



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**TEMA: ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA UBICACIÓN DE UN
SISTEMA DE MALLAS FLEXIBLES DE RETENCIÓN DE
SÓLIDOS DEL FLUJO DE LODOS DEL VOLCÁN
COTOPAXI**

AUTOR: LLERENA OÑA, ERIKA VANESSA

DIRECTOR: ING. SANDOVAL E., WASHINGTON R. Ph.D.

SANGOLQUÍ

2016



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA UBICACIÓN DE UN SISTEMA DE MALLAS FLEXIBLES DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS DEL FLUJO DE LODOS DEL VOLCÁN COTOPAXI”** realizado por la señorita **ERIKA VANESSA LLERENA OÑA**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a la señorita **ERIKA VANESSA LLERENA OÑA** para que los sustente públicamente.

Sangolquí, 30 de Septiembre del 2016



ING. WASHINGTON RAMIRO SANDOVAL ERAZO Ph. D.

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ERIKA VANESSA LLERENA OÑA**, con cédula de identidad N° 1717062895, declaro que este trabajo de titulación **“ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA UBICACIÓN DE UN SISTEMA DE MALLAS FLEXIBLES DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS DEL FLUJO DE LODOS DEL VOLCÁN COTOPAXI”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 30 de Septiembre del 2016

ERIKA VANESSA LLERENA OÑA

C.C.: 1717062895



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **ERIKA VANESSA LLERENA OÑA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **"ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA UBICACIÓN DE UN SISTEMA DE MALLAS FLEXIBLES DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS DEL FLUJO DE LODOS DEL VOLCÁN COTOPAXI"** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 30 de Septiembre del 2016

ERIKA VANESSA LLERENA OÑA

C.C.: 1717062895

DEDICATORIA

A mis padres, Patricia y Luis,

A mi hermana, Gabriela,

A mi abuelito, Enrique,

A Andrés.

Erika V. Llerena Oña

AGRADECIMIENTO

A Dios por poner a personas tan maravillosas en mi camino, por darme fuerza y acompañarme en todo momento.

A mis papás y mi hermana por ser mi ejemplo de esfuerzo y constancia, por el apoyo y el amor que siempre han sabido darme, porque su esfuerzo también se ve reflejado en la culminación de esta etapa.

A Andrés por ser siempre mi apoyo incondicional, en los buenos y sobre todo en los malos momentos, por su comprensión y sus consejos.

No tengo palabras para agradecerles lo suficiente.

A mi tutor, Ing. Washington Sandoval, por ser un gran docente y persona, por guiarme durante todo el desarrollo del proyecto.

Al Ing. Marcelo Romo y al Ing. Oswaldo Padilla, docentes del Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción y al Ing. Fausto Miranda, Pivaltec, por su colaboración en el proyecto.

Erika V. Llerena Oña

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Localización geográfica y descripción del área de estudio	2
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos Específicos	5
1.5. Metas del proyecto	5
CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN DE LOS FLUJOS DE LODO	6
2.1. Tipos de Flujos de lodos	6
2.1.1. Flujos de lodo.....	6
2.1.2. Clasificación de flujo de lodos	6
2.1.2.1. Clasificación por el contenido de partículas finas	6
2.1.2.2. Clasificación por las causas que los generan	7
2.1.2.3. Clasificación de acuerdo al fluido intersticial.....	8

2.1.3. Lahares	9
2.2. Determinación del volumen de lahares por erupción del volcán Cotopaxi	10
2.2.1. Volcán Cotopaxi	10
2.2.2. Glaciar del volcán Cotopaxi	12
2.2.3. Escenarios Eruptivos	15
2.2.4. Desbordamiento río Damas	19
2.3. Parámetros físicos de los flujos de lahares	20
2.3.1. Densidad del flujo	20
2.3.2. Coeficiente de Fricción / Fricción de Coulomb	21
2.3.3. Fricción viscosa – turbulenta	21
2.3.4. Volumen total	22
2.3.5. Hidrograma	22
CAPÍTULO III: MORFOMETRÍA	24
3.1. Delimitación de la zona de implantación del sistema	24
3.2. Estudio de posibles secciones de ubicación	25
3.3. Volúmenes de sólidos retenidos	29
3.3.1. Asentamiento de la malla	30
3.3.2. Ángulo de sedimentación del material acumulado	30
3.3.3. Cálculo de volúmenes	30
3.4. Determinación de parámetros físicos de flujos del Cotopaxi	32
3.4.1. Densidad del flujo	32
3.4.2. Porcentaje de partículas gruesas en depósito encontrado en el río Tambo	33
3.4.3. Volumen total e Hidrograma	34
3.4.4. Modelación del flujo de lodos producido durante una posible erupción del volcán Cotopaxi	35

	ix
3.4.5. Velocidad crítica de desplazamiento	42
CAPÍTULO IV: MALLAS GEOBRUGG	43
4.1. Generalidades	43
4.1.1. Disposición de las barreras	44
4.1.2. Elementos del sistema de mallas flexibles	45
4.2. Parámetros de Diseño	50
4.2.1. Datos de entrada.....	50
4.2.2. Factor de seguridad	50
4.3. Aplicaciones existentes de estas mallas.....	51
4.3.1. Retención de flujo de lodos	51
4.3.2. Contra deslizamientos de tierras	54
4.3.3. Contra avalancha de nieve.....	55
4.3.4. Contra caída de rocas y desprendimiento de bloques	55
4.3.5. Otros usos.....	56
CAPÍTULO V: DISEÑO Y UBICACIÓN DE LAS MALLAS.....	57
5.1. Número de mallas flexibles para el sistema.....	57
5.2. Distancia entre mallas.....	57
5.3. Características físicas de las secciones	57
5.3.1. Sección 1	58
5.3.2. Sección 2	58
5.3.3. Sección 3	59
5.3.4. Sección 4	59
5.3.5. Sección 5	59
5.3.6. Sección 6	60
5.3.7. Sección 7	60
5.3.8. Sección 8	61
5.3.9. Sección 9	61

	x
5.3.10. Sección 10	62
5.4. Volúmenes de retención entre mallas.....	62
5.5. Diseño de las mallas flexibles ante las cargas propuestas	64
5.5.1. Presión hidrostática.....	64
5.5.2. Presión hidrodinámica.....	65
5.5.3. Esfuerzo de corte	66
5.5.4. Diseño de los cables de soporte	67
5.5.4.1. Estados de Carga	67
5.5.4.2. Modelo Estructural.....	70
5.5.4.3. Dimensionamiento del cable.....	72
CAPÍTULO VI: COSTOS DEL PROYECTO	76
6.1. Cuantificación de volúmenes de obra	76
6.2. Indicadores económicos	77
CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES.....	81
BIBLIOGRAFÍA.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Población de la Provincia de Pichincha con potencial afectación en caso de una erupción del volcán Cotopaxi.....	1
Tabla 2. Glaciares del volcán Cotopaxi.....	13
Tabla 3. Estimación de volúmenes del casquete glaciar del Cotopaxi.....	15
Tabla 4. Coordenadas UTM del margen derecho e izquierdo de las secciones transversales.....	28
Tabla 5. Altura, ancho superior (bo) e inferior (bu) del sistema de mallas flexibles en cada sección.	29
Tabla 6. Ecuaciones para estimar la velocidad promedio de las oleadas del flujo de lodos.	38
Tabla 7. Relaciones semi-teóricas para el cálculo de los coeficientes de resistencia del flujo como función del caudal pico.....	38
Tabla 8. Velocidad crítica de desplazamiento de las partículas.....	42
Tabla 9. Clases de riesgo de acuerdo a las consecuencias potenciales. ...	51
Tabla 10. Factor de seguridad de carga γF para diferentes clases de riesgo y períodos de tiempo.....	51
Tabla 11. Distancia entre mallas.....	57
Tabla 12. Cálculo del volumen de retención de la Sección 1.....	63
Tabla 13. Volumen retenido en cada sección.	63
Tabla 14. Cálculo de la carga hidrostática para cada sección	65
Tabla 15. Cálculo de la carga hidrodinámica para cada sección	66
Tabla 16. Cálculo del esfuerzo cortante para cada sección.....	67
Tabla 17. Cálculo de carga para cada cable de la Sección 1.	69
Tabla 18. Cálculo de la carga por metro para cada cable de la sección 1..	70
Tabla 19. Fuerza Axial, área de acero, flecha y longitud de cada cable de la sección 1.	73
Tabla 20. Sección transversal de cada cable de la sección 1.....	73
Tabla 21. Presupuesto referencial del sistema de barreras flexibles	76
Tabla 22. Altura y Volumen de embalse presas río El Salto y río Pita.....	78
Tabla 23. Costo de las obras de protección propuestas por Bonito & Naranjo, 2016.	78

Tabla 24. Costo de obras de protección para el flujo de lodos drenaje norte del volcán Cotopaxi por m ³	78
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del proyecto.....	2
Figura 2. Región de influencia del volcán Cotopaxi.	3
Figura 3. Ciudad de Armero, Colombia después del flujo de lodos de 1985. 6	6
Figura 4. Clasificación de flujo de lodos por las causas que los generan.	7
Figura 5. Clasificación de flujo de lodos de acuerdo a la densidad aparente	8
Figura 6. Morfología de un lahar en movimiento.....	9
Figura 7. Lahares secundarios en el Cotopaxi.....	10
Figura 8. Volcán Cotopaxi visto desde el norte.....	11
Figura 9. Capas de fragmentos de escoria, ceniza y pómez de distintas erupciones del volcán Cotopaxi, ubicado en la carretera Panamericana.....	12
Figura 10. Retroceso del glaciar del volcán Cotopaxi.	13
Figura 11. Esquema de Escenario 1.....	16
Figura 12. Esquema del Escenario 2.	17
Figura 13. Esquema del Escenario 3.	17
Figura 14. Esquema del Escenario 4.	18
Figura 15. Rocas atascadas en el cauce del río Damas.....	19
Figura 16. Vestigios de la crecida del río Damas.....	19
Figura 17. Hidrograma de tres puntos.	23
Figura 18. Modelo Digital del terreno en formato TIN.....	24
Figura 19. Posibles zonas de inundación en el drenaje norte del volcán Cotopaxi.....	25
Figura 20. Selección de la ubicación de las mallas flexibles.....	26
Figura 21. Criterio de ubicación de las mallas	27
Figura 22. Esquema de ubicación de las secciones transversales.....	28
Figura 23. Material retenido tras la malla flexible.....	29
Figura 24. Material depositado detrás de la malla.	30
Figura 25. Altura máxima del material retenido por la malla flexible.....	31
Figura 26. Cálculo del área de curvas de nivel.	32
Figura 27. Depósito del lahar ubicado en la zona alta del río Tambo.	34
Figura 28. Hidrograma Cuenca Norte volcán Cotopaxi.....	35

	xiv
Figura 29. Pre-procesamiento modelo en HEC-RAS.....	40
Figura 30. Resultados de la máxima profundidad del flujo de lodos del volcán Cotopaxi.....	40
Figura 31. Resultados de velocidad del flujo de lodos del volcán Cotopaxi.	41
Figura 32. Máximo ancho alcanzado por el flujo.....	41
Figura 33. Barrera Flexible instalada en Berner Oberland.....	44
Figura 34. Sistema tipo UX (arriba) y VX (abajo).....	44
Figura 35. Elementos de una malla flexible.	45
Figura 36. Red de anillos.	46
Figura 37. Anillos de frenado y apoyos.....	47
Figura 38. Anclaje del sistema.	48
Figura 39. Protección contra la abrasión.	49
Figura 40. Componentes del sistema de mallas flexibles Geobrugg.	49
Figura 41. Barrera flexible para retención de flujo de lodos en Tobinosu, Japón.	52
Figura 42. Malla flexible para retención de flujo de lodos en Goiserer Weissenbach, Austria.	53
Figura 43. Barrera múltiple para retención de flujo de lodos. Milibach, Meiringen Suiza.	53
Figura 44. Diseño especial de barrera tipo VX.....	54
Figura 45. Malla flexible para contra deslizamiento de tierra.	54
Figura 46. Barrera flexible contra avalancha de nieve.	55
Figura 47. Barrera flexible contra caída de rocas.	55
Figura 48. Disipador para el frenado del frente del flujo de detritos.....	56
Figura 49. Esquema Sección 1.....	58
Figura 50. Esquema Sección 2.....	58
Figura 51. Esquema Sección 3.....	59
Figura 52. Esquema Sección 4.....	59
Figura 53. Esquema Sección 5.....	60
Figura 54. Esquema Sección 6.....	60
Figura 55. Esquema Sección 7.....	61
Figura 56. Esquema Sección 8.....	61
Figura 57. Esquema Sección 9.....	62

	xv
Figura 58. Esquema Sección 10.....	62
Figura 59. Esquema estado de Carga 1.....	68
Figura 60. Esquema Estado de Carga 2.....	68
Figura 61. Espaciamiento de cables de soporte.....	69
Figura 62. Ancho cooperante para los cables de soporte.....	70
Figura 63. Vista superior del cable de soporte.....	71
Figura 64. Modelo estructural del cable 1 de la sección 1 en SAP2000.....	71
Figura 65. Diagrama de Fuerzas Axiales Cable 1, Sección 1.....	72

RESUMEN

El proyecto de titulación “ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA UBICACIÓN DE UN SISTEMA DE MALLAS FLEXIBLES DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS DEL FLUJO DE LODOS DEL VOLCÁN COTOPAXI” determina la ubicación idónea de un conjunto de mallas flexibles que permitan retener el mayor volumen de sólidos provenientes del flujo de lahares que se pueden producir durante una erupción del volcán Cotopaxi, el cual en el año 2015 incrementó considerablemente su actividad volcánica. Así como, determina todos los parámetros necesarios para el diseño de dichas mallas. Se tomó como referencia los diferentes estudios realizados sobre el volcán y sobre el flujo de lahares generados en distintos periodos eruptivos de los cuales se tiene registros, el tramo seleccionado corresponde al río Pita. De los resultados obtenidos se presenta una alternativa a las medidas de mitigación que se han propuesto contra este enorme riesgo y se realiza un análisis que permite comparar el sistema propuesto, que tiene mayores beneficios tanto técnicos como económicos, con otras alternativas de obras de mitigación.

PALABRAS CLAVE:

- **VOLCÁN COTOPAXI**
- **FLUJO DE LODOS**
- **OBRAS DE MITIGACIÓN**
- **MALLAS FLEXIBLES**
- **RETENCIÓN DE LAHARES**

ABSTRACT

The titling project "TECHNICAL ANALYSIS FOR THE LOCATION OF A FLEXIBLE BARRIERS SYSTEM FOR SOLID RETENTION OF DEBRIS FLOW AT COTOPAXI VOLCANO" determines the ideal location of a set of flexible barriers that allow the retention of the greater solids volume from lahars flow that may occur during an eruption of Cotopaxi volcano which in 2015 significantly increased its volcanic activity. As well as determines all the parameters required for the design of the nets. Several studies of the volcano and the lahar flow, generated in different eruptive periods of which have records, were taken as reference were taken as reference, the selected segment corresponds to the Pita River. From the results obtained an alternative to mitigation measures that have been proposed against this huge risk is presented and also an analysis that compares the proposed system, which has higher both technical and economic benefits, with alternatives of mitigation works performed.

KEYWORDS:

- **COTOPAXI VOLCANO**
- **DEBRIS FLOW**
- **MITIGATION WORKS**
- **FLEXIBLE BARRIERS**
- **LAHARS RETENTION**

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El volcán Cotopaxi intensificó su actividad en el mes de abril de 2015, posteriormente en el mes de agosto del mismo año se registraron cuatro explosiones que alcanzaron entre seis y ocho kilómetros de altura sobre el nivel del cráter. (EPN, Informe Especial volcán Cotopaxi N°6 - 2015, 2016)

El incremento de la actividad del volcán puso en alerta al país debido al riesgo que supone la formación de grandes flujos de lodo, principalmente por la fusión del glaciar del volcán con flujos piroclásticos. El riesgo se ha incrementado con el paso del tiempo debido a que ciertas zonas afectadas por el flujo de los lahares han incrementado su número de habitantes (Aguilera & Toulkeridis, 2005). En la actualidad se estima que más de 300.000 personas viven en zonas de afectación por flujo de lodos, como zonas cercanas a ríos o quebradas (Ordóñez , Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013). En la tabla 1 se presenta la población de la provincia de Pichincha que podría ser afectada.

Tabla 1.

Población de la Provincia de Pichincha con potencial afectación en caso de una erupción del volcán Cotopaxi.

Cantón	Parroquia	Población	Vivienda
Mejía	Machachi	24	15
Quito	Alangasí	6315	2077
	Conocoto	4784	1694
	Cumbayá	3927	1353
	Guangopolo	306	102
	Tumbaco	399	121
Rumiñahui	Rumipamba	41	15
	Sangolquí	19323	6383
TOTAL		35119	11760

Fuente: (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2016)

Existen varias obras de mitigación que se pueden implementar en zonas estratégicas para disminuir el riesgo que representan este tipo de flujos como la construcción de presas de hormigón o materiales sueltos, presas permeables entre otros. El visible incremento de la actividad del volcán atrae

la atención hacia las posibles medidas de protección que se podrían tomar, tanto a las tradicionales como a las que se han desarrollado recientemente.

1.2. Localización geográfica y descripción del área de estudio

El volcán Cotopaxi se encuentra ubicado a 35 km del Noreste de la ciudad de Latacunga y a 45 km al Sureste de la ciudad de Quito, en la Cordillera Oriental (EPN, Cotopaxi, 2016).

El presente proyecto se encuentra ubicado en el flanco norte del volcán Cotopaxi, entre la unión de los ríos El Salto y Pita, R-1 y R-2 respectivamente (ver figura 2), y el sector de la Caldera, abarca una longitud de aproximadamente 4 km. En la figura 1 se puede observar la ubicación general del proyecto, mientras que en la figura 2 en el recuadro amarillo se aprecia de forma más precisa su localización así como el volcán Cotopaxi y sus drenajes.



Figura 1. Localización del proyecto.

Fuente: (Google Earth, 2016)

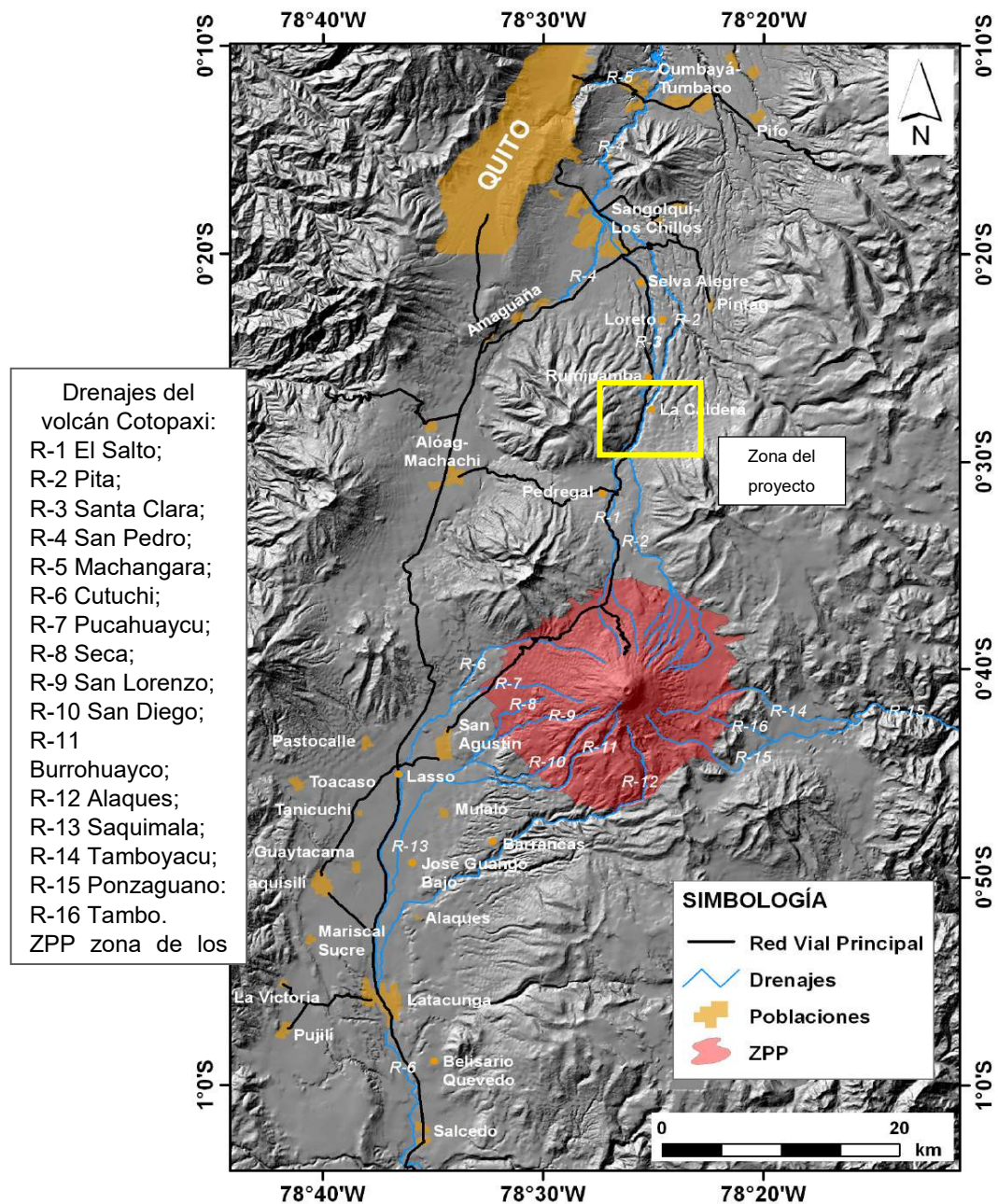


Figura 2. Región de influencia del volcán Cotopaxi.

Fuente: (Ordóñez , Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013)

Tanto el volcán como sus zonas aledañas forman parte de una zona turística, en la figura 2 se puede observar las distintas poblaciones ubicadas en las proximidades de los drenajes del volcán, se puede apreciar que la zona donde se propone implementar el proyecto no se encuentra poblada.

1.3. Justificación

Uno de los riesgos potenciales durante una erupción del volcán Cotopaxi es la formación de flujo de lodos, debido a la fusión del glaciar con flujos piroclásticos que avanzarían principalmente por los cauces naturales que se originan en el volcán. Los registros con los que se cuenta de la erupción de 1877 muestran que los flujos de lodo llegaron al Valle de los Chillos en cuarenta minutos recorriendo una distancia de 50 kilómetros. (Aguilera & Toulkeridis, 2005).

La velocidad con la que se desplazan, la gran cantidad de energía con la que cuentan, su densidad y su capacidad de arrastre lo convierten en un fenómeno sumamente destructivo (Aguilera & Toulkeridis, 2005). La implementación de obras de mitigación que permitan reducir el riesgo para las poblaciones afectadas es sumamente importante por lo mencionado anteriormente y por la naturaleza impredecible de este tipo de eventos.

