

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA QUEBRADA
LLOCLLAMAYO PARA CONTROL DE FLUJO DE ESCOMBROS –
REGIÓN DE PUNO**

**TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADA POR

Bach. CELI FARFAN, JUAN CARLOS

Bach. TANTA ARCOS, FREDY YOLBY

ASESOR: Mg. Ing. MOGROVEJO GUTIERREZ, RUBÉN ESAÚ

LIMA - PERÚ

2019

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mis padres Segundo Celi Gutiérrez y Amanda Farfan Rodríguez, por enseñarme a creer que todo es posible, por guiarme y ser la base que me ayudo a salir adelante.

A mi esposa Claudia, mi sobrina Arellys Doménica y mi hijo Mateo Ignacio, quienes forman parte fundamental de mi vida.

Juan Carlos Celi Farfan

Dedico esta tesis a mi familia por el constante apoyo y confianza, para lograr cada uno de mis objetivos.

Fredy Yolby Tanta Arcos

AGRADECIMIENTO

Nuestro sincero agradecimiento a nuestro asesor Mg. Ing. Mogrovejo Gutiérrez, Rubén Esaú, por la habilitación del software FLO – 2D compartiendo sus conocimientos de investigación y experiencias, encaminándonos en el desarrollo de la presente.

Esta tesis fue realizada con el apoyo de imágenes de la estación satelital CONIDA (Space Agency of Peru), sobre la quebrada Llocllamayo.

Carlos Celi y Fredy Tanta

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Descripción de la realidad de la problemática.....	3
1.2. Formulación del problema	3
1.2.1. Problema principal	3
1.2.2. Problemas secundarios	4
1.3. Objetivos de la investigación.....	4
1.3.1. Objetivo principal	4
1.3.2. Objetivo secundario	4
1.4. Justificación e importancia de la investigación	4
1.4.1. Relevancia social	4
1.4.2. Implicancia practica	5
1.5. Limitaciones de la investigación	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes de la investigación	6
2.1.1. Antecedentes en el ámbito internacional	7
2.1.2. Antecedentes en el ámbito Nacional.....	9
2.1.3. Antecedente regional	10
2.2. Bases teóricas	11
2.2.1. Cuenca hidrológica	11
2.2.2. Delimitación.....	11
2.2.3. Clasificación de cuenca	11

2.2.4.	División de una cuenca	14
2.2.5.	Curvas características de una cuenca	15
2.4.6.	Índices representativos	15
2.4.7.	Rectángulo equivalente.....	16
2.4.8.	Índice de pendiente	16
2.4.9.	Pendiente de la cuenca.....	17
2.5.	Escurrimiento	18
2.5.1.	Aspectos generales	18
2.5.2.	Parámetros del proceso de conversión de lluvia a escurrimiento	20
2.5.3.	Relación precipitación – escurrimiento	20
2.6.	Selección del periodo de retorno	20
2.7.	Análisis estadísticos de datos hidrológicos	22
2.7.1.	Distribución de Gumbel.....	23
2.7.2.	Distribución Log Gumbel	24
2.7.3.	Distribución normal	24
2.7.4.	Distribución Log Pearson Tipo III	25
2.8.	Prueba de bondad de ajuste	25
2.9.	Determinación de la tormenta de diseño	26
2.10.	Curvas Intensidad Duración Frecuencia.....	27
2.11.	Tiempo de concentración	28
2.12.	Hietograma de diseño	30
2.13.	Precipitación total y efectiva	30
2.13.1.	Método SCS para abstracciones.....	31
2.14.	Hidrograma unitario	32
2.14.1.	Sistema de Modelamiento Hidrológico (HMS).....	32

2.15.	Estimación de caudales.....	33
2.15.1.	Método racional.....	33
2.16.	Hidráulica fluvial.....	35
2.16.1.	Parámetros hidráulicos y geométricos.....	35
2.16.2.	Debris Flow.....	37
2.17.	Clasificación y características de los fluidos de detritos.....	38
2.17.1.	Flujo de escombros de tipo pedregoso.....	39
2.17.2.	Flujo de escombros de tipo lodoso.....	43
2.17.3.	Flujo de escombros viscosos.....	44
2.17.4.	Factores que desencadenan los flujos de detritos.....	50
2.18.	Alternativas para el control de Debris Flow.....	51
2.19.	Reología de flujos de escombros.....	56
2.20.	Modelo de mecánica de flujo de detritos.....	59
2.21.	Caracterización del flujo.....	65
2.21.1.	Composición de flujo de lodo y escombros.....	66
2.21.2.	Propiedades de los flujos de escombros.....	68
2.21.3.	Estimación de los caudales máximos.....	72
2.22.	Modelos hidrológicos.....	74
2.23.	Tipos de modelos hidrológicos.....	74
2.24.	Modelos hidráulicos.....	76
2.24.1.	Tipos de modelos hidráulicos.....	76
2.25.	Descripción del modelo hidráulico FLO-2D.....	78
2.25.1.	Ecuaciones básicas.....	79
2.25.2.	Solución numérica.....	80
2.25.3.	Algoritmo del FLO - 2D.....	81

2.26.	Medición de los parámetros reológicos	84
2.27.	Concentración volumétrica de sedimentos Cv	86
2.28.	Formulación de hipótesis	89
2.28.1.	Hipótesis general	89
2.28.2.	Hipótesis específica.....	89
2.29.	Variables.....	89
CAPÍTULO III: DISEÑO METODOLÓGICO		91
3.1.	Tipo y método de la investigación.....	91
3.2.	Diseño de investigación	91
3.3.	Población y muestra	91
3.4.	Población	91
3.5.	Muestra.....	91
3.6.	Técnicas de recolección de datos	92
3.7.	Tipos de técnicas e instrumentación	92
3.7.1.	Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos	93
3.7.2.	Técnica para el procesamiento y análisis de datos	93
CAPÍTULO IV: ÁREA DE ESTUDIO.....		94
4.1.	Metodología de trabajo	94
4.1.1.	Etapa de preparación	94
4.1.2.	Etapa de campo	94
4.1.3.	Etapa de gabinete	95
4.2.	Ubicación topográfica y límites	96
4.3.	Geología y geodinámica	97
4.4.	Características hidrográficas e hidráulicas	101
4.4.1.	Generalidades	101

4.4.2.	Clima y biodiversidad.....	101
4.4.3.	Parámetros geomorfológicos	102
4.5.	Mecanismo de desestabilización/rotura del movimiento de ladera en la quebrada Llocllamayo	103
4.6.	Hidrología.....	103
4.6.1.	Precipitaciones máximas 24 horas (P24).....	104
4.6.2.	Análisis de Bondad - Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov – Smirnov	104
4.6.3.	Precipitación máxima 24h.....	106
4.6.4.	Curva IDF.....	106
4.6.5.	Determinación del Caudal.....	107
4.6.6.	Tiempo de concentración	108
4.6.7.	Tiempo de retardo	108
4.6.8.	Coeficiente de rugosidad de Manning.....	108
4.6.9.	Hidrograma de avenidas líquido	109
4.6.9.1.	Tiempo de retorno 100 años	109
4.6.9.2.	Tiempo de retorno 500 años	111
4.6.9.3.	Tiempo de retorno 1000 años	112
4.6.10.	Valores de caudales totales.....	114
4.7.	Imagen Satelital CONIDA	115
4.8.	Características geotécnicas.....	116
	CAPÍTULO V: MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN	118
5.1.	Simulación con el modelo FLO – 2D	118
5.1.1.	Información básica.....	118
5.2.	Definición de parámetros reológicos	119
5.3.	Descripción de la simulación con el FLO – 2D.....	119

5.4.	Definición de parámetros para la simulación	121
5.5.	Simulación del FLO – 2D en la Quebrada Llocllamayo	121
5.6.	Utilización del post procesador (Mapper) en FLO- 2D	123
5.6.1.	Partes del Mapper	123
5.6.2.	Validación.....	126
CAPÍTULO VI: PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS		127
6.1	Introducción	127
6.1.1	Resultados para el periodo de retorno $Tr = 100$ años	127
6.1.2	Resultado para el periodo de retorno $Tr = 500$ años	131
6.1.3	Resultados para el periodo de retorno $Tr=1000$ años	139
6.2	Discusión	146
CONCLUSIONES		148
RECOMENDACIONES		151
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		152
Anexo 1: Matriz de consistencia.....		156
Anexo 3: Planos.....		158
Anexo 4: Ensayos de laboratorio.....		162
Anexo 5: Análisis Hidrológico		167
Anexo 6: Panel fotográfico		175

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Grupos de suelos hidrológicos.....	31
Tabla 2 Número de curva de escorrentía para uso selecto de tierra agrícola, suburbana y urbana (condición antecedente de humedad II, Ia=0.2s).....	32
Tabla 3 Coeficiente de escorrentía método racional.....	34
Tabla 4 Modelos de fluido de acuerdo con el tipo de flujo.	64
Tabla 5 Tipos de flujo de acuerdo a las características de la mezcla y del canal.	66
Tabla 6 Propiedades de los flujos de escombros.	71
Tabla 7 Modelos reconocidos de 1D, 2D y 3D.....	78
Tabla 8 Propiedades de las matrices de flujos de lodo (sólo limo y arcilla).....	85
Tabla 9 Esfuerzo de cedencia y viscosidad en función de Cv	85
Tabla 10 Comportamiento del flujo de lodo como una función de Cv.....	87
Tabla 11 Resumen de parámetros geomorfológicos de la Microcuenca Llocllamayo	103
Tabla 12 Precipitación máxima 24 horas - Estación san Gaban (mm).....	104
Tabla 13 Análisis estadístico: prueba de la bondad del ajuste - grafica de probabilidades	105
Tabla 14 Análisis estadístico: prueba de la bondad de ajuste Kolmogorov – Smirnov.....	105
Tabla 15 Precipitación (mm). para diferentes periodos de retorno.....	106
Tabla 16 Coeficiente de escorrentía C.....	107
Tabla 17 Coeficiente de Manning.....	109
Tabla 18 Caudales para periodos de retorno.....	114
Tabla 19 Elaboración del Bulking Factor.	114
Tabla 20 Caudales totales para cada periodo de retorno.	115
Tabla 21 Resultados de la granulométrica - ASTM D422.....	117
Tabla 22 Contenido de Humedad - ASTM D-2216.....	117
Tabla 23 Resultados de la simulación para un caudal total de 40.89 m ³ /s.	130
Tabla 24 Resultados de la simulación para un caudal total de 77.28 m ³ /s.	138
Tabla 25 Resultados de la simulación para un caudal total de 95.85 m ³ /s.	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuenca en función de su salida.	12
Figura 2. Partes de una cuenca hidrográfica.	13
Figura 3. División de una cuenca hidrográfica: sub cuencas y micro cuencas	14
Figura 4. Riesgo de por lo menos una excedencia del evento de diseño durante la vida útil	22
Figura 5. Curvas Intensidad – Duración - Frecuencia.....	28
Figura 6. Concepto del perfil longitudinal y secciones transversales típicas de un río, a lo largo de su recorrido	36
Figura 7. Esquema de un flujo de detritos (Debris Flow).....	37
Figura 8. Parte frontal de un flujo de escombros.	38
Figura 9. Sección transversal de la cuenca Shiramizudani después del paso de un flujo de escombros.....	41
Figura 10. Flujo de escombros de tipo pétreo en la cuenca Kamikamihorizawa	42
Figura 11. Flujos de escombros en el río Nojiri, Sakurajima (OhsumiWork oficina 1988).44	
Figura 12. Flujos de escombros en la cuenca experimental Jiangjia Gully, afluente del río Xiaojiang - China.....	46
Figura 13. Criterios de existencia de varios movimientos de la mezcla de sólidos y fluidos	49
Figura 14. Flujo de detritos.	50
Figura 15. Pernos para sostener grupos de roca.	52
Figura 16. Malla anclada.	53
Figura 17. Barrera dinámica – Chosica Perú.	54
Figura 18. Barrera dinámica.	54
Figura 19. Muestra la tensión del cable, antes y después de un evento de flujo de detritos	55
Figura 20. Retención de rocas a través de una barrera dinámica.	55
Figura 21. Curvas de coherencia para fluidos no newtonianos.	57
Figura 22. Distribución de velocidades para los diferentes tipos de fluido, aplicado a flujos y avalanchas de tierra	62
Figura 23. Clasificación de los deslizamientos y flujos de acuerdo con la velocidad y concentración de sedimentos	65

RESUMEN

Las precipitaciones intensas generadas por lluvias torrenciales, dan origen a deslizamientos y avenidas de flujo de escombros, en este panorama, como medida de estudio se propuso estimar el comportamiento del flujo de escombros probable a través del modelamiento y simulación de la Quebrada Llocllamayo – Distrito de San Gabán, en la zona de ceja de selva de la región Puno y plantear medidas de mitigación.

El programa que se propone utilizar es el modelo numérico bidimensional de diferencias finitas FLO-2D (O'Brien), que simula el tránsito de flujos y permite medir el grado de amenaza que afectan potencialmente un área. Para la evaluación del estudio, flujo de detritos y la simulación en el programa FLO-2D, es necesario contar con información documentada y digital de los componentes topográficos, hidrológicos, geológicos y la reproducción digital del terreno.

El método de estudio fue analítico y deductivo evaluando la simulación entregada por el software FLO-2D, analizando los resultados obtenidos como: La altura de sedimentación, la velocidad de flujo de escombros y mapas de riesgo enmarcadas con niveles de peligrosidad, para cada periodo de retorno. Con el objetivo de estimar zonas vulnerables al transporte de flujo de escombros ante avenidas máximas planteando medidas de mitigación, a través de mallas dinámicas en puntos críticos y un dique de 2 m. en el eje principal. Que tienen un impacto directo sobre el corredor vial interoceánico sur tramo 4, Azángaro – puente Inambari.

Palabras claves: Flujo de detritos, FLO - 2D, Modelo numérico, Modelamiento y simulación.

ABSTRACT

The intense rainfall generated by torrential rains, give rise to landslides and avenues of debris flow, in this panorama, as a study measure it was proposed to evaluate the behavior of the probable debris flow through the modeling and simulation of the Llocllamayo Gorge - District of San Gabán, in the jungle eyebrow area of the Puno region and propose mitigation measures.

The program that is proposed to be used is the two-dimensional numerical model of finite differences FLO-2D (O'Brien), which simulates the flow of flows and allows measuring the degree of threat potentially affecting an area. For the evaluation of the study, debris flow and simulation in the FLO-2D program, it is necessary to have documented and digital information of the topographic, hydrological, geological and digital terrain reproduction.

The study method was analytical and deductive evaluating the simulation delivered by the FLO-2D software, analyzing the results obtained as: The sedimentation height, the flow rate of debris and risk maps framed with levels of danger, for each period of return. With the objective of estimating areas vulnerable to the transport of debris flow before maximum avenues, proposing mitigation measures, through dynamic meshes at critical points and a 2 m dike. on the main axis. They have a direct impact on the interoceanic highway corridor south section 4, Azángaro - Inambari bridge.

Keywords: Debris flow, FLO - 2D, Numerical model, Modeling and simulation.

INTRODUCCIÓN

Los huaycos son un tipo de flujo característico por la naturaleza geografía de nuestro país, que causan daño en todo su recorrido, desde la cabecera hasta el cono de deyección en el caso de las quebradas, dejándose notar por su poder destructivo.

La quebrada Llocllamayo situada en la vertiente de la cordillera oriental del sur del país, presenta variados contrastes debido a la existencia de diferentes franjas climatológicas relacionados directamente a los cambios altitudinales y la variada morfología del terreno. Por su topografía y geografía, se han reconocido movimientos masivos que desencadenan importantes fenómenos, como flujo de escombros, eventos que afectan a la infraestructura vial por la interferencia que sucede en su cono deyección en la zona de la región de Puno.

La presente tesis, Modelamiento y simulación de la quebrada Llocllamayo, se propone un modelo numérico, caracterizando la cuenca e ingresando datos geomorfológicos e hidráulicos, siguiendo una línea de investigación de flujo de detritos, con fines de brindar parámetros que permitan evaluar posibles consecuencias al ocurrir un evento.

