEOMINAS (1997)

En el modelamiento de flujos de lodo en la quebrada el Cuscungo se obtuvieron 2 distribuciones de probabilidad, la primera considerando 100 eventos con un ángulo de fricción basal constante de 10° y la segunda con ángulos de fricción basal variables aleatoriamente en un rango entre 9° y 17° , mostrándose como principal diferencia que la segunda presenta menos área con probabilidades de inundación mayores al 60% para las estructuras alcanzadas, esto debido a que el 85% de los eventos simulados poseen una fricción mayor a 10° , lo que produce una reducción en el alcance del flujo.

Las condiciones de la distribución 1, las principales estructuras que serían alcanzadas por el flujo serían la clínica veterinaria con un 90% de probabilidad, el coliseo Adriana Benítez con un 75%. La Facultad de Arte, la planta Piloto y la facultad de Ingeniería también se verían afectadas con un 20% de probabilidad. Por lo tanto, la estructura que se encontraría en mayor probabilidad de ser alcanzada en caso de producirse un flujo de lodo en la quebrada el Cuscungo sería la Clínica Veterinaria con una probabilidad mayor del 90%.

El factor más determinante para que el flujo alcance, es el ángulo de fricción basal, directamente proporcional al alcance del flujo.

Las zonas de inundación calculadas mediante esta investigación deberán visualizarse como guías para la interpretación de los escenarios analizados y no considerarse como predicciones exactas, debido a las incertidumbres que se presentan asociadas con los datos iniciales y con el modelo de elevación digital y ángulo de fricción basal.

Según los resultados del presente trabajo se observa que para que el río Pasto en la zona de la Universidad de Nariño inunde al menos 100 metros hacía el costado del campus, se necesitaría que transportara un caudal de más de $3500 \text{ m}^3/\text{s}$, que sería desproporcionado para las condiciones del río.

Sólo para inundar el cauce natural del río se necesitaría un caudal de $1387 \text{ m}^3/\text{s}$, que sería aproximadamente 86 veces el caudal máximo registrado para el río Pasto.

8. RECOMENDACIONES

Efectuar modelamientos más precisos en la quebrada Cuscungo, se necesita realizar correcciones al modelo de elevación digital, eliminando las barreras topográficas artificiales generadas por el DEM que evitan que se pueda localizar la pila de material en sitios aguas arriba del punto utilizado.

Corroborar los resultados de esta investigación es necesario hacer un estudio de los depósitos geológicos que se encuentren en la zona analizada para determinar si el rango de volumen escogido está dentro de los parámetros reales de la quebrada, además que con estos depósitos geológicos se podría realizar la calibración del modelo utilizado.

Tener en cuenta que la información proporcionada por TITAN2D es únicamente en el campo de velocidades y espesores, TITAN2D no arroja resultados acerca de la presión dinámica, para llegar a determinar el riesgo y vulnerabilidad de las estructuras se sugiere hacer un estudio más profundo, sería necesario utilizar otro programa, se recomienda el TITAN 2 FASES.

Tener un análisis más completo y plantear una franja de amenaza, es necesario comparar los resultados obtenidos con un análisis hidrológico en condiciones críticas con el fin de obtener caudales máximos y evaluarlos en todas las secciones de estudio que plantea esta investigación.

9. COROLARIO

La Corte Constitucional de Colombia, mediante Sentencia T-269, ordenó al SGC presentar una nueva actualización del mapa de Amenaza del Volcán Galeras. De acuerdo al plazo otorgado, y en cumplimiento de tal sentencia, el SGC presentó dicha actualización en diciembre de 2015.

El SGC tomó como referencia los depósitos descritos por Calvache (1990), para determinar los parámetros de simulación de flujo de lodos, se empleó la herramienta LAHARZ Schilling (1998); Schilling (2014) y de esta manera definir las áreas que podrían llegar a ser afectadas. En la zonificación (amenaza alta) por lahares, que muestra las áreas que podrían ser afectadas por este fenómeno asociado a actividad del volcán Galeras, propuesta en el mapa de amenaza en su cuarta versión SGC (2015), reduce de manera importante el área de afectación por este fenómeno en el sector de la Universidad de Nariño, Zona de estudio de este trabajo.