Los sistemas de mallas flexibles consisten en un conjunto de elementos resistentes a la corrosión, una red cables de soporte, frenos y anclajes. Este tipo de mallas o barreras flexibles son ampliamente utilizadas para la estabilización de taludes, desprendimiento de rocas, protección contra flujos de lodo y derrubios. Los modelos teóricos de estos sistemas han sido validados con pruebas y mediciones a escala real en el torrente Illgraben en Suiza por el Instituto Federal Suizo para la Investigación de Bosques, Nieve y Paisaje, WSL, junto con la empresa suiza Geobrugg (Volkwein, Wendeler, & Guasti, 2011).

Una característica importante de estos sistemas es que debido a su permeabilidad permite drenar el agua del flujo, reduciendo de esta manera uno de los componentes necesarios para la formación del flujo de lodos, además por su capacidad de deformación provee de un sistema de retención de las partículas sólidas del flujo (Volkwein A. , 2014).

El volumen de retención de estos sistemas se encuentra en un rango de 100 m³ a 2000 m³, es importante recalcar que este parámetro está en función de la topografía y de la pendiente del área de implementación, entre otras

características propias del sitio, (Volkwein, Wendeler, & Guasti, 2011), por ello es importante la evaluación de esta alternativa de mitigación para reducir el potencial riesgo de los flujos de lodo del volcán Cotopaxi.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar la ubicación de un sistema de mallas flexible de retención de sólidos del flujo de lodos del volcán Cotopaxi en la zona alta del Río Pita, como medida de mitigación a fin de disminuir el riesgo a las principales zonas pobladas del Valle de los Chillos.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar los sitios de posible ubicación de las mallas flexibles.
- Cuantificar el volumen retenido por el sistema de las mallas flexibles de acuerdo a las características propias del sitio.
- Establecer los parámetros físicos requeridos para determinar las características del flujo y posterior dimensionamiento de las mallas.
- Definir la ubicación de las mallas flexibles en sitios que permita retener el mayor volumen posible del flujo de lodos formado durante una erupción del volcán Cotopaxi.
- Determinar el costo del sistema de malla flexible propuesto.

1.5. Metas del proyecto

- Sitios de posible ubicación de las mallas flexibles.
- Volumen retenido por el sistema de mallas flexibles de acuerdo a la topografía y condiciones del sitio de implantación.
- Parámetros físicos requeridos para determinar las características del flujo y dimensionamiento de mallas flexibles.
- Ubicación del sistema de mallas flexibles en sitios que permita retener el mayor volumen posible del flujo de lodos formado durante una erupción del volcán Cotopaxi.
- Costo del sistema de malla flexible propuesto.

CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN DE LOS FLUJOS DE LODO

2.1. Tipos de Flujos de lodos

2.1.1. Flujos de lodo

Es un flujo conformado por agua y sedimentos, mezclados de forma que se desplazan como un solo flujo continuo bajo la acción de la gravedad (ver figura 3). El comportamiento y el poder destructivo de estos flujos dependen de factores como la velocidad, la profundidad y la pendiente del canal (Takahashi, 2014).



Figura 3. Ciudad de Armero, Colombia después del flujo de lodos de 1985.

Fuente: (Aguilera & Toulkeridis, 2005)

2.1.2. Clasificación de flujo de lodos

2.1.2.1. Clasificación por el contenido de partículas finas

Los flujos de lodo son un fenómeno complejo debido a que el material involucrado tiene propiedades complejas y varía de un flujo a otro. Coussot & Meunier (1996), distinguen dos tipos principales de flujos de lodo, pero aclaran que esta clasificación es una aproximación de la realidad en la que no se considera las condiciones de borde del flujo. Los clasifica en flujos de lodo turbios (muddy debris flows) y flujos de lodo granulares (granular debris flows).

- Flujos de lodo turbios: en este tipo de flujo la fracción de los finos, que contiene arcilla, es lo suficientemente grande, al rededor del 10%, para que la mezcla de agua con partículas finas forme un fluido intersticial

que lubrica el movimiento de los granos e impone su comportamiento en todo el material.

- Flujos de lodo granulares: flujo en el que la fracción de partículas finas es lo suficientemente baja para que el contacto directo entre granos tenga un mayor rol en el comportamiento del flujo.

Volkwein et al. (2011) coinciden en esta clasificación desde el punto de vista mecánico, a los flujos de lodo (mud flows) los describe como agua y material fino, mientras a los flujos de lodo granulares como agua con una distribución de granos más gruesos que generalmente carecen de la fracción de arcilla, su densidad varía entre 1600 a 1900 kg/m³ y 1900 a 2300 kg/m³, respectivamente (Wendeler C. , 2016).

Existen varias formas de clasificar los flujos de lodos por lo cual se presentan dos tipos más de clasificaciones, de acuerdo a las causas que lo generan y de acuerdo a la densidad aparente del material.

2.1.2.2. Clasificación por las causas que los generan

De acuerdo con Takahashi (2014) las causas y los procesos que generan el flujo de lodos es un tipo de clasificación utilizado frecuentemente. En ocasiones los flujos pueden ser clasificados por más de una causa. Esta clasificación se puede observar en la figura 4.

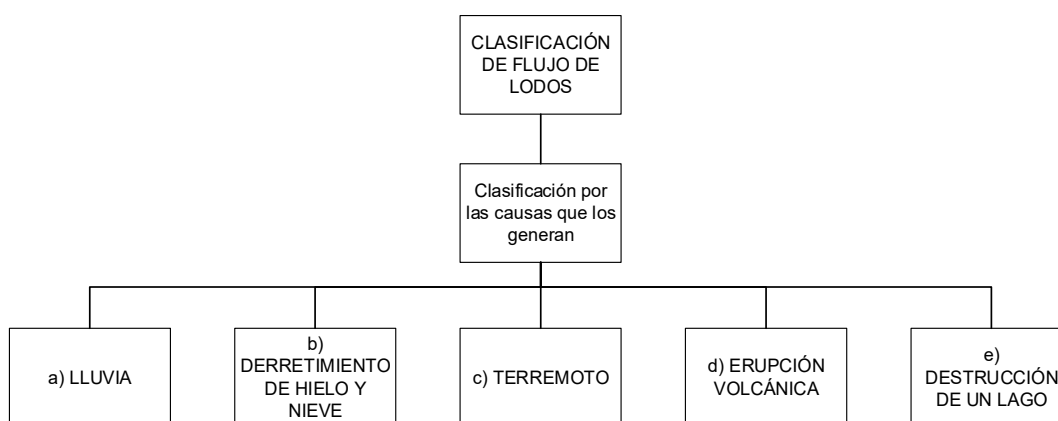


Figura 4. Clasificación de flujo de lodos por las causas que los generan.

- a) Lluvias: fuertes lluvias pueden provocar flujos de lodo.

- b) Derretimiento de nieve y hielo: los flujos se pueden producir por el derretimiento de nieve o glaciares debido a cambios bruscos de la temperatura atmosférica.
- c) Terremoto: grandes terremotos pueden causar deslizamientos de tierra, los mismos que se pueden transformar en flujos de lodo.
- d) Erupción volcánica: los flujos se pueden producir por el derretimiento de los glaciares durante un proceso eruptivo. Los flujos de lodos generados en montañas volcánicas también suelen llamarse lahares.
- e) Destrucción de un lago: esto se produce generalmente debido a la destrucción de diques naturales, existen factores que pueden contribuir a la destrucción como la lluvia o el derretimiento de glaciares.

2.1.2.3. Clasificación de acuerdo al fluido intersticial

Los flujos de lodos en China se clasifican de acuerdo a si el fluido intersticial es agua o lodo líquido, Flujos con partículas finas (Mud-stone flow) y Flujos de agua turbia (Water-stone flow) respectivamente. En el primer caso, el flujo se sub-clasifica de acuerdo a la densidad aparente del material como se puede ver en la figura 5 (Takahashi, 2014).

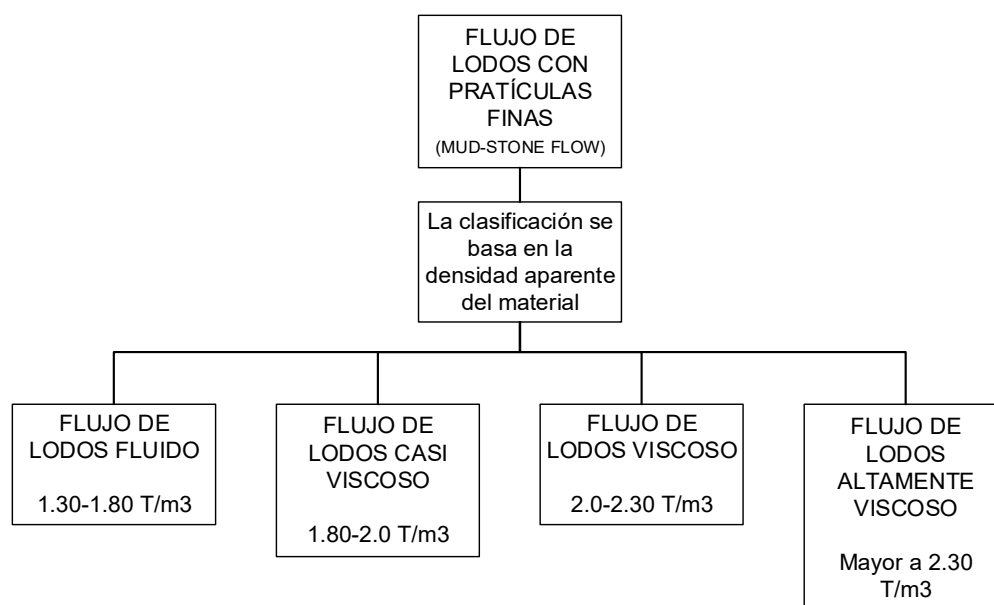


Figura 5. Clasificación de flujo de lodos de acuerdo a la densidad aparente

2.1.3. Lahares

Como se expuso anteriormente, es un tipo de flujo de lodos originado en la pendiente de un volcán. Aguilera & Toulkeridis (2005) lo describen como un flujo torrencial de agua lodosa cargada de partículas sólidas de diversos tamaños, estos pueden producirse de forma directa o indirecta por la erupción de un volcán, de tal manera que el material sólido podría ser ceniza, grandes rocas, arena u otros objetos arrastrados por el flujo (Ordóñez, Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013). Este flujo se desplaza debido a la gravedad desde las laderas del volcán a través de cauces naturales alcanzando altas velocidades.

Se distinguen tres zonas del lahar en movimiento por tratarse de flujos multi-fase, como se observa en la figura 6: la cabeza, en donde las rocas de mayor tamaño se acumulan, el cuerpo, cuya concentración de sólidos en peso se encuentra entre el 75% y el 90% y la cola con una concentración del 45% (Aguilera & Toulkeridis, 2005). De acuerdo con Pareschi (1994), las propiedades físicas de los lahares están controladas estrictamente por su contenido de sedimentos.

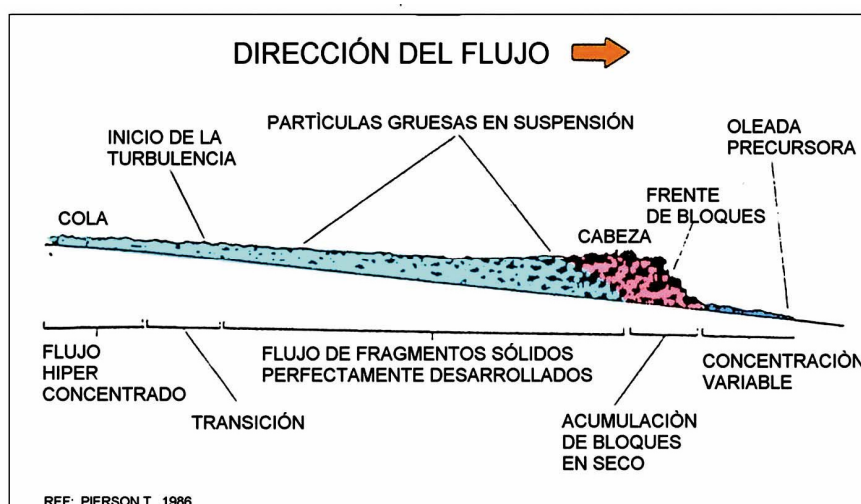


Figura 6. Morfología de un lahar en movimiento.

Fuente: (Aguilera & Toulkeridis, 2005)

El agua que genera este tipo de flujos de lodo puede provenir de diferentes causas: (a) vertido violento de una masa de agua de una laguna cratérea, (b) derretimiento de nieve y glaciares por flujos piroclásticos y (c) debido a fuertes

lluvias (Aguilera & Toulkeridis, 2005). En el caso del volcán Cotopaxi cuando los lahares se producen debido al derretimiento del glaciar por la interacción con flujos piroclásticos, son conocidos como lahares primarios ya que son causados directamente por la actividad eruptiva, mientras que cuando son producidos por fuertes lluvias se conocen como lahares secundarios, ya que pueden ocurrir en períodos de inactividad o posteriores a la erupción (Andrade, y otros, 2005), (Zanchetta et al., 2004, citado en (Fagents , Gregg, & Lopes, 2013)), como los ocurridos el 25 de mayo de 2016, ver figura 7.



Figura 7. Lahares secundarios en el Cotopaxi.

Fuente: (El Comercio, 2016)

La distancia recorrida por los lahares depende de la diferencia de nivel que existe entre el origen del lahar y el lugar donde se termina la energía potencial. En el caso del volcán Cotopaxi, en la erupción de junio de 1877 alcanzó una distancia de 300 km en un tiempo de 18 horas (Aguilera & Toulkeridis, 2005).

2.2. Determinación del volumen de lahares por erupción del volcán Cotopaxi

2.2.1. Volcán Cotopaxi

Se trata de un estrato volcán ubicado a 45 km al Sureste de Quito y a 35 km del Noreste de la ciudad de Latacunga, en la Cordillera Oriental, Latitud $0^{\circ} 38'S$; Longitud $78^{\circ}26'O$. Su forma es cónica, como se puede apreciar en la figura 8, con pendientes que alcanzan los 35° . La base de este volcán tiene

una longitud de 20 km mientras que el diámetro del cráter es de 800 m en sentido norte-sur y 650 m en sentido este-oeste. Una de las principales características de este volcán es su glaciar, el cual se extiende hasta aproximadamente los 4600 msnm en la zona oriental, mientras que en la zona occidental llega hasta los 5100 msnm. (Ordóñez , Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013).



Figura 8. Volcán Cotopaxi visto desde el norte.

Fuente: (EPN, 2016)

Los Peligros volcánicos del Cotopaxi en caso de que se produzca un evento como el ocurrido en 1877, serían: (a) Caída de ceniza, (b) Flujos piroclásticos y (c) Lahares producidos por el derretimiento del casquete glaciar (Aguilera & Toulkeridis, 2005), siendo este último el que representa mayor riesgo.

Su predisposición a formar lahares, lo convierte en uno de los volcanes más peligrosos del Ecuador debido a que zonas densamente pobladas, como Latacunga y una parte del Valle de los Chillos, se verían afectadas por el paso de estos enormes flujos de lodo a través de cauces naturales que tienen origen en el volcán.

El lahar más destructivo provocado por una erupción del volcán Cotopaxi se produjo hace aproximadamente 4500 años durante una erupción ríolítica, lo que generó lahares de un volumen aproximado de 3.80 km³, no existe una alta posibilidad de que se repita un evento similar a este, ya que el volumen del glaciar ha disminuido considerablemente y no se espera una erupción

riolítica de esta magnitud (Andrade, y otros, 2005). En la figura 9 se puede observar una capa gruesa de lapilli de color blancuzco que corresponde a una erupción producida hace aproximadamente 1000 años (Andrade, y otros, 2005).

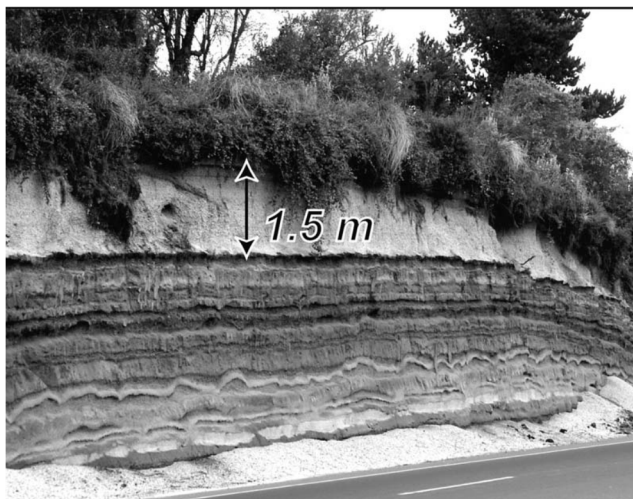


Figura 9. Capas de fragmentos de escoria, ceniza y pómez de distintas erupciones del volcán Cotopaxi, ubicado en la carretera Panamericana.

Fuente: (Andrade, y otros, 2005)

Existen dos factores que definen la magnitud de los lahares producidos por una erupción del volcán Cotopaxi (Ordóñez , Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013).

- a) Tipo de erupción: este factor determina el volumen de magma que será expulsado, la intensidad y magnitud de la erupción.
- b) Volumen de agua generado durante la erupción: este volumen tiene una relación directa con el tamaño del glaciar del volcán.

2.2.2. *Glaciar del volcán Cotopaxi*

El glaciar del volcán Cotopaxi está formado por 19 lenguas, ha sido objeto de estudio por muchos años con el objetivo de determinar su área, espesor, volumen y el porcentaje de retroceso o la evolución del mismo a través del tiempo, ya que en décadas recientes se ha evidenciado un indudable retroceso de este glaciar (Andrade, y otros, 2005), en la figura 10 se puede apreciar la diferencia en la extensión del glaciar para el año 1976, 1997 y 2006. En la tabla 2 se presentan los nombres de cada una de las lenguas que conforman el casquete glaciar.

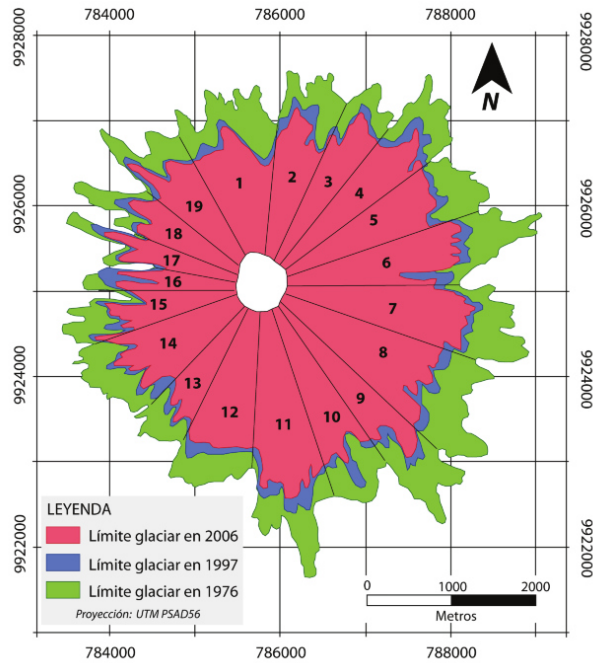


Figura 10. Retroceso del glaciar del volcán Cotopaxi.

Fuente: (Ordóñez , Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013)

Tabla 2.
Glaciares del volcán Cotopaxi.

No.	Nombre del Glaciar
1	Glaciar Sindipampa
2	Glaciar Carero Machay
3	Glaciar Potrerillos
4	Glaciar Pucahuaycu Norte
5	Glaciar Mudadereo
6	Glaciar Cajas
7	Glaciar Tamboyacu
8	Glaciar Manantial
9	Glaciar Tambo
10	Glaciar Churruhurco
11	Glaciar Simarrones
12	Glaciar El Picacho
13	Glaciar Saquimala
14	Glaciar San Lorenzo
15	Glaciar Capuli-Huaicu
16	Glaciar Pucahuaicu Oeste
17	Glaciar Chanchunga Sur
18	Glaciar Chanchunga Norte
19	Glaciar Yanasacha

Fuente: (Cáceres, 2010)

Los drenajes naturales que nacen en la parte alta del volcán se dividen en tres: drenaje norte, sur y oriental los cuales se abastecen del deshielo del casquete glaciar del volcán.

- Cuenca Norte

En la cuenca norte se originan los ríos El Salto y Pita, los cuales se alimentan del deshielo de los glaciares 1 – 6 (ver figura 10). Estos ríos continúan su recorrido en dirección sur-norte hasta unirse aproximadamente a 14 km del volcán manteniendo el nombre del río Pita. En el sector de “La Caldera” debido a la morfología del sitio, este río da un giro de casi noventa grados, razón por la cual parte del río Pita se desborda hacia el río Santa Clara (Aguilera & Toulkeridis, 2005).

El río Pita y Santa Clara se unen al río San Pedro, el cual posteriormente forma el río Guayllabamba y por último el río Esmeraldas que desemboca en el Océano Pacífico (Aguilera & Toulkeridis, 2005).

- Cuenca Oriental

Los deshielos de los glaciares 7 – 9 son drenados por la cuenca oriental (ver figura 10), formando los ríos Tambo y Tamboyacu. La unión de ambos ríos mantiene el nombre de Tambo que desemboca en el río Juntayacu, afluente principal del río Napo (Aguilera & Toulkeridis, 2005).

- Cuenca Sur

Los ríos Cutuchi, Saquimala y Alaques se alimentan del deshielo de los glaciares 10 – 19 (ver figura 10) conformando el drenaje sur y sur-occidental. Constituyen las cabeceras del río Patate. Este último al unirse con el río Chambo forman el río Pastaza (Aguilera & Toulkeridis, 2005).

Mediante el uso de fotografías aéreas del año 2006, tomadas por el Instituto Geográfico Militar (IGM), Cáceres estimó en base a treinta y cinco parámetros, que para el año 2006 la cobertura glaciar del volcán era de 11.84 km². Además señaló que para el período 1976 – 1997 existió un porcentaje de pérdida de 28.8%, mientras que para el período 1997 – 2006 el porcentaje

de pérdida fue del 22.5%. Si se considera el período 1976 – 2006 existió una pérdida del 42% del casquete glaciar (Cáceres, 2010).

Para el año 2011, trabajos previos sobre este glaciar permitieron determinar porcentajes de reducción anual para cada lengua, con lo cual se proyectó el tamaño del mismo para dicho año, estableciéndose un área total del casquete de 10,40 km², de la misma forma para el glaciar que alimenta el drenaje norte, lenguas 1 – 6, se determinó un área de 3,60 km², como se detalla en la tabla 3 (Ordóñez, Samaniego, Mothes, & Schilling, 2011).

Tabla 3.

Estimación de volúmenes del casquete glaciar del Cotopaxi.