El desarrollo de la tesis se estructura de 6 capítulos:

El capítulo 1 se desarrolla el planteamiento del problema, objetivos, justificación e importancia de la investigación y la limitación de la investigación.

El capítulo 2 se desarrolla el fundamento teórico, bases teóricas conceptos y fórmulas de autores que relacionan el estudio de los fenómenos de flujo de escombros en el ámbito nacional e internacional.

El capítulo 3 se desarrollan aspectos del diseño metodológico, enfocando la investigación a través del tipo y métodos, el diseño, población y muestra, los tipos de técnicas e instrumentación, delimitando el sistema en estudio.

El capítulo 4 desarrolla la aplicación de la metodología de trabajo en el área de estudio.

La ubicación topográfica, geología y geodinámica, características geotécnicas y las características hidrográficas e hidráulicas, donde caracterizamos la micro cuenca y se determina el análisis hidrológico hallando los caudales totales a partir del hidrograma líquido para cada tiempo de retorno.

El capítulo 5 desarrolla el modelamiento y simulación para el cual se recopila las características de la quebrada, fotografías satelitales, el hidrograma de caudal total, la topografía digital, los cuales son la información necesaria para el procesamiento del estudio y para la modelación del software FLO-2D para cada escenario de simulación haciendo comparaciones y ajustes respectivos de los resultados.

El capítulo 6 desarrolla la presentación de los resultados de los gráficos obtenidos del software FLO-2D, como alturas máximas de sedimentación, velocidades máximas y mapas de peligro.

La finalidad de la investigación es evaluar el comportamiento del flujo de escombros de la Quebrada Llocllamayo – Región Puno. estimando zonas vulnerables ante avenidas máximas y así poder plantear medidas de mitigación,

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad de la problemática

Durante la última década, el departamento de Puno ha sido uno de los más afectados por las heladas y granizadas en las provincias de Puno, Chucuito, Carabaya, el Collao y Yunguyo, sufriendo fuertes precipitaciones. Los reportes de INDECI dan cuenta de más de un centenar de registros de lluvias torrenciales, que dan origen a deslizamientos y huaycos afectando el Corredor Vial Interoceánico sur interrumpiendo el tránsito por varias horas.

El motivo del presente estudio, trata acerca del conocimiento del flujo de escombros, simulado a través de un modelo. Para el caso de la micro cuenca de la quebrada Llocllamayo del tramo IV del corredor vial interoceánico sur, San Gabán - Inambari - Región de Puno, se aplicará el modelo numérico FLO-2D versión 2009 (O'Brien).

El área de interés, geográficamente se sitúa en la vertiente de la cordillera oriental del sur del Perú; políticamente, en la provincia de Carabaya en el distrito de San Gabán; hidrográficamente, dentro del conjunto de drenaje de la cuenca del río Inambari, contribuyente de la hoya del atlántico, que junto al río Tampopata son afluentes del río Madre de Dios.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema principal

¿De qué manera se controla el flujo de escombros, a través del modelamiento y simulación de la Quebrada Llocllamayo, utilizando el modelo FLO-2D?

1.2.2. Problemas secundarios

- a) ¿Qué escenarios numéricos se tiene para los tiempos de retorno t_r : 100, 500 y 1000?
- b) ¿Qué medidas de mitigación son aplicables para el control de flujo de escombros?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo principal

Controlar el flujo de escombros probables, a través del modelamiento y simulación de la Quebrada Llocllamayo - Puno. Utilizando el modelo FLO – 2D para diferentes tiempos de retorno.

1.3.2. Objetivo secundario

- a) Simular escenarios numéricos para los tiempos de retorno t_r : 100, 500 y 1000.
- b) Planteamiento de medidas de mitigación aplicables para el control de flujo de escombros.

1.4. Justificación e importancia de la investigación

1.4.1. Relevancia social

Como tal, el propósito del presente estudio es mitigar la vulnerabilidad de la vía Corredor Vial Interoceánico Sur (CVIS) en el sector de la Quebrada Llocllamayo del tramo IV, San Gabán – Inambari, sobre el trazo vial en el paso de la torrentera y la escombrera respectivamente, ante los riesgos de deslizamientos y derrumbes.

1.4.2. Implicancia practica

La investigación se justifica mediante el análisis de los resultados obtenidos del software FLO-2D, se aportará medidas de control del flujo de escombros para los periodos de retorno en un tiempo determinado.

1.5. Limitaciones de la investigación

La investigación es solo válida para el tramo de estudio del Corredor Vial Interoceánico Sur Tramo IV km 295+350, debido a que los parámetros geomorfológicos en otros tramos varían de acuerdo a la Carta Geológica Nacional. El periodo de precipitaciones en la zona de estudio se presenta anualmente entre los meses de diciembre a marzo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

En el periodo de los meses de diciembre a marzo del 2017, la región de Puno es afectado por las intensas precipitaciones producidas por el fenómeno del niño costero con el incremento de la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones, que generan lluvias intensas entre otros fenómenos. Ante esta realidad se debe tomar prevención antes, durante y después de un desastre.

Rocha, A. (2007) explica de acuerdo al Simposio realizado en el CIP de 1972:

Las quebradas, ríos son influenciados por esporádicas pero notables y fuertes lluvias que incrementan caudales, huaycos e inundaciones, los cuales son temas de preocupación en el Perú.

El Colegio de Ingenieros del Perú, ante esta situación convocó al simposio llamado Deslizamientos (Huacos) e inundaciones, planteando un estudio exhaustivo ante la ocurrencia de estos fenómenos, facilitando las acciones pertinentes, con el fin de disminuir y suprimir sus efectos dependiendo de los casos que se suscite. Aquí el punto principal, los fenómenos naturales como avenidas y huaycos quedaron expuestos como fenómenos frecuentes en las cuencas hidrográficas del territorio peruano, el común de estos fenómenos está integrado por la lluvia, además de la geología, el clima y la topografía, cuyos efectos se reflejan en desastres. (pág. 1).

Gamion, F. (2014) describe:

El fenómeno natural que modifica las condiciones climatológicas en nuestro país, incitando temporales de lluvias, que desencadenan en las zonas huaycos e

inundaciones, es conocido como el Fenómeno del niño. Este fenómeno ocurre eventualmente teniendo como resultado destroz de obras civiles e inundación de viviendas. La naturaleza de una topografía escarpada incluida a agentes como El fenómeno del niño es una tarea que los ingenieros tienen para solucionar en los diseños de obras civiles, los cuales nos lleva a tener medidas de seguridad ante posibles desastres naturales. (pág.19)

Zhang, K., & Hongjun, B. (2019) de acuerdo a la investigación:

Describe al flujo de escombros y deslizamientos de tierra como peligros naturales que se encuentran en todo mundo, teniendo un índice del 17% (Hy Hong et al., 2015) de víctimas mortales debido a los deslizamientos de tierra que se presentan como peligros naturales, a estos deslizamientos de tierra se les atribuyen 1.000 muertes y pérdidas de propiedades con un monto alrededor de 4 mil millones de dólares, a nivel mundial por año. En cuanto a los flujos de escombros la manera de cuantificar daños al igual que víctimas humanas se ve obstaculizado, por la forma de distinguir si la pérdida es causada por flujo de escombros, inundaciones u otros peligros (pág. 93).

2.1.1. Antecedentes en el ámbito internacional

Heping *et al.* (2018) analiza el flujo de escombros:

El estudio en la cuenca Zuizi para flujos de escombros, evaluado para diferentes periodos de retorno en base al análisis de datos meteorológicos locales y estudios de riesgos aplicados a la cuenca del río Beiyu, basándose en procesos de riesgos son seleccionados en la investigación centrándose en parámetros para determinar:

- La energía de flujo de escombros y de peligros por medio del uso del modelo de simulación FLO – 2D.

- Basándose en estudios de campo y análisis experimental, determinan parámetros mediante modelos numéricos.
- Obtener riesgo por medio del acoplamiento de las zonas de riesgo y zonas de vulnerabilidad (págs. 2319-2320).

Luque, R., & Alva, J. (sf) evalúa:

La estabilización de talud como forma de estudio para los flujos de escombros presenta aspectos a considerar, determinados por parámetros para diseños de estructuras, que ayudan permitiendo la mejora de retención de los flujos o si es el caso la desviación de escombros. Los flujos de detritos son descritos como movimientos de ondas a velocidad constante, se podría simplificar como una ocurrencia en oleadas. Estas oleadas comúnmente traen material de bolonería en la parte del frente, presentando la mayor resistencia de flujo y en espacios confinados es impulsado por el empuje de gran material líquido que viene detrás. Los peligros y su mitigación son fenómenos que requieren evaluación detallada, dependiendo del relieve topográfico y la precipitación pluvial de la zona en estudio (pág. 1-2).

Escobar, P., & Poma, V. (2018):

Describe la quebrada Tantará como término de la captación de flujo de escombros, donde la actividad y concentración de masas de deslizamientos, rocas, erosión de sus laderas. Son características de su región, que se ven expuestos a fenómenos del medio ambiente, sumada a su geografía y geología.

Su base metodológica se centró en la búsqueda y recopilación de información, trabajo en campo y el procesamiento de datos.

La propuesta es determinar el rango de amenaza que tendría la quebrada de Tantará bajo influencia por el flujo de escombros, modelando con el programa FLO-2D, simulando la circulación de los flujos.

Los resultados Permitieron conocer áreas virtualmente amenazadas, clasificándolas de acuerdo al grado de peligrosidad (págs. 1-2-3-42-84).

Daming *et al.* (2019) nos menciona:

La investigación representa como campo de estudio de 35 ciudades y condados de Guangxi, caracterizado por montañas, ríos y grandes precipitaciones.

La precipitación, la geología, la población, el terreno y la vegetación son seleccionados como las causas de impacto, que al ser digitalizadas se sintetiza para evaluar el peligro de flujo de escombros, asignado un grado de riesgo.

La evaluación del peligro de flujo de escombros está determinada por el mecanismo de la hidrodinámica y la aplicación de un modelo matemático apoyado por la herramienta espacial software ArcGis, para el procesamiento del terreno y la generación de cuadrículas no estructuradas (generación de rejillas).

El método basado en la hidrodinámica es útil en la evaluación de impactos de peligros de flujos de escombros. Los resultados han sido validados por estadísticas de riesgos geológicos del condado de Quanzhou, demostrando su validez para la evaluación de la peligrosidad del condado en estudio (págs. 2-6-11-16).

2.1.2. Antecedentes en el ámbito Nacional

Escusa, F. (2016) menciona:

El estudio se sitúa en la quebrada Maranura, analizando la conducta de los flujos de escombros, mediante distintos modelos de simulación (Modelo Kanako 2D y Modelo Titan 2D) estimando la predicción y precisión de cada programa para diversos periodos de retorno, estableciendo mapa de peligros en la zona.

Apoyándose en casos de estudios de quebradas anexas para poder emplear registros históricos que especifiquen la particularidad del flujo de escombros.

Evalúa la peligrosidad de los eventos con tres parámetros: la altura máxima, la velocidad máxima y la cantidad de depósitos del flujo de escombros.

La metodología que adopta es el establecimiento de la zona, recopilación de datos, inspección de campo y ensayos in situ.

Los resultados se basaron en la diferencia de la aplicación de los modelos y la manera adecuada que representan los flujos de escombros en la zona, encontrando la herramienta válida y proponiendo alternativas en relación a gestión de riesgos (págs. 2-49-96).

2.1.3. Antecedente regional

De acuerdo al informe de Rumi Ingenieros Geotécnicos S.A.C. (2010) menciona:

La construcción del Corredor Vial Interoceánico sur (CVIS), que cruza por los departamentos de Puno, Cusco y Madre de Dios, significa un eje de desarrollo para estos pueblos, pero también puede representar impactos negativos al medio ambiente y, el enfrentamiento a riesgos naturales que deben ser superados por la ingeniería.

Como tal, el propósito del presente estudio es orientar a mitigar la vulnerabilidad de la vía CVIS en el sector de la quebrada Llocllamayo del tramo IV, San Gabán – Inambari, sobre el trazo vial en el paso de la tormenta y la escombrería respectivamente, ante los riesgos de deslizamientos. (Pág. 3)

2.2. Bases teóricas

Para el desarrollo de la investigación nos apoyaremos en los conceptos y fórmulas de autores reconocidos en relación al estudio de flujo de escombros, de ámbito nacional e internacional.

2.2.1. Cuenca hidrológica

La cuenca de drenaje natural de una corriente, es el espacio de terreno donde las aguas caídas por precipitación, convergen y se organizan en un solo curso. Estos cursos de agua tienen una cuenca bien definida, para los puntos de su recorrido. (Villón, 2011, pág. 21).

2.2.2. Delimitación

Villón, M. (2011) nos menciona que:

La demarcación de una cuenca, se hace sobre un plano o mapa de curvas de nivel la cual es una línea imaginaria, que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originando por la precipitación que, en cada sistema de corriente, fluye hacia el punto de salida de la cuenca. El parteaguas está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida, llamado estación de aforo. (págs. 21-22)

2.2.3. Clasificación de cuenca

- a. En relación a su dimensión se clasifica en cuenca grande y cuenca pequeña:

Cuenca grande: “Es aquella cuenca en la que predominan las características fisiográficas de la misma (pendiente, elevación, área, cauce). Una cuenca, para fines prácticos, se considera grande cuando el área es mayor a 250 km²” (Villón, 2011, págs. 22-23).

Cuenca pequeña: Es aquella cuenca que responde a las lluvias de fuerte intensidad y pequeña duración, y en la cual las características físicas (tipo de suelo, vegetación) son más importantes que las de cauce. Se considera cuenca pequeña cuya área varía desde unas pocas hectáreas hasta un límite, que para propósitos prácticos se considera 250 km². (Villón Bejar, 2011, pág. 23)

- b. En función de su salida se clasifica en dos grupos cuenca endorreica y exorreica:

Cuenca endorreica: “Se considera así cuando es un área en la que el agua no tiene salida fluvial hacia el océano, desembocando en ríos, lagos” (Aparicio, 1992, pág. 19)

Cuenca Exorreica: “Es un sistema abierto de circulación de aguas, cuyos ríos principales de recolección y desagüe desembocan en el mar” (Aparicio, 1992, pág. 19), ver figura 1.

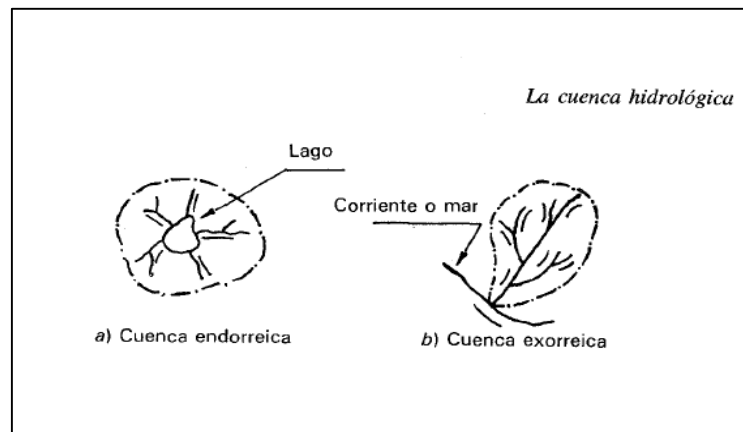


Figura 1. Cuenca en función de su salida.
Fuente: Aparicio (1992, pág. 20)

- c. En función de la elevación, una cuenca hidrográfica alto andina normalmente en función a la elevación tiene tres partes:

Vásquez *et al.* (2016) clasifica a la cuenca en:

Partes altas: En las partes altas se encuentran áreas donde se encuentran grandes volúmenes de agua, comprenden una elevación por encima de los 3,000 msnm alcanzando hasta los 6,500 msnm en forma de nevados de lluvia, dado que allí la precipitación de lluvias es fuerte y excesivo. El tipo de terreno en estas zonas es sumamente montañosas y escarpada; en consecuencia, su potencial erosivo es sumamente alto. La precipitación total promedio en el año llega a alcanzar de los 800 mm al 1,600 mm. A estas partes se le suele llamar “cabecera de cuenca”.