El SGC aclara que se debe tener en cuenta que las simulaciones efectuadas mediante la herramienta LAHARZ, muestran las zonas que podrían ser afectadas por lahares, pero no indican los parámetros físicos que caracterizarían dichos flujos, como son altura de inundación y velocidad del flujo. Particularmente, para la ciudad de San Juan de Pasto, debido al desarrollo urbanístico, es necesario realizar estudios más detallados sobre el comportamiento de los lahares y el grado de afectación, utilizando herramientas de simulación computacional que contemplen parámetros físicos que muestren mejor la dinámica de este fenómeno en zonas urbanas SGC (2015).

10. BIBLIOGRAFÍA

Alcaldía Municipal de San Juan de Pasto, 2015, Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Pasto.

Argoty T. 2010, Modelamiento de flujos de lodo provenientes del río Barranco mediante el software TITAN2D, Universidad de Nariño.

Acuerdo 004. 2015, Plan de Ordenamiento Territorial Municipal de Pasto.

Barbat, A., & Pujades, L. (2004). Evaluación de la Vulnerabilidad y del riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a Barcelona. In *Sísmica 2004: 6º Congreso Nacional de Sismología e Engenharia Sísmica* (pp. 229-252).

Baron, N. (1999). Técnicas estadísticas avanzadas en el análisis de Grandes Modelos Computacionales. In *Congreso latinoamericano de métodos computacionales para Ingeniería*. Argentina.

Caicedo C. 2012, Diseño e implementación de un sistema prototipo para la estimación de caudal en un canal abierto, basado en el procesamiento digital de imágenes como herramienta preliminar para el estudio de flujos de escombros en la cuenca del río Páez, Popayán, Universidad del Cauca.

Calvache V, M. L. (1990). Geology and volcanology of the recent evolution of Galeras volcano, Colombia (Master's thesis, Louisiana State University, Baton Rouge). Chanson H, 2002 *Hidráulica Del Flujo en Canales Abiertos*, Mc Graw Hill, Queensland Australia.

Castro, E., Valencia, A., Ojeda, J., Muñoz, F., & Fonseca, S. (2001). Evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa: Guía metodológica. INGEOMINAS/Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca/Escuela Colombiana de Ingeniería. Santa Fé de Bogotá, Colombia.

Chanson, H. (2002). *Hydraulics of stepped chutes and spillways*. CRC Press.

Chow, V. T. (1982). *Hidráulica de los Canales Abiertos*. Primera edición, Editorial Diana.

Congreso de Colombia, 1997, Ley 338 del 18 de julio de 1997.

Congreso de Colombia, 2012, Ley 1523 del 24 de abril de 2012.

Crosta, G. B., & Dal Negro, P. (2003). Observations and modelling of soil slip-debris flow initiation processes in pyroclastic deposits: the Sarno 1998 event. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(1/2), 53-69.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC. Universidad del Valle (2005). Optimización y Aplicaciones de los modelos Hidrodinámico, Sedimentológico y Morfológico del Río Cauca. Tramo La Balsa - La Virginia. Cali.

de Vallejo, L. G. (2002). Ingeniería geológica.

Delaite, G., Stinton, A. J., Sheridan, M. F., Thouret, J. C., & Burkett, B. (2004). A comparison of the TITAN2D and LAHARZ simulated debris flow hazards at El Misti Volcano, Southern Peru. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 6, p. 01099).

Dorta, D. O., Toyos, G., Oppenheimer, C., Pareschi, M. T., Sulpizio, R., & Zanchetta, G. (2007). Empirical modelling of the May 1998 small debris flows in Sarno (Italy) using LAHARZ. *Natural Hazards*, 40(2), 381-396.

Du, R. H., & Zhang, S. C. (1981). Characteristics of glacial mud-flows in south-eastern Qinghai-Xizang plateau. *J. Glaciol. Geocryol*, 10-16.

Duarte, C. A., & Niño, J. R. (2004). Introducción a la mecánica de fluidos. Univ. Nacional de Colombia.

García, A. M., Murcia, H. F., Cortés, G. P., & Laverde, C. A. (2011). Simulación de flujos Piróclásticos en el volcán Galeras con el código TITAN2D. *Geología Colombiana*, 36(1), 135.

Geophysical Mass Flow Group (GMFG). 2007. TITAN2D User Guide. Release 2.0.0. Buffalo, NY, USA: University at Buffalo.

Grieco, F., Capra, L., Groppelli, G., & Norini, G. (2007, May). Numerical modeling of debris avalanches at Nevado de Toluca (Mexico): implications for hazard evaluation and mapping. In *AGU Spring Meeting Abstracts*.

Heim, A. (1932). Bergsturz und menschenleben (No. 20). Fretz & Wasmuth.