Drenaje	Área (mill. m²) (2011)	Espesor mínimo (m)	Espesor máximo (m)	Volumen mínimo (mill. m³)	Volumen máximo (mill. m³)
Norte	3.6	20	40	73	145
Oriental	2.2	30	60	66	132
Sur	4.6	17	35	78	160
Total	10.4	30	50	260	520

Fuente: (Ordóñez, Samaniego, Mothes, & Schilling, 2011)

Cáceres en el año 2015 expresa que el área del glaciar del volcán Cotopaxi para el mes de agosto de este año era de 11.56 km² (Lagla, 2015).

2.2.3. Escenarios Eruptivos

De acuerdo a estudios realizados sobre la actividad del volcán en los últimos 2000 años, se ha determinado que el tiempo promedio entre dos erupciones sucesivas del Cotopaxi es de 117±70 años, (Aguilera & Toulkeridis, 2005). A lo largo del tiempo se han presentado cinco períodos eruptivos de importancia: 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1853-1854 y 1877-1880 (Ordóñez, Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013), de los cuáles la explosión producida en el último período, el 26 de junio de 1877, es considerada como la actividad explosiva máxima probable (Aguilera & Toulkeridis, 2005).

Andrade et al. (2005) y Samaniego et al. (2011) (citado en Ordóñez et al., 2013) han expuesto cuatro escenarios eruptivos, los cuales se han definido por: (a) dinamismo eruptivo, (b) magnitud de la erupción, (c) tamaño del glaciar y grado de fusión, (d) grado de interacción entre los productos volcánicos y el glaciar y (e) analogías con volcanes andesíticos similares.

A continuación se presenta los cuatro escenarios eruptivos y algunas de sus características, como el Índice de Explosividad Volcánica, VEI por sus siglas en inglés, el cual es una escala logarítmica que varía entre 0 y 8, muy utilizada para cuantificar la explosividad de una erupción volcánica, y el volumen de tefra expulsado que corresponde a cualquier tipo material sólido emitido durante erupciones explosivas (Ordóñez , Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013).

- Escenario 1
 - VEI: Índice de Explosividad Volcánica: 1-2
 - Tipo de explosión: Estromboliano
 - Volumen de tefra emitido: $< 0,01 \text{ km}^3$
 - Generación de flujos piroclásticos: No se generarían
 - Volumen del glaciar derretido:
 - Norte – Sur: 1 mill. m^3
 - Volumen de lahares:
 - Norte – Sur: 2 - 3 mill. m^3

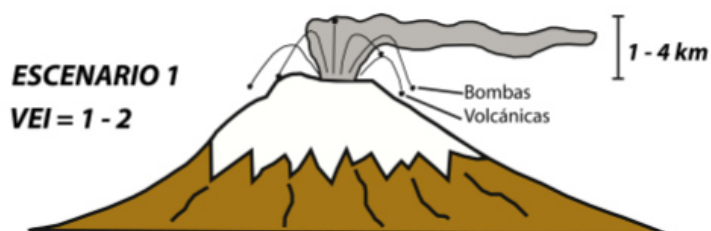


Figura 11. Esquema de Escenario 1.

Fuente: (Ordóñez , Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013)

- Escenario 2
 - VEI: 2-3
 - Tipo de explosión: Estromboliano a vulcaniano
 - Volumen de tefra emitido: $0,01$ a $0,10 \text{ km}^3$
 - Generación de flujos piroclásticos: Flujos de pequeños a moderados
 - Volumen del glaciar derretido:
 - Norte: 3 – 6 mill. m^3
 - Sur: 4 – 8 mill. m^3
 - Volumen de lahares:
 - Norte: 10 – 20 mill. m^3
 - Sur: 14 – 30 mill. m^3



Figura 12. Esquema del Escenario 2.

Fuente: (Ordóñez , Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013)

- Escenario 3
 - VEI: 3-4
 - Tipo de explosión: Sub-pliniano
 - Volumen de tefra emitido: 0,10 a 1,0 km³
 - Generación de flujos piroclásticos: Flujos por todos los flancos del volcán producidos por desbordamiento de magma sobre el cráter.
 - Volumen del glaciar derretido:
 - Norte: 10 – 15 mill. m³
 - Sur: 15 – 20 mill. m³
 - Volumen de lahares:
 - Norte: 40 – 45 mill. m³
 - Sur: 50 – 60 mill. m³



Figura 13. Esquema del Escenario 3.

Fuente: (Ordóñez , Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013)

- Escenario 4
 - VEI: mayor a 4
 - Tipo de explosión: Pliniano
 - Volumen de tefra emitido: mayor a 1,0 km³

- Generación de flujos piroclásticos: Flujos piroclásticos originados por el colapso de la columna eruptiva
- Volumen del glaciar derretido:
 - Norte: 24 – 26 mill. m³
 - Sur: 30 – 35 mill. m³
- Volumen de lahares:
 - Norte: 85 mill. m³
 - Sur: 110 mill. m³

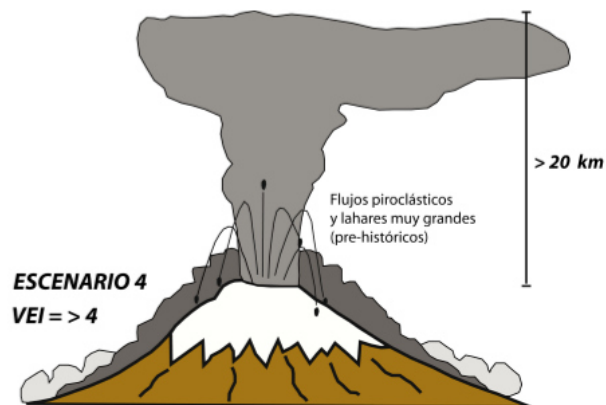


Figura 14. Esquema del Escenario 4.

Fuente: (Ordóñez , Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013)

Tanto los volúmenes de glaciar derretido como los volúmenes de lahares para cada escenario expuestos anteriormente fueron tomados del estudio realizado por Samaniego et al. (2011).

La explosión máxima probable, de características similares a la ocurrida en 1877, corresponde a un VEI de aproximadamente cuatro de acuerdo a Ordóñez et al. (2013), por lo cual se encuentra dentro del escenario 3 que se presentó anteriormente.

Bonito & Naranjo (2016) dentro de su estudio del diseño de obras de protección para el flujo de lahares en la cuenca norte del volcán Cotopaxi realizaron un análisis del volumen del evento considerando el aporte del 25% del glaciar del volcán, de dicho análisis obtuvieron que para la cuenca del río El Salto el volumen es de 3.23 millones de m³ y para la cuenca del río Pita 28.78 millones de m³, con un total de 32.01 millones de m³ para el drenaje norte del volcán.

2.2.4. Desbordamiento río Damas

Es importante tomar en cuenta eventos similares de los cuales se tienen registros que permitan inferir el posible comportamiento del flujo, en el caso del evento producido en la población El Paraíso en Alluriquín el 26 de abril de 2016, donde debido a las fuertes lluvias que se produjeron en la zona, el río Damas se desbordó trayendo consigo grandes cantidades de rocas, se pudo observar que en ciertas secciones del cauce rocas de gran tamaño quedaron atascadas en las zonas altas del mismo como se puede apreciar en las figuras 15 y 16.



Figura 15. Rocas atascadas en el cauce del río Damas.

Foto: (Sandoval, W.)



Figura 16. Vestigios de la crecida del río Damas.

Foto: (Sandoval, W.)

Con este antecedente y debido a las características del río Pita, el cual forma gargantas en ciertas zonas donde el cauce se angosta, podría esperarse que las rocas de mayor tamaño quedaran atascadas de forma similar al evento mencionado previamente, sin embargo no se puede garantizar que esto ocurra con los flujos de lodo producidos durante una erupción del volcán Cotopaxi.

2.3. Parámetros físicos de los flujos de lahares

Existen varios parámetros que permiten determinar el comportamiento de un flujo de lodos, estos parámetros son imprescindibles para la simulación de estos eventos, necesarias a su vez para el diseño de obras de mitigación o para la obtención de mapas de inundación de las zonas de riesgo.

2.3.1. Densidad del flujo

Generalmente se asume que ambas partes, la parte sólida y el fluido que conforman el flujo de lodos, tienen densidades fijas, Iverson (2013) establece que la densidad del flujo se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$\rho = \rho_s(1 - n) + \rho_f n$$

donde,

ρ_s = densidad del material sólido

ρ_f = densidad del fluido

n = porosidad

De esta expresión se puede distinguir que la variación de la porosidad de la mezcla determina la variación de la densidad del flujo. Los valores de n varían desde 0.30 en los flujos de lodo más densos a 0.50 en los más diluidos (Iverson, 2013).

Del mismo modo existe otra expresión en la que se considera la influencia de la densidad de los granos finos (Iverson, The Physics of Debris Flows, 1997):

$$\rho_f = \rho_s v_{fines} + \rho_w (1 - v_{fines})$$

donde,

v_{fines} = fracción del volumen del fluido ocupado por granos finos, limos y arcillas.

ρ_w = densidad del agua

ρ_s = densidad de los granos finos, por simplicidad se asume igual a la de los sedimentos más gruesos

ρ_f = densidad del flujo de lodos.

2.3.2. Coeficiente de Fricción / Fricción de Coulomb

De acuerdo con Iverson (1997) (citado por Iverson, 2013), la fricción de Coulomb genera la mayoría de los esfuerzos de corte en los flujos de lodo y en otros flujos granulares densos. Por otra parte, el coeficiente de fricción puede ser expresado como la tangente del ángulo interno de fricción, que es similar al ángulo de reposo más empinado alcanzable por una capa estática de granos, (Iverson R. M., 2013).

$$\mu = \tan(\varphi)$$

Takahashi (2014), expresa que muchos deslizamientos o avalanchas de lodos de gran escala, muestran que el coeficiente de fricción disminuye a medida que el volumen aumenta, por ejemplo cuando los volúmenes son menores a un millón de metros cúbicos, los coeficientes de fricción equivalentes son mayores a 0.60, pero cuando alcanza cien millones de metros cúbicos o más, su significado llega a ser muy pequeño.

2.3.3. Fricción viscosa – turbulenta

Tanto el coeficiente de fricción como la fricción viscosa-turbulenta forman parte del modelo de Voellmy (1955), muy usado en la simulación de movimientos de masas, ya que esta ley de resistencia del flujo es la que mejor coincide con las observaciones en campo (Hürlimann, Rickenmann, Medina, & Bateman, 2008). Los coeficientes de fricción son los responsables del comportamiento del flujo, el coeficiente de fricción, μ , domina cuando el flujo se encuentra cerca de detenerse, mientras que el coeficiente de fricción viscosa – turbulenta, ξ , domina cuando el flujo se mueve rápidamente (WSL, 2013).

Para calibrar el modelo de Voellmy se debe contar con eventos históricos documentados, que permitan determinar el par de parámetros que mejor se adapten a dichos registros, este es uno de los pasos más importantes en una simulación ya que de ello depende obtener resultados realistas y útiles. Obtener datos exactos puede ser difícil, sin embargo de la información de campo se puede obtener, en ciertos casos, el volumen total, la altura del flujo y la composición del material (WSL, 2013).

2.3.4. Volumen total

El volumen del flujo de lodos es uno de los parámetros más importantes desde el punto de vista de la evaluación de un peligro potencial, por la naturaleza del evento se puede esperar diferentes volúmenes de flujo con diferentes probabilidades de ocurrencia, por lo cual se debe definir un intervalo de recurrencia adecuado asociado a una determinada magnitud del evento para el diseño de cualquier medida de protección contra estos eventos. Existen ecuaciones empíricas que permiten calcular el volumen total, generalmente basadas en las características morfométricas más importantes de la cuenca, sin embargo dichas ecuaciones suelen sobre estimar el volumen hasta por un factor de 100 (Rickenmann, 1999).

El volumen total del evento puede ser usado para calcular una primera aproximación de otros parámetros como el caudal máximo de descarga o la distancia total de recorrido a través de diferentes relaciones empíricas propuestas por varios autores, (Rickenmann, 1999).

2.3.5. Hidrograma

Un hidrograma es la representación del tiempo versus el caudal o descarga, donde el área bajo la curva corresponde al volumen total del evento (ver figura 17). Para la simulación de un flujo de lodos canalizado es muy usual el uso de un hidrograma, esto requiere conocimiento acerca de la cantidad del material que pasa por un determinado sitio, lo cual se puede obtener de varias maneras, por ejemplo si se conoce el caudal en diferentes tiempos en un sitio determinado estimados a través de mediciones de alturas del flujo y la correspondiente sección transversal del canal, a través del volumen total estimado combinado con relaciones empíricas entre este parámetro y la

máxima descarga, como las propuestas por Rickenman (1999) (WSL, 2013), o una vez establecido el volumen total del evento y conocido el tiempo de llegada del flujo a cierta sección del cauce.

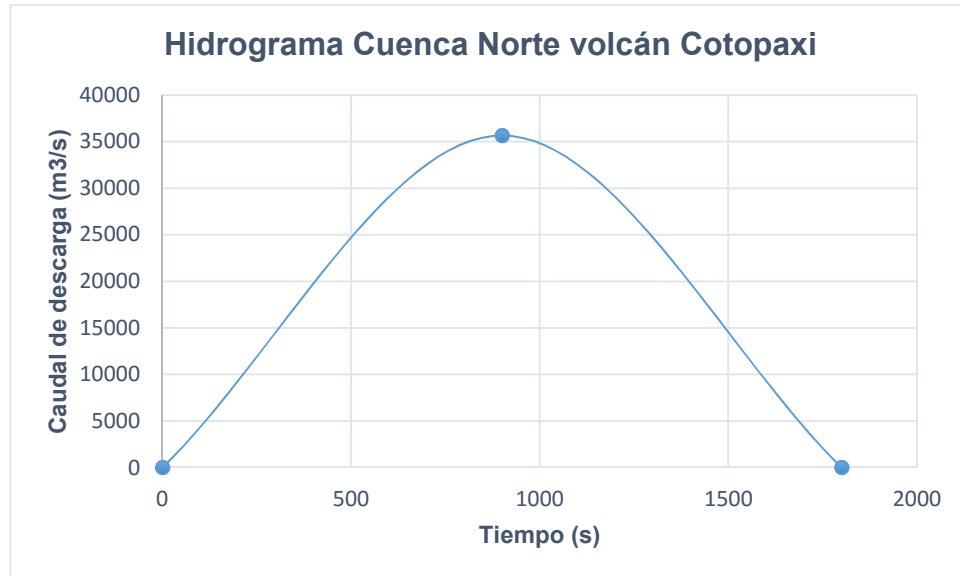


Figura 17. Hidrograma de tres puntos.

CAPÍTULO III: MORFOMETRÍA

3.1. Delimitación de la zona de implantación del sistema

La zona de implantación del sistema de mallas flexibles escogida se encuentra en la zona alta del río Pita, una vez que éste se ha unido con el río El Salto en la zona este del volcán Pasochoa (4199 msnm) y la zona de La Caldera, ya que como se mencionó en el Capítulo II en esta zona parte del río Pita se desborda hacia el río Santa Clara, razón por la cual al colocar el sistema de retención antes de este sitio se reduce el volumen de lahares que avanzarían hacia el Valle de los Chillos, disminuyendo el daño que el flujo podría producir. Se ha tomado como referencia de la unión de estos dos ríos el punto de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) E: 785759.722, N: 9946217.591.

En la figura 18 se observa el modelo digital del terreno en formato TIN desde el flanco sur-este del volcán Pasochoa, el cual permite apreciar la diferencia de elevación en la zona de acuerdo a la variación de la paleta de colores que se presenta en la imagen.

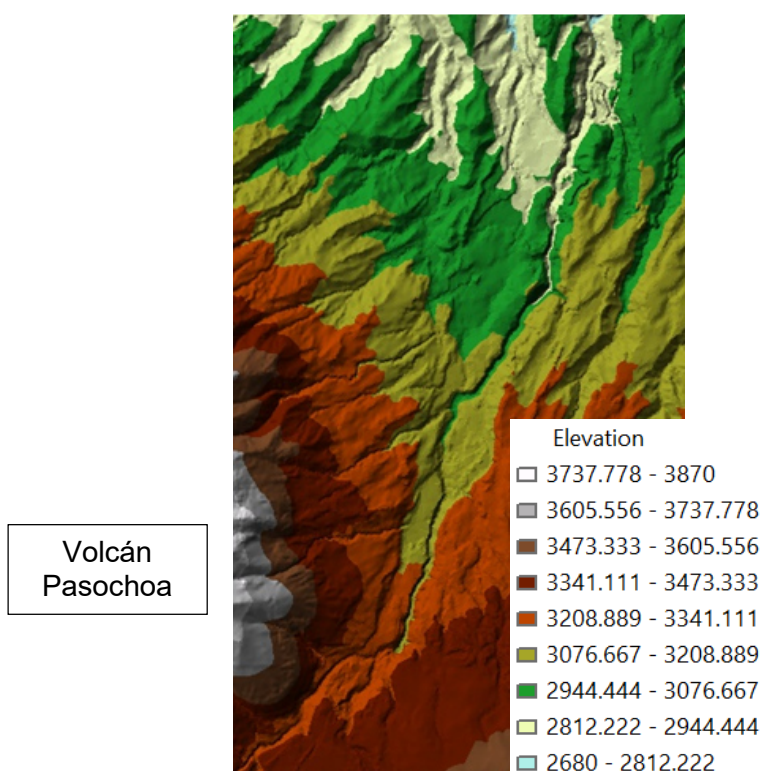


Figura 18. Modelo Digital del terreno en formato TIN

Esta zona adicionalmente presenta una característica importante, el flujo a lo largo de este tramo de aproximadamente cuatro kilómetros se mantiene encausado de acuerdo con diferentes simulaciones realizadas, en la figura 19 se puede observar los resultados presentados por Ordóñez et al. (2013), donde también se puede apreciar el desbordamiento hacia el río Santa Clara en el sector de La Caldera.

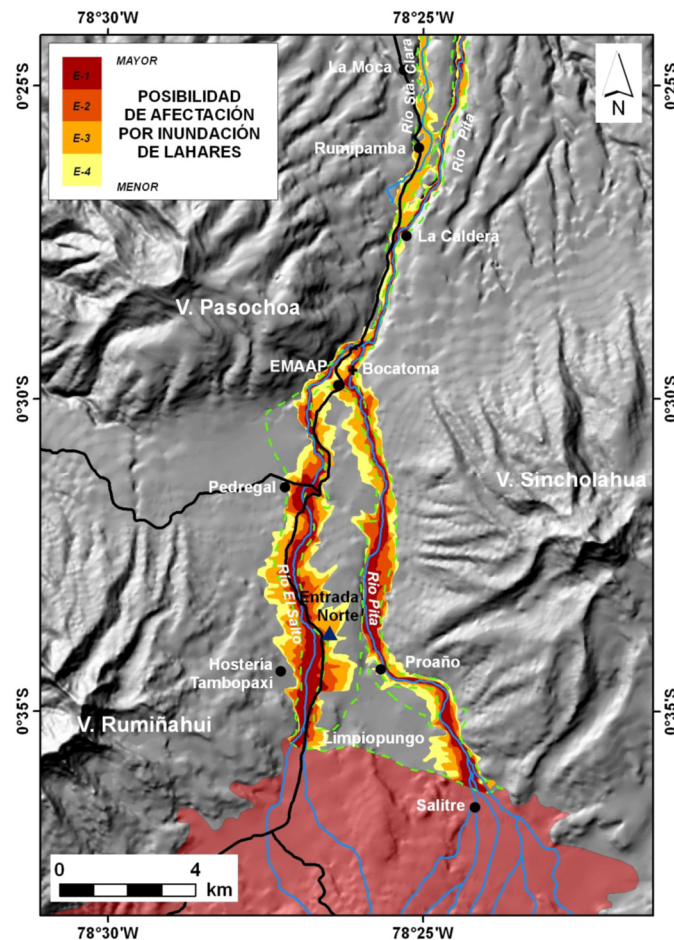


Figura 19. Posibles zonas de inundación en el drenaje norte del volcán Cotopaxi.

Fuente: (Ordóñez , Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013)

3.2. Estudio de posibles secciones de ubicación

La selección de las diferentes secciones en donde se propone colocar las mallas flexibles se basó en distintos factores que se deben tomar en cuenta, como las características topográficas del sitio y las restricciones propias de las mallas flexibles que se pueden encontrar en el mercado. Las consideraciones que se tomaron fueron las siguientes:

- Las mallas flexibles que la empresa Geobrugg oferta tienen ciertas limitaciones en cuanto a sus dimensiones. Las mallas VX y UX, que son aplicables para flujos de lodos, llegan a tener alturas de hasta seis metros en ambos casos. En cuanto al ancho de la malla en la parte inferior debe ser de mínimo cinco metros para ambos tipos de mallas, mientras que en el ancho de la parte superior es de máximo 15 y 25 metros, respectivamente, la diferencia en este último parámetro se debe a que las mallas UX cuentan con postes intermedios a diferencia de las mallas VX que no los poseen.
- La ubicación de las mallas debe ser de tal forma que el volumen retenido por cada una de ellas no se vea interferido por la ubicación de la siguiente malla, de esta forma se aprovecha al cien por ciento la capacidad de la malla.
- El principal objetivo al seleccionar la ubicación de las mallas debe ser obtener el mayor volumen de retención posible, por ello se procuró que la ubicación no coincidiera con el final de una curva de nivel.
- La dimensión inferior de la malla debe ser lo más cercana a los cinco metros debido a que con ello se puede aprovechar la altura máxima disponible, ya que a medida que esta dimensión aumenta la altura que se podría emplear tiende a disminuir por la restricción de la dimensión superior de la malla (25m).

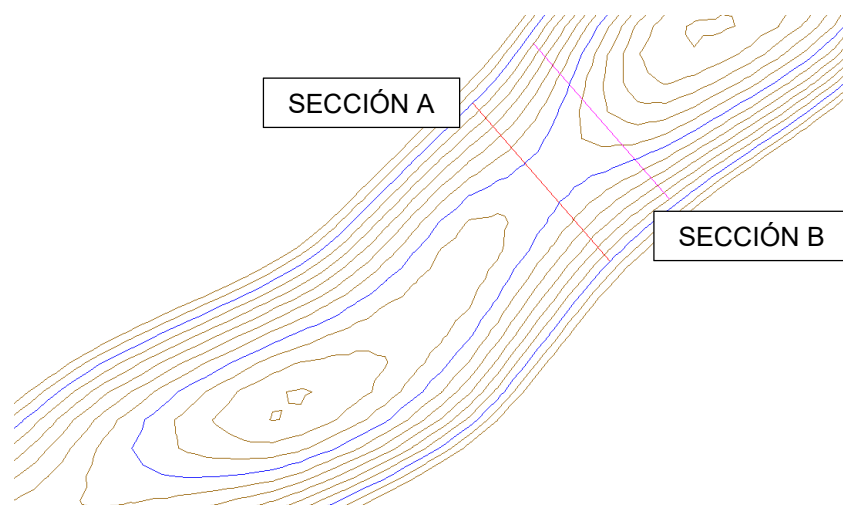


Figura 20. Selección de la ubicación de las mallas flexibles

En la figura 20 se puede observar los criterios de selección mencionados, la dimensión inferior se mantuvo lo más cercana a cinco metros y se controló que la dimensión superior de la sección no superara los 25 m, aprovechando, en la mayoría de los casos los seis metros de altura máxima. En este caso la sección B no resulta ser favorable por varias razones, la dimensión inferior es mayor que la de la sección A, lo que incrementa la cantidad de malla necesaria, además el volumen de retención es menor debido a que por su ubicación abarca una menor cantidad de terreno. En la figura 21 se puede apreciar el segundo criterio de selección, se puede observar que la ubicación de la sección 2 se encuentra situada a una distancia adecuada del volumen de retención de la sección 1, representado por la curva de nivel interna de color azul.