Partes medias; Las precipitaciones en estas zonas varían en promedio de 100 a 800 mm por año y son comprendidas de los 800 a los 3000 msnm. La función de estas partes de la cuenca está relacionada fundamentalmente con el escurrimiento del agua.

Partes bajas; La precipitación en esta zona es muy limitada en promedio menores a 100 mm/año, comprende desde la cota nivel del mar hasta los 800 metros sobre nivel del mar. En estas zonas se emplazan grandes proyectos de irrigación con considerables sistemas. (págs. 20-21), ver figura 2.

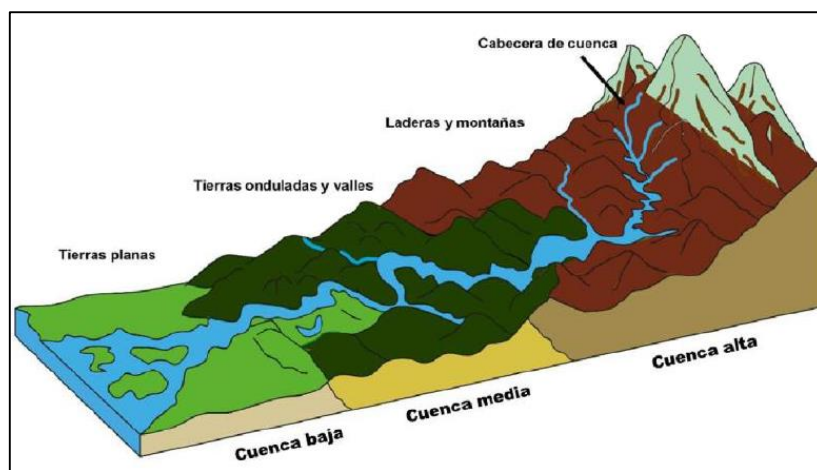


Figura 2. Partes de una cuenca hidrográfica.
Fuente: Vásquez *et al.* (2016, pág. 21)

2.2.4. División de una cuenca

De acuerdo a Vázquez *et al.* (2016) expone que:

La cuenca y su división esta en constante discusión, dirigido a los conceptos de cuenca, sub cuenca y micro cuenca (ver figura 3). La manera de empezar el análisis de la cuenca es el grado, en este caso de ramificaciones de las diferentes trayectorias de agua que en ella existan; luego de esto se pueden clasificar las trayectorias de agua en primer, segundo y tercer orden como micro cuencas; las trayectorias de agua de cuarto y quinto orden a las sub cuencas y las trayectorias de agua de sexto orden y más a cuencas. La cantidad del orden de las trayectorias de agua o río empieza con el cauce más pequeño y partiendo como referencia del límite considerado por la “Divisoria de aguas límite de la cuenca” (pág. 32)



Figura 3. División de una cuenca hidrográfica: sub cuencas y micro cuencas.

Fuente: Vázquez et al (2016, pág.23)

2.2.5. Curvas características de una cuenca

a) Curva hipsométrica

“Es la curva que, siendo colocada en un sistema de coordenadas rectangulares, simboliza la relación entre la superficie y la altitud de la cuenca en estudio, que queda sobre esa altitud. Para fabricar la curva hipsométrica se emplea un mapa con curvas de nivel” (Villón, 2011, pág. 43).

b) Curva de frecuencias de altitudes

“Es la imagen gráfica del porcentaje de la distribución, de las áreas ocupadas por diferentes altitudes. Es un complemento de la curva hipsométrica” (Villón, 2011, pág. 37).

2.4.6. Índices representativos

a) Índice o factor de forma (F)

“Expresa el cociente, entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud al cuadrado” (Villón, 2011, pág. 39)

$$F = \frac{\text{ancho}}{\text{longitud}} = \frac{A}{L^2} \dots \dots \dots (1)$$

b) Índice de compacidad

“El índice de compacidad de una cuenca, determinado por Gravelious, refleja la correlación entre el perímetro equivalente de una circunferencia y el perímetro de la cuenca, que contiene la misma área de la cuenca” (Villón, 2011, pág. 41) es decir:

$$K = \frac{\text{perímetro de la cuenca}}{\text{perímetro de un círculo de igual área}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \dots \dots (2)$$

Villon, M. (2011) menciona que:

El índice de compacidad, trata de expresar la influencia del perímetro y el área de una cuenca en la escorrentía, particularmente en las características del hidrograma. Si $K=1$, la cuenca sería de forma circular; por lo general, para cuencas alargadas se espera de $K>1$. Las cuencas de forma delgada, reducen las probabilidades, de que sean cubiertas en su totalidad por una tormenta, lo que afecta el tipo de respuesta que se presente en el río. (pág. 42)

2.4.7. Rectángulo equivalente

Villón, M. (2011) define que:

El rectángulo equivalente es la modificación geométrica, que permite simbolizar al cauce o cuenca, de su estructura heterogénea, con la estructura de un rectángulo, que poseen el mismo perímetro y la misma área y que, a consecuencia de esto, tienen el mismo índice de compacidad o índice de Gravelious, de igual forma la distribución de alturas y en consecuencia igual curva hipsométrica, en cuanto a sus condiciones de cobertura, similar distribución de área. (pág. 42)

2.4.8. Índice de pendiente

Es el estudio que se establece entre la distancia recorrida por el río y las pendientes, este valor funda el tipo de granulometría que se encuentra en el cauce. Además, refleja en cierto modo, el relieve de la cuenca. (Villón, 2011, pág. 49) Se utiliza la siguiente expresión:

$$I_p = \sum_{i=2}^n \sqrt{\beta_i(a_i - a_{i-1})} \cdot \frac{1}{\sqrt{L}} \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

I_p = índice de pendiente

n = número de curvas de nivel existentes en el rectángulo equivalente, incluido los extremos

a_1, \dots, a_n = cotas de las n curvas de nivel en km.

β_i = fracción de la superficie total de la cuenca comprendida entre las cotas $a_i - a_{i-1}$, $\beta_i = \frac{A_i}{A_T}$

L = longitud del lado mayor del rectángulo equivalente (km)

2.4.9. Pendiente de la cuenca

Villón, M. (2011) define que:

En el estudio de toda la zona de la cuenca, es el perímetro el que tiene una relación significativa y compleja con la escorrentía superficial, la filtración, la contribución de aguas subterránea a la escorrentía y la humedad del suelo. Factores que controlan la concentración de lluvia y el tiempo de escurrimiento en los canales de drenaje, y tienen una relación directa en magnitud de las crecidas. Algunos criterios para evaluar la pendiente de una cuenca:

- Criterio de alvord
 - Criterio de Nash
 - Criterio de Horton
 - Criterio del rectángulo equivalente
- Criterio del rectángulo equivalente

Con este criterio, para hallar la pendiente de la cuenca, se toma la pendiente media del rectángulo equivalente, es decir:

$$S = \frac{H}{L} \dots \dots (4)$$

Donde:

H = desnivel total (cota en la parte más alta – cota en la cuenca estación de aforo),
km

S = pendiente de la cuenca

L = lado mayor del rectángulo equivalente en km (pág. 16)

2.5. Esguerrimiento

Se llama esgurrentía a la corriente de agua que se vierte al rebasar su depósito o cauce natural o artificiales.

2.5.1. Aspectos generales

Villón, M. (2011) menciona que:

El agua procedente de la precipitación se define como esgurreimiento, que se mueve sobre o bajo la superficie o área terrestre y que llega a un curso para al fin, ser desaguada hasta la salida de la cuenca.

Si se estudia un corte simplificado de la superficie terrestre, se tiene que la precipitación al llegar a la superficie, tiene el siguiente comportamiento:

- Parte de la lluvia será infiltrada.
- Otra parte de esta lluvia, sacia la humedad del suelo de las capas que convergen sobre el nivel freático.
- Cuando el estrato del suelo se ha saturado, el agua subterránea es recargada, por la parte sobrante del agua que se ha infiltrado.

- La lluvia, tiende a deslizarse sobre la extensión de la superficie terrestre; denominándosele precipitación en exceso, a la precipitación que es ocasionada por este escurrimiento.

El escurrimiento se puede clasificar en:

- Escurrimiento superficial (Q).
- Escurrimiento subsuperficial (Q_s).
- Escurrimiento subterráneo (Q_g).

Escurrimiento superficial, es el proveniente de la precipitación que no es infiltrada y que se desliza por la superficie del suelo. El resultado sobre el escurrimiento total es rápido y existiría durante e inmediatamente después de que la tormenta termine. La parte de la precipitación total que da espacio a este escurrimiento, se le llama precipitación en exceso.

Escurrimiento subsuperficial, es el proveniente de una fracción de la precipitación infiltrada. El resultado sobre el escurrimiento total, puede ser rápido o retardado. Si es necesario se le da igual tratamiento que el escurrimiento, en caso contrario, como escurrimiento subterráneo.

Escurrimiento subterráneo, es el proveniente de las aguas subterráneas, la cual es recargada por la fracción de la precipitación que se infiltra, una vez que el suelo se ha saturado.

Con base en la forma en que contribuyen al escurrimiento total, el escurrimiento, se clasifica en escurrimiento directo, cuando su efecto es inmediato y escurrimiento base si su efecto es retardado. El hecho de presentarse una precipitación, no implica necesariamente que haya escurrimiento superficial, y en algunos casos tampoco escurrimiento, esto depende de una serie de factores. (págs. 135-136).

2.5.2. Parámetros del proceso de conversión de lluvia a escurrimiento

Los parámetros que influyen en el procedimiento de transformación de lluvia a escurrimiento son:

- El área de la cuenca.
- La altura total de precipitación.
- La forma, la pendiente, la vegetación, como características de la cuenca.
- Distribución de la precipitación en el tiempo y en el espacio.

2.5.3. Relación precipitación – escurrimiento

Los datos de escurrimiento en el lugar de estudio, son necesarios para conocer el gasto (caudal) de diseño. Muchas veces no se cuenta con la información, por los cambios en las condiciones de salida de la cuenca tales como: la deforestación, la urbanización, la construcción de obras almacenamiento, etc, lo que causa que los datos de gasto obtenidos antes de los cambios no sean útiles.

2.6. Selección del periodo de retorno

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008) menciona:

El periodo medio en años, en que la cantidad del caudal máximo de una creciente definida es igualado o superado una vez cada “Tr” años, se le denomina periodo de retorno “Tr”. Si los eventos anuales son individuales, es factible calcular la probabilidad de falla para una vida útil de “n” años.

Para admitir el periodo de retorno a emplear en el proyecto de una obra, es indispensable considerar la relación que existe entre, la vida útil de la estructura, la probabilidad de excedencia de un evento y el de riesgo de falla admisible,

dependiendo este último, de factores tales como: sociales, técnicos, económicos, entre otros.

El criterio de riesgo es la fijación, a priori, del riesgo que se desea asumir por el caso de que la obra llegase a fallar dentro de su tiempo de vida útil, lo cual implica que no ocurra un evento de magnitud superior a la utilizada en el diseño durante el primer año, durante el segundo, y así sucesivamente para cada uno de los años de la vida de la obra.

El riesgo de falla admisible en función del periodo de retorno y vida útil de la obra dado por:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \dots \dots \dots (5)$$

Si la obra tiene una vida útil de “n” años, la formula descrita con anterioridad permite calcular el periodo de retorno, fijando el riesgo de falla admisible R, el cual es la probabilidad de ocurrencia del pico de la corriente estudiada, durante la vida útil de la obra, ver figura 4 (Pág.23).

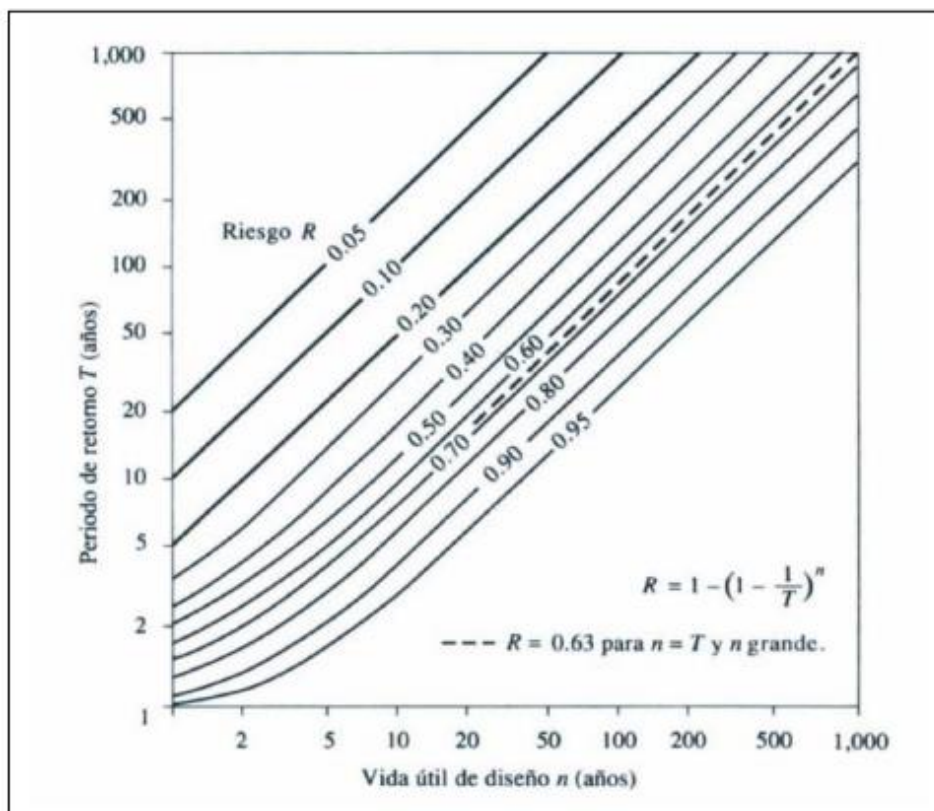


Figura 4. Riesgo de por lo menos una excedencia del evento de diseño durante la vida útil.

Fuente: Hidrología aplicada (Ven Te Chow)

2.7. Análisis estadísticos de datos hidrológicos

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008) menciona:

El análisis de frecuencias tiene el objetivo de evaluar precipitaciones, intensidades o caudales máximos, para distintos períodos de retorno, mediante el empleo de modelos probabilísticos, los cuales pueden ser discretos o continuos.

Para los estudios se recomienda utilizar:

- Distribución Normal
- Distribución Log Normal 2 parámetros
- Distribución Log Normal 3 parámetros

- Distribución Gamma 2 parámetros
- Distribución Gamma 3 parámetros
- Distribución Log Pearson tipo III
- Distribución Gumbel
- Distribución Log Gumbel.

(pág. 29)

2.7.1. Distribución de Gumbel

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008) describe la distribución de Gumbel o Doble Exponencial como “una distribución de Valores Tipo I, la función de distribución de probabilidades tiene la siguiente expresión:” (Pág. 22).

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \dots \dots \dots (6)$$

La siguiente relación se obtiene utilizando el método de momentos.

$$\alpha = \frac{1.2825}{\sigma}$$

$$\beta = \mu - 0.45\sigma$$

Donde:

α : Parámetro de concentración.

β : Parámetro de localización.

Para Ven Te Chow, la distribución se expresarse de la siguiente manera:

$$x = \bar{x} + k\sigma_x \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

x: Valor con una probabilidad dada.

\bar{x} : Promedio de la serie.

k: Factor de frecuencia.

2.7.2. Distribución Log Gumbel

De acuerdo al Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008) “La variable aleatoria reducida log Gumbel, se determina como:” (págs. 29-30).

$$y = \frac{\ln x - u}{\alpha}$$

Donde, la función acumulada reducida log Gumbel es:

$$G(y) = e^{-e^{-y}} \dots \dots \dots (8)$$

2.7.3. Distribución normal

De acuerdo al Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008) “La función de densidad de probabilidad normal se define como:” (pág. 26).

$$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{(2\pi)}} e^{-\frac{1}{2}\left\{\frac{x-u}{S}\right\}^2} \dots \dots \dots (9)$$

Donde:

$f(x)$ = Función densidad de la variable x.

X = variable independiente.