IAVCEI, 1975 (Asociación internacional de vulcanología y química del interior de la Tierra), *Catalogo de Volcanes Activos*.

INGEOMINAS (1997). Mapa de amenazas volcánicas del Galeras (Tercera versión). Santa Fé de Bogotá

INGEOMINAS (2009) <http://www2.sgc.gov.co/Pasto/Publicaciones/Informes-tecnicos/Informe-Mensual/2009.aspx> San Juan de Pasto, Colombia.

INSTITUTO DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA DE MÉXICO (INEGI) 2015 Modelos digitales de elevación (MDE). Ciudad de México.

Macías, J. L., Capra, L., Arce, J. L., Espíndola, J. M., García-Palomo, A., & Sheridan, M. F. (2008). Hazard map of El Chichón volcano, Chiapas, México: Constraints posed by eruptive history and computer simulations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175(4), 444-458.

Martin J. 2002, Ingeniería de Ríos 1ra Edición, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Martins, J. L., Ferreira, M. L., Pardal, J. M., & Morano, C. A. (2012). Comparación de la estimación de la productividad del proceso de soldadura eléctrica por los métodos de simulación de Monte Carlo e Hipercubo Latino. *Información tecnológica*, 23(4), 21-32.

Melosh, H. J. (1986). The physics of very large landslides. *Acta Mechanica*, 64(1), 89-99.

Moriano, D. Paredes, P. Córdoba, G., Delgado, H., 2017, Evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones como parte del riesgo volcánico por lahares: Caso de estudio en la población de Santiago Xalitzi, en el flanco NE del volcán Popocatepetl, *Boletín de la Sociedad Geológica*.

Muñoz, E., Palacios, D., Namikawa, L., Sheridan, M., & Renschler, C. (2004). Contrast between computer simulations and field observations of Popocatepetl lahars. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 6, p. 04599).

Muñoz, J. L. A. Circulación de flujos. (2005). Monografía, (179).

Murcia, H. F., Hurtado, B. O., Cortés, G. P., Macías, J. L., & Cepeda, H. (2008). The ~ 2500 yr BP Chicoral non-cohesive debris flow from Cerro Machín Volcano, Colombia. *Journal of volcanology and geothermal research*, 171(3), 201-214.

Murcia, H. F., Sheridan, M. F., Macías, J. L., & Cortés, G. P. (2010). TITAN2D simulations of pyroclastic flows at Cerro Machín Volcano, Colombia: Hazard implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(2), 161-170.

Narváez, C. & Rosero, N. (2005) Modelamiento del Control Topográfico Ejercido por el Valle de Atríz Sobre los Flujos de Lodo Provenientes de la Quebrada Mijitayo. Universidad de Nariño.

Pilger, G. G., Costa, J. F. C., & Koppe, J. C. (2005). Improving the efficiency of the sequential simulation algorithm using Latin Hypercube Sampling. *Geostatistics Banff 2004*, 989-998.

Procter, J. N., Cronin, S. J., Fuller, I. C., Sheridan, M., Neall, V. E., & Keys, H. (2010). Lahar hazard assessment using Titan2D for an alluvial fan with rapidly changing geomorphology: Whangaehu River, Mt. Ruapehu. *Geomorphology*, 116(1), 162-174.

Procter, J. N., Cronin, S. J., Platz, T., Patra, A., Dalbey, K., Sheridan, M., & Neall, V. (2010). Mapping block-and-ash flow hazards based on Titan 2D simulations: a case study from Mt. Taranaki, NZ. *Natural hazards*, 53(3), 483-501.

Reed, W., & Monroe, J. (2000). *Fundamentos de geología*. Savage, S. B., & Hutter, K. (1989). The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *Journal of fluid mechanics*, 199, 177-215.

RUIZ, P. R. (2008). *Hidráulica de Canales*.

Sandi, H. (1983). Earthquake risk and earthquake preparedness: some qualitative aspects and quantification possibilities. In *Proceedings of the Seminar on Earthquake Preparedness* (pp. 79-93).

Schilling, S. P. (1998). LAHARZ; GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones (No. 98-638). US Geological Survey; Information Services [distributor].

Schilling, S. P. (2014). Laharz_py: GIS tools for automated mapping of lahar inundation hazard zones (No. 2014-1073). US Geological Survey.

Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2015. Actualización del mapa de amenaza volcánica de Galeras - En cumplimiento a la Sentencia de la Corte Constitucional T-269 de 2015, Memoria.