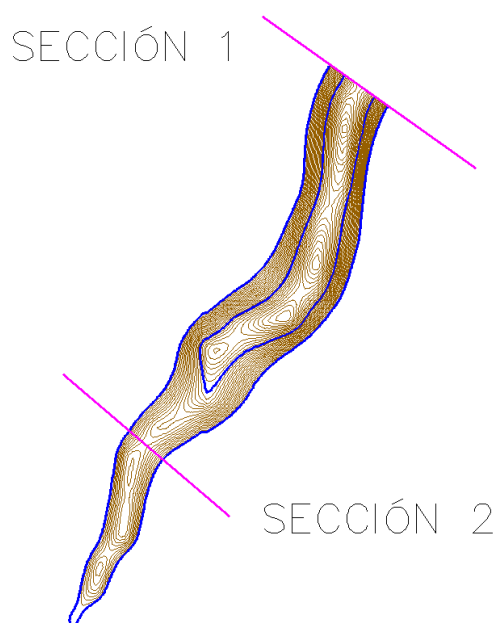


Figura 21. Criterio de ubicación de las mallas

Una vez realizado el análisis mencionado se han determinado diez puntos como posibles ubicaciones para las mallas flexibles, las mismas que se pueden observar en la figura 22, las características de sus secciones transversales se detallan en las tablas 4 y 5 a continuación.

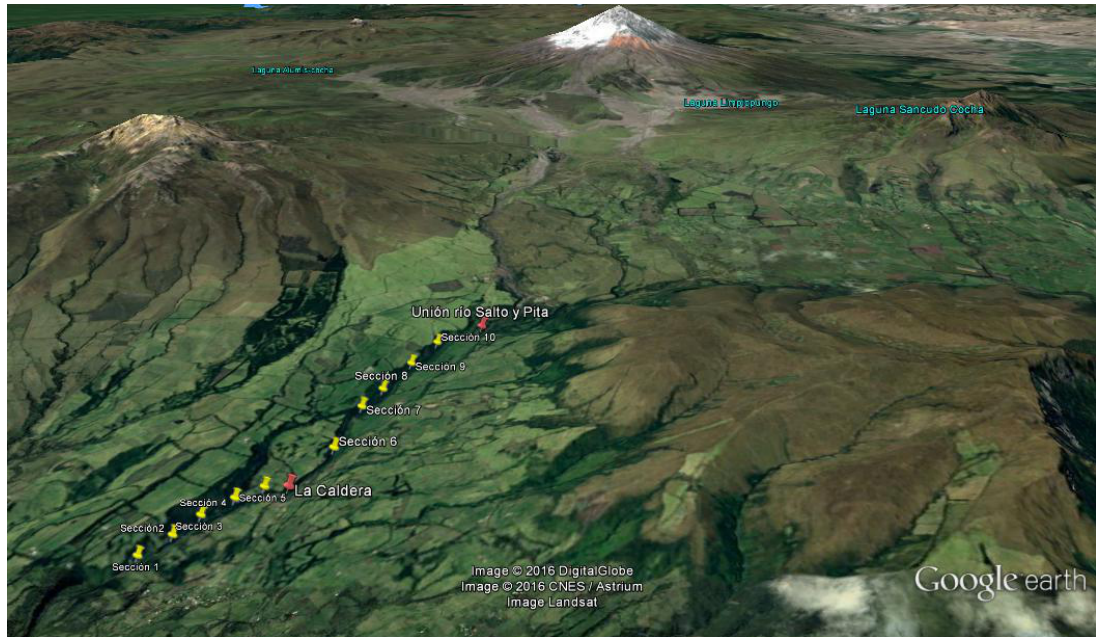


Figura 22. Esquema de ubicación de las secciones transversales.

Fuente: (Google Earth, 2016)

Tabla 4.

Coordenadas UTM del margen derecho e izquierdo de las secciones transversales.

Sección	Coordenadas UTM			
	Margen Izquierdo		Margen Derecho	
	E	N	E	N
1	787655.196	9950699.629	787672.189	9950687.487
2	787497.888	9950439.605	787516.514	9950423.727
3	787393.262	9950157.19	787408.11	9950140.524
4	787209.772	9949904.068	787227.725	9949890.559
5	787038.206	9949686.845	787049.183	9949661.245
6	786634.149	9949026.189	786657.874	9949034.089
7	786607.155	9948242.971	786627.454	9948228.698
8	786490.177	9947886.742	786508.956	9947886.734
9	786351.029	9947255.642	786365.525	9947245.66
10	786173.834	9946758.426	786187.961	9946743.915

Tabla 5.

Altura, ancho superior (bo) e inferior (bu) del sistema de mallas flexibles en cada sección.

Sección	Geometría de las secciones		
	Ho (m)	bo (m)	bu (m)
1	6.00	20.93	5.43
2	5.50	24.45	5.11
3	6.00	22.33	5.53
4	6.00	22.48	5.65
5	4.00	27.87	6.92
6	6.00	24.96	6.27
7	4.00	24.81	9.55
8	6.00	18.84	5.46
9	6.00	17.59	6.36
10	6.00	20.25	6.23

3.3. Volúmenes de sólidos retenidos

El volumen máximo retenido por cada malla está definido por tres parámetros: (a) la altura de la malla considerando el asentamiento esperado cuando ésta se encuentra llena, (b) la topografía del canal y (c) el ángulo de sedimentación del material acumulado (Volkwein A. , 2014). En la figura 23 se puede observar el material retenido detrás de la malla flexible.



Figura 23. Material retenido tras la malla flexible.

Fuente: (Wendeler C. , 2010)

3.3.1. Asentamiento de la malla

Como resultado del comportamiento de la malla flexible se debe considerar que la altura de la barrera se reduce debido al alargamiento del cable de soporte de frenos (Volkwein A. , 2014). Además, la altura de la barrera se reduce después del proceso de llenado en aproximadamente $\frac{3}{4}$ de la altura inicial, como se puede ver en la figura 23 (Wendeler, y otros, 2016).

3.3.2. Ángulo de sedimentación del material acumulado

El ángulo de sedimentación del material acumulado de acuerdo con estudios empíricos corresponde a $\frac{2}{3}$ del gradiente del torrente original, como se puede ver en la figura 19, la pendiente que corresponde a I_s' en la figura 24, (Rickenmann, 1999) citado en (Volkwein, Wendeler, & Guasti, 2011).

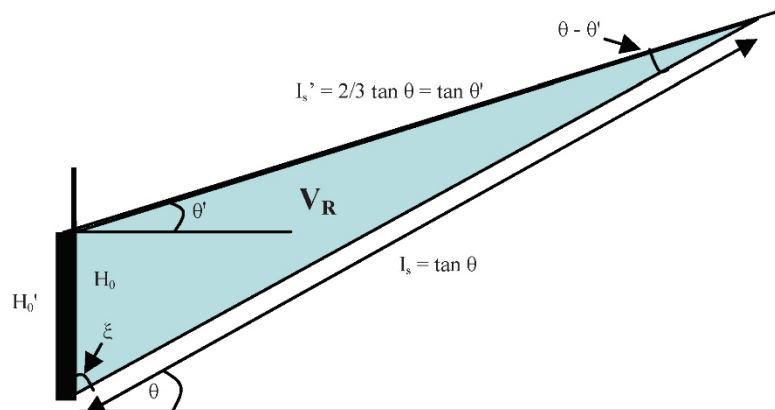


Figura 24. Material depositado detrás de la malla.

Fuente: (Volkwein, Wendeler, & Guasti, 2011)

3.3.3. Cálculo de volúmenes

Una vez que se ha establecido la ubicación de la malla, el ángulo de sedimentación del material acumulado y se ha determinado la altura de la barrera cuando ésta se encuentra llena se procede al cálculo del volumen retenido por cada una de las mallas como se detalla a continuación.

- a) Se ubica la curva de nivel correspondiente al punto más alto donde se encontrará la malla, en este caso representada por la curva de nivel de color azul en la figura 25. De la misma manera se ubica la cota máxima del volumen retenido de acuerdo con el ángulo de sedimentación del

material, la cual corresponde en este caso a la curva de nivel de color magenta.

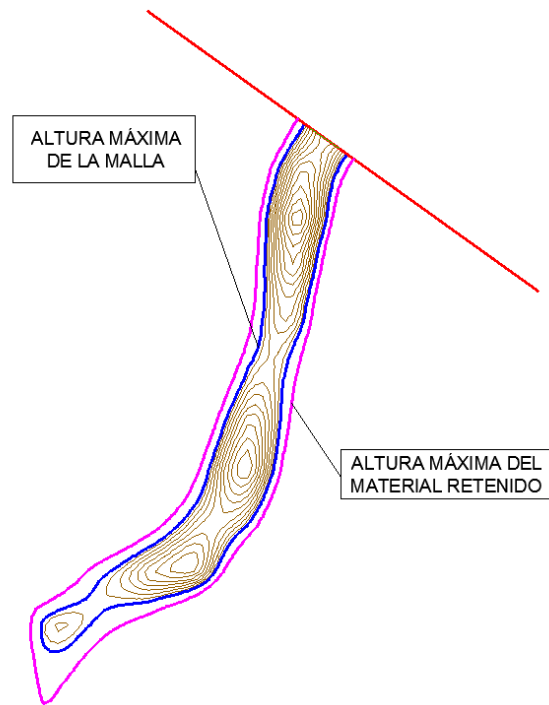


Figura 25. Altura máxima del material retenido por la malla flexible.

- b) Se realiza el cálculo del área de cada una de las curvas de nivel, como se puede observar en la figura 26 el área se encuentra sombreada en color verde, para ello se pueden utilizar diferentes herramientas disponibles de software.

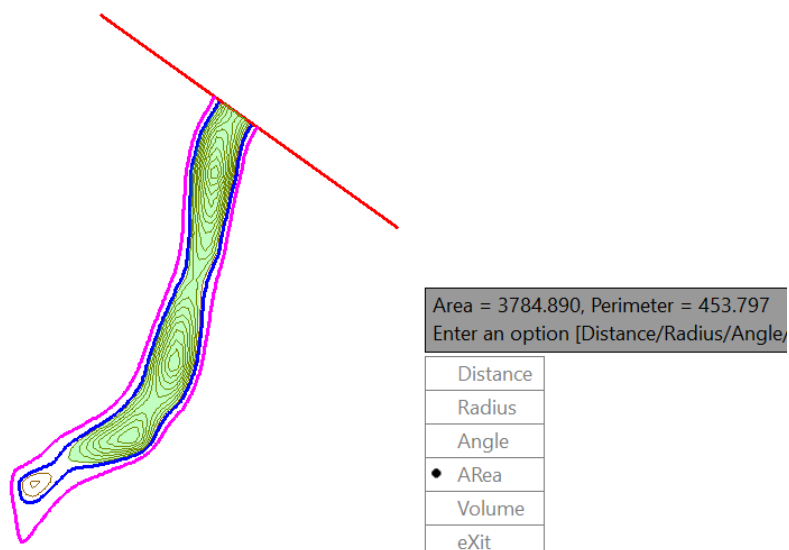


Figura 26. Cálculo del área de curvas de nivel.

- c) Una vez se ha determinado el área de todas las curvas de nivel y la diferencia de elevación (Δh) entre cada una de las curvas se calcula el volumen como la semisuma de las áreas multiplicado por el Δh :

$$V_i = \frac{(A_{i+1} + A_i)}{2} * \Delta h$$

- d) Con ello se obtiene el volumen retenido parcial con el cual se obtiene el volumen retenido total.

$$V = \sum_{i=1}^n V_i$$

Tanto el primero como el último volumen parcial calculados para cada sección fueron reducidos por un factor de 2/3 debido a la forma en la que se acumula el material.

3.4. Determinación de parámetros físicos de flujos del Cotopaxi

3.4.1. Densidad del flujo

La densidad del flujo de lodos del volcán Cotopaxi se calculó de acuerdo a la ecuación propuesta por Iverson (2013), para ello se tomó como densidad del material sólido la densidad de las rocas andesitas. La densidad de este tipo de roca se encuentra entre 2500 – 2800 kg/m³ (Alden, 2016), el valor empleado en este caso es de 2500 kg/m³, ya que la densidad del fluido que consideró es de agua lodosa, 1200 kg/m³ (Iverson & Denlinger, 2001).

$$\rho = \rho_s(1 - n) + \rho_f n$$

donde:

ρ_s = densidad del material sólido

ρ_f = densidad del fluido

n = porosidad (0.30 - fluido denso)

$$\rho = 2500(1 - 0.30) + 1200 * 0.30$$

$$\rho = 2110 \text{ kg/m}^3$$

De acuerdo con Mothes & Vallance, (2014), la mayoría de los lahares producidos por el volcán han sido andesíticos (por este motivo se tomó la densidad de esta roca en el cálculo previo), pobres en matriz, arenosos y ricos en clastos, durante la erupción más significativa y reciente ocurrida el 26 de junio de 1877, se produjeron lahares ricos en clastos y pobres en matriz, donde dominan la grava y arena. Las proporciones de grava en los depósitos encontrados en el drenaje norte son superiores a los del drenaje sur-oeste, los lahares producidos en 1877 y los más recientes tienen una composición alta de grava, están constituidos entre el 50 al 80% por clastos de este tamaño, además es común encontrar en todos los depósitos cantos rodados de varios metros de diámetro (Mothes & Vallance, 2014). En el tramo propuesto para la implantación del sistema se encuentra que la matriz contiene entre el 60 y 70% de grava mientras que el contenido de finos es menor al 10%, varía entre el 4 y 9% aproximadamente (Mothes & Vallance, 2014).

Los depósitos encontrados en el drenaje norte, sur y en Tambo-Tandayacu permiten clasificar al flujo de lodos como no cohesivos y pobres en arcilla, ya que el contenido de finos o limos y arcillas es menor al 6%, además en las muestras obtenidas de estos depósitos el contenido de arcilla era menor o insignificante (Ettinger, Mothes, Paris, & Schilling, 2007), por esta razón de acuerdo con Volkwein et al. (2011) y Coussot & Meunier (1996) se trata de un flujo de lodos granular.

En los estudios realizados sobre el gran lahar del Valle de los Chillos rico en matriz, generado entre 4500 a 4600 años atrás, se encontró que la misma está compuesta por ceniza, pómez y granos líticos (Mothes, Hall, & Janda, 1998).

3.4.2. Porcentaje de partículas gruesas en depósito encontrado en el río Tambo

Es de interés para este proyecto conocer que porcentaje del flujo está constituido por partículas de tamaño considerable, por ello en base a una fotografía de un depósito del flujo de lodos ocurrido en 1877 ubicado en la zona alta del río Tambo, en donde se observa claramente distintos tamaños

de partículas, se determinó que porcentaje del flujo constituyen las partículas mayores a 10 cm de diámetro. Se consideró un área de 3 m² para la cual se obtuvo el porcentaje de partículas mayores a 10 cm, como se puede observar en la figura 27, de este análisis se determinó que el 36.7% de las partículas por cada m² corresponde a partículas de este tamaño.

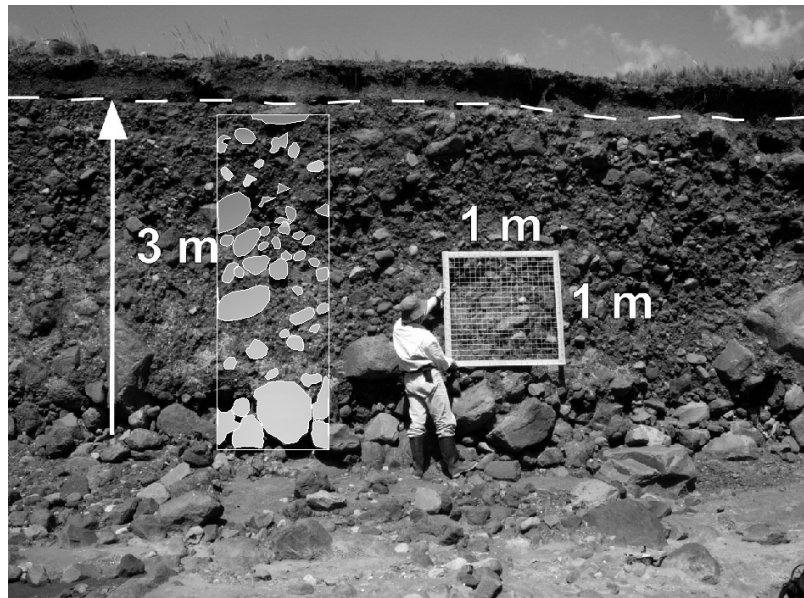


Figura 27. Depósito del lahar ubicado en la zona alta del río Tambo.

Fuente: (Ettinger, Mothes, Paris, & Schilling, 2007)

3.4.3. Volumen total e Hidrograma

El volumen total del evento considerado para este estudio es de 32.01 millones de m³, tomado del estudio de Bonito & Naranjo (2016). Por otro lado, el tiempo máximo del hidrograma de acuerdo con Aguilera et al. (2004) fue asumido como 30 minutos de acuerdo a la información histórica disponible, para este estudio el tiempo máximo considerado es el mismo.

Con esta información y tomando en cuenta que se trata de un hidrograma triangular se procede a calcular el caudal máximo de descarga. El hidrograma para la cuenca norte del volcán Cotopaxi se puede observar en la figura 28.

$$Q_p = \frac{V_T}{t} * 2$$

$$Q_p = \frac{32\,100\,000\,m^3}{1800\,s} * 2 = 35\,666.67\,m^3/s$$

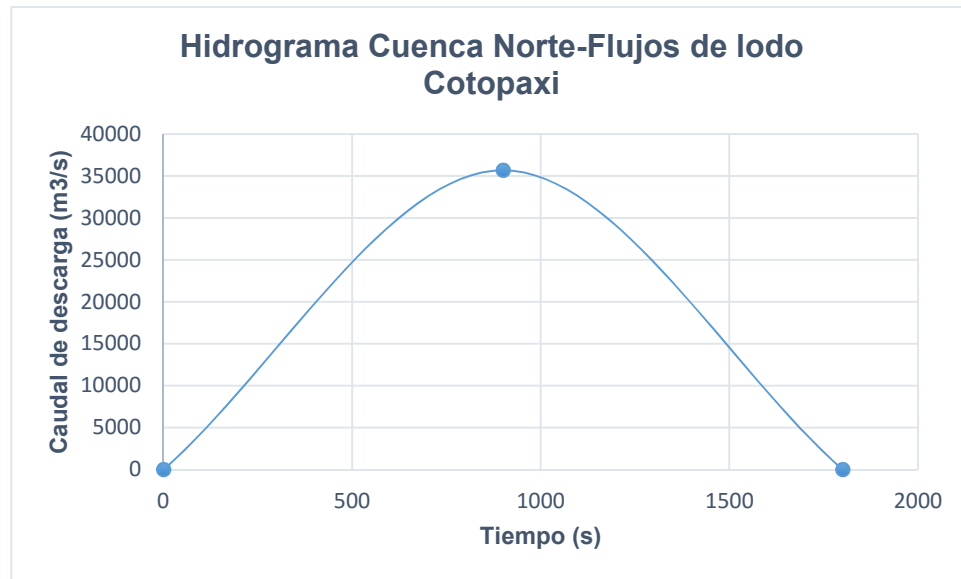


Figura 28. Hidrograma Cuenca Norte volcán Cotopaxi.

3.4.4. Modelación del flujo de lodos producido durante una posible erupción del volcán Cotopaxi

Existen dos parámetros fundamentales que permiten describir el comportamiento del flujo: la altura y velocidad del mismo.

En el caso del volcán Cotopaxi se han realizado varias simulaciones de sus lahares a lo largo de sus drenajes. Rebecca Williams (2006) realizó la simulación de los lahares que se dirigen por el drenaje sur del volcán utilizando TITAN2D. Aguilera, Pareschi, Rosi & Zanchetta (2004) empleando el programa específico SIM-LAHAR determinaron la altura de la onda, el tiempo de llegada entre otros parámetros del flujo que se dirige por el drenaje norte del volcán, basado en 170 perfiles transversales en escala 1:2000 con los que se determinó la geometría de los cauces (Aguilera & Toulkeridis, 2005).

La calibración del modelo es de vital importancia para obtener resultados reales y apropiados, para ello se debe contar con información histórica del evento, Aguilera et al. (2004) realizaron este procedimiento basado principalmente en la información que se presenta en las crónicas del evento de 1877 de Sodiro (1877) y Wolf (1878) así como en otros archivos históricos, ya que los depósitos y vestigios que pudo dejar el evento ocurrido hace más de 139 años son difíciles de identificar tanto por la intervención humana como

por la superposición de otros eventos. Este modelo está basado en las ecuaciones de masa y balance de momento para una mezcla de gran masa, es importante mencionar los supuestos del modelo, se consideró un volumen constante del lahar, una concentración de sedimentos también constante y una diferencia despreciable entre la velocidad de la fracción líquida y sólida. Las ecuaciones empleadas son análogas para flujos de agua, con una diferencia en el coeficiente de disipación que considera la reología del lahar (Aguilera, Pareschi, Rosi, & Zanchetta, 2004).

El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional mediante el modelo matemático LAHARZ, desarrollado por hidrólogos y vulcanólogos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), realizó la simulación de los flujos de lodo del volcán Cotopaxi, este modelo matemático se ejecuta a través de un Sistema de Información Geográfica sobre un modelo digital de elevación del terreno para ello se consideró los cuatro escenarios eruptivos que fueron mencionados en el Capítulo II, los resultados obtenidos se presentan como mapas de las zonas de inundación (Ordóñez, Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013).

Carrillo (2013) presentó como alternativa para la simulación de este flujo de lodos el uso del programa HEC-RAS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, la calibración del modelo la realizó basado en la simulación en SIM-LAHAR. Durante este proceso Carrillo obtuvo que el coeficiente de Manning (n), uno de los datos de entrada del programa, se encontraba entre 0.04 a 0.09 de acuerdo a estudios previos realizados, concluyendo que el valor del coeficiente que mejor se ajusta es de 0.09. En este caso la verificación del modelo se basó principalmente en las alturas de inundación del flujo en las zonas pobladas (Carrillo, 2013).

Como se puede observar las simulaciones presentadas se centran en la obtención de parámetros importantes como la profundidad del flujo y el tiempo de llegada ya que estos parámetros permiten determinar las potenciales zonas en peligro que se derivan en mapas de las zonas de inundación que a su vez son la base para la implementación de programas de evacuación de zonas pobladas.