U = parámetro de localización, igual a la medida aritmética de x.

S = parámetro de escala, igual a la desviación estándar de x.

2.7.4. Distribución Log Pearson Tipo III

De acuerdo al Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008) “la función de densidad es:” (pág. 28).

$$f(x) = \frac{(\ln x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(\ln x - x_0)}{\beta}}}{x\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \dots \dots \dots (10)$$

Donde:

x_0 : Parámetro de dispersión

γ : Parámetro de forma

β : Parámetro de escala

2.8. Prueba de bondad de ajuste

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008) menciona:

Las pruebas de bondad de ajuste son demostraciones de hipótesis que se utilizan para estimar el conjunto de datos es una muestra independiente de la distribución elegida.

En la teoría estadística, las pruebas de bondad de ajuste más conocidas son la de Kolmogorov – Smirnov y las X^2 .

a) Prueba de Kolmogorov – Smirnov

Método por el cual se comprueba la bondad de ajuste de las distribuciones, asimismo permite elegir la más representativa, es decir la de mejor ajuste.

Esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada $F_o(x_m)$ y la estimada $F(x_m)$.

$$D = \frac{max}{Fo(xm)} - F(xm) \dots \dots \dots (11)$$

Con un valor crítico d que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado. Si $D < d$, se acepta la hipótesis nula. Esta prueba tiene ventaja sobre X^2 que compara los datos con el modelo estadístico sin necesidad de agruparlos. La función de distribución de probabilidad observada se calcula como:

$$Fo = 1 - \frac{m}{n + 1} \dots \dots \dots (12)$$

Donde m es el número de orden de dato x_m en una lista de mayor a menor y n es el número total de datos. (págs. 30-32).

2.9. Determinación de la tormenta de diseño

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008) menciona:

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitaciones definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente la tormenta de diseño conforma la entrada del sistema. Los caudales resultantes a través de este se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales. Una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta.

Las tormentas de diseño pueden basarse en información histórica de precipitaciones de una zona o puedan construirse utilizando las características generales de las precipitaciones en regiones adyacentes. Su aplicación va desde el uso de valores puntuales de precipitación en el método racional para determinar los caudales picos en alcantarillados de aguas de lluvia y alcantarillas de carretera, hasta

el uso de hietogramas de tormenta como las entradas para el análisis de lluvia escorrentía en embalses de detección de aguas urbanas. (pág. 33)

2.10. Curvas Intensidad Duración Frecuencia

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008) menciona:

La tasa temporal de precipitación se le denomina intensidad (mm/h) o intensidad promedio sobre la duración de la lluvia y se expresa como:

$$i = \frac{P}{Td} \dots \dots \dots (13)$$

Donde P es la profundidad de lluvia (mm) y Td es la duración, dada usualmente en horas. La frecuencia se expresa en función del período de retorno, T, que es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño. La asignación de probabilidad para la intensidad de lluvia correspondiente a cada duración se representa en un gráfico de intensidad vs. duración (ver figura 5).

Para determinar estas curvas IDF se necesita contar con registros pluviográficos de lluvia en el lugar de interés y seleccionar la lluvia más intensa de diferentes duraciones en cada año, con el fin de realizar un estudio de frecuencia con cada una de las series así formadas. Es decir, se deben examinar los hietogramas de cada una de las tormentas ocurridas en un año y de estos hietogramas elegir la lluvia correspondiente a la hora más lluviosa, a las dos horas más lluviosas, a las tres y así sucesivamente. Con los valores seleccionados elegidas. Estas series anuales están formadas correspondientemente a cada duración, obteniéndose un valor para cada año y cada duración.

Cada serie se somete a un análisis de frecuencia, asociando modelos probabilísticas. Así se consigue una asignación de probabilidad para la intensidad de lluvia correspondiente a cada duración. (págs. 33-34)

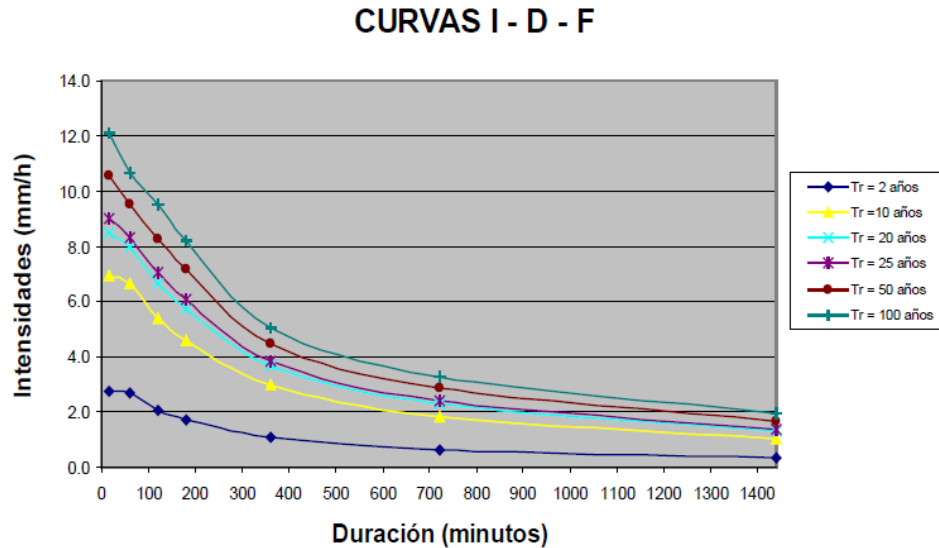


Figura 5. Curvas Intensidad – Duración - Frecuencia.

Fuente: Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje (2008, pág.35).

2.11. Tiempo de concentración

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008) menciona:

El tiempo requerido por una gota para recorrer desde el punto hidráulicamente más alejado hasta la salida de la cuenca.

Pasado el tiempo de concentración se considera que toda la cuenca contribuye a la salida. Como existe una relación inversa entre la duración de una tormenta y su intensidad (a mayor duración disminuye la intensidad), entonces se asume que la duración crítica es igual al tiempo de concentración t_c . El tiempo de concentración real depende de muchos factores, entre otros de la geometría en planta de la cuenca (una cuenca alargada tendrá un mayor tiempo de concentración), de su

pendiente pues una mayor pendiente produce flujos más veloces y en menor tiempo de concentración, el área, las características del suelo, cobertura vegetal, etc. Las fórmulas más comunes solo incluyen la pendiente, la magnitud del cauce mayor desde la divisoria y el área.

El tiempo de concentración es un sistema de drenaje pluvial es:

$$tc = t_o + tf \dots \dots \dots (14)$$

Donde:

t_o : tiempo de entrada

tf : tiempo de flujo

Para el desarrollo de la investigación utilizaremos la ecuación de California Culverts Practice (1942):

$$tc = 0.0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \dots \dots \dots (15)$$

Donde:

L = longitud del curso de agua más largo, m.

H = diferencia desnivel entre la divisoria de aguas y la salida, m.

(pág. 38).

2.12. Hietograma de diseño

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008) menciona:

En ocasiones no es suficiente el dato de que (por ejemplo) la precipitación máxima por las 5 horas más lluviosas es de 100mm. Es posible que necesitemos conocer la evolución de esos 100 mm a lo largo de esas 5 horas.

Los métodos hidrológicos más modernos requieren no solo del valor de lluvia o intensidad de diseño, sino de una distribución temporal (tormenta), es decir el método estudia la distribución en el tiempo, de las tormentas observadas.

Una de las maneras de obtenerlo es a partir de las curvas IDF, dentro de ellas el Método del Bloque Alterno, es una manera sencilla. (pág. 40).

2.13. Precipitación total y efectiva

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008) menciona:

El exceso de precipitación o precipitación efectiva, es la precipitación que no se retiene en la superficie terrestre y tampoco se infiltra en el suelo. Después de fluir a través de la superficie de la cuenca, el exceso de precipitación se convierte en escorrentía directa a la salida de la cuenca bajo la suposición de flujo superficial hortoniano. Las gráficas de precipitaciones vs. El tiempo o hietograma de exceso de precipitaciones es un componente clave para el estudio de las relaciones lluvia-escorrentía de exceso de precipitación se conoce como abstracción o pérdida. Las pérdidas son primordialmente agua absorbida por la filtración con algo de interceptación y almacenamiento superficial.

El hietograma de exceso de precipitación puede calcularse a partir del hietograma de precipitación unas o dos formas, dependiendo de si existe o no información de caudales disponibles para la tormenta. (pág. 42).

2.13.1. Método SCS para abstracciones

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008) menciona:

El Soil Conservation Service (1972) desarrolló un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta.

El uso de esta metodología exige la determinación del valor respectivo del CN (número adimensional de curva o curva número), correspondiente al área específica en estudio, valor que debe ser obtenido mediante procesos de calibración. (pág. 42).

El calculo de CN se da a conocer por el uso del suelo (Tabla 1 y Tabla 2)

Tabla 1
Grupos de suelos hidrológicos.

Grupo A	Suelos de bajo potencial de escorrentía, teniendo altas tasas de infiltración aun cuando está completamente saturado. Arena profunda muy bien drenadas, con alta tasa de transmisión de agua.
Grupo B	Suelos con moderadas tasas de infiltración. Suelos poco profundos, moderadamente drenadas, con texturas moderadamente finas a gruesas. Esto suelos tienen una moderada tasa de transmisión de agua.
Grupo C	Suelos con baja tasa de infiltración cuando está completamente saturado, principalmente suelos que tienen una capa que impide el movimiento descendente del agua o suelos de textura moderadamente finas a finas. Suelos con altos contenidos de arcilla y baja tasa de transmisión de agua.
Grupo D	Suelos de alto potencial de escorrentía, teniendo tasas muy bajas infiltración cuando está completamente saturado. Son suelos arcillosos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas. Suelos con muy baja tasa de transmisión de agua.

Fuente: Hidrología aplicada Ven te Chow

precipitación, mediante la muestra de la cuenca como un medio interconectado de elementos hidrológicos e hidráulicos. (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2008, págs. 58-59).

La utilización del programa corresponde a la utilización de las características de la precipitación, las características de la cuenca y la intensidad obtenidas de las curvas I-d-f (Intensidad, duración, frecuencia). (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2008, págs. 58-59).

2.15. Estimación de caudales

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008) menciona:

Cuando existen datos de aforo en cantidades suficientes, se realiza un análisis estadístico de los caudales máximos instantáneos anuales para la estación más cercana al punto de interés. Se calculan los caudales para los periodos de retorno de interés (2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años son valores estándar) usando la distribución log normal, log Person III y valor extremo tipo I (Gambel), etc.

Cuando no existe datos de aforo, se utilizan los datos de precipitación como dato de entrada a una cuenca y que producen un caudal Q . cuando ocurre la lluvia, la cuenca se humedece de manera progresiva, infiltrándose una parte en el subsuelo y luego de un tiempo el flujo se convierte en flujo superficial. Para el desarrollo de la investigación utilizaremos el método racional. (pág. 48).

2.15.1. Método racional

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008) menciona:

Estimas caudales máximos a partir de las precipitaciones, abarcando todas las abstracciones en un solo coeficiente C (coeficiente de escorrentía) estimado sobre

la base de las características de la cuenca. Muy usado para cuencas $A < 10 \text{ km}^2$. Considerar que la duración de P es igual a t_c .

La descarga máxima de diseño, según esta metodología, se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$Q = 0,278 CIA \dots \dots \dots (16)$$

Donde:

Q: Descarga máxima de diseño (m^3/s).

C: Coeficiente de escorrentía (ver tabla 3)

I: Intensidad de precipitación máxima (mm/h)

A: Área de la cuenca (km^2)

Tabla 3
Coeficiente de escorrentía método racional

COBERTURA VEGETAL	TIPO DE SUELOS	PENDIENTES DEL TERRENO				
		Pronunciadas > 50%	Altas >20%	Medias > 5%	Suave > 1%	Despreciable < 1%
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierba, grama	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosques, densa vegetación	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Fuente: Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje (2008).

El valor de escorrentía se establecerá de acuerdo a las características hidrológicas geomorfológicas de las quebradas cuyos cursos interceptan el alineamiento de la carretera en estudio. En virtud a ello, los coeficientes de escorrentía variaran según dichas características (pág. 49)

2.16. Hidráulica fluvial

Gamion, F. (2014) menciona que:

La hidráulica fluvial es la participación humana en los ríos para su acondicionamiento a la explotación de los recursos o a la disminución de los riesgos de daño. El río no es un objeto de la ingeniería civil como una carretera o un ferrocarril, el río es un componente natural que junta las aguas de una cuenca y las traslada en cualquier régimen hasta su salida o desagüe. El precedente o el punto de referencia más directo en los estudios de la ingeniería civil para comprender un río son las obras hidráulicas y la hidráulica del régimen laminar, para transporte en el mismo régimen, en otras palabras, se trata de los "canales", la hidráulica proporciona una base de análisis de ciertos problemas fluviales. (pág. 43)

2.16.1. Parámetros hidráulicos y geométricos

Gamion, F. (2014) nos menciona que:

La sección transversal del cauce y su estudio (geometría hidráulica), se fundamenta en las relaciones existentes entre los niveles de agua, los caudales y los diferentes parámetros hidráulicos y geométricos, tales como el ancho, la pendiente, el área hidráulica, la velocidad del agua y la rugosidad.

El régimen de flujo en un segmento particular de un movimiento natural se clasifica en aplicación del Número de Froude, el cual es una relación adimensional

entre la fuerza de gravedad y la fuerza de inercia. En el régimen supercrítico ($NF > 1$) el flujo es de alta velocidad, propio de cauces de gran pendiente o ríos de montaña. El flujo subcrítico ($NF < 1$) corresponde a un régimen de llanura con baja velocidad. El flujo crítico ($NF = 1$) es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición entre los regímenes subcrítico y supercrítico.

Cuando el lecho pasa de un tramo con una pendiente elevada a otro de pendiente baja, su capacidad de transporte se disminuye y empieza a alojar los materiales que acepta del tramo anterior. En este cambio se forman islas y brazos que puede tomar una conformación trenzada, con cauce divagante. Asimismo, el material que se acepta eleva el fondo del cauce y disminuye su capacidad a cauce lleno, Ver figura 6. (pág. 43).

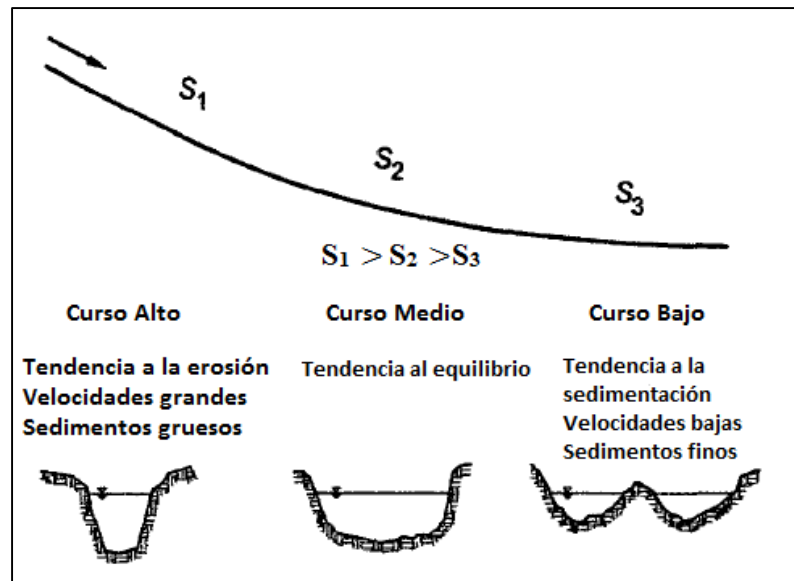


Figura 6. Concepto del perfil longitudinal y secciones transversales típicas de un río, a lo largo de su recorrido.

Fuente: Dr. ROCHA (1998)

2.16.2. Debris Flow

Debris Flow - Es un flujo de sedimentos con mezcla de agua de una manera como si fuera un flujo de fluido continuo impulsado por la gravedad, y alcanza una gran movilidad desde el espacio vacío saturado con agua o suspensión, ver figura 7. (Takahashi, 2014, pág. 7).