Sheridan, M. F., Stinton, A. J., Patra, A., Pitman, E. B., Bauer, A., & Nichita, C. C. (2005). Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 Little Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, Washington. *Journal of volcanology and geothermal research*, 139(1), 89-102.

Siebert, L. (1984). Large volcanic debris avalanches: characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of volcanology and geothermal research*, 22(3-4), 163-197.

Sotelo, A. G. (2002). *Hidráulica de canales*. UNAM. México.

Spence, R., Baxter, P., and Zuccaro, G., 2004a, Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow, a model and its application to Vesuvius: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133(1), 321-343.

- Stevens, N. F., Manville, V., & Heron, D. W. (2003). The sensitivity of a volcanic flow model to digital elevation model accuracy: experiments with digitised map contours and interferometric SAR at Ruapehu and Taranaki volcanoes, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 119(1), 89-105.
- Stinton, A. J., Sheridan, M. F., Patra, A., Dalbey, K., & Namikawa, L. (2004). Incorporation of variable bed friction into Titan2D mass-flow model: Application to Little Tahoma Peak avalanches (Washington). *Acta vulcanológica*, 16(1/2), 153.
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico*.
- Undro. (1987). *Manejo de emergencias volcanicas. Undro*.
- Valentine, G. A. (1998). Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 87(1), 117-140.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., & Myers, S. L. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros. Pearson Educación*. Williams, R. (2006). Modeling lahars using Titan2D for the southern drainage of Volcan Cotopaxi: impact on the city of Latacunga (Doctoral dissertation, Graduate School of the State University of New York at Buffalo).
- Xingkui, W., & Ning, Q. (1989). Turbulence characteristics of sediment-laden flow. *Journal of hydraulic Engineering*, 115(6), 781-800.
- Xu, D., & Feng, Q. (1979). Table of roughness of debris flow channel. In *Abstract of papers of first National Symposium on Debris Flow*.
- Zanchetta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M. T., Leoni, F. M., & Santacroce, R. (2004). Characteristics of May 5–6, 1998 volcanoclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): relationships to structural damage and hazard zonation. *Journal of volcanology and geothermal research*, 133(1), 377-393.

11. ANEXOS

ANEXO No. 1 Calculo del coeficiente de resistencia "C"

- a) **Formula de kutter.** En 1869, Gangillet y Kutter, ingenieros suizos, realizaron una investigación compleja de todos los experimentos disponibles sobre conductos abiertos, como resultado de estos estudios, dedujeron una formula empírica para calcular el coeficiente de resistencia "C" en la fórmula de Chezy.

$$C = \frac{23 + \frac{0.00155}{S} + \frac{1}{n}}{1 + \frac{n}{\sqrt{R}} \left(23 + \frac{0.00155}{S} \right)}, \quad \text{sistema métrico}$$

Donde:

S = pendiente longitudinal del canal

n = coeficiente de rugosidad del material

R = radio hidráulico del canal

En esta fórmula, C se expresa en función del radio hidráulico "R" y la pendiente "S" así como el coeficiente de rugosidad "n" cuyo valor aumenta con el grado aspereza del canal.

Tabla a. Valores del factor de rugosidad del material (n), en la fórmula de Kutter.

Tipo de Canal abierto	Límites de "n"	Valor utilizado común
Cemento bien pulido	0.010 - 0.013	0.010
Tubo de concreto simple	0.012 - 0.016	0.013
Canales y zanjas: en tierra alienada y uniforme	0.017 - 0.025	0.020
En roca lisa	0.025 - 0.035	0.033
Excavado en tierra	0.025 - 0.033	0.0275
Mampostería de cemento	0.017 - 0.030	-
Canales labresto en roca	0.035 - 0.045	0.040
Canales de tabique rojo con mortero de cemento	0.012 - 0.017	0.015
Canales de madera cepillada	0.01	0.010
Canal de concreto acabado normal	0.014	0.014

- b) **Ecuación de Bazin.** En 1897, el ingeniero hidráulico francés H. Bazin propuso una ecuación para calcular el valor de C de Chezy el cual se consideraba como una función de R pero no de la pendiente del canal (S):

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}}$$

Tabla b. Valores propuestos para el “m” de Bazin.