En cuanto a la velocidad media del flujo la mayoría de las ecuaciones de resistencia que han sido propuestas están basadas en datos empíricos de parámetros promedio del flujo obtenidos de flujos prototipo medidos en flujos de laboratorio donde se usan mezclas de material simplificadas para simular el flujo (Rickenmann, 1999).

Rickenmann (1999) indica que la velocidad máxima de una oleada no necesariamente coincide con la parte de la ola donde ocurre la máxima profundidad, presenta un análisis en el que no considera que la profundidad máxima del flujo y la máxima velocidad pudieran no coincidir, así como la distinción entre la velocidad promedio en una sección transversal y la velocidad de traslación promedio. Presenta una comparación entre diferentes ecuaciones propuestas para estimar la velocidad máxima de la parte frontal del flujo de lodos (ver tabla 6) y además relaciones semi-teóricas para el cálculo de los coeficientes de resistencia del flujo en función del caudal pico de descarga (ver tabla 7).

En las ecuaciones mostradas en la tabla 6, H corresponde a la profundidad máxima del flujo en [m] mientras que S corresponde a la pendiente del lecho del canal. En la ecuación (1) la constante $1/3$ es válida para canales anchos rectangulares, pero depende de la sección transversal, en la ecuación (2) la constante $2/3$ también es válida para este tipo de canales. Las guías Japonesas para flujos de lodo proponen el uso de la ecuación (3) de Manning – Strickler (PWRI, 1998, citado en Rickenmann, 1999). La ecuación de Chézy (5) es usada en el enfoque de Voellmy que estima los parámetros del flujo para avalanchas de nieve pero que también es aplicado para flujos de lodo (Rickenmann, 1999).

Tabla 6.

Ecuaciones para estimar la velocidad promedio de las oleadas del flujo de lodos.

Tipo de flujo	Ecuación (m/s)	Coefficiente de resistencia del flujo –o Parámetro del material
Flujo Laminar Newtoniano	$v = \left(\frac{1}{3}\right) \rho g H^2 \frac{S}{\mu} \quad (1)$	Viscosidad dinámica de la mezcla grano - agua $\mu [kg/(sm)]$ $\rho [kg/m^3]$
Dilatant grain shearing	$v = \left(\frac{2}{3}\right) \xi H^{1.5} S \quad (2)$	Coefficiente agrupado que depende del tamaño de las partículas y su concentración $\xi [1/(sm^{1/2})]$
Flujo Turbulento Newtoniano: Ecuación de Manning – Strickler	$v = \left(\frac{1}{n}\right) H^{2/3} S^{1/2} \quad (3)$	Coefficiente de Manning $n [s/m^{1/3}]$
Flujo Turbulento Newtoniano: Ecuación de Chézy	$v = C H^{1/2} S^{1/2} \quad (4)$	Coefficiente de Chézy $C [m^{1/2}/s]$
Ecuación empírica	$v = C_1 H^{0.3} S^{0.5} \quad (5)$	Coefficiente empírico dimensional $C_1 [m^{0.7}/s]$

Fuente: Rickenmann (1999).

Tabla 7.

Relaciones semi-teóricas para el cálculo de los coeficientes de resistencia del flujo como función del caudal pico.

Tipo de flujo	Ecuación (m/s)
Flujo Laminar Newtoniano	$\mu = 20Q^{3/5}$
Dilatant grain shearing	$\xi = 150Q^{-2/5}$
Flujo Turbulento Newtoniano: Ecuación de Manning – Strickler	$n = 0.077Q^{1/15}$
Flujo Turbulento Newtoniano: Ecuación de Chézy	$C = 22$
Ecuación empírica	$C_1 = 10Q^{2/25}$

Fuente: Rickenmann (1999).

Rickenmann (1999) establece que al no contar con la suficiente información reológica se pueden emplear leyes de resistencia de flujo válidas para agua para describir el comportamiento promedio del flujo de lodo, también puntualiza que el factor C y n son función principalmente de la rugosidad del canal para flujos de agua, mientras que estos parámetros para flujos de lodos, en cierta medida, también pueden depender de las propiedades mecánicas de la mezcla.

El comportamiento del flujo puede ser simulado razonablemente bien usando la ecuación de Manning o Chezy para flujos de agua. Adicionalmente se ha propuesto en varios estudios que la velocidad pico del flujo puede ser estimada usando la ecuación de Manning-Strickler con $n \approx 0.10 \text{ s/m}^{1/3}$ (Rickenmann, 1999).

Con el fin de obtener la velocidad y altura del flujo se realizó la simulación del área de interés en el programa HEC-RAS, para ello se empleó un modelo digital del terreno, facilitado por la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE del cual se obtuvo curvas de nivel cada metro y con ello se siguió el procedimiento propuesto por Carrillo (2013) para un tramo del río Pita de aproximadamente cinco kilómetros aguas abajo de la unión de los ríos Pita y El Salto como se puede observar en la figura 29, utilizando un coeficiente de Manning de 0.09 considerando un flujo permanente supercrítico. Se procuró mantener una distancia de cinco metros entre las secciones transversales.

En la figura 30, se puede observar los resultados de la profundidad máxima del flujo a lo largo del perfil longitudinal del río. El máximo valor obtenido es de 61.53 m mientras que la profundidad mínima es de 19.68 m, es importante tomar en cuenta que el punto más alto del río se encuentra en la estación 5196. En cuanto a los resultados de velocidad, estos se presentan en la figura 31, el valor máximo obtenido es de 26.11 m/s.

En los resultados presentados por Aguilera et al. (2004) el máximo valor para la profundidad del flujo no sobrepasa a los 50 m, este valor no se encuentra tan alejado del valor obtenido en esta simulación. De igual manera

el ancho máximo alcanzado por el flujo de acuerdo a la simulación en SIM-LAHAR no supera los 200m, en la simulación en HEC-RAS para $n=0.09$ el valor máximo alcanzado es de 181.30 m (ver figura 32).

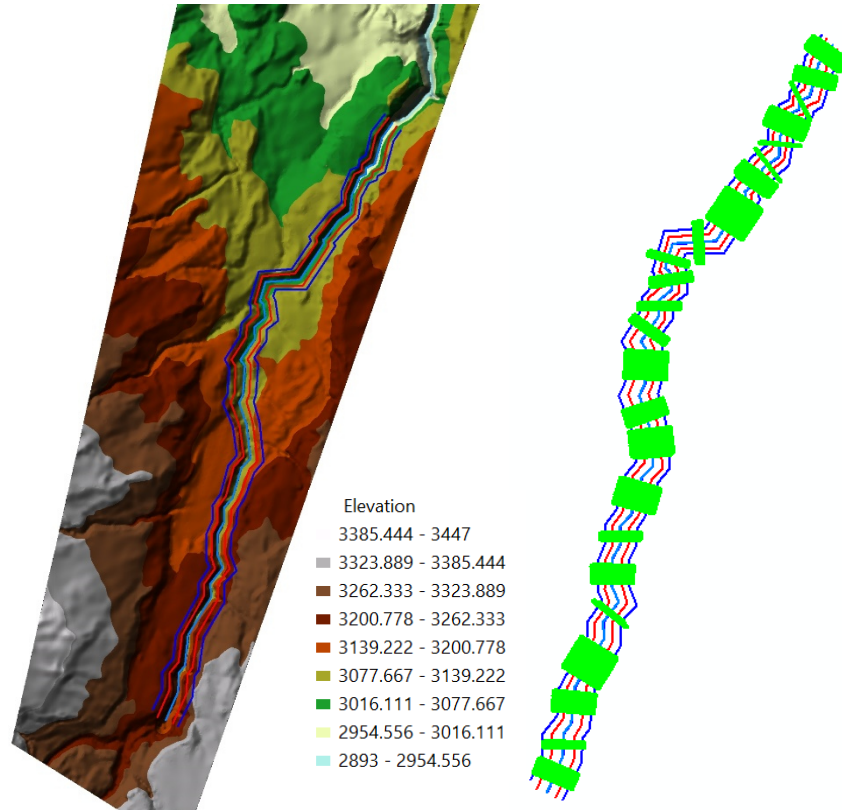


Figura 29. Pre-procesamiento modelo en HEC-RAS

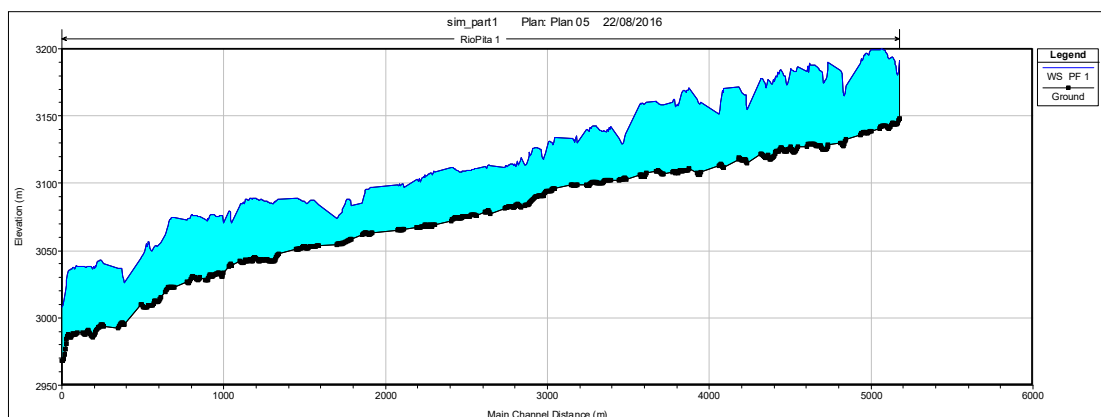


Figura 30. Resultados de la máxima profundidad del flujo de lodos del volcán Cotopaxi.

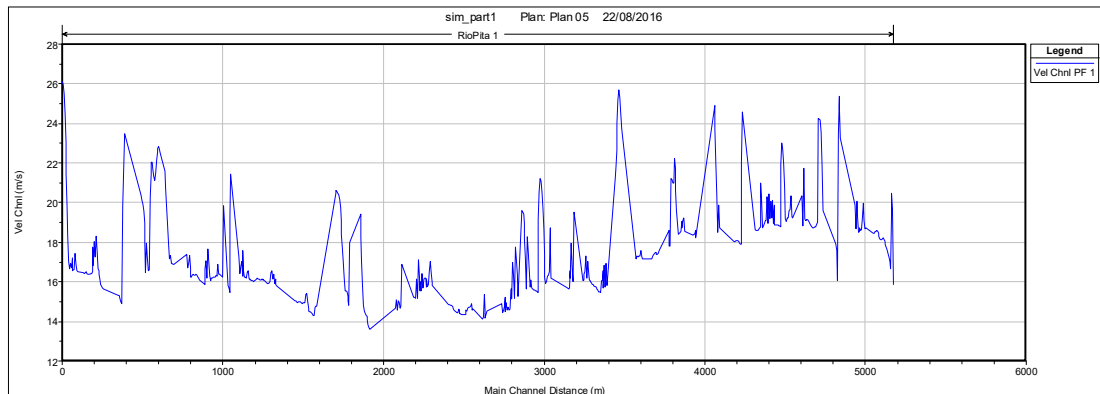


Figura 31. Resultados de velocidad del flujo de lodos del volcán Cotopaxi.

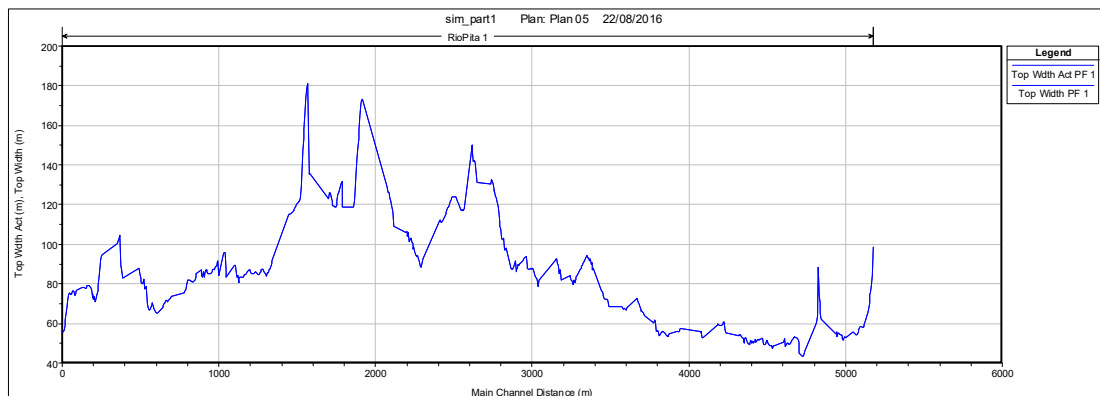


Figura 32. Máximo ancho alcanzado por el flujo.

De acuerdo con los resultados de Aguilera et al. (2004) la máxima profundidad alcanzada por el flujo en el tramo de interés es de 40 m, mientras que el mínimo valor de este parámetro es de 16 m para un volumen de lahares de 60 millones de m^3 . Es importante mencionar que Aguilera et al. (2004) presentan también resultados para un volumen de 40 millones de m^3 , donde la profundidad mínima y máxima del flujo es de 13 y 30 m, respectivamente.

Mothes & Vallance, (2014) presentan información sobre la altura y velocidad de los lahares del volcán Cotopaxi en el río Pita, en esta publicación la altura máxima del flujo es aproximadamente 40 m, en cuanto a la velocidad para el tramo de interés se encuentra entre 22 y 14 m/s, es importante mencionar que el volumen de lahares estimado para el drenaje norte del volcán en este estudio es de 75 a 100 millones de m^3 .

3.4.5. Velocidad crítica de desplazamiento

En base a la fotografía presentada del depósito de lahares de 1877 en la zona alta del río Tambo, donde se observa claramente diferentes tamaños de las partículas se realizó el cálculo de la velocidad crítica de desplazamiento (V_c), es decir la velocidad a la cual se inicia el movimiento de las mismas con la siguiente ecuación (Sandoval, 2013).

$$V_c = A\sqrt{gd}$$

donde,

d = diámetro medio de las partículas (m)

g = gravedad (m/s)

A = coeficiente empírico

Tabla 8.

Velocidad crítica de desplazamiento de las partículas.

Coeficiente empírico		Vc (m/s)
Izbash $A = 1.7\sqrt{\gamma_s - 1}$	$\gamma_s = 2.50$ Peso específico de sedimentos (T/m ³)	2.91
Studenichnikov $A = 1.15 \left(\frac{H}{d}\right)^{0.25}$	$H = 3$ profundidad del flujo sobre la partícula (m) $d = 0.20m$	3.17
Goncharov $A = 0.95 \lg\left(\frac{8.8H}{d_{max}}\right)$	$d_{max} = 0.60 m$	2.19

Fuente: (Sandoval, 2013)

De acuerdo con los resultados obtenidos para este parámetro se puede concluir que las partículas pudieron ser fácilmente arrastradas por el flujo ya que la velocidad mínima determinada en la simulación es de 13.62 m/s y la máxima velocidad crítica de desplazamiento es de 3.17 m/s (ver tabla 8), este cálculo es únicamente referencial ya que la fotografía con la que se cuenta no corresponde al río Pita.

CAPÍTULO IV: MALLAS GEOBRUGG

4.1. Generalidades

El sistema de barreras flexibles fue desarrollado por la empresa suiza Geobrugg junto con el Instituto Federal Suizo para la Investigación de Bosques, Nieve y Paisaje, WSL, para ello se realizaron las actividades necesarias como investigaciones detalladas de los diferentes parámetros relevantes, desarrollaron un modelo numérico (elementos finitos discretos) para el sistema, el mismo que se calibró y verificó con ensayos y pruebas a escala real con la debida supervisión y finalmente se desarrolló un concepto de dimensionamiento apropiado que considera tanto el impacto dinámico por masa distribuida como el proceso de llenado y de desborde (Geobrugg AG, 2011).

Las barreras están diseñadas para disminuir la velocidad del flujo y recoger el material entrante como resultado de su capacidad de deformación. Al tratarse de una malla, su estructura permite el drenaje de la mezcla lo que llega rápidamente a un punto muerto donde se estabiliza debido al incremento de la fricción de las partículas sólidas. El material adicional es detenido o desacelerado debido a la acumulación de sedimentos, hasta que la barrera se encuentra totalmente llena (Volkwein A. , 2014).

La principal ventaja de este sistema es su rápida y simple instalación si se compara con sistemas de retención rígidos ya que puede ser instalado sin el uso de maquinaria pesada y sin grandes movimientos de materiales. La construcción final se puede integrar al paisaje debido a que tiene una apariencia bastante transparente como se puede observar en la figura 33. La protección contra la corrosión garantiza un mínimo de vida útil entre 30 y 50 años siempre que no se haya producido un evento. Cuando un evento ocurre las mallas pueden ser vaciadas y limpiadas. Además como norma los elementos de freno deben ser reemplazados (Volkwein A. , 2014).



Figura 33. Barrera Flexible instalada en Berner Oberland.

Fuente: (Geobrugg, 2016)

4.1.1. Disposición de las barreras

Existen dos tipos de disposición de las barreras que dependen de la forma del torrente. Para secciones transversales amplias con forma de U, con longitudes mayores a 15m de ancho, se desarrolló un sistema con postes en la mitad de la construcción que transfieren las cargas a los extremos del cauce. Para los cauces más estrechos con forma de V de hasta 12-15 m de ancho un sistema sin postes intermedios es suficiente, como se puede ver en la figura 34. La altura estándar de construcción de las mallas se encuentra entre tres y seis metros (Wendeler, Volkwein, Roth, Denk, & Wartmann, 2016).

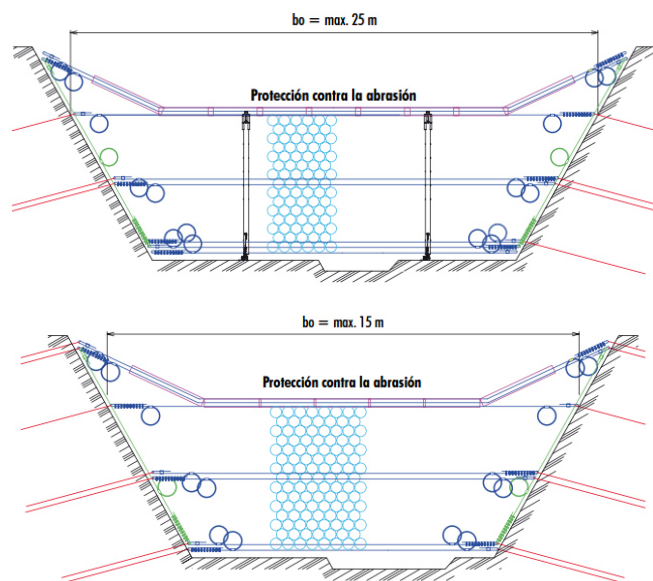


Figura 34. Sistema tipo UX (arriba) y VX (abajo).

Fuente: (Geobrugg, 2016)

4.1.2. Elementos del sistema de mallas flexibles

Una malla flexible consta de varios elementos. En la figura 35 se presenta los componentes genéricos con los que debería contar el sistema, estos componentes deben ser protegidos adecuadamente contra la corrosión.

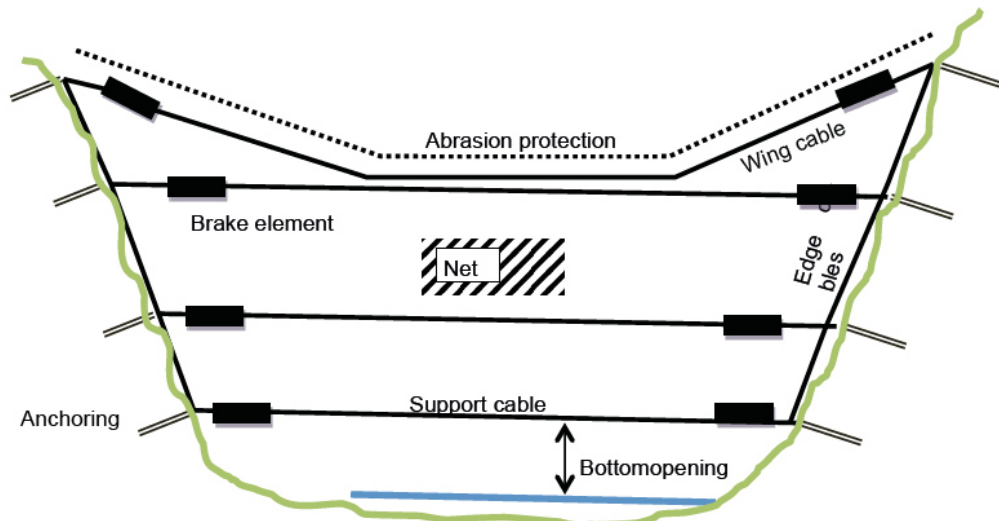


Figura 35. Elementos de una malla flexible.

Fuente: (Volkwein A. , 2014)

a) Red

La red está cargada inicialmente por el flujo de lodos y debe transmitir las fuerzas de impacto y compresión actuantes a la estructura de soporte. Su distribución espacial debe ser compatible con la capacidad de carga de la red, las redes más débiles requieren más cables de soporte. El tamaño de la malla debe corresponder aproximadamente al diámetro de grano d_{90} , es decir el 90% de las partículas del flujo tienen un diámetro menor este, lo que permite que las partículas más pequeñas y el agua puedan ser drenadas, una malla secundaria con aberturas menores puede ser montada en la malla primaria de forma que se cumpla con este objetivo (Volkwein A. , 2014), esta malla secundaria no interviene dentro del dimensionamiento (Wendeler C. , 2010).

La red está formada por un conjunto de anillos de alambre de acero de alta resistencia como se puede ver en la figura 36, absorbe tanto las cargas dinámicas como las cargas estáticas, por lo cual cumple su función aun cuando la malla se encuentra llena (Geobrug, 2016).



Figura 36. Red de anillos.

Fuente: (Geobrugg, 2016)

b) Cables de soporte

Estos cables son los encargados de transmitir las cargas soportadas por la red hacia los anclajes, se extienden desde un banco del río hacia el otro, adicionalmente los cables de soporte deben estar distribuidos uniformemente a lo largo de la altura de la red (Volkwein A. , 2014). Cada cable cuenta con una capa de zinc y aluminio que los protege de la corrosión (Wendeler C. , 2016).

c) Elementos de frenado

Las cargas son transferidas por la red, los cables de soporte y el cable de ala hacia los anclajes. Los elementos de frenado con una gran capacidad de deformación plástica disminuyen las cargas pico que pueden presentarse por el impacto individual de grandes bloques y debido a su gran alargamiento optimizan la forma de la barrera para soportar de mejor manera las cargas actuantes (Volkwein A. , 2014).

Los anillos de frenado se incorporan en los cables de soporte (ver figura 37), cuando estos elementos se activan reducen la energía que debe absorber la red sin dañar los cables, por lo cual la carga de rotura de los mismos no disminuye debido a la activación de los frenos (Geobrugg, 2016).