Suárez, J. (2001) menciona:

En los flujos de detritos los sedimentos gobiernan enteramente el flujo y el elemento agua es menos importante. El movimiento de los flujos de detritos se le puede asociar por lo regular como un “flujo turbulento de granos”. Este proceso no solicita la presencia de una fase gaseosa o líquida y el movimiento se produce por transferencia de momentum al colisionar las partículas o bloques que se mueven.

Su conducta se aleja del modelo hidráulico particular. Los flujos son no-viscosos y son regularmente flujos turbulentos de dos fases. La fase líquida es un slurry constituido por partículas finas y agua, siendo la fase propiamente sólida las partículas gruesas. Las partículas gruesas rotan y saltan con velocidades mucho menores que las del slurry y se puede oír el ruido de colisión de las partículas unas con otras, con ondas superficiales y salpicaduras, observándose visiblemente la turbulencia del flujo. (pág. 179).

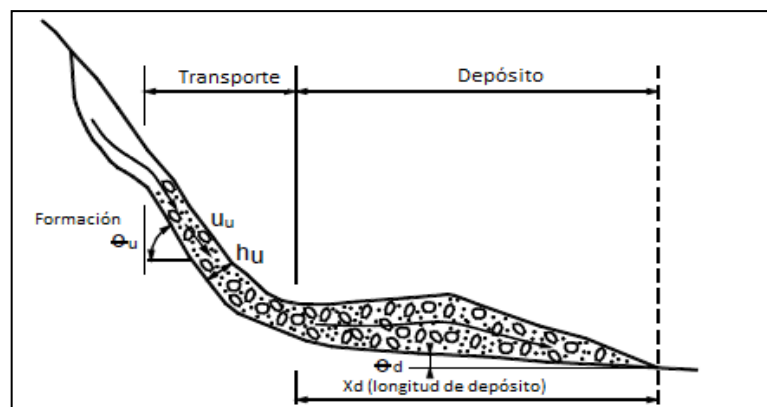


Figura 7. Esquema de un flujo de detritos (Debris Flow).
Fuente: SUÁREZ (2004, pág. 187)



Figura 8. Parte frontal de un flujo de escombros.
Fuente: Takahashi (2014)

La figura 8, muestra la parte frontal del flujo de escombros en la cuenca Jiangjia Gully, Yunnan, China. Está fluyendo desde el tramo superior derecho al tramo inferior izquierdo. Este flujo contiene sólidos, Fracciona más del 60% en volumen. A pesar de tal alta concentración de sólidos, Fluye rápido en pendientes tan suaves como de 3 grados. (Takahashi, 2014, pág.01).

2.17. Clasificación y características de los fluidos de detritos

Los flujos de escombros son aplicables independientemente de los tamaños de su material constitutivo y sus distribuciones, las concentraciones de sedimentos en el flujo, las propiedades de fluido intersticial, y las condiciones hidráulicas de flujo tales como la velocidad, la profundidad y el gradiente de pendiente del canal. Los flujos de escombros difieren en función de los factores del comportamiento y de su poder destructivo.

2.17.1. Flujo de escombros de tipo pedregoso

Takahashi, T. (2014) nos indica que la:

Cuenca experimental Shiramizudani de Hodaka, Observatorio de Sedimentación, DPRI, en 1968 y Análisis fotográfico de flujo de escombros en Kamikamihorizawa en 1976.

Donde se produjo un flujo de escombros la cual recabo rastros curiosos dentro y en los márgenes del canal dentro del cual fluye, el canal era de unos 10m De ancho y unas decenas de centímetros de profundidad. Aunque la parte central de la cama estaba cubierta por partículas comparativamente pequeñas, ambos dobladillos estaban compuestos de cantos rodados de más de 1 metro de diámetro, como si se elevaran desde el fondo y alineados artificialmente (Figura 9).

La naturaleza del flujo de escombros descrito anteriormente fue suficiente para darme un incentivo para investigar la mecánica del flujo, pero, en ese momento, el flujo de escombros se consideró un "Desastre fantasmal" que tuvo orígenes desconocidos. Varios años pasados sin avances hasta que Okuda y sus colegas en DPRI, lograron tomar fotos de flujo de escombros en Kamikamihorizawa en 1976.

La figura 10, refleja las tomas fotográficas secuenciales del flujo de escombros, capta imagen tomada cada segundo. Las cuales fueron analizadas a detalle y se obtuvieron las siguientes conclusiones sobre la naturaleza del flujo de escombros

La figura 10, es la secuencia en el tiempo de un flujo de escombros, con una fotografía tomada cada segundo. Ellos analizaron estas fotografías en detalle y obtuvieron las siguientes conclusiones sobre la naturaleza de flujo de escombros (Okuda et al. 1977):

- a) La vanguardia del flujo de escombros parece un agujero y la profundidad del flujo de repente se hace grande desde prácticamente ningún flujo precedente.
- b) Las piedras más grandes se acumulan en la parte delantera y la vanguardia contiene poca agua, denominándosele flujo de piedra.
- c) El flujo se eleva mucho a lo largo del banco derecho (externo), probablemente debido a que la sección fotografiada localiza un poco aguas abajo de una ligera curva en la corriente canal.
- d) La parte frontal del flujo, donde se acumulan grandes rocas, dura solo unos segundos y la siguiente parte que dura mucho tiempo parece un flujo de lodo gradualmente descarga decreciente.
- e) Estimado a partir de la nitidez de las imágenes fotográficas, la velocidad parece distribuirse lateralmente y la parte central es algo así como un tapón en el flujo de fluido de Bingham, la velocidad en la parte central es la mayor y casi sin gradiente de velocidad lateral existe (Comentario del autor: Es erróneo concluir automáticamente que si no hay velocidad el gradiente existe es un plugin. El flujo de agua turbulenta en un canal ancho tiene casi distribución lateral uniforme de la velocidad.

Las observaciones del flujo de escombros en Kamikamihorizawa han dado una gran cantidad de valiosos resultados se ocupan de la imagen completa de los procesos de flujo de escombros; es decir, las situaciones en el área de origen, los comportamientos en el canal y los procesos de deposición. A continuación, se muestran las diversas naturalezas de los flujos de escombros pedregosos en el barranco de Kamikamihorizawa. (págs. 9-10).

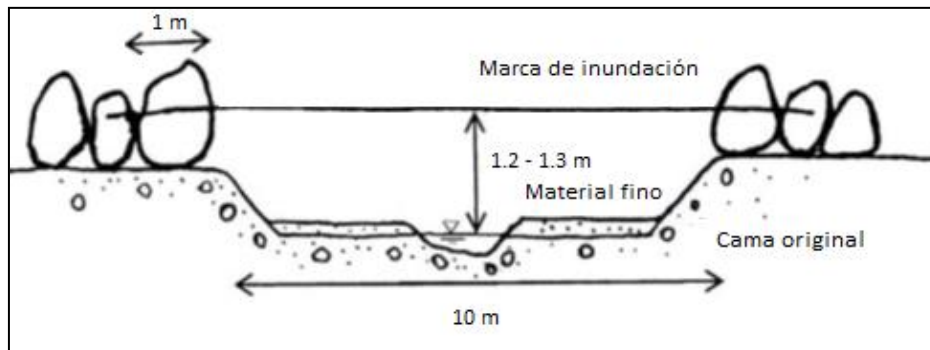


Figura 9. Sección transversal de la cuenca Shiramizudani después del paso de un flujo de escombros.

Fuente: Takahashi (2014, pág. 9)

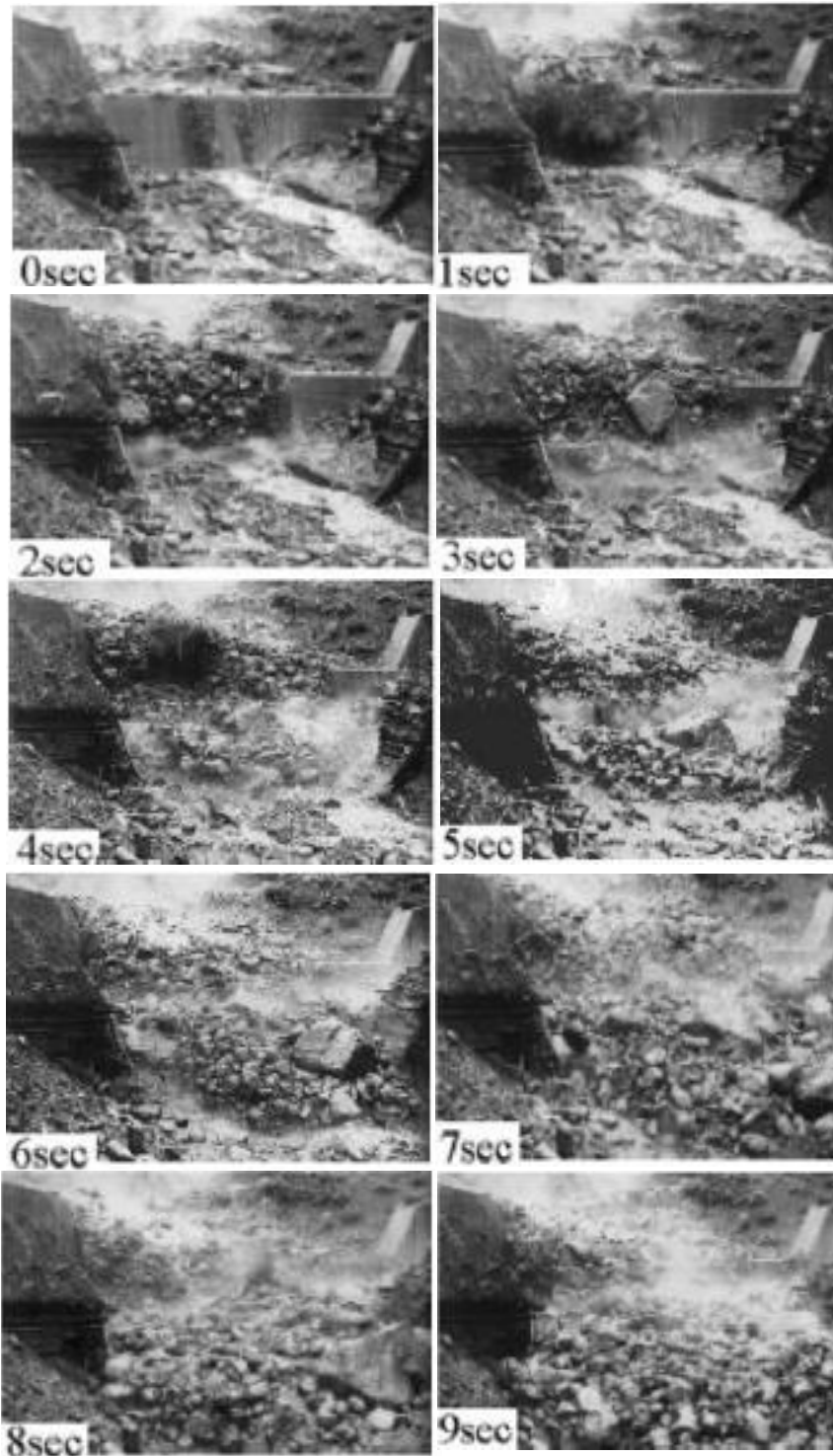


Figura 10. Flujo de escombros de tipo pétreo en la cuenca Kamikamihorizawa. 03 de agosto de 1976.
Fuente: Okuda et al. (1977).

2.17.2. Flujo de escombros de tipo lodoso

Takahashi, T. (2014) menciona:

La expulsión vigorosa de ceniza de un volcán activo, da como resultado la gruesa cubierta de montaña que se erosiona fácilmente incluso por una ligera precipitación. Tal cubierta de ceniza provoca la erosión frecuente de ocurrencia de flujos de escombros. Este tipo de flujos de escombros son, aunque contienen muchas rocas grandes, principalmente compuestas de ceniza fina, y los comportamientos de flujo son diferentes de las de tipo pedregoso. La (figura 11), muestra los flujos de escombros en el río Nojiri, Sakurajima. El flujo es muy turbulento desde la vanguardia hasta la parte posterior. A este tipo de flujo de escombros lo llamamos "Tipo lodoso (turbulento)".

Las muestras de sedimentos en los frentes han sido recolectadas por los muestreadores establecidos en la sección de flujo de una presa sabo (barrera de escombros) en el área aguas arriba y en el canal funciona aguas abajo en el río Nojiri. Estos datos muestran la concentración de sólidos en el punto de presa sabo de 35 - 42% por volumen y que en el canal es de 54 - 72%, el diámetro de los sólidos es de 0.3 - 1 mm, y la fracción es menor de 0.1mm es 10 - 30%.

Debido a que el flujo es violentamente turbulento, podemos aplicar la fórmula de Manning por la ley de resistencia; $U = (1/n_m)H_a^{2/3} I^{1/2}$, donde U es la velocidad media en sección en m/s, H_a es la profundidad de flujo en m y I es el gradiente de pendiente del canal que es Igual a 1/18 en las obras del canal del río Nojiri. El coeficiente de resistencia calculado. n_m para las partes antes del pico, en el pico, después del pico y la parte trasera son 0.030, 0.022, 0.027 y 0.020, respectivamente, y estos valores son casi los mismos que la del flujo de agua corriente (Ohsumi Work Office 1988). La ley de resistencia es a veces descrita por el coeficiente de velocidad definido por $\psi = U/u_*$, donde $u_* (= (gHaI)^{1/2})$ es la

velocidad de corte y g es la aceleración debida a la gravedad. En el caso de los flujos de detritos en el río Nojiri $\psi = 10-20$. (págs. 20-21).



Figura 11. Flujos de escombros en el río Nojiri, Sakurajima (OhsumiWork oficina 1988).

(1) Un flujo de escombros que pasa por una presa de sabo. 18 de diciembre de 1986.

(2) Un flujo de escombros que fluye hacia abajo las obras del canal.

Fuente: Takahashi (2014, pág.21)

2.17.3. Flujo de escombros viscosos

Takahashi, T. (2014) menciona:

Estudios durante ocho años a partir de 1991, entre el Instituto de Riesgos de Montaña y Medio Ambiente, y la Academia de Ciencias y Ministerio de Conservación del Agua, China. Sobre el mecanismo de los flujos de escombros de tipo viscoso.

El Jiangjia Gully, Yunnan afluente del río Xiaojiang (una de las ramas de primer nivel del río Jinsha) es la cuenca experimental de la investigación del flujo de escombros de Dongchuan, estación del Instituto en la que observamos varios flujos de escombros. El Jiangjia Gully tiene un área de cuenca de 46.8 km², tiene 13.9 km de largo en el tronco, los 3.269 m en el nivel más alto, y 1,024 m en la confluencia con el río Xiaojiang. Es una cuenca empinada, de los cuales el 60%

está ocupado por deslizamientos de tierra y más de mil millones de metros cúbicos de escombros se acumulan listos para ser eliminados como flujos de escombros (Wu et al. 1990). Por lo tanto, los flujos de escombros a gran escala ocurren más de diez veces al año. Las observaciones del flujo de escombros durante el flujo y el muestreo de materiales de flujo de escombros se llevan a cabo en un alcance de canal recto, aproximadamente 200 m de largo, 20 - 40 m de ancho, 5 - 6m de profundidad y con una pendiente de alrededor del 6%.

Los flujos de escombros en el Jiangjia Gully son famosos como los típicos viscosos. El carácter más conspicuo de estos flujos es, como se muestra en la (figura 12), su intermitencia, decenas y cientos de sobretensiones (flujo intermitente diámetro similar) salen repetidamente con el intervalo de tiempo de unas pocas decenas de segundos a unos pocos minutos. Cada oleada avanza y ruga como si fuera una ola rompiente en la costa del mar. El tiempo general los aspectos secuenciales de un evento en el canal de observación son los siguientes:

Acompañando a la lluvia, al principio, la carga de sedimentos turbulentos inunda el flujo aparente y genera densidad de $1 - 1.5 \text{ t/ m}^3$. Es sucedido por un flujo continuo de escombros de 1.8 t / m^3 . A su debido tiempo, la primera oleada sale. Esta oleada se desacelera dentro de una distancia de unos pocos de decenas de metros hasta 200 m. y se detiene formando un depósito. En el canal el lecho antes de la subida de tensión es una superficie rugosa, pero después de la interrupción de la oleada del canal, el lecho, aguas arriba del frente detenido se vuelve lisa. La siguiente oleada, ayudada por el lecho alisado, va aguas abajo que logrando alargar el depósito, así como el engrosamiento de la profundidad del depósito apilando sobre el depósito de la última oleada.