Descripción del canal	" m" de Bazin
Para superficies lisas de cemento	0.11
Madera sin Cepillar, concreto o ladrillo	0.21
Canales en tierra perfectas condiciones	1.54
Canales en tierra en condiciones normales	2.36
Canales en tierra en condiciones rugosas	3.17
Canales labrados en roca	5.5
Mampostería en bloques de piedra	0.83

- b) **Ecuación de Manning.** En 1889 el ingeniero irlandés Robert Manning presenta una ecuación para determinar el valor de “C”, en función del radio hidráulico y la rugosidad del material de que se construya el canal.

Para el sistema métrico la expresión de “C” es:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n}$$

Tabla b. Valores del coeficiente “n” de Manning.

Material	Valores		
	Mínimo	Normal	Máximo
Arroyo de montaña con muchas piedras	0.035	0.040	0.050
Tepetate (liso y uniforme)	0.025	0.035	0.040
Tierra en buenas condiciones	0.017	0.020	0.025
Tierra libre de vegetación	0.020	0.025	0.033
Mampostería seca	0.025	0.030	0.033
Mampostería con cemento	0.017	0.020	0.025
Concreto	0.013	0.017	0.020
Asbesto cemento	0.090	0.010	0.011
polietileno y PVC	0.007	0.008	0.009
Fierro fundido (Fo, Fo)	0.011	0.014	0.016
Acero	0.013	0.015	0.017
Vidrio, Cobre	0.009	0.010	0.010

FUENTE: RUIZ, P. R. (2008). Hidráulica de Canales.

ANEXO No. 2 Ángulo de fricción y volumen asignado.
100 escenarios en las 2 distribuciones de probabilidad.

Evento	Ang. Fricción Basal	Ang. Fricción Basal	Ang. Fricción Interno	Vol.	Evento	Ang. Fricción Basal	Ang. Fricción Basal	Ang. Fricción Interno	Vol.
	Dist. 1	Dist. 2				Dist. 1	Dist. 2		
	[°]	[°]	[°]	[m³]		[°]	[°]	[°]	[m³]
1	10	9.2	33	23,262	51	10	16.8	33	28,836
2	10	12.4	33	65,412	52	10	9.7	33	58,534
3	10	11.2	33	60,182	53	10	9.5	33	50,504
4	10	11.0	33	33,301	54	10	14.2	33	37,343
5	10	10.2	33	64,977	55	10	15.5	33	11,017
6	10	11.6	33	53,095	56	10	11.1	33	36,851
7	10	9.1	33	25,463	57	10	16.6	33	23,885
8	10	15.2	33	33,809	58	10	12.7	33	56,378
9	10	12.5	33	15,908	59	10	14.4	33	57,586
10	10	9.4	33	15,010	60	10	12.6	33	31,659
11	10	14.7	33	40,520	61	10	9.9	33	50,396
12	10	13.7	33	68,840	62	10	13.8	33	19,706
13	10	13.0	33	34,525	63	10	12.3	33	13,699
14	10	14.1	33	59,503	64	10	10.4	33	19,336
15	10	12.0	33	41,828	65	10	15.0	33	46,138
16	10	15.8	33	67,063	66	10	9.5	33	42,281
17	10	11.8	33	47,718	67	10	16.7	33	46,711
18	10	14.0	33	68,003	68	10	16.0	33	26,909
19	10	13.1	33	39,337	69	10	9.3	33	10,640
20	10	11.8	33	39,337	70	10	10.7	33	64,124
21	10	9.9	33	35,451	71	10	15.6	33	48,557
22	10	15.7	33	53,984	72	10	14.4	33	32,415
23	10	16.3	33	49,159	73	10	12.2	33	66,431
24	10	10.5	33	69,404	74	10	9.1	33	31,227
25	10	11.4	33	30,358	75	10	11.7	33	52,586
26	10	14.3	33	12,012	76	10	13.5	33	12,701
27	10	16.4	33	20,048	77	10	13.2	33	38,560
28	10	15.4	33	43,648	78	10	15.8	33	60,399
29	10	16.2	33	44,660	79	10	11.0	33	47,291
30	10	10.5	33	12,405	80	10	16.1	33	16,402
31	10	12.4	33	28,263	81	10	10.8	33	63,221
32	10	14.1	33	43,105	82	10	11.6	33	14,096
33	10	13.4	33	58,386	83	10	16.6	33	34,963
34	10	14.5	33	45,072	84	10	14.6	33	30,766
35	10	12.1	33	56,671	85	10	14.9	33	24,403
36	10	14.8	33	62,590	86	10	10.3	33	49,431
37	10	11.4	33	26,169	87	10	10.0	33	15,529
38	10	13.6	33	68,313	88	10	13.8	33	61,151
39	10	9.8	33	27,682	89	10	13.1	33	21,281
40	10	16.4	33	17,320	90	10	15.4	33	18,562
41	10	10.8	33	17,807	91	10	10.0	33	54,817
42	10	16.5	33	41,219	92	10	15.0	33	44,356
43	10	12.8	33	22,424	93	10	13.3	33	65,763
44	10	15.3	33	63,320	94	10	17.0	33	10,115
45	10	12.9	33	51,290	95	10	11.9	33	36,470
46	10	11.3	33	39,786	96	10	16.9	33	29,475
47	10	15.9	33	25,586	97	10	10.1	33	52,240
48	10	12.1	33	21,030	98	10	14.0	33	37,816
49	10	9.6	33	54,429	99	10	15.1	33	61,957
50	10	10.6	33	55,672	100	10	13.5	33	22,836