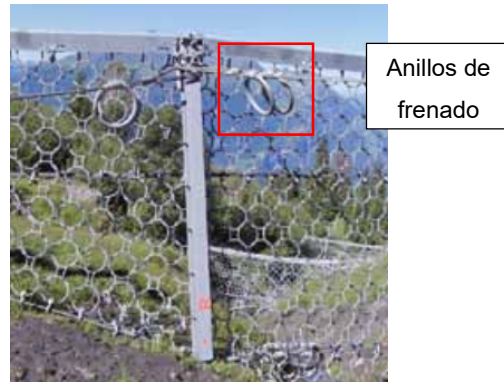


Figura 37. Anillos de frenado y apoyos.

Fuente: (Geobruigg, 2016)

d) Cables de ala y cables de borde

Los cables de ala van a través de la mitad central de la barrera paralelos al cable de soporte superior y son guiados hacia arriba a los lados, esta disposición hace que el flujo se concentre en el centro de la barrera y reduce la erosión de los flancos del canal. Este cable también permite que la reducción del lado superior de la red sea menor (Volkwein A. , 2014).

Los cables de borde van paralelos a los flancos del canal y se anclan a estos a intervalos regulares, como resultado de esta configuración la red se apoya lateralmente impidiendo aberturas laterales de la barrera (Volkwein A. , 2014).

e) Anclaje

La orientación de los anclajes debe ser ajustada a la geometría de la barrera. Los anclajes laterales de los cables son generalmente instalados mediante anclajes de cable o anclajes auto perforantes con cabezas de anclaje flexibles, estas últimas permiten la carga óptima de los cables, incluso cuando la barrera está deformada. El Instituto Suizo WSL recomienda cimentaciones para las cabezas de anclaje (Volkwein A. , 2014).

Geobruigg presenta este sistema con anclajes de cable espiral de cabeza flexible insensible a los impactos (ver figura 38) que se adaptan a la orientación de los esfuerzos en la dirección de la tracción y

adicionalmente se pueden desviar 30 grados con respecto al eje de perforación sin que esto represente una pérdida de su capacidad portante. La longitud de anclaje depende de la capacidad del suelo, la misma varía entre dos y diez metros (Wendeler C. , 2016).



Figura 38. Anclaje del sistema.

Fuente: (Geobrugg, 2016)

f) Apoyos

En el caso de secciones amplias, mayores a 15 m, donde el lecho del canal es amplio, la altura útil suelen ser muy bajas cuando el sistema se encuentra lleno, por ello soportes o apoyos adicionales pueden ayudar a mantener la altura. La cimentación de los apoyos debe ser diseñada a tensión, compresión y corte (Volkwein A. , 2014).

En el caso de las mallas Geobrugg, las barreras tipo UX cuentan con perfiles HEB como apoyos (ver figura 37), los cuales se colocan en la placa base a través de una articulación. Estos apoyos guían los cables de los cuales cuelga la red (Geobrugg, 2016).

g) Protección contra la abrasión

De acuerdo con el instituto WSL, cuando se espera un rebose o desborde del flujo cuando ya se encuentra llena o debido a la instalación de barreras individuales en serie, el cable de soporte superior y el cable de ala deben protegerse contra la abrasión y contra el impacto de grandes bloques.

Las mallas Geobruigg cuentan con perfiles angulares de acero que protegen los cables superiores contra la abrasión provocada por escombros y grava, como se observa en la figura 39, los cuales pueden ser reemplazados de acuerdo a su desgaste.



Figura 39. Protección contra la abrasión.

Fuente: (Geobruigg, 2016)

El sistema de barreras flexibles propuesto por Geobruigg se puede apreciar de forma resumida en la figura 40, en donde se puede observar los elementos que conforman dicho sistema y su respectiva ubicación.

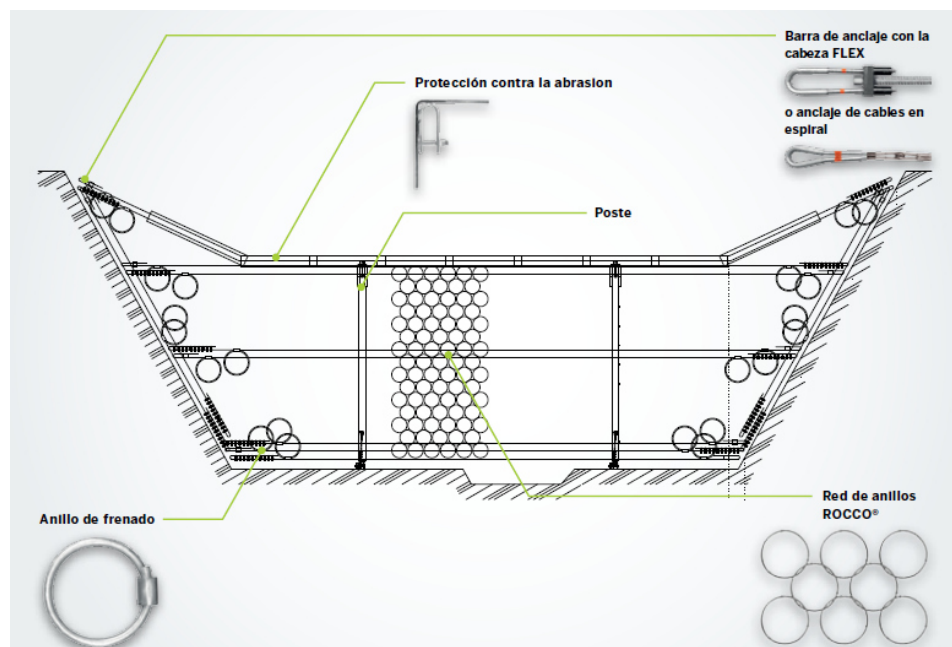


Figura 40. Componentes del sistema de mallas flexibles Geobruigg.

Fuente: (Geobruigg, 2016)

4.2. Parámetros de Diseño

4.2.1. Datos de entrada

Los datos de entrada necesarios para el diseño de la barrera se fundamentan en análisis previos del evento como tal y de la ubicación de la malla flexible de acuerdo a consideraciones topográficas. Los parámetros necesarios son los siguientes:

- Volumen total del evento
- Caudal pico de descarga
- Densidad
- Altura del flujo
- Velocidad frontal del flujo
- Pendiente del canal
- Características geométricas de la sección transversal / barrera flexible
- Diámetro d_{90} de las partículas sólidas del flujo

La velocidad y la altura del flujo tienen una influencia significativa en las presiones de impacto que se esperan. En cuanto al volumen, la pendiente del canal y el ángulo de sedimentación del material son relevantes con respecto a la capacidad de retención de cada barrera como se explicó en el capítulo 3 (Volkwein A. , 2014).

4.2.2. Factor de seguridad

El concepto de seguridad propuesto por Volkwein et al. (2011) no se basa en un análisis probabilístico debido a que los datos de investigación de campo son limitados, en su lugar presenta parámetros de seguridad en base a directrices suizas que se encargan de impactos de amenazas naturales. Propone dos factores de seguridad:

- Factor de seguridad de Resistencia

De acuerdo con Buwal (2007) citado por Volkwein et al. (2011) este factor se puede establecer en 1.35.

$$\gamma_R = 1.35$$

- Factor de seguridad de Carga

Este factor de seguridad se ve influenciado por dos parámetros, en primer lugar por el riesgo potencial y en segundo lugar por el período de retorno, ambos parámetros se pueden observar en la tabla 9 y 10.

Tabla 9.

Clases de riesgo de acuerdo a las consecuencias potenciales.

Clase de Riesgo	Consecuencias potenciales
1	- Bajo riesgo potencial en pérdida de vidas humanas. - Consecuencias económicas bajas.
2	- Riesgo potencial de pérdida de vidas humanas medio. - Consecuencias económicas significativas.
3	- Riesgo potencial de pérdida de vidas humanas alto. - Consecuencias económicas importantes.

Fuente: (Volkwein, Wendeler, & Guasti, 2011)

Tabla 10.

Factor de seguridad de carga γ_F para diferentes clases de riesgo y períodos de tiempo.

Risk class \ Return period	1 - 30 years	30 – 100 years	More than 100 years
1	1.0	1.0	1.0
2	1.3	1.3	1.2
3	1.5	1.3	1.2

Fuente: (Volkwein, Wendeler, & Guasti, 2011)

4.3. Aplicaciones existentes de estas mallas

Existen diversas aplicaciones para el sistema de mallas flexibles, algunos de los mismos se presentan a continuación.

4.3.1. Retención de flujo de lodos

En la figura 41 se muestra una de las aplicaciones de este sistema, fue implantado en Tobinosu, Japón en el año 2010. La altura del sistema es de seis metros, cuenta con una longitud de 26 metros y el volumen soportado es de 1500 m³ en un terreno de inclinación de 10°. La versatilidad del sistema se

puede apreciar en la figura 42, la barrera fue instalada en Goiserer Weissenbach, Austria, la malla cuenta con una altura y longitud de 5.50 m.

En la figura 43 se observa un sistema de barreras multinivel para flujos de lodo de mayor magnitud, conformado por 13 barreras con una capacidad de retención de 13000 m³. Se pueden realizar diseños especiales para casos puntuales en los que no se podría emplear barreras estándar, como el que se aprecia en la figura 44, la altura de esta malla es de 20m y su longitud es de 40m, el sistema fue instalado en el año 2012 y tiene una capacidad de retención de 13000 m³.



Figura 41. Barrera flexible para retención de flujo de lodos en Tobinosu, Japón.

Fuente: (Geobrugg, 2006)



Figura 42. Malla flexible para retención de flujo de lodos en Goiserer Weissenbach, Austria.

Fuente: (Geobrugg, 2006)



Figura 43. Barrera múltiple para retención de flujo de lodos. Milibach, Meiringen Suiza.

Fuente: (Geobrugg, 2016)



Figura 44. Diseño especial de barrera tipo VX

Fuente: (Geobrugg, 2016)

4.3.2. Contra deslizamientos de tierras

Los deslizamientos de tierra son fenómenos frecuentes, especialmente en época de fuertes lluvias invernales en zonas montañosas, ocurren principalmente en estas zonas debido a la saturación del suelo. La aplicación del sistema en estos casos se puede observar en la figura 45.



Figura 45. Malla flexible para contra deslizamiento de tierra.

Fuente: (Geobrugg, 2016)

4.3.3. *Contra avalancha de nieve*

En la figura 46 se puede observar la aplicación de las barreras flexibles para la retención de avalanchas de nieve.



Figura 46. Barrera flexible contra avalancha de nieve.

Fuente: (Geobrugg, 2006)

4.3.4. *Contra caída de rocas y desprendimiento de bloques*

Esta aplicación del sistema de mallas flexibles (ver figura 47) se emplea ampliamente en bermas de minas, las barreras han sido probadas en modelos a escala real y certificadas de acuerdo a normativas suizas para mallas contra desprendimientos de rocas.



Figura 47. Barrera flexible contra caída de rocas.

Fuente: (Geobrugg, 2016)

4.3.5. Otros usos

En el caso de Engler, Hasliberg Suiza que se aprecia en la figura 48, la barrera se emplea para absorber específicamente la energía del frente del flujo, no tiene una gran capacidad de retención debido a que el terreno tiene una gran pendiente (Geobrugg, 2016).



Figura 48. Disipador para el frenado del frente del flujo de detritos.

Fuente: (Geobrugg, 2016)

CAPÍTULO V: DISEÑO Y UBICACIÓN DE LAS MALLAS

5.1. Número de mallas flexibles para el sistema

Como se mencionó en el capítulo III se consideraron diez mallas flexibles, cinco de ellas se encuentran ubicadas entre el sector de La Caldera y la unión del río Pita y Salto, la cinco restantes se encuentran ubicadas después del sector de La Caldera en sentido norte. Las diez mallas fueron consideradas finalmente para formar el sistema de mallas flexibles multi-nivel.

5.2. Distancia entre mallas

La distancia entre mallas es importante cuando se emplea un sistema de barreras en serie o multinivel, la misma debe ser la suficiente de forma que el salto hidráulico y la curva de remanso próxima a la presa filtrante pueda alcanzar la máxima pérdida de energía. La distancia entre mallas no debe ser menor a la longitud de contrapresión (Volkwein, Wendeler, & Guasti, 2011). Wendeler, (2016) expresa que para barreras en escalón la longitud entre ellas debe ser mayor a diez metros. En la tabla 11 se puede observar que la distancia entre las secciones consideradas supera los 280 metros.

Tabla 11.
Distancia entre mallas

Sección	Distancia a la siguiente malla (m)
1 - 2	326.18
2 - 3	316.97
3 - 4	333.26
4 - 5	288.18
5 - 6	901.01
6 - 7	859.11
7 - 8	378.89
8 - 9	702.85
9 - 10	547.85

5.3. Características físicas de las secciones

A continuación se presenta diferentes características de las secciones propuestas para el sistema de mallas flexibles, como la altura y velocidad del

flujo de lahares de acuerdo con la simulación realizada (ver Anexo 1) y un esquema de las dimensiones cada sección (ver figuras 49 - 58).

5.3.1. Sección 1

- Altura de la malla: 6 m
- Abertura inferior: 0.34 m
- Altura del flujo: 49.79 m
- Velocidad del flujo: 17.27 m/s
- Pendiente: 2.30%

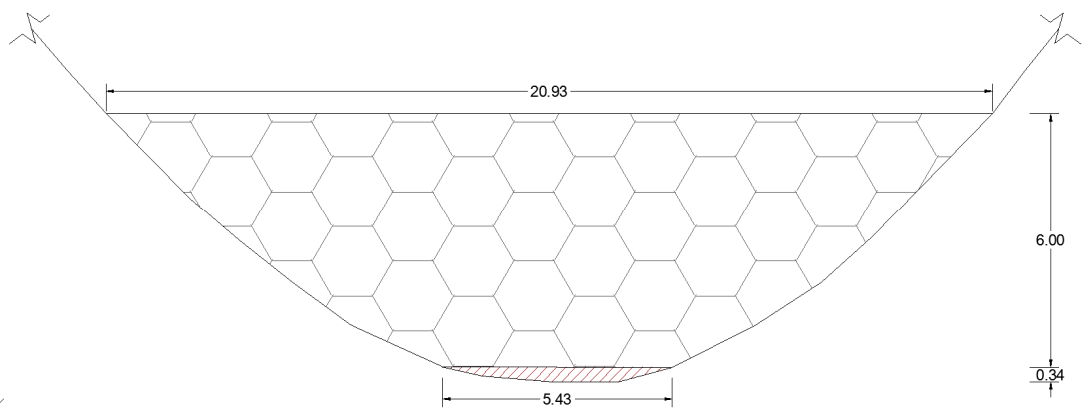


Figura 49. Esquema Sección 1.

5.3.2. Sección 2

- Altura de la malla: 5.50 m
- Abertura inferior: 0.06 m
- Altura del flujo: 46.08 m
- Velocidad del flujo: 17.16 m/s
- Pendiente: 3.81%

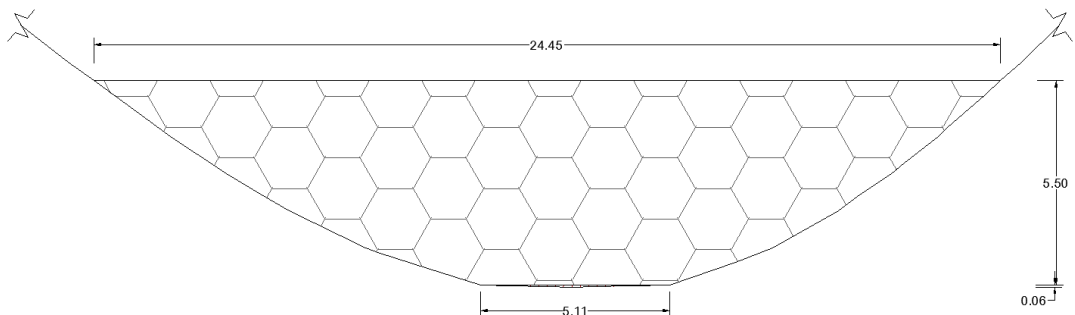


Figura 50. Esquema Sección 2.

5.3.3. Sección 3

- Altura de la malla: 6 m
- Abertura inferior: 0.05 m
- Altura del flujo: 46.05 m
- Velocidad del flujo: 16.18 m/s
- Pendiente: 2.08%

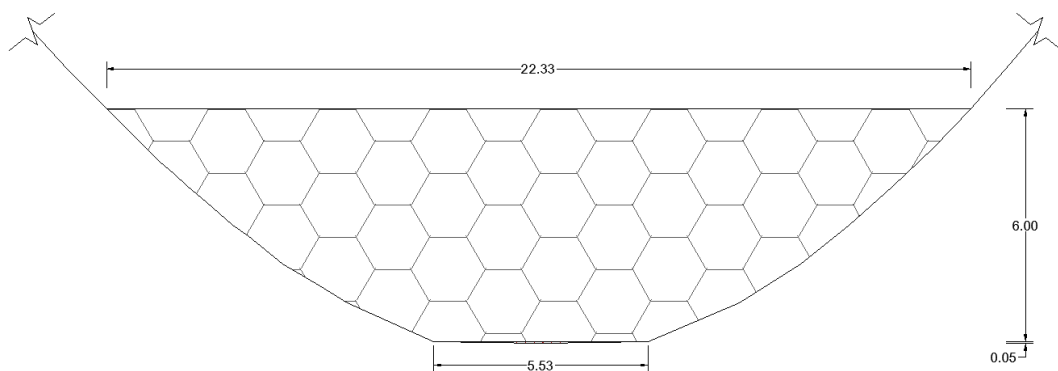


Figura 51. Esquema Sección 3.

5.3.4. Sección 4

- Altura de la malla: 6 m
- Altura del flujo: 44.64 m
- Velocidad del flujo: 16.0 m/s
- Pendiente: 1.82%

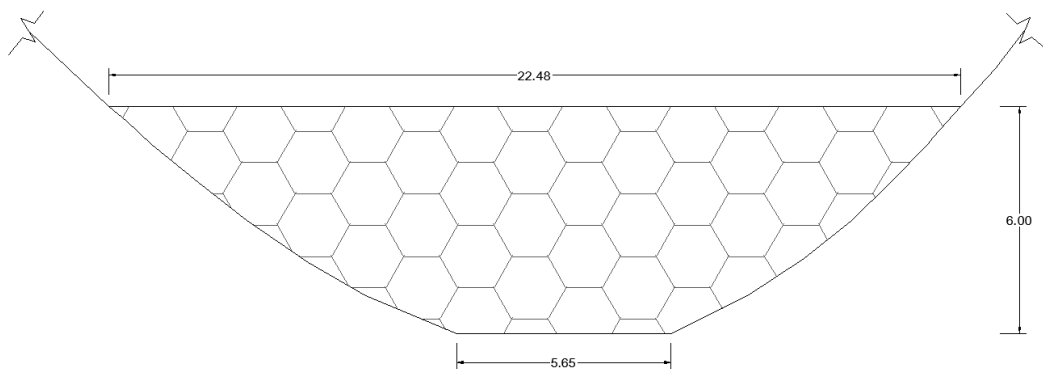


Figura 52. Esquema Sección 4.

5.3.5. Sección 5

- Altura de la malla: 4 m
- Abertura inferior 0.09 m

- Altura del flujo: 36.01 m
- Velocidad del flujo: 14.13 m/s
- Pendiente: 1.27%

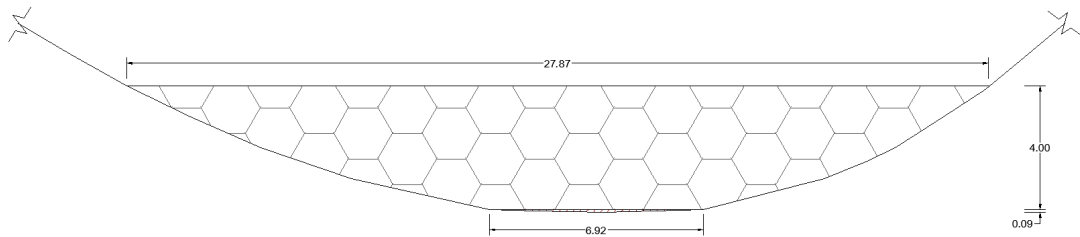


Figura 53. Esquema Sección 5.

5.3.6. Sección 6

- Altura de la malla: 6 m
- Altura del flujo: 39.76 m
- Abertura inferior: 0.29 m
- Velocidad del flujo: 14.63 m/s
- Pendiente: 2.36%

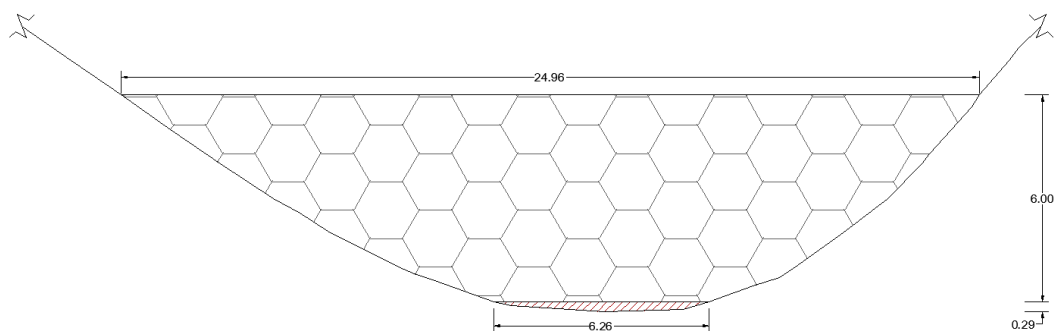


Figura 54. Esquema Sección 6.

5.3.7. Sección 7

- Altura de la malla: 4 m
- Abertura inferior: 0.35 m
- Altura del flujo: 40.93 m
- Velocidad del flujo: 16.04 m/s
- Pendiente: 1.50%

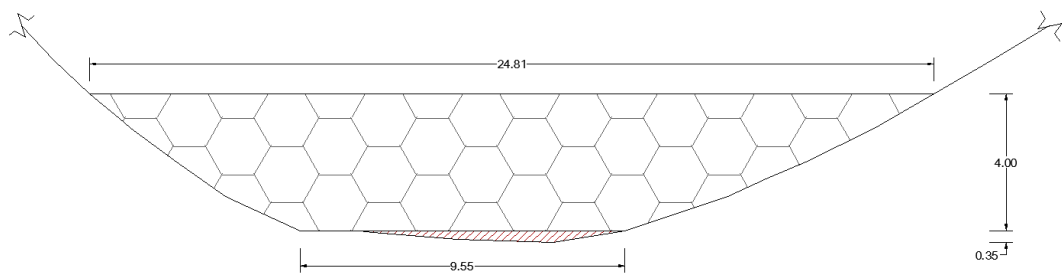


Figura 55. Esquema Sección 7.