La repetición de estos procesos da como resultado un alisado completo del lecho y el espesor del depósito alcanza una etapa de equilibrio (parece depender de la aparente densidad y viscosidad de alrededor de 1 metro). Entonces, el número de oleadas pasan repetidamente. La densidad aparente del flujo de escombros en

esta etapa es de 1.8 a 2.3 t / m³. De vez en cuando, la intermitencia cesa repentinamente en esta etapa y aparece un flujo turbulento continuo durante un tiempo, pero es seguido de nuevo por los flujos intermitentes. Este fenómeno puede deberse a la condición de suministro del material de flujo de escombros en el área de origen, pero no se puede decir definitivamente. En general, tras la repetición de oleadas intermitentes, en una inversa del proceso de desarrollo, aparece un flujo continuo de escombros turbulentos seguido por el flujo de inundación hiperconcentrado. El flujo de inundación erosiona el alisado del lecho. Por lo tanto, después de un evento, el lecho del canal vuelve a ser tan resistente como antes. Pero, la elevación del lecho, el ancho del canal y las formas longitudinales los bancos laterales no son necesariamente los mismos que los anteriores al evento. (págs. 21-23).

(1)



(2)

Figura 12. Flujos de escombros en la cuenca experimental Jiangjia Gully, afluente del río Xiaojiang - China.

(1) Vista de dos oleadas sucesivas.

(2) Se observa la violenta Turbulencia a la vanguardia, comparado con el flujo laminar en la parte trasera que se ve en (1).

Fuente: Takahashi (2014, pág.22)

Las estadísticas actuales muestran que la duración de un evento es de unas pocas decenas de minutos a varias decenas de horas, y la más frecuente es de aproximadamente dos horas. Alrededor del 70% de la duración es la continuación de oleadas intermitentes (Kan 1994).

Las características generales de una oleada pueden resumirse de la siguiente manera:

- El frente de una oleada tiene una longitud de 3 a 5 m, donde la profundidad y la velocidad son las máximas.
- La velocidad frontal suele ser de 6 - 8 m / s, a veces tan grande como 10 m / s.
- Una vez que ha pasado la parte delantera violentamente turbulenta, los 10 - 20 m de largo las partes menos turbulentas sigue, en la que la velocidad todavía no es muy diferente de la parte frontal.
- Después de esta parte, viene la parte ondulada de 30 - 50 m de longitud, en la que la profundidad y la velocidad disminuyen gradualmente.
- Luego, la parte de flujo laminar de 50 - 80 m de largo continúa.

Takahashi, T. (2014) comenta:

La clasificación de flujo de escombros es posible en el diagrama de fases ternario tal como se muestra en la (Figura 13). El eje vertical representa el agrupamiento de partículas gruesas media en el flujo. Si las partículas gruesas no están contenidas en el flujo (en el punto más bajo en el eje vertical), el flujo es simple agua o flujo de la suspensión. En un flujo de agua, el esfuerzo cortante es compartida por la tensión turbulenta de Reynolds y la tensión viscosa y cuanto mayor es la viscosidad, mayor la importancia relativa de la tensión viscosa. Por lo tanto, los

cambios de régimen de flujo de laminar a turbulento o viceversa a lo largo del eje horizontal más bajo. La relación de los miembros finales de este eje, T_{fq} / T_t , es simplemente, el número de Reynolds. Por lo tanto, el número de Reynolds cambia a lo largo de este eje. La t que aparece en el miembro final de la figura representa el total de las tensiones internas. Cuando la concentración de sólidos se hace más grande pero aún menor a aproximadamente 0.02 (Takahashi 1991).

El flujo contiene carga de lecho o carga suspendida dependiendo de la turbulencia y viscosidad. Aparece estrés por colisión de partículas, pero es pequeño. Cuando la concentración de sólidos se hace más grande pero menor a aproximadamente 0.2, el flujo se convierte en un flujo de escombros inmaduros, la tensión de colisión domina solo en la parte inferior Capa de mezcla de partículas. A medida que la concentración media de partículas gruesas se hace más grande, pero es más pequeña que C_3 , el flujo se convierte en un flujo de residuos dinámico. En este caso posibles tensiones dominantes, son la tensión de colisión de partículas, la tensión de mezcla turbulenta y la tensión viscosa, porque bajo tal concentración, la tensión casi estática no puede ser dominante. Por lo tanto, La subclasificación del flujo de escombros es posible en el diagrama de fase ternaria como se muestra en la Figura 13. Los tres vértices del triángulo significan T_c respectivo, T_t y T_{fq} ocupan un 100% del esfuerzo total de cizallamiento interno T . Uno de los tres ejes del diagrama ternario indica el número de Reynolds como se mencionó anteriormente. La relación de los dos miembros finales en los vértices T_t / T y T_c / T ; es decir, T_t / T_c , se puede aproximar como $f(C, e) (h / d_p)^2$, y la relación de los dos miembros finales en los vértices T_c / T y T_{fq} / T ; es decir, T_c / T_{fq} , representa el número Bagnold. Por lo tanto, los tres ejes del diagrama ternario representan la profundidad relativa h / d_p , el número de Bagnold y el número de Reynolds, respectivamente. La región donde el número Bagnold es grande y la profundidad relativa es pequeña es donde se produce el flujo de escombros pedregosos. En la región donde el número Bagnold y el número de Reynolds es pequeño, se produce un flujo de escombros viscosos; en la región donde la profundidad relativa y el número de Reynolds son grandes, flujo de escombros es

turbulento-fangoso. Así, el área cercana a los tres vértices está ocupada por áreas de pedregosos, viscosas y flujos de escombros fangosos, respectivamente, y el resto del área en el triángulo ocupado por un tipo híbrido de esos tres típicos. (págs. 29-31).

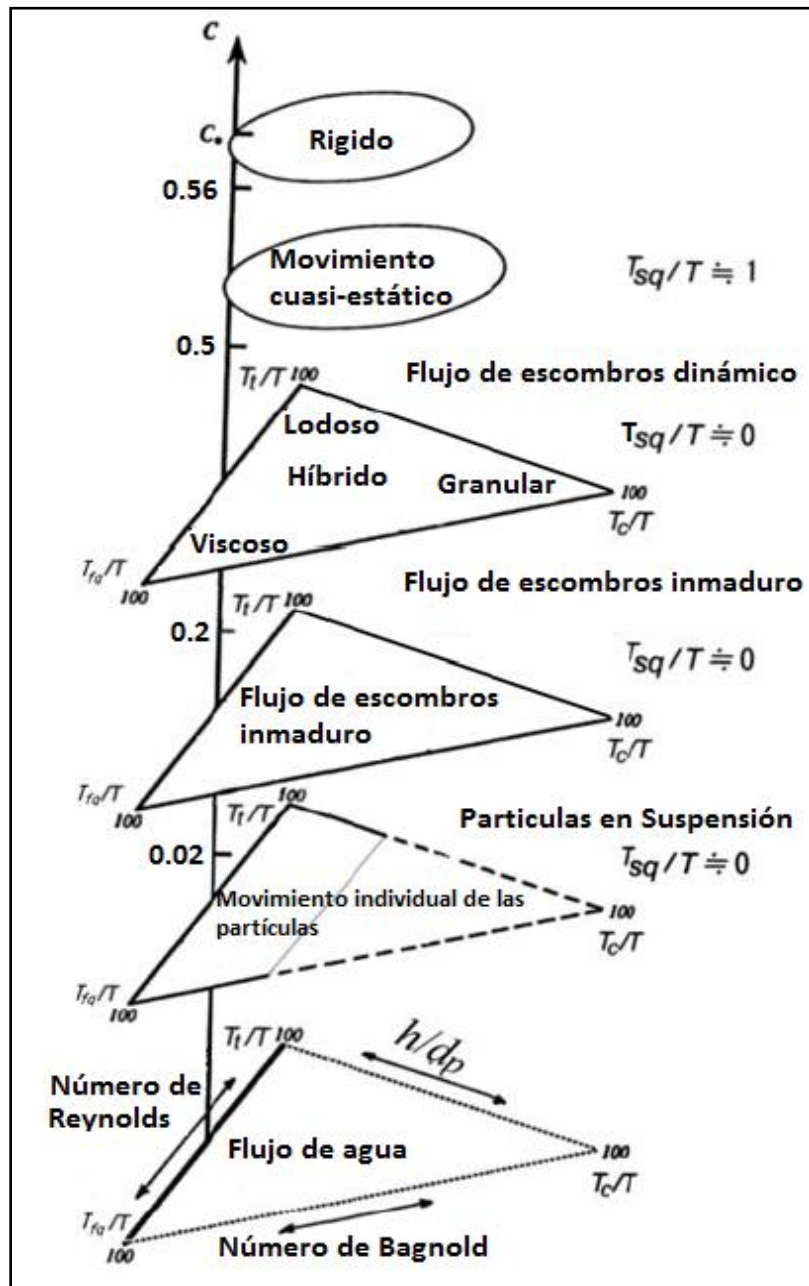


Figura 13. Criterios de existencia de varios movimientos de la mezcla de sólidos y fluidos.

Fuente: Takahashi (2014)

2.17.4. Factores que desencadenan los flujos de detritos

Suárez, J. (2001) comenta:

Cuando se produce un evento anómalo como lluvias extraordinarias, sismos fuertes o deshielos rápidos pueden ocasionarse deslizamiento o erosión, los cuales originan una acumulación de sedimentos o partículas encima de las laderas o cauces.

De acuerdo al proceso activador las masas que se sueltan pueden estar saturadas o puede haber aporte adicional de agua. La acumulación de sedimentos dispersos sobre una pendiente fuerte favorece su movimiento. (pág.181)

El desplazamiento de los flujos de detritos se acciona con las lluvias, a causa de la pérdida de resistencia por el decrecimiento de la succión al saturarse el material o por el incremento de fuerzas causadas por el movimiento del agua subterránea (Collins y Znidarcic, 1997). Los daños originados por los flujos de detritos concentran áreas aproximadamente grandes (Figura 14) (Suárez, 2004, pág. 24).

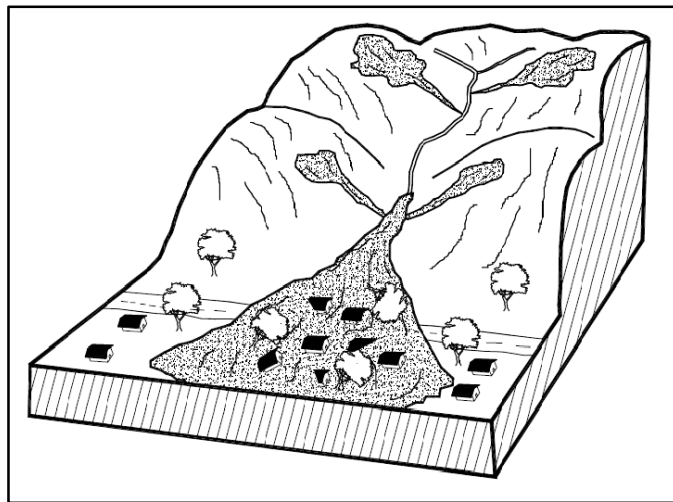


Figura 14. Flujo de detritos.
Fuente: Suárez (2004, pág. 24)

Castillo, L. (2006) indica:

Los factores que influyen en el tipo de flujo y que ayudan a definir la probabilidad de ocurrencia del flujo son:

- Área de la cuenca de recepción: A mayor área, mayor será la cantidad de agua que captará, y mayor el volumen del flujo.
- Pendiente: A mayor pendiente mayor será la velocidad del flujo, y habrá mayor posibilidad de erosión e inestabilidad de la zona.
- Clima: Donde se produzcan intensas precipitaciones se activará la quebrada y el flujo de escombros será el desenlace. El Colegio de Ingenieros del Perú (1998) asocia el suceso de huaycos con lugares de climas áridas y semiáridas a efecto de una precipitación inusitada.
- Tipo de suelo: Depende del tipo del suelo (presencia de material fino y grueso), la capacidad para soportar el efecto erosivo, la permeabilidad, la cobertura vegetal que serán aportes para el flujo. (pág. 22)

2.18. Alternativas para el control de Debris Flow

Suárez, J. (2004) en su libro Deslizamientos: Técnicas de Remedación, Indica el procedimiento para estabilización y refuerzo a través de:

Pernos. - Los pernos comúnmente varillas de acero (figura 15), son barras de refuerzo colocadas en huecos pre perforados que se cementan formando una dovela de concreto reforzada, inyectando una resina epóxica o lechada de cemento. Se utiliza acero de alta resistencia en diámetro de 1/2" a 1.5".

El objetivo es generar resistencia a la tensión dentro del macizo, impidiendo el deslizamiento de rocas. generalmente no son tensionadas, ya que al ser tensionadas

la roca puede moverse, los pernos también pueden utilizarse para sostener cables, mallas entre otros elementos. (Pág. 339).

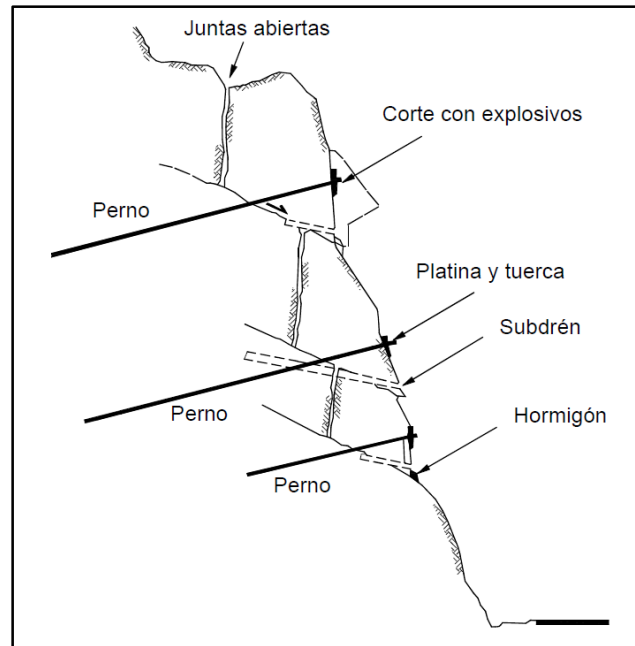


Figura 15. Pernos para sostener grupos de roca.
Fuente: Suárez (2004, Pág. 338)

Mallas ancladas. – Alambre o malla galvanizado anclado con pernos (figura 16), actúan como una membrana alrededor de la masa o bloque inestable, y deben quedar en contacto directo con la superficie del talud. Estas mantas se utilizan para obstaculizar el movimiento de bloques pequeños o masas superficiales delgadas de roca (0.6 a 1.0 metros de diámetro), se utilizan mallas tejidas en cadena o mallas hexagonales torsionales y mallas electrosoldadas. (Pág. 342).



Figura 16. Malla anclada.

Fuente: Google.com

TDM Ingeniería (2016) Barreras Dinámicas contra Flujo de Detritos caso Chosica – Perú como solución integral y reducción a la vulnerabilidad:

El sistema de componentes que tiene la capacidad de retener una cantidad de materiales, originados por efectos dinámicos de flujos de detritos granulares, mixtos o de lodo se le denomina barrera dinámica.

Las barreras dinámicas frente a los flujos de huaycos son sistemas flexibles conformados por anillos circulares que absorben la energía del impacto, la cual es transmitida a los anclajes perimetrales del cauce. (Figuras 17-18-19-20)



Figura 17. Barrera dinámica – Chosica Perú.

Fuente: Estabilidad y contención Barreras dinámicas contra huaycos Chosica.



Figura 18. Barrera dinámica.

Fuente: Universidad Nacional de Ingeniería - Soluciones geotécnicas en estabilidad de taludes de carreteras.