ANEXO No. 3 Caracterización tipológica.
Estructuras Universidad de Nariño – Sede Torobajo.

N	BLOQUE	CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA	TIPOLOGÍA	VULNERABILIDAD	PRESION DINAMICA
1	BLOQUE 1	Mampostería Reforzada con muros en Ladrillo y vigas de madera y de acero, piso de concreto. Techo: Madera y Tejas. La estructura presenta fallas en sus columnas por compresión a la menor carga latera puede colapsar la estructura.	2	ALTA	29 Kpa
2	BLOQUE 2	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Caso especial ya que esta estructura fue construida sin norma sismo resistente y tiene una edad de más de 30 años, por motivos de seguridad se la clasifica en esta tipología.	2	ALTA	29 Kpa
3	BLOQUE 3	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Caso especial ya que esta estructura fue construida sin norma sismo resistente y tiene una edad de más de 30 años, por motivos de seguridad se la clasifica en esta tipología	2	ALTA	29 Kpa
4	FACULTAD DE MEDICINA	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Dadas las características de los materiales de la estructura se clasifica en tipología 3b.	3b	MEDIA	35 Kpa

5	BIBLIOTECA ALBERTO QUIJANO	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Dadas las características de los materiales de la estructura se clasifica en tipología 3b.	3b	MEDIA	35 Kpa
6	UNIDAD DE SALUD	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Dadas las características de los materiales de la estructura se clasifica en tipología 3b.	3b	MEDIA	35 Kpa
7	AUDITORIO LUIS SANTANDER	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Dadas las características de los materiales de la estructura se clasifica en tipología 3b.	3b	MEDIA	35 Kpa
8	BLOQUE ADMINISTRATIVO	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Dadas las características de los materiales de la estructura se clasifica en tipología 3b.	3b	MEDIA	35 Kpa
9	FACULTAD DE DERECHO	Estructura Mixta (acero y Concreto) construcción institucional. Muro: Ligeros y pesados. Partes interiores: columnas y pernos metálicos. Dadas las características de los materiales esta la estructura se clasifica en 5a, además de estar diseñada con la última norma Sismo Resistente, genera un grado de confiabilidad mayor, para eventos de flujos de lodo.	5a	BAJA	83 Kpa

10	CAFETERÍA PRINCIPAL	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Dadas las características de los materiales de la estructura se clasifica en tipología 3b.	3b	MEDIA	35 Kpa
11	FACULTAD DE ARTES	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Dadas las características de los materiales de la estructura se clasifica en tipología 3b.	3b	MEDIA	35 Kpa
12	COLISEO ADRIANA BENITES	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Dadas las características de los materiales de la estructura se clasifica en tipología 3b.	3b	MEDIA	35 Kpa
13	CLÍNICA VETERINARIA	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Dadas las características de los materiales de la estructura se clasifica en tipología 3b.	3b	MEDIA	35 Kpa
14	BLOQUE TECNOLÓGICO	Estructura Mixta (acero y Concreto) construcción institucional de 6 pisos incluidos sótanos. Muro: Ligeros y pesados. Partes interiores: pernos metálicos con yeso o placas de yeso, bloques de concreto. Dadas las características de los materiales esta la estructura se clasifica en 5a, además de estar diseñada con la última norma Sismo Resistente, genera un grado de confiabilidad mayor, para eventos de flujos de lodo.	5a	BAJA	83 Kpa