5.3.8. Sección 8

- Altura de la malla: 6 m
- Abertura inferior: 0.23 m
- Altura del flujo: 51.98 m
- Velocidad del flujo: 17.17 m/s
- Pendiente: 0.98%

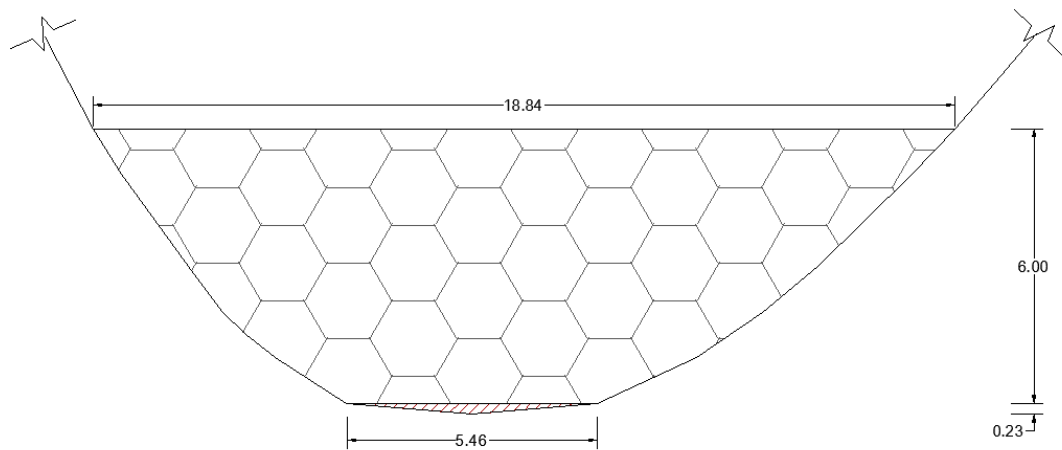


Figura 56. Esquema Sección 8.

5.3.9. Sección 9

- Altura de la malla: 6 m
- Abertura inferior: 0.92 m
- Altura del flujo: 55.16
- Velocidad del flujo: 18.65 m/s
- Pendiente: 1.31%

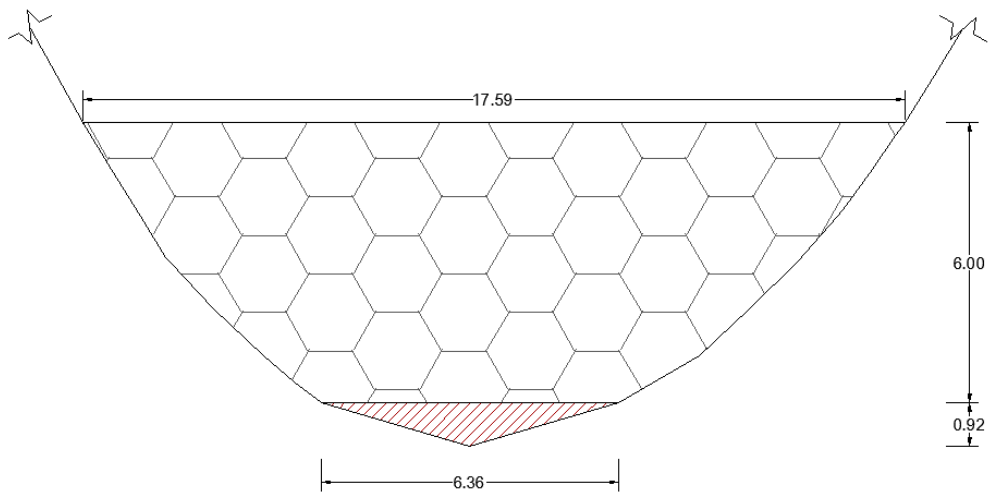


Figura 57. Esquema Sección 9.

5.3.10. *Sección 10*

- Altura de la malla: 6 m
- Abertura inferior: 0.31 m
- Altura del flujo: 41.70 m
- Velocidad del flujo: 22.65 m/s
- Pendiente: 2.79%

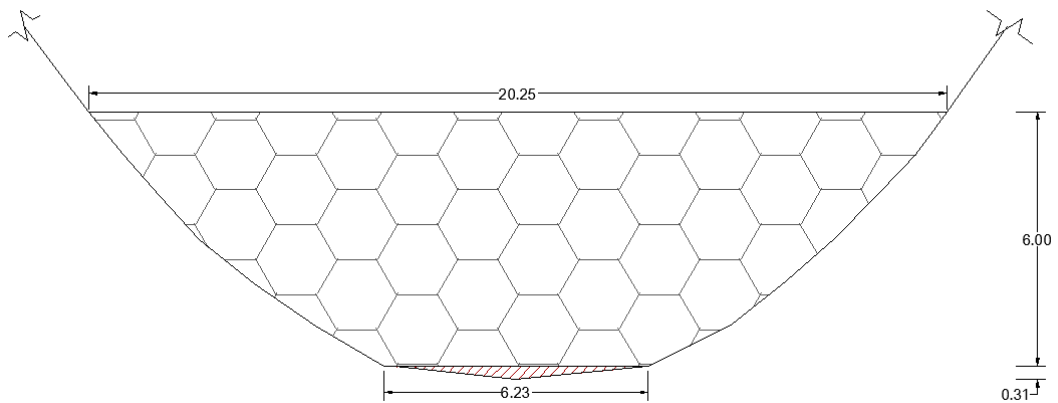


Figura 58. Esquema Sección 10.

5.4. Volúmenes de retención entre mallas

El volumen de retención fue calculado de acuerdo al procedimiento indicado en el capítulo III, en la tabla 12 se presenta el cálculo de este volumen para la

sección 1, como se mencionó previamente tanto el primer volumen parcial como el último fueron afectados por un factor de 2/3, la última fila de esta tabla corresponde al volumen acumulado por el asentamiento del material. En el Anexo 2 se muestra el cálculo para las secciones restantes. En la tabla 13 se presenta el resumen del volumen total retenido por cada sección de acuerdo a su respectiva altura y el volumen total retenido por el conjunto de mallas.

Tabla 12.

Cálculo del volumen de retención de la Sección 1.

COTA	A_{total} (m²)	A_{promedio}	Vol. Parcial (m³)	Vol. Acumulado (m³)
2986	17.47			
2987	72.32	44.89	29.93	29.93
2988	200.15	136.24	136.24	166.17
2989	404.00	302.08	302.08	468.25
2990	727.60	565.80	565.80	1,034.05
2991	1,141.95	934.77	934.77	1,968.82
2992	1,605.65	1,373.80	1,373.80	3,342.62
2993	2,162.07	1,883.86	1,883.86	5,226.48
2994	2,674.12	2,418.10	2,418.10	7,644.58
2995	3,253.92	2,964.02	2,964.02	10,608.60
2995.5	3,579.31	3,416.61	1,708.31	12,316.91
2998.7	5,707.58	4,643.44	10,011.99	22,328.90

Tabla 13.

Volumen retenido en cada sección.

Sección	Volumen Retenido (m³)
1	22,328.89
2	10,942.53
3	22,894.23
4	23,193.45
5	23,822.63
6	18,691.64
7	14,925.41
8	38,561.06
9	23,935.10
10	22,061.95
TOTAL	221,356.89

Tomando en cuenta que el volumen total para el evento es de 32.10 millones de m³ y que de acuerdo al análisis realizado en uno de los depósitos del lahar de 1877, el cual es considerado como el evento máximo probable (Aguilera & Toulkeridis, 2005) donde se determinó que el 36.70% de las partículas, es decir 11.78 millones de m³, tienen un diámetro mayor o igual a 10 cm con el sistema propuesto se consigue retener el 1.9% de esta fracción del flujo. Se tomó esta consideración debido a que las partículas de mayor tamaño son las que representan mayor riesgo por el daño que pudieran causar.

5.5. Diseño de las mallas flexibles ante las cargas propuestas

5.5.1. Presión hidrostática

La presión hidrostática es calculada de acuerdo con Volkwein (2014) con la siguiente expresión:

$$P_{estática} = KH\rho g$$

donde,

K = 1 coeficiente de

H = la altura del flujo en (m),

ρ = densidad del flujo (kg/m³)

Esta ecuación también puede ser expresada en función del peso específico, siendo ésta la ecuación más empleada.

$$\gamma = \rho g$$

$$P_{estática} = \gamma H$$

donde,

γ = Peso específico del flujo (N/m³)

En la tabla 14 se observa los resultados de la carga hidrostática para cada sección, H_o corresponde a la altura del sistema una vez que la malla se

encuentra completamente llena, $h_{fi\ total}$ corresponde a la altura máxima del flujo que se espera en cada sección.

Tabla 14.

Cálculo de la carga hidrostática para cada sección

Sección	H_o (m)	$h_{fi\ total}$ (m)	N/m ²	kg/cm ²
			P_{estat}	P_{estat}
1	4.50	49.79	1,030,608.19	10.51
2	4.10	46.08	953,814.53	9.72
3	4.50	46.05	953,193.56	9.72
4	4.50	44.64	924,007.82	9.42
5	3.00	36.01	745,374.59	7.60
6	4.50	39.76	822,996.22	8.39
7	3.00	40.93	847,214.16	8.64
8	4.50	51.98	1,075,939.22	10.97
9	4.50	55.16	1,141,762.36	11.64
10	4.50	41.7	863,152.47	8.80

5.5.2. Presión hidrodinámica

La presión hidrodinámica se puede obtener a partir de la fuerza dinámica al dividirla por el área.

$$F_{dinámica} = C_p \gamma A \frac{v^2}{2g}$$

donde,

C_p = coeficiente de presión

γ = Peso específico del flujo (N/m³)

v = velocidad del flujo (m/s)

$$P_{dinámica} = F_{dinámica} / A$$

$$P_{dinámica} = C_p \rho g \frac{v^2}{2g}$$

$$P_{dinámica} = C_p \rho \frac{v^2}{2}$$

Volkwein (2014) presenta la siguiente ecuación para calcular la presión dinámica del flujo sobre la malla.

$$P_{dinámica} = \alpha \rho v^2$$

Donde, α corresponde también a un coeficiente de presión y puede expresarse de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{C_p}{2}$$

Al tomar $\alpha = 1$, en realidad se está duplicando la fuerza dinámica ya que el valor del coeficiente de presión, C_p , en este caso es igual a 2.

En la tabla 15 se presenta los resultados del cálculo de la presión dinámica para cada sección, la velocidad empleada en el cálculo corresponde a los resultados de la simulación en HEC-RAS. Los cálculos se realizaron tomando en cuenta un coeficiente de presión $C_p=2$.

Tabla 15.

Cálculo de la carga hidrodinámica para cada sección

Sección	H _o (m)	V (m/s)	N/m ²	kg/cm ²
			P _{dyn}	P _{dyn}
1	4.50	17.27	629,313.62	6.42
2	4.10	17.16	621,322.42	6.33
3	4.50	16.18	552,381.96	5.63
4	4.50	16.00	540,160.00	5.51
5	3.00	14.13	421,276.06	4.29
6	4.50	14.63	451,617.86	4.60
7	3.00	16.04	542,864.18	5.53
8	4.50	17.17	622,046.78	6.34
9	4.50	18.65	733,905.48	7.48
10	4.50	22.65	1,082,477.48	11.03

5.5.3. Esfuerzo de corte

Cuando la barrera se encuentra llena y existe un desbordamiento del flujo un esfuerzo adicional actúa sobre la parte superior de la malla, este esfuerzo puede ser calculado con la siguiente expresión (Volkwein A. , 2014).

$$\tau = h_{fl} \rho g \tan(\varphi)$$

donde,

h_{fl} = corresponde a la altura del flujo sin tomar en cuenta la altura de la barrera llena.

φ = ángulo de fricción del material.

En la tabla 16 se presenta el esfuerzo de corte para cada sección, para este estudio el valor empleado para el ángulo de fricción interna del material presente en flujos de lodos es de 37° , de acuerdo con lo presentado por Pareschi (1994).

Tabla 16.

Cálculo del esfuerzo cortante para cada sección.

Sección	h_{fl} (m)	T	
		N/m ²	kg/cm ²
1	45.29	706,428.47	7.20
2	41.98	654,799.45	6.67
3	41.55	648,092.36	6.61
4	40.14	626,099.33	6.38
5	33.01	514,886.37	5.25
6	35.26	549,981.62	5.61
7	37.93	591,627.99	6.03
8	47.48	740,587.85	7.55
9	50.66	790,189.14	8.05
10	37.2	580,241.53	5.91

5.5.4. Diseño de los cables de soporte

5.5.4.1. Estados de Carga

Para el diseño de los cables de soporte se han considerado dos estados de carga, los cuales se describen a continuación.

- Estado de Carga 1: en este estado actúa únicamente la presión hidrodinámica, se asume que la malla flexible se llena con la primera oleada que llega del flujo como se puede observar en la figura 59.

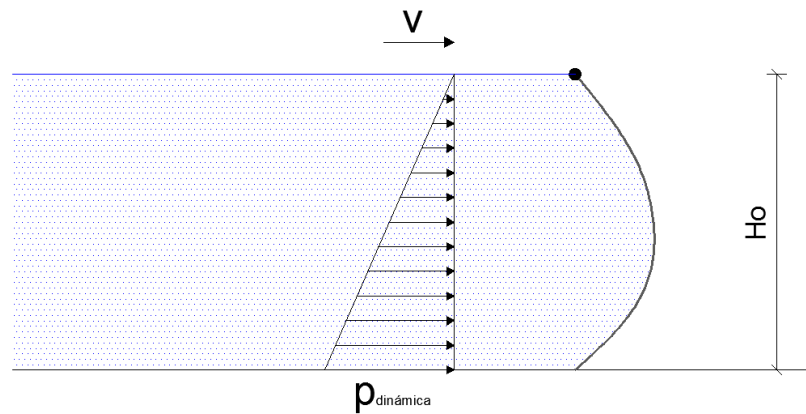


Figura 59. Esquema estado de Carga 1.

- Estado de carga 2: en este estado existe desbordamiento del flujo, por ello las cargas actuantes son la presión hidrostática y el esfuerzo cortante que actúa sobre el cable de soporte superior, como se observa en la figura 60.

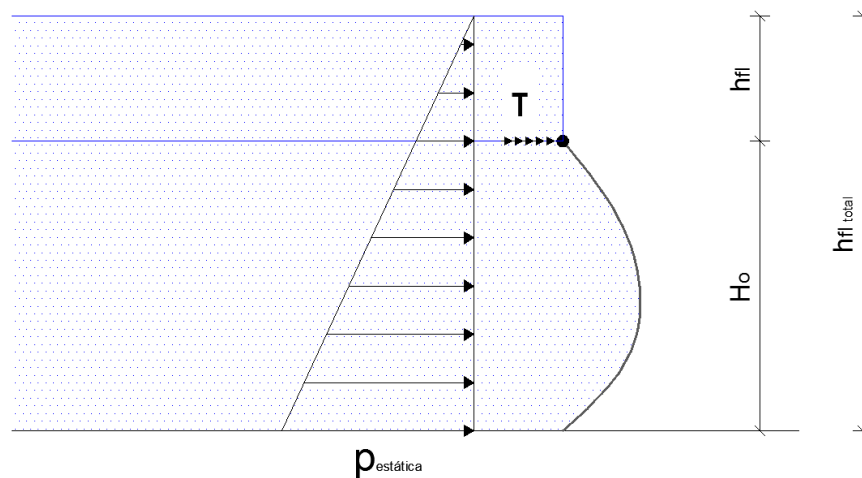


Figura 60. Esquema Estado de Carga 2.

Dentro del diseño se ha considerado un espaciamiento de 0.50 metros entre los cables de soporte (ver figura 61), por tratarse de una carga triangular en ambos estados, la carga correspondiente para cada cable se tomó como el promedio de las cargas que llegan a los extremos del ancho cooperante, el cálculo de las cargas para los cables de la sección 1 se puede observar en la tabla 17, tanto para el estado de carga 1 como para el estado de carga 2. En

el último estado el esfuerzo cortante de 7.20 kg/cm^2 se encuentra considerado en la carga (Q) del cable 1.

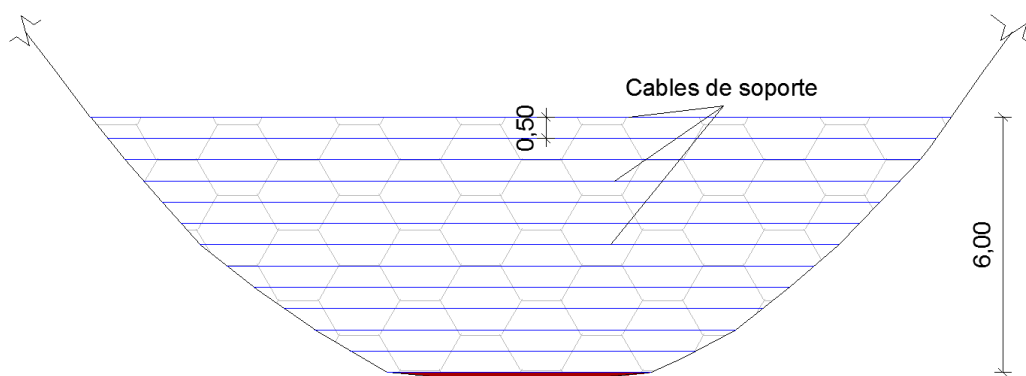


Figura 61. Espaciamiento de cables de soporte.

Como se puede observar en la tabla 17, la carga hidrostática es significativamente mayor que la carga hidrodinámica, esto se ocurrió en todas las secciones. Por ser este el caso más desfavorable el cálculo de los cables se realizarán bajo los efectos de esta carga multiplicada por el ancho cooperante para cada caso (ver figura 62), obteniendo de esta forma la sollicitación por metro que se presenta en la tabla 18.

Tabla 17.

Cálculo de carga para cada cable de la Sección 1.

Cable	Ancho (m)	Estado de carga 1		Estado de carga 2	
		Qi (kg/cm ²)	Q (kg/cm ²)	Qi (kg/cm ²)	Q (kg/cm ²)
		0.00		9.24	
1	0.25	0.27	0.13	9.29	16.47
2	0.50	0.80	0.53	9.40	9.35
3	0.50	1.34	1.07	9.50	9.45
4	0.50	1.87	1.60	9.61	9.56
5	0.50	2.41	2.14	9.71	9.66
6	0.50	2.94	2.67	9.82	9.77
7	0.50	3.47	3.21	9.93	9.87
8	0.50	4.01	3.74	10.03	9.98
9	0.50	4.54	4.28	10.14	10.08
10	0.50	5.08	4.81	10.24	10.19
11	0.50	5.61	5.35	10.35	10.29
12	0.50	6.15	5.88	10.45	10.40
13	0.25	6.42	6.28	10.51	10.48

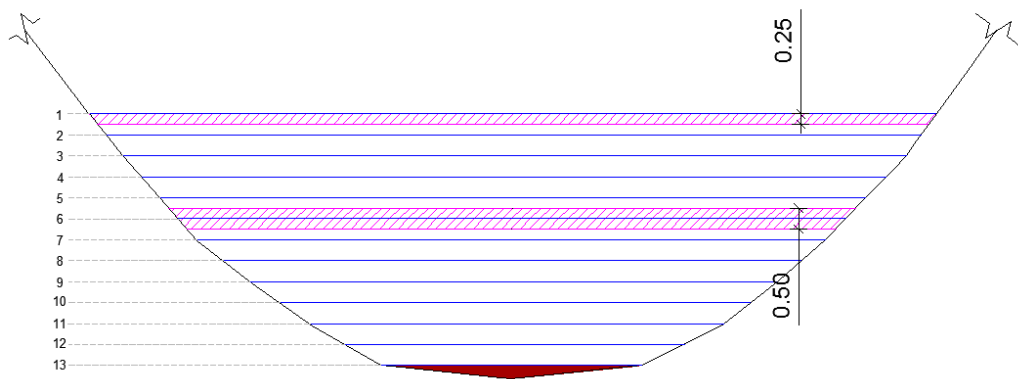


Figura 62. Ancho cooperante para los cables de soporte.

Tabla 18.

Cálculo de la carga por metro para cada cable de la sección 1.

Cable	Ancho (m)	Q (kg/cm ²)	Q (T/m)
1	0.25	16.47	41.17
2	0.50	9.35	46.73
3	0.50	9.45	47.25
4	0.50	9.56	47.78
5	0.50	9.66	48.31
6	0.50	9.77	48.84
7	0.50	9.87	49.36
8	0.50	9.98	49.89
9	0.50	10.08	50.42
10	0.50	10.19	50.95
11	0.50	10.29	51.47
12	0.50	10.40	52.00
13	0.25	10.48	26.20

5.5.4.2. Modelo Estructural

Dentro del diseño de los cables de soporte se tomaron varias consideraciones, en primer lugar una vez instalado y listo para entrar en funcionamiento el cable tendrá una flecha de aproximadamente $L/6$ de longitud, siendo L la distancia horizontal entre los apoyos como se puede apreciar en la figura 63, de esta forma el cable no se encuentra totalmente tensado. Esta configuración disminuye la fuerza axial resultante sobre el cable.

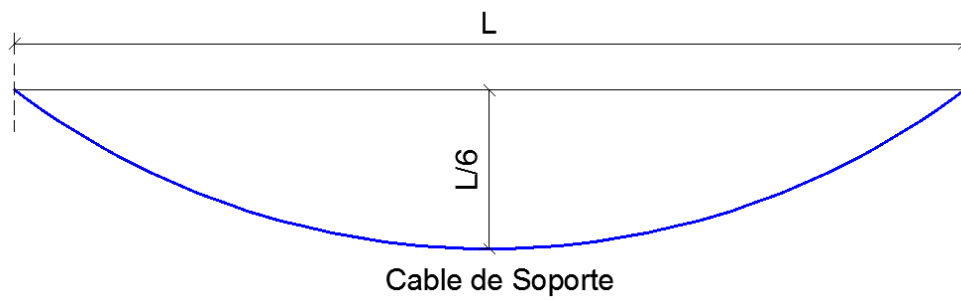


Figura 63. Vista superior del cable de soporte.

La carga actuante sobre cada cable fue modelada como una carga viva y los extremos del cable fueron considerados como articulaciones, como se puede observar en la figura 64. El modelo de cada cable se efectuó en SAP2000 ingresando las coordenadas de la parábola que describe la forma del cable. Se realizó un análisis estático no lineal considerando una no linealidad geométrica, de forma que se tomó en cuenta los efectos de grandes esfuerzos y desplazamientos.