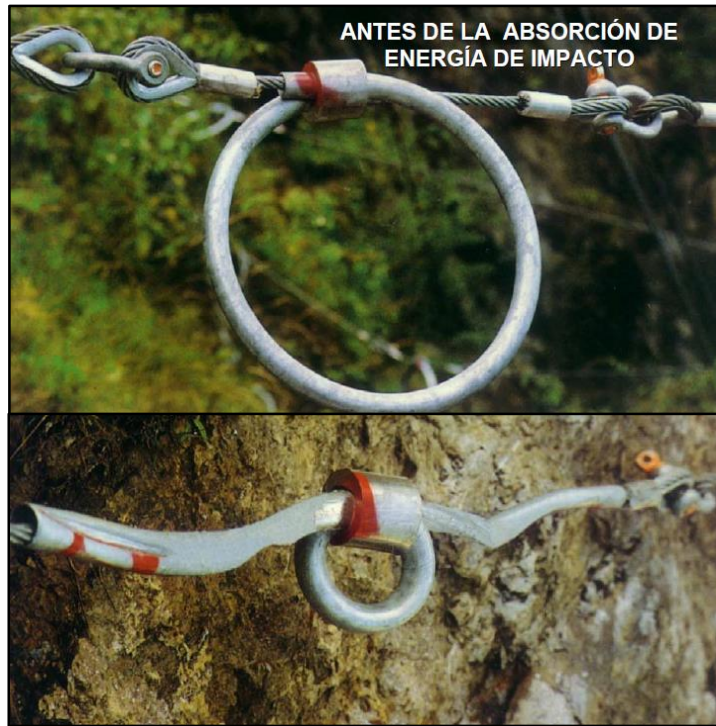


Figura 19. Muestra la tensión del cable, antes y después de un evento de flujo de detritos.

Fuente: Universidad Nacional de Ingeniería – Soluciones geotécnicas en estabilidad de taludes de carreteras.



Figura 20. Retención de rocas a través de una barrera dinámica.

Fuente: Universidad Nacional de Ingeniería – Soluciones geotécnicas en estabilidad de taludes de carreteras.

Garcia, R. (2016) Evalúa la alternativa para la estabilización de la Quebrada la Cantuta II, para la reducción a la vulnerabilidad, a través:

Diques de Piedra o muros de piedra, contienen el agua y en nuestro caso será el encargado de retener la mezcla del agua y escombros (flujo de escombros).

Los diques tienen como función principal disminuir la velocidad del flujo de escombros (huaycos), trabajando como una barrera de protección que retienen las piedras producto de deslizamientos.

Reforestación es la práctica para terrenos con pendientes pronunciadas donde la finalidad es obtener e infiltrar el agua procedente de lluvia uniformemente y tratando de controlar la erosión, apropiado para zonas semiáridas y áridas. Tanto en el Perú como en el mundo.

La reforestación siempre y cuando se realice con plantas nativas de la zona, es la opción más fácil y barata para la defensa contra la erosión en los suelos.

2.19. Reología de flujos de escombros

Escusa, F. (2016) menciona:

La reología es la disciplina que busca aprender y relacionar la conducta de las deformaciones y la fluidez de la materia con los esfuerzos. Se visualiza que definir el estado de esfuerzos \mathbb{T} y relacionarlo con las condiciones de avance del material existente dentro del flujo de detritos es importante para dar un resultado a la mecánica del flujo mismo.

Escoger un modelo reológico adecuado definirá el comportamiento y las velocidades de los flujos de detritos. Se puede acarrear graves errores si no se controlan adecuadamente los parámetros que rigen a la reología del flujo de

escombros y la formulación de la misma. La selección de dicho modelo no es algo simple, debido a que un flujo de escombros no se comportará forzosamente como un fluido newtoniano, a causa de la interacción de las partículas dentro del mismo y a la creación de barro (Iverson, 1997).

El fundamento reológico de todos los modelos existentes, es la interacción entre el esfuerzo cortante del fluido τ y la tasa de deformación por corte du/dz .

Un pequeño esquema de los diferentes modelos reológicos se muestra en la Figura 21.

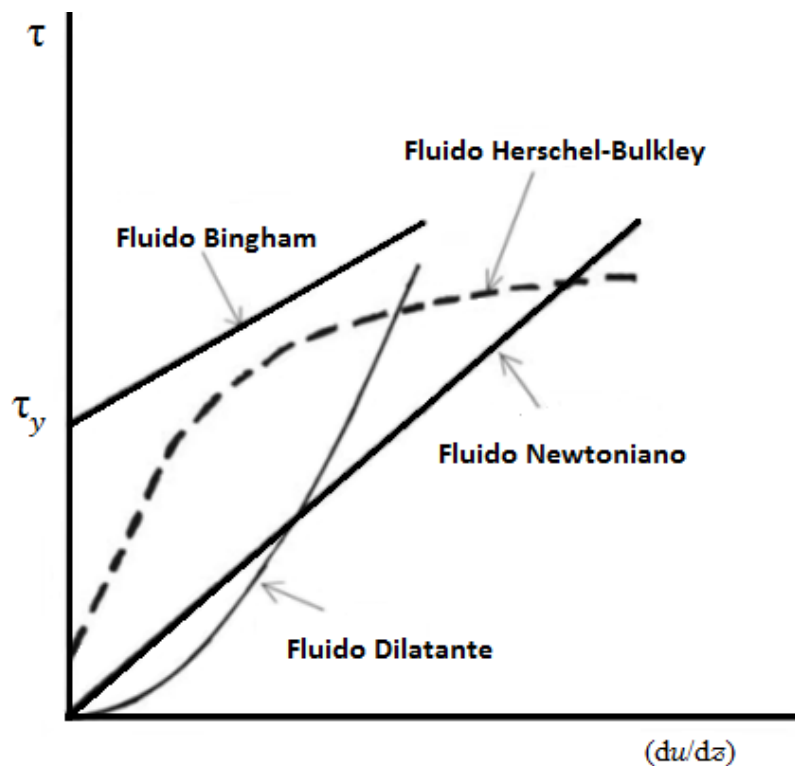


Figura 21. Curvas de coherencia para fluidos no newtonianos.
Fuente: Takahashi (2014, pág.43).

El valor de τ_y es el esfuerzo cortante de fluencia y será aplicado solamente para los fluidos de tipo Bingham y sus provenientes.

Se reconoce en la Figura 21, el comportamiento de cada fluido con relación a su promedio de deformación. Un ejemplo, los fluidos dilatantes oponen mejor resistencia a medida que se deforman. A este evento se le entiende como dilatancia y sucede debido a que a medida que el medio se deforma, las partículas se entrecruzan de tal manera que producen fuerzas de disgregación las cuales incrementan la resistencia del medio (Takahashi, 2007). Caso contrario a los fluidos del tipo pseudoplástico, de forma que, no muestran un ordenamiento de partículas, por el contrario, la dispersión desacomoda el medio permitiendo mayor facilidad a la movilización del conjunto.

Por otra parte, los fluidos de tipo Bingham muestran una explícita resistencia a la deformación comportándose como sólidos, hasta el punto en que consigue el esfuerzo τ_y en el que recién se empieza el movimiento. Y es igual al evento de licuefacción en los suelos, puesto que, con la debida condición de esfuerzos, el conjunto empieza a presentar un comportamiento fluido (Das, 2010).

El problema es que todos los fenómenos referidos previamente, se desenvuelven en un flujo de escombros de forma conjunta o incluso por etapas, pudiendo esta etapa ser considerada en registro audiovisual (Costa & Williams, 1984), donde se observa que en la mayoría de casos, la cresta del flujo de escombros muestra un comportamiento dilatante, dado que el arreglo de las gravas presenta un ordenamiento evidente y fuerzas dispersivas que permiten que éstas se acomoden y fluyan dentro de la misma área. Por otra parte, la zona o área de lodos y la cola, muestran flujos más caóticos, en el cual las fuerzas dispersivas sobre las partículas no producen un arreglo, más bien desacomodan la matriz generando que las partículas pasen a la cresta o se depositen.

De acuerdo al deterioro, la altura y la velocidad, que el flujo de escombros posea se ve perjudicada por la cresta del mismo, muchos autores trabajan enfocando modelos del tipo dilatante o modelos obtenidos de Bingham (Hussain, 2007).

Algunos autores incorporan un régimen íntegramente friccional procedente de las ecuaciones Mohr-Coulomb, partiendo desde el inicio que el nexo constitutivo que existe en un suelo se conserva constante en la medida en que no se desarrolle licuefacción por completo (págs. 33-35).

2.20. Modelo de mecánica de flujo de detritos

Takahashi, T. (2014) menciona que los:

Modelos continuos de una sola fase para el flujo de los escombros, la mezcla de partículas y el líquido se considera como un tipo de fluido continuo que se comporta como flujo de escombros en varias situaciones. Las características del fluido aparente se determinan por la relación entre la tensión de corte operativo y la tasa de deformación que se llama la ley constitutiva o la consistencia. Algunas de estas relaciones se dan en la Figura 21. Las ecuaciones constitutivas de las respectivas curvas son como sigue:

$$\text{Fluido newtoniano} \quad \tau = \mu (du/dz) \quad (17)$$

$$\text{Fluido Bingham} \quad \tau = \tau_y + \eta (du/dz) \quad (18)$$

$$\text{Fluido Herschel – Bulkley} \quad \tau = \tau_y + K1 (du/dz)^n, n \leq 1 \quad (19)$$

$$\text{Fluido dilatante} \quad \tau = K2 (du/dz)^n, n > 1 \quad (20)$$

El fluido newtoniano está representado por el flujo laminar de agua simple en el que el esfuerzo cortante τ es linealmente proporcional a la velocidad de deformación (du / dz) , donde el coeficiente proporcional μ es la viscosidad dinámica. Los otros fluidos en la Figura 21, se agrupan juntos como fluidos no newtonianos. Entre ellos, el fluido de Bingham no se deforma si el esfuerzo cortante operativo es menor que un umbral, pero, si la tensión de funcionamiento es mayor que el umbral se comporta como si se tratara de un fluido newtoniano,

donde la tensión umbral τ_y se llama la tensión de fluencia (fuerza) y el coeficiente proporcional η se llama el módulo de rigidez o la viscosidad del fluido de Bingham. El fluido Herschel-Bulkley aumenta su movilidad con el aumento esfuerzo cortante, y el fluido de Bingham es una partícula cuya potencia n es igual a 1. La arcilla estática saturada de agua forma estructuras de un vacío y cuando tal estructura esquelética es destruida por la operación de la tensión de cizallamiento mayor es la resistencia a la fluencia, las partículas se dispersan dentro de la masa desacoplada entre sí disminuyendo la resistencia al flujo. Este es el caso del fluido Herschel-Bulkley. El fluido dilatante, por el contrario, disminuye su movilidad con el aumento de la tensión de cizallamiento debido a la creciente frecuencia de conseguir más de otras partículas al aumentar la velocidad de cizallamiento.

El flujo de escombros, obviamente, se comporta de manera diferente al flujo de agua simple, por lo que puede ser apropiado considerarlo como el flujo de un fluido no newtoniano. Pero, como diferentes modelos están disponibles, uno debe averiguar lo que existe con relación a la característica entre la tensión de corte operativo y la velocidad de deformación (gradiente de velocidad perpendicular al lecho) en el flujo particular, acerca de los cuales uno está hablando. (págs. 42-43)

Suárez, J. (2004) describe los tipos de modelos de fluido:

a) Fluido Newtoniano (Modelo de Manning)

En algunos países como en China es muy popular el modelamiento matemático de los flujos hiperconcentrados de tierra empleando el criterio de Manning ya que existe una predisposición mundial a modelar los flujos de mezclas de suelo y agua como un flujo Newtoniano, debido particularmente, a la disposición de modelos matemáticos y programas de software.

$$\tau = \eta_c \left(\frac{dV}{dy} \right) \dots \dots \dots (21)$$

Dónde:

η_c = Coeficiente de viscosidad

Mediante el modelo de Manning para flujos con elevado contenido de agua como los flujos hiperconcentrados y flujos de lodos. De características Newtonianas turbulentas y viscosas, el modelo de Manning es el más a fin a la realidad del flujo.

$$q_T = \frac{1}{n} h^{5/3} \text{sen}^{1/2} \theta \dots \dots \dots (22)$$

Donde:

q_T = Caudal unitario

n = Número de rugosidad de Manning

θ = Pendiente del canal

Cuando se incrementan las concentraciones de sólidos, el modelo de Manning no es enteramente válido. Para las concentraciones muy elevadas de sólidos (concentraciones inmediatas o superiores a 1.000 kg/m³), la distribución de velocidades es más constante, el flujo se parece más al modelo de Bingham y si la concentración de sedimentos supera un valor crítico, la distribución de velocidades tiende a ser uniforme (Chien y Wan, 1999).

b) Fluido Bingham

El modelamiento matemático de flujos de escombros se originó empleando: Johnson (1970) modificó su propio modelo de fluido Bingham para tener en cuenta la movilidad mucho más baja de flujo de escombros real que la esperada por los ensayos del reómetro, como el siguiente modelo de Coulomb-viscoso (Takahashi, 2014, pág.46) y se representa con la siguiente ecuación:

$$\tau = C + \sigma_n \tan\phi + \eta_c (dV/dy) \dots \dots \dots (23)$$

En el cual:

τ = Resistencia al cortante en la base del flujo

C = Cohesión.

ϕ = Ángulo de fricción interna

η_c = Coeficiente de viscosidad.

c) Perfil de velocidades Fluido Bingham

El perfil de velocidades se puede asimilar a la de un tapón (“plug”) la Figura 22, indica un movimiento sobre una zona de flujo laminar. En tal sentido, no existe movimiento relativo significativo en la parte superior del flujo y el flujo se desplaza hacia adelante como un solo cuerpo sobre un fluido Bingham.

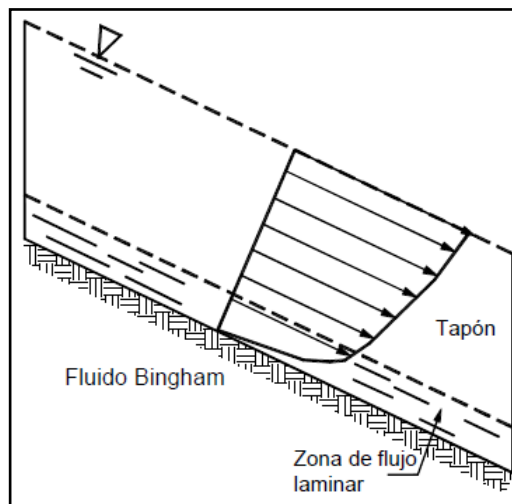


Figura 22. Distribución de velocidades para los diferentes tipos de fluido, aplicado a flujos y avalanchas de tierra.

Fuente: Suárez (2004, Pág.179).

d) Modelo de Fluido Dilatante

Las condiciones de fluido Bingham o de fluido Newtoniano no se cumplen para los flujos de residuos (Debris Flow) y se recurre al modelo de fluido dilatante desarrollado por Takahashi (1991), con fundamento en los trabajos realizados por Bagnold.

$$\tau = \eta_c (dV/dy)^2 \dots \dots \dots (24)$$

Conforme al modelo de fluido dilatante (Takahashi, 1991):

$$q_T = \frac{2}{5} Rh^{5/2} \text{sen}^{1/2} \theta \dots \dots \dots (25)$$

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

Perfil de velocidades Fluido dilatante

Una relación entre la concentración de sedimentos y la constante de Karman, se muestra por el cambio de la distribución de velocidades.

La constante de Karman tiene un valor mínimo de alrededor de 0.27, para una concentración de sedimentos de 300 kg/m³.

El perfil de distribución de velocidades para un flujo de residuos, no viscoso, está dado por la expresión (Takahashi, 1991):

$$\frac{u_s - u}{u_s} = \left(\frac{h - z}{h} \right)^{3/2} \dots \dots \dots (26)$$

Donde:

u = velocidad

u_s = velocidad en la superficie del flujo

h = Altura del flujo

z = Elevación de cada punto con respecto al fondo del canal

La fórmula anterior fue verificada por Takahashi por medio de modelos en el laboratorio.

e) Modelos de Fluido para los Tipos de Flujo

Los conceptos de Takahashi (1991) y de Chien y Wan (1999) para definir los modelos de fluido se pueden observar en la Tabla 4 (Págs. 178-180-181).