15	BLOQUE DOCENCIA	Estructura Mixta (acero y Concreto) construcción institucional de 8 pisos incluidos sótanos. Muro: Ligeros y pesados. Partes interiores: pernos metálicos con yeso o placas de yeso, bloques de concreto. Dadas las características de los materiales esta la estructura se clasifica en 5a, además de estar diseñada con la última norma Sismo Resistente, genera un grado de confiabilidad mayor, para eventos de flujos de lodo.	5a	BAJA	83 Kpa
16	FACULTAD DE INGENIERÍA	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Dadas las características de los materiales de la estructura se clasifica en tipología 3b.	3b	MEDIA	35 Kpa
17	LABORATORIOS ESPECIALIZADOS	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Dadas las características de los materiales de la estructura se clasifica en tipología 3b.	3b	MEDIA	35 Kpa
18	LABORATORIOS DE INGENIERÍA	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Dadas las características de los materiales de la estructura se clasifica en tipología 3b.	3b	MEDIA	35 Kpa
19	PLANTA PILOTO	Mampostería Reforzada: Edificios de oficinas. Muros en Ladrillo macizo, bloque de hormigón o tejas de arcilla o bloque de concreto con ladrillo y piedra. Techo: Plano o inclinado suavemente con viguetas de madera o acero ligero. Dadas las características de los materiales de la estructura se clasifica en tipología 3b.	3b	MEDIA	35 Kpa

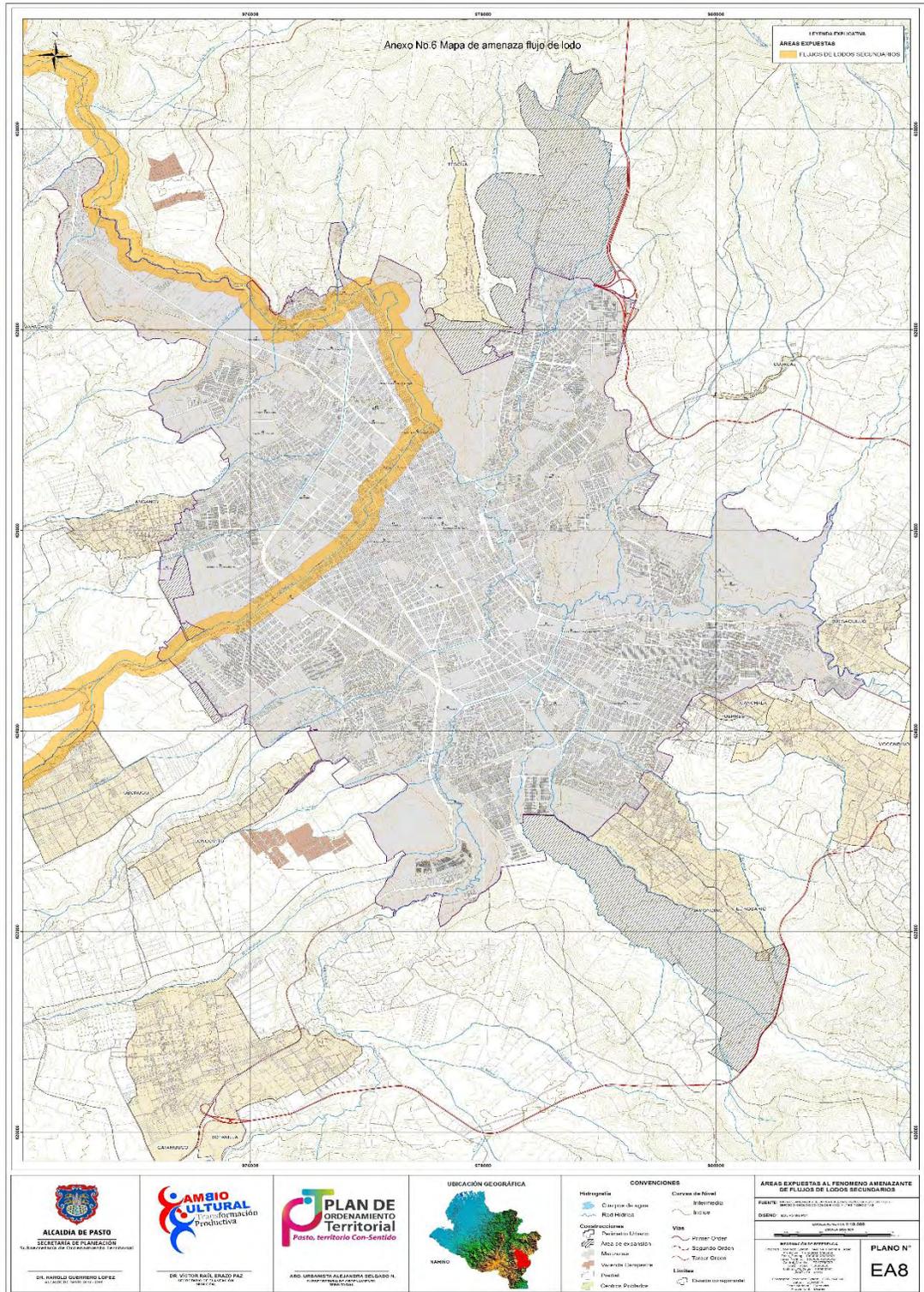
ANEXO No. 4 Cálculo características sección sector Hospital Infantil.