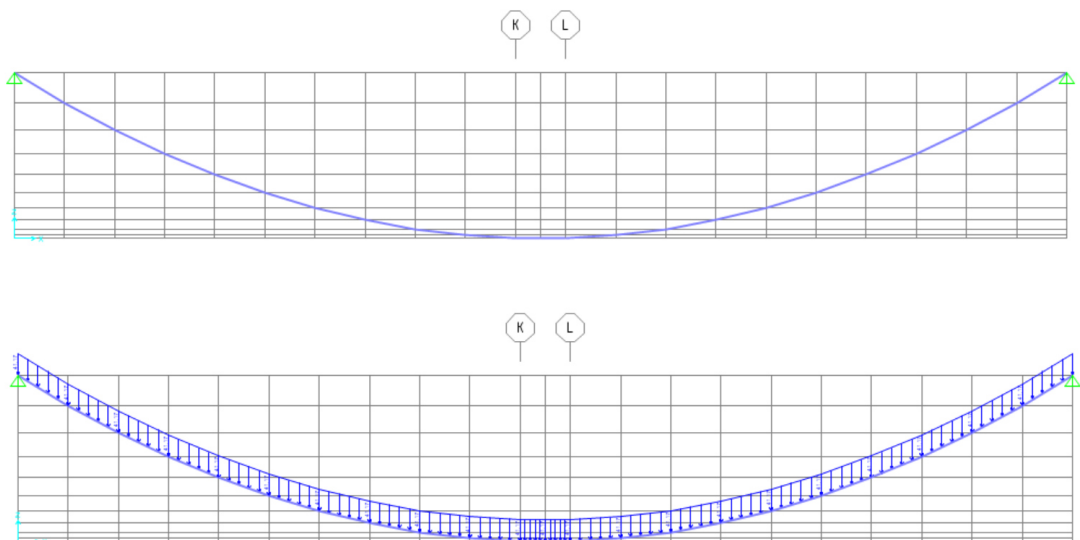


Figura 64. Modelo estructural del cable 1 de la sección 1 en SAP2000.

5.5.4.3. Dimensionamiento del cable

Del análisis realizado en SAP2000 se obtuvo la fuerza axial o de tensión que actúa sobre el cable, como se observa en la figura 65. A partir de ello se obtiene el área de acero necesaria para cada caso.

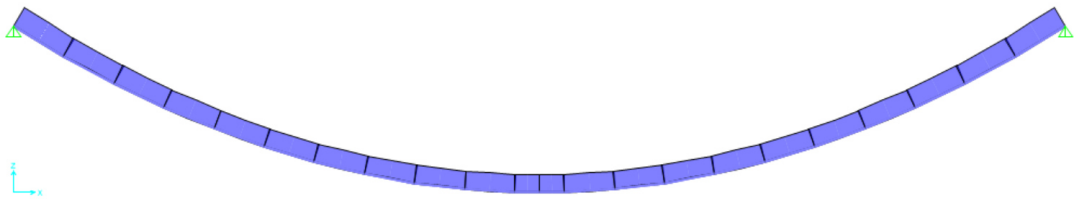


Figura 65. Diagrama de Fuerzas Axiales Cable 1, Sección 1.

El tipo de acero propuesto para estos cables corresponde a acero de grado 270, con un esfuerzo de rotura de 18900 kg/cm^2 . El diseño se realizó por esfuerzos admisibles, por lo cual se aplicó un factor de seguridad de 1.50, el mismo que supera el factor de seguridad por resistencia recomendado de 1.35.

$$f_{adm} = \frac{18900 \text{ kg/cm}^2}{1.50}$$

$$f_{adm} = 12600 \text{ kg/cm}^2$$

El área de acero necesaria en cada caso se obtuvo al dividir la fuerza de tensión calculada dividida para el esfuerzo del acero admisible.

$$A_{acero} = \frac{F_{tensión}}{12\,600 \text{ kg/cm}^2}$$

Una vez obtenida el área de acero se obtuvo el número de cables necesarios tomando en cuenta que se emplearán torones de presfuerzo, un conjunto de siete alambres de acero de alta resistencia dispuestos de forma helicoidal alrededor de un núcleo de las mismas características, de 15.24 mm (5/8") de diámetro con un área mínima de 140 mm^2 y con un peso propio de 1.126 kg/m fabricados por IdealAlambrec Bekaert.

En la tabla 19 se presenta la fuerza axial para cada cable de la sección 1, la flecha de diseño así como el área de acero requerida para cada uno de ellos. El área de acero se incrementó en un 15% considerando que los cables de soporte se encuentran expuestos al ambiente y esto podría ocasionar la degradación de los mismos, en la tabla 20 se presenta la sección transversal de los cables de soporte de sección 1.

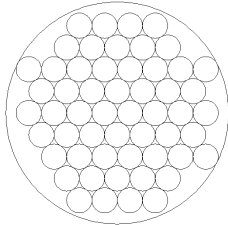
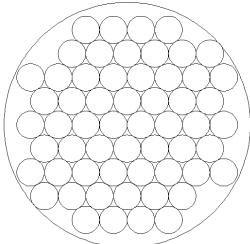
Tabla 19.

Fuerza Axial, área de acero, flecha y longitud de cada cable de la sección 1.

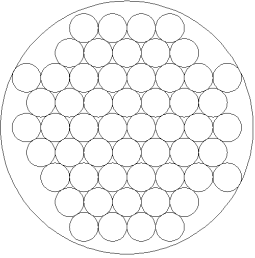
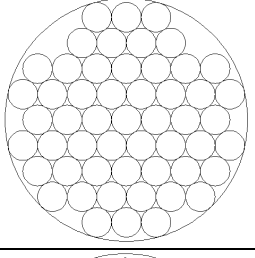
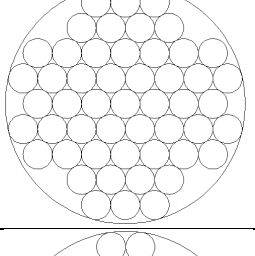
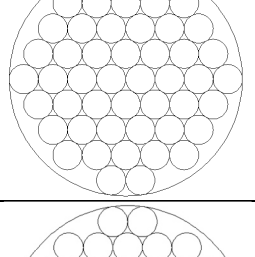
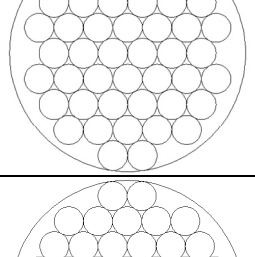
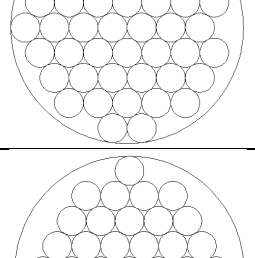
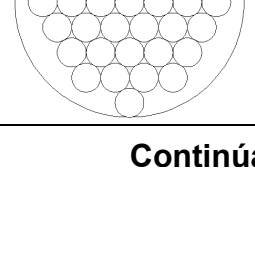
Cables	F (T)	A (cm ²)	f (m)	L (m)
1	833.30	66.13	3.30	22.35
2	878.14	69.69	3.30	21.40
3	840.53	66.71	3.15	20.40
4	805.23	63.91	3.00	19.35
5	771.39	61.22	2.80	18.20
6	731.90	58.09	2.70	17.15
7	691.72	54.90	2.50	16.00
8	712.00	56.51	2.30	14.75
9	593.07	47.07	2.10	13.42
10	525.72	41.72	1.85	11.85
11	468.00	37.14	1.60	10.30
12	369.06	29.29	1.25	8.05
13	137.93	10.95	0.90	5.85

Tabla 20.

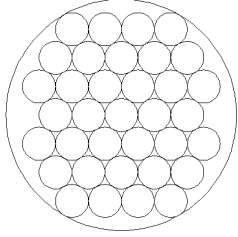
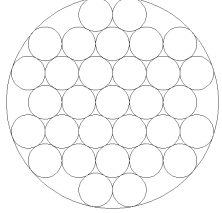
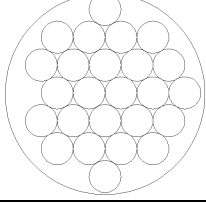
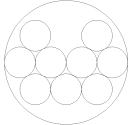
Sección transversal de cada cable de la sección 1.

Cable	# Torones	+15%	Φ (cm)	Sección Transversal Cable
1	48	55	13.43	
2	50	58	13.62	

Continúa →

3	48	55	13.43	
4	46	53	12.51	
5	44	51	12.51	
6	42	48	12.19	
7	40	46	12.19	
8	41	47	12.19	
9	34	39	12.08	

Continúa 

10	30	35	10.67	
11	27	31	9.59	
12	21	25	9.54	
13	8	9	6.10	

Las secciones transversales obtenidas para cada cable de soporte de las secciones restantes se encuentran detalladas en el Anexo 3. Los resultados presentados sobre este elemento del sistema son referenciales y responden únicamente a un prediseño.

CAPÍTULO VI: COSTOS DEL PROYECTO

6.1. Cuantificación de volúmenes de obra

Los volúmenes de obra que se presentan a continuación están basados en los siguientes fundamentos:

- Se considera que los bancos del río están conformados por un lecho rocoso por lo cual se ha seleccionado una longitud de anclaje de cinco metros, en caso de aplicar este sistema se debe realizar un análisis y diseño detallado de este elemento del sistema así como ensayos que determinen el material que conforma los márgenes del río en los puntos propuestos para la implementación de las mallas.
- Se asume que la red de anillos empleada en este caso corresponde a la red ROCCO 16/3/300, la red más resistente dentro de las barreras estándar con un diámetro de los anillos de 30 centímetros.
- Para retener partículas mayores a diez centímetros se colocará una malla U238 fabricada por IdealAlambrec Bekaert cuyo espaciamiento es de diez centímetros en ambas direcciones.

Tabla 21.

Presupuesto referencial del sistema de barreras flexibles

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo Total
Cable de acero de alta resistencia - Torón 5/8"	kg	100 161.76	\$ 1.56	\$ 156,252.35
Anclajes profundidad 5m	u	242.00	\$1,000.00	\$ 242,000.00
Malla ROCCO 16/3/300				
S-1		94.666		
S-2		99.836		
S-3		101.299		
S-4		101.233		
S-5		85.712		
S-6		113.531		
S-7		79.365		
S-8		87.747		
S-9		85.217		
S-10		86.482		
	m ²	935.088	\$ 10.87	\$ 10,164.41

Continúa

Malla U238	m ²	935.088	\$ 5.78	\$ 5,404.81
SUBTOTAL				\$ 413,821.57
IVA 14%				\$ 57,935.02
TOTAL*				\$ 471,756.59

*El costo total del sistema puede variar de acuerdo al proveedor.

En cuanto al tiempo estimado de construcción, la perforación de los anclajes consume la mayor parte de tiempo, el mortero que se inyecta es capaz de transmitir completamente las fuerzas actuantes después de 28 días. Sin embargo la tensión de los cables de soporte puede iniciarse después de siete días, cuando el mortero ha alcanzado del 80% al 90% de su máxima fuerza de compresión, por ello la instalación completa de la malla generalmente toma una semana (Wendeler C. , 2016). Tomando en cuenta que se propone la implementación de diez mallas el tiempo de construcción es de aproximadamente 2.5 meses.

6.2. Indicadores económicos

Por tratarse de un sistema alternativo y relativamente nuevo es necesario realizar una comparación entre éste y sistemas de protección tradicionales como la construcción de presas y las diferentes obras que se involucran en el diseño de la misma.

En el año 2016, Bonito & Naranjo realizaron un estudio en el cual se presentó el diseño de obras de protección ante los flujos de lahares para el drenaje norte del río Pita, en las tablas 22 y 23 se presenta el volumen de embalse y el costo aproximado, respectivamente. Dentro de este proyecto se encuentra contemplado:

- La implementación de dos presas mixtas de hormigón y materiales sueltos, la primera ubicada en el cauce del río Pita y la segunda en el cauce del río El Salto.
- Una alcantarilla paralela para ambas presas.
- Un canal de rápida con tapa y columpio tanto para la presa del el río El Salto como para la presa del río Pita.
- Una estructura de descarga: un vertedero de cresta ancha para ambas presas.

Tabla 22.

Altura y Volumen de embalse presas río El Salto y río Pita.

Presa	Altura de la Presa (m)	Volumen de embalse (mil. m³)
Río El Salto	55.00	3.89
Río Pita	50.00	35.62
TOTAL		39.51

Fuente: (Bonito & Naranjo, 2016)

Tabla 23.

Costo de las obras de protección propuestas por Bonito & Naranjo, 2016.

Cauce	Costo (2016) (USD)
Río El Salto	\$ 12'538,252.13
Río Pita	\$ 39'035,861.75
TOTAL	\$ 51' 574, 113.88

Fuente: (Bonito & Naranjo, 2016)

Dado que el principal objetivo del sistema de mallas flexibles es retener el componente sólido que forma parte del flujo de lodos, la comparación entre ambos sistemas debería realizarse en función de este parámetro. Es importante toma en cuenta que el costo presentado en la tabla 23 no considera los costos indirectos del proyecto y por tratarse de obras de un tamaño considerable el tiempo de ejecución podría tomar varios meses. En la tabla 24 se presenta el costo por metro cúbico obtenido.

Tabla 24.

Costo de obras de protección para el flujo de lodos drenaje norte del volcán Cotopaxi por m³.

Presa	Volumen de embalse (mil. m³)	Costo USD/ m³
Río El Salto	3.89	3.22
Río Pita	35.62	1.10

Dentro del costo de estas obras de protección no se ha considerado la construcción de vías de acceso las mismas que son necesarias para la construcción del proyecto debido al gran volumen de material que debe ser movilizado, un factor significativo que se debe tomar en cuenta.

En cuanto al sistema de mallas flexibles el costo por m³ de sólidos retenidos es de \$ 2.13 dólares, ya que el volumen total soportado por el sistema es 221,356.89 m³.

CONCLUSIONES

- El diseño de las diferentes obras debe contar con una adecuada y detallada simulación del evento esperado, ya que las simulaciones permiten determinar parámetros importantes como la altura, velocidad y ancho total del flujo y dimensionar correctamente todas las obras.
- La zona elegida para la implementación del sistema de mallas en este proyecto es adecuada para el buen funcionamiento de las obras, las secciones transversales tienen una profundidad que mantiene encausado el flujo cuando este se desborda sobre las mallas.
- El volumen de retención calculado es muy significativo, sin embargo este podría incrementarse sustancialmente si la altura de las barreras es mayor ya que la topografía lo permite.
- El diseño presentado del sistema de mallas flexibles responde a un diseño a un nivel de prefactibilidad.
- El costo referencial del sistema de mallas flexibles que se obtuvo por metro cúbico es un 51% menor al costo de construcción de la presa del río el Salto y supera en un 94% el costo de la presa del río Pita.
- El sistema de mallas flexibles presenta grandes ventajas con respecto a otras obras, como la facilidad y el corto tiempo de construcción de aproximadamente dos meses y medio, al mismo tiempo que el impacto ambiental es considerablemente menor.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda analizar la implementación de mallas flexibles a lo largo del recorrido de los lahares en zonas cercanas a las poblaciones como el Valle de los Chillos, debido a que tanto la velocidad como la altura del flujo disminuyen considerablemente en estas zonas lo que permitiría que el efecto del sistema en la mitigación sea más efectivo, siempre y cuando la topografía presente las condiciones adecuadas para implementarlo.
- Se recomienda que la entidad responsable de salvaguardar las vidas humanas y bienes materiales que pueden verse afectados por el flujo de lahares consideren la ejecución de obras de mitigación que permitan reducir los efectos de dicho flujo, ya que por su naturaleza impredecible constituyen un riesgo latente para la población.
- Se recomienda que la entidad responsable de llevar a cabo obras de protección contra los lahares producidos por una erupción del volcán Cotopaxi analice la posibilidad de colocar mallas de mayor altura en conjunto con la empresa fabricante que cuenta con la experiencia y las herramientas necesarias para desarrollar un diseño especial para este caso.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, E. (04 de Julio de 2016). *Flujo de lodos en el Cotopaxi*. Obtenido de <http://publiespe.espe.edu.ec/articulos/vulcanismo/flujo-de-lodos/infocoto.htm>
- Aguilera, E., & Toulkeridis, T. (2005). *El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha*. Quito: Sotavento Ed.
- Aguilera, E., Pareschi, M., Rosi, M., & Zanchetta, G. (2004). Risk from Lahars in the Northern Valleys of Cotopaxi Volcano (Ecuador). *Natural Hazards* 33, 161-189.
- Alden, A. (31 de Julio de 2016). *Densities of Common Rocks and Minerals*. Obtenido de About education: http://geology.about.com/cs/rock_types/a/aarockspecgrav.htm
- Andrade, D., Minard, H., Mothes, P., Troncoso, L., Eissen, J.-P., Samaniego, P., . . . Yepes, H. (2005). *Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi*. Quito: Corporación Editora Nacional.
- Bonito, M., & Naranjo, M. (2016). *Diseño de Obras de Protección ante el flujo de los lahares del volcán Cotopaxi para la Cuenca Norte*. Sangolquí.
- Cáceres, B. (2010). *Actualización del Inventario de tres casquetes glaciares del Ecuador*.
- Carrillo, L. (2013). *Simulación de lahares del volcán Cotopaxi en sus drenajes del lado norte con el uso del programa HEC-RAS*. Sangolquí, Ecuador.
- Coussot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews* 40, 209-227.
- El Comercio. (28 de Junio de 2016). *Se cierra el sector sur del Parque Nacional Cotopaxi por lahares*. Obtenido de http://www.elcomercio.com/app_public.php/actualidad/ecuador-lahares-parquenacional-cotopaxi-cierre.html
- EPN, I. G. (03 de Abril de 2016). *Cotopaxi*. Obtenido de <http://www.igepn.edu.ec/cotopaxi>

- EPN, I. G. (04 de Abril de 2016). *Informe Especial volcán Cotopaxi N°6 - 2015*.
Obtenido de <http://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1126-informe-especial-volcan-cotopaxi-n-6-2015>
- Ettinger, S., Mothes, P., Paris, R., & Schilling, S. (2007). The 1877 lahar deposits on the eastern flank of Cotopaxi volcano. *Formes de relief volcaniques, processus et risques*, 13, 271-280.
- Fagents, S., Gregg, T., & Lopes, R. (2013). *Modeling Volcanic Processes: The Physics and Mathematics of Volcanism*. New York: Cambridge University Press.
- Geobrugg. (2006). *Extracto de la lista de referencia de barreras de flujo de detritos global*.
- Geobrugg. (21 de Julio de 2016). *Barreras flexibles de anillos para retención de flujos de detritos: la solución económica*. Obtenido de Geobrugg: http://www1.geobrugg.com/contento/Portals/35/media/Download-Brochures/Geobrugg-AG_Flujos-detritos_es.pdf
- Geobrugg. (21 de Julio de 2016). *Flexible shallow landslide barriers: Cost-effective protection against natural hazards*. Obtenido de Geobrugg: http://www1.geobrugg.com/contento/Portals/35/media/Download-Brochures/Geobrugg-AG_shallow-landslides_en.pdf
- Geobrugg. (22 de Julio de 2016). *La barrera flexible contra flujos de detritos más grande del mundo*. Obtenido de Geobrugg: <https://www.geobrugg.com/es/La-barrera-flexible-contra-flujos-de-detritos-mas-grande-del-mundo-21727,7870.html>
- Geobrugg. (21 de Julio de 2016). *Protección contra caída de rocas para energías de impacto desde 100 kJ hasta 8000 kJ*. Obtenido de Geobrugg: <http://www1.geobrugg.com/contento/es-es/Inicio/Barrerascontraca%C3%ADdaderocas/tabid/2188/Default.aspx>
- Geobrugg AG. (2011). *Picacho, Qda. Las Lajas y El Muerto - Propuesta Pre-Diseño/Diseño Conceptual (v1)*. El Salvador.

Google Earth. (03 de Agosto de 2016). *Google Earth*. Obtenido de <https://www.google.com/earth/>

Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V., & Bateman, A. (2008). Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. *Engineering Geology* 102, 152-163.

Iverson, R. M. (1997). The Physics of Debris Flows. *Reviews of Geophysics* 35, 245-296.

Iverson, R. M. (2013). Mechanics of Debris Flow and Rock Avalanches. En U. S. Survey, *Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Volume One* (págs. 573-586). CRC Press/Taylor & Francis Group, LLC.

Iverson, R., & Denlinger, R. (2001). Flow of variably fluidized granular masses. *Journal of Geophysical Research, Vol.106*, 537-552.

Lagla, A. (08 de Noviembre de 2015). El glaciar del volcán Cotopaxi rejuvenece con cada erupción. *El Comercio*. Obtenido de El Comercio.

Mothes, P., & Vallance, J. (2014). Lahars at Cotopaxi and Tungurahua Volcanoes, Ecuador: Highlights from Stratigraphy and Observational Records and Related Downstream Hazards. En P. Papale, *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (págs. 141-168). Elsevier.

Mothes, P., Hall, M., & Janda, R. (1998). The enormous Chillós Valley Lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi Volcano, Ecuador. *Bull Volcano* 59, 233-244.

Ordóñez, J., Samaniego, P., Mothes, P., & Schilling, S. (2013). *Las Potenciales zonas de inundación por Lahares en el volcán Cotopaxi*. Quito.

Ordóñez, J., Samaniego, P., Mothes, P., & Schilling, S. (2011). *Posibles escenarios eruptivos del Cotopaxi y delimitación de potenciales zonas inundadas por lahares en el drenaje sur*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

- Pareschi, T. (1994). Física de los Lahares y Simulación Numérica. *Algunos tópicos recientes sobre la evaluación de los peligros volcánicos en el Ecuador*. Sangolquí, Ecuador.
- Rickenmann, D. (1999). Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards* 19, 47-77.
- Sandoval, W. (2013). *Principios de la Hidráulica 2*. Sangolquí: EDIESPE.
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (02 de Julio de 2016). *Plan de Contingencia Amenaza de Erupción del volcán Cotopaxi*. Obtenido de Secretaría de Gestión de Riesgos: http://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/09/PLAN-DE-CONTINGENCIA-REACTIVACION-Volcan-Cotopaxi-rv_03-sept.pdf
- Takahashi, T. (2014). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Londres: CRC Press.
- Volkwein, A. (2014). Flexible debris flow barriers - Design and application. *WSL Berichte* 18, 18-29.
- Volkwein, A., Wendeler, C., & Guasti, G. (2011). *Design of flexible debris flow barriers*. Padua: Casa Editrice Università La Sapienza.
- Wendeler, C. (2010). *DEBFLOW - The dimensioning tool for flexible ring net barriers against debris flow*. Romanshorn: Geobruigg .
- Wendeler, C. (2016). *Debris-Flow Protection Systems for Mountain Torrents – Basic Principles for Planning and Calculation of Flexible Barriers*. WSL Berichte.
- Wendeler, C., McArdell, B., Rickenmann, D., Volkwein, A., Roth, A., & Denk, M. (05 de Julio de 2016). *Field testing and numerical modeling of flexible debris flow barriers*. Obtenido de WSL: <http://www.wsl.ch/wsl/info/mitarbeitende/volkwein/pdf/8162.pdf>
- Wendeler, C., Volkwein, A., Roth, A., Denk, M., & Wartmann, S. (20 de Julio de 2016). *Field measurements and numerical modelling of flexible*

debris flow barriers. Obtenido de WSL:
<http://www.slf.ch/wsl/info/mitarbeitende/volkwein/pdf/9049.pdf>

WSL, I. f. (2013). *RAMMS. User Manual v1.5 Debris Flow.*