CASO 1 SECCIÓN HOSPITAL INFANTIL Q=3546 M3/S			
LOCALIZACIÓN H.	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS		CAUDAL CALCULADO (m3/S)
ITERACIÓN 1	ÁREA MOJADA (m2)	778.650	2117.534
	PERÍMETRO (m)	252.756	
	RADIO HIDRÁULICO (m)	3.081	
	ALTURA LODO	10.500	
	n Manning	0.08	
	PENDIENTE S(m/m)	0.010	
ITERACIÓN 2	ÁREA MOJADA (m2)	912.100	2683.122
	PERÍMETRO (m)	257.000	
	RADIO HIDRÁULICO (m)	3.549	
	ALTURA LODO	11.000	
	n Manning	0.08	
	PENDIENTE S(m/m)	0.010	
ITERACIÓN 3	ÁREA MOJADA (m2)	1170.693	3850.878
	PERÍMETRO (m)	266.860	
	RADIO HIDRÁULICO (m)	4.387	
	ALTURA LODO	12.000	
	n Manning	0.08	
	PENDIENTE S(m/m)	0.010	
ITERACIÓN 8	ÁREA MOJADA (m2)	1118.244	3605.936
	PERÍMETRO (m)	264.882	
	RADIO HIDRÁULICO (m)	4.222	
	ALTURA LODO	11.800	
	n Manning	0.08	
	PENDIENTE S(m/m)	0.010	
ITERACIÓN 10	ÁREA MOJADA (m2)	1105.191	3545.299
	PERÍMETRO (m)	264.419	
	RADIO HIDRÁULICO (m)	4.180	
	ALTURA LODO	11.750	
	n Manning	0.08	
	PENDIENTE S(m/m)	0.010	

ANEXO No. 5 Cálculo características sección sector Universidad de Nariño.

CASO 2 SECCIÓN HOSPITAL INFANTIL LOS ÁNGELES Q= 908.026 M3/S			
LOCALIZACIÓN UDENAR	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS		CAUDAL CALCULADO (m3/s)
ITERACIÓN 1	ÁREA MOJADA (m ²)	197.265	944.547
	PERÍMETRO (m)	39.974	
	RADIO HIDRÁULICO (m)	4.935	
	ALTURA LODO	10.000	
	n Manning	0.08	
	PENDIENTE S(m/m)	0.016	
ITERACIÓN 2	ÁREA MOJADA (m ²)	165.947	777.308
	PERÍMETRO (m)	36.674	
	RADIO HIDRÁULICO (m)	4.525	
	ALTURA LODO	9.000	
	n Manning	0.07	
	PENDIENTE S(m/m)	0.016	
ITERACIÓN 3	ÁREA MOJADA (m ²)	181.278	858.672
	PERÍMETRO (m)	38.324	
	RADIO HIDRÁULICO (m)	4.730	
	ALTURA LODO	9.500	
	n Manning	0.08	
	PENDIENTE S(m/m)	0.016	
ITERACIÓN 7	ÁREA MOJADA (m ²)	187.594	892.477
	PERÍMETRO (m)	38.984	
	RADIO HIDRÁULICO (m)	4.812	
	ALTURA LODO	9.700	
	n Manning	0.08	
	PENDIENTE S(m/m)	0.016	
ITERACIÓN 8	ÁREA MOJADA (m ²)	190.792	909.656
	PERÍMETRO (m)	39.314	
	RADIO HIDRÁULICO (m)	4.853	
	ALTURA LODO	9.800	
	n Manning	0.08	
	PENDIENTE S(m/m)	0.016	

ANEXO No. 6 Mapa de amenaza volcánica galeras.



FUENTE: mapa de amenaza volcánica galeras. Tercera versión 1997 servicio geológico colombiano, antes INGEOMINAS.