Tabla 4
Modelos de fluido de acuerdo con el tipo de flujo.

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

Fuente: Suárez (2001, Pág. 174)

2.21. Caracterización del flujo

Para modelar flujos de escombros, es preciso determinar el tipo de flujo que se va a presentar con fundamento en las propiedades de la mezcla y del cauce.

Para abreviar los criterios generales y para definir el tipo de flujo se presenta la Tabla 5.

De igual manera, como lo propone O'Brian, (2000) (Figura 23), los flujos se pueden clasificar de acuerdo con la concentración de sedimentos y la velocidad.

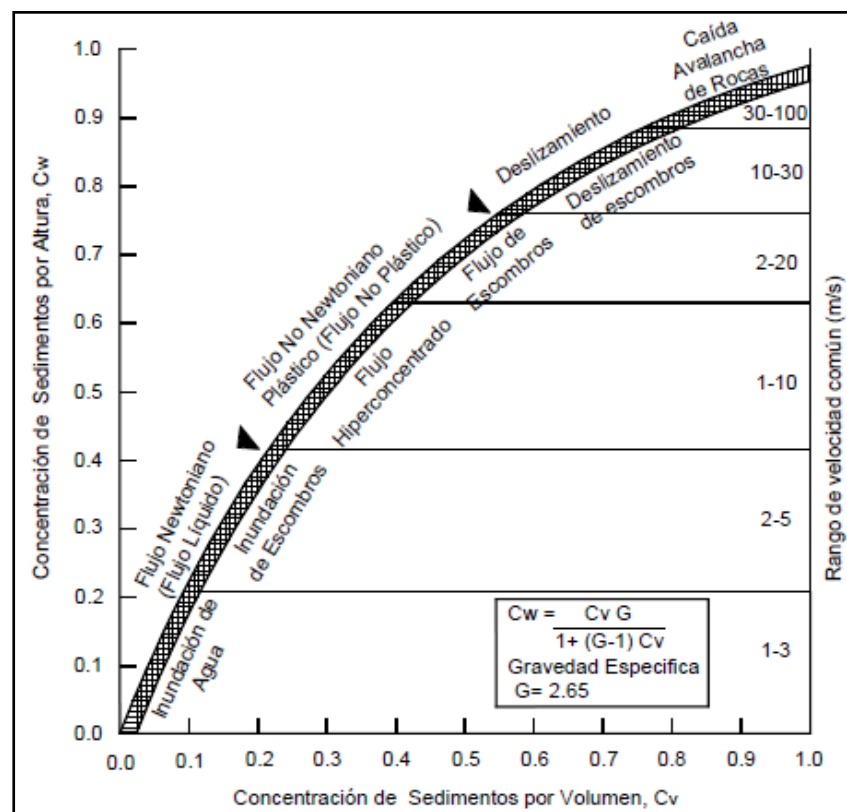


Figura 23. Clasificación de los deslizamientos y flujos de acuerdo con la velocidad y concentración de sedimentos (Modificada de O' Brian, 2000). Fuente: Suárez (pág. 183) - Libro Deslizamientos: Análisis geotécnicos capítulo 05.

Tabla 5

Tipos de flujo de acuerdo a las características de la mezcla y del canal.

Características de los Sedimentos	Concentración de Sedimentos de la Mezcla (Kg/m ³)	Pendiente del Canal					
		>100%(45°	100 a 50%	50 a 20%	20 a 10%	10 a 5%	< 5%
		Tipos de flujo					
Más del 20% del peso total de sedimentos son partículas finas (d<ASTM#200)	<90	Flujo hiperconcentrado			Flujo de lodo		
	>90				Flujo de lodo		
	<300				Flujo hiperconcentrado		
Menos del 20% del peso total de sedimentos son partículas finas (d<ASTM#200)	300 a 600	Flujo turbulento de residuos (Debris Flow)			Flujo hiperconcentrado		
	600 a 900				Flujo turbulento de residuos (Debris Flow)		
	>900				Flujo laminar de residuos		

Fuente: Suárez (2001, pág. 174).

2.21.1. Composición de flujo de lodo y escombros

La composición de los flujos de escombros varía enormemente debido a la dimensión de sus partículas que, cambian desde materiales finos hasta cantos rodados suspendidos en una matriz viscosa. Asimismo, de ser un flujo de múltiples fases de granos desordenados con agua y aire mezclados entre sí. Por consiguiente, entre los principales elementos tenemos: la matriz fina (partículas de arcilla) y los granos gruesos y el agua. (Banda, 2015, pág.13)

- Agua

La densidad del agua (P_w) es equivalente a 1000 Kg/m³ y es el principal encargado del transporte para los flujos de escombros en virtud de su propiedad (como elemento), de contener a las partículas gruesas y finas, así como envolver a todo el material que se presente en su recorrido.

- Partículas de Arcilla

Las rocas originan las partículas de arcilla por la desintegración física o mecánica, seguida por una transformación química. La densidad de estas partículas es equivalente a 2650 Kg/m³. La resistencia de la arcilla seca es alta y cuando se está húmeda es baja. Existen varios tipos de arcilla como: caolinitas, illitas, montomorillonitas, entre otras. La plasticidad del suelo necesita el contenido de arcilla; a mayor cantidad de arcilla, mayor será la plasticidad. Por lo tanto, la presencia de gran cantidad de arcilla define a un tipo de flujo de lodo (Gamion, 2014, pág. 50).

- Granos

El grupo de granos incluye varios tipos de partículas consistiendo de mineral inerte y fragmentos de rocas el cual se diferencia apenas por sus tamaños. Se usa la siguiente clasificación simple: por debajo de los 2 μm, arcilla; de 2 μm a 20 μm, limo; de 20 μm a 200 μm, arena fina; de 0.2mm a 2 mm, arena gruesa; de 2mm a 20mm, gravas; de 2cm a 20cm, guijarros; y por encima de 200 mm, cantos rodados (Figura 24). Estos granos son formados por la desintegración física o mecánica de las rocas, pero conservan la estructura de sus rocas madres. Sus densidades generalmente varían entre los 2650 Kg/m³ y 2750 Kg/m³. (Castillo, 2006, págs. 27-28).

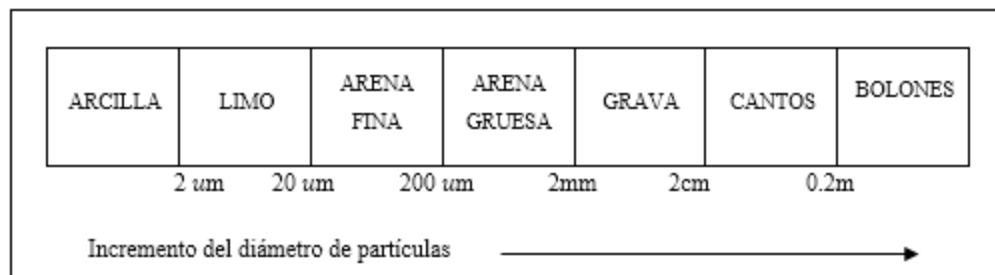


Figura 24. Clasificación del tamaño de los granos

Fuente: International Society of Soil Science)

2.21.2. Propiedades de los flujos de escombros

Gamion, F. (2014) menciona sobre los flujos de escombros:

Involucran masas importantes de suelo o roca, regularmente con un volumen considerable de agua de saturación, son ocasionados a partir de una gran contribución de materiales de uno o varios deslizamientos o flujos combinados, formando una masa de comportamiento hidráulico complejo logrando velocidades muy altas, fenómenos con un gran poder destructivo que afectan áreas relativamente grandes dentro de una cuenca de drenaje.

a) Velocidad

La velocidad del flujo de escombros es debido a la clasificación geométrica del cauce, tamaño, pendiente y sinuosidad en los cuales se ha podido observar variaciones de 0.5 m/s a 20 m/s. (Okuda, 1980) en Japón, en una de sus observaciones la velocidad en el tramo superior estuvo sobre los 10 m/s, pero, en el área del abanico la velocidad fue de 5 m/s.

El debate sobre la velocidad nos conduce directamente hacia la pregunta de turbulencia en el flujo de escombros. Las velocidades grandes tienden a indicar la posibilidad de turbulencia en el flujo.

Ha habido pocas referencias para la turbulencia en flujos de escombros. Bagnold (1954), señala que la presencia de partículas del tamaño de la arcilla tiende a amortiguar los remolinos turbulentos. Esto es adicionalmente enfatizado por Johnson (1970), en el estudio de barros de agua-caolín. En sus observaciones de flujo de escombros en Wrightwood, California, Johnson (1970) sugiere que la superficie agitada visto en muchos flujos de lodo, es el resultado de la "turbulencia al esfuerzo cortante". Más casos indican que la turbulencia se amortigua por la presencia de arcilla

suspendida y sedimento. Johnson sugiere que el agua enlodada solo fluye turbulentamente cuando el curso agitado pasa sobre una caída pequeña o una constricción.

El flujo turbulento fue también observado por Pierson (1981, 1985) en el flujo de escombros en Mt. Thomas, Newzealand y Rudd Canyon, Utah. En Mt. Thomas una vez que la velocidad aumenta de 3 a 5 m/s, el flujo se puso distinguidamente turbulento con ondas estacionarias seguidas tirando barro y piedras al aire. En Rudd Creek, Utah la turbulencia fue aparente en una concentración por peso aproximado a 70%. En este flujo un gran porcentaje de finos y arcilla contenidas estaba presente.

b) Pendiente

Es importante notar que, aunque los flujos de escombros ocurren en pendientes pronunciadas, este flujo tiene la habilidad de fluir en pendientes muy suaves. Algunas pendientes observadas por los autores oscilan de 2% a 32% (Costa, 1984). En Steele Creek, Yukon (Broscoe & Thompson, 1969) la pendiente fue de 13 - 32° y en Wrightwood, California la pendiente fue de 1 a 9° (Sharp & Nobles, 1953). En los flujos de escombros en Mt. Thomas, Newzealand (Pierson, 1981) la pendiente del cauce varió de 5 - 7°.

c) Angulo de deposición

Este proceso puede ocurrir al disminuir la velocidad, por la disminución de la pendiente, presencia de obstáculos que aumenten la resistencia al flujo o aumento del ancho del canal. Lo cual hace que las partículas desaceleran, aumentando el espesor y finalmente sedimentándose. Las partículas de mayor tamaño son las primeras en depositarse, en tanto las partículas finas antes de producirse la sedimentación tratan de recorrer una distancia mayor. Normalmente estos flujos corren a lo largo de cañones angostos y en el

punto en que se encuentra una zona más extensa tratan de detenerse, formándose abanicos de depositación. Estudios en campo señalan que hay cierto ángulo de inclinación límite donde la avalancha del flujo de escombros disipa su capacidad de recorrer a velocidad constante y reduce, comenzando a sedimentar la masa de la mezcla. El ángulo que es significativo para el comienzo de la sedimentación es de 10° . Se recomienda tomar un rango de ángulos de sedimentación entre 10° y 14° para flujos abiertos o no confinados y de 8° a 12° para flujos canalizados o confinados. (págs. 53-54).

La tabla 6, describe las propiedades de los flujos de escombros de cuencas observadas.

Tabla 6
Propiedades de los flujos de escombros.

Ubicación	Velocidad (m/s)	Pendiente (%)	Densidad (gr/cm ³)	Viscosidad dinámica	%arcilla	Profundidad (m)	Sólidos (% en peso)	N° Reynolds
Río Reventado, Costa Rica	2.9 - 10	4.6 - 17.4	1.13 - 1.98	-	1 - 10	8 - 12	20 - 79	-
Hunshui Gully, China	10 - 13	-	2 - 2.3	15 - 20	3.6 (<0.005mm)	3 - 5	80 - 85	40 000
Bullock Creek, Newzealand	2.5 - 5.0	10.5	1.95 - 2.13	2100 - 8 100	4	1.0	77 - 84	28.57
Pine Creek, Mt. St. Helens	10 - 31.1	7 - 32	1.97 - 2.03	200 - 3 200	-	0.13 - 1.5	-	200
Wrightwood Canyon Ca. (1941)	1.2 - 4.4	9 - 31	2.4	2 100 - 6 000	<5	1.2	79 - 85	23.8
Wrightwood Canyon Ca. (1969)	0.6 - 3.8	9 - 31	1.62 - 2.13	100 - 60 000	-	1.0	59 - 86	1.33
Mayflower Gulch, Colorado	2.5	27	2.53	30 000	1.1 (<0.004 mm)	1.5	91	3.2
Dragon Creek, Arizona	7.0	5.9	2.0	27 800	-	5.8	80	29.2
Jian-jia Ravine, China	8.0	0.06	2.3	15.5 - 1 736	-	1.4	89	148-11 561

Fuente: Castillo (2006).

2.21.3. Estimación de los caudales máximos

Para flujo de detritos las metodologías más utilizadas son, de O'Brien (2000) y JICA (Japan International Cooperation Agency), métodos utilizados en los en desarrollo de Takahashi, tal como se expresa:

$$V_s = V_a \left(\frac{C_d}{C^* - C_d} \right) \dots \dots \dots (27)$$

- V_s : Volumen de detritos en m^3 .
- V_a : Volumen de agua en m^3 .
- C_d : Densidad volumétrica de flujo de lodo y piedra.
- C^* : Densidad volumétrica de sedimentos de lecho.

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \dots \dots (28)$$

- ρ : Densidad de fluido de detritos (tn/m^3).
- σ : Densidad de lodo y piedra (tn/m^3).
- ϕ : Ángulo de talud.
- θ : Ángulo de fricción interna.

La forma según Takahashi para estimar el caudal máximo de lodo y piedra, caudal máximo de material fino, en función del caudal líquido es:

$$Q_s = \left(\frac{C^*}{C^* - C_d} \right) Q_p \dots \dots \dots (29)$$

$$Q_f = \left(\frac{\rho - 1}{\rho - \sigma} \right) Q_p \dots \dots \dots (30)$$

$$Q_t = Q_s + Q_f \dots \dots \dots (31)$$

- Q_s : Caudal de lodo y piedra máximo (m³/s).
- Q_p : Caudal líquido máximo (m³/s).
- Q_t : Caudal total máximo del flujo de detritos (m³/s).
- Q_f : Caudal del material fino máximo (m³/s).

La metodología propuesta por O'Brien (2000), donde a partir del hidrograma de flujo de agua multiplicado por un factor (BF) se estima el flujo de detritos. Se deberá tener en consideración los valores para flujo de detritos C_v , los cuales varían entre 0.20 y 0.45, dependiendo del flujo.

$$Q_t = BF \times Q_l \dots \dots \dots (32)$$

$$BF = \frac{1}{1 - C_v} \dots \dots \dots (33)$$

- Q_l : Caudal líquido (m³/s).
- Q_t : Caudal total de flujo de detritos (m³/s).
- C_v : Concentración volumétrica de detritos.
- BF: Factor (Bulking factor).

2.22. Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos son una representación física o matemática simplificada de la realidad compleja de forma que resulte conveniente para los propósitos de la modelación. Cierta tipo de modelos, los matemáticos, representan el sistema real por medio de un conjunto de expresiones matemáticas, manipulable que mejoran la visión que de esta se tiene. (Gamion, 2014, pág. 59).

Debido a que en muchas circunstancias es difícil aplicar experimentos en campo que respondan a las exigencias prácticas de la investigación sobre sistemas hidráulicos, se plantea una extensa gama de formas de trabajo que relajan las estrictas condiciones que debe llevar a cabo un experimento.

Una de estas formas es el estudio por medio de modelos. (Mociño, 2015, pág. 21)

2.23. Tipos de modelos hidrológicos

Para Gamion, F. (2014) Existen:

Dos tipos de modelos elementales: los matemáticos y los físicos. Los modelos matemáticos se dividen en determinísticos y estadísticos.

Ver Figura 25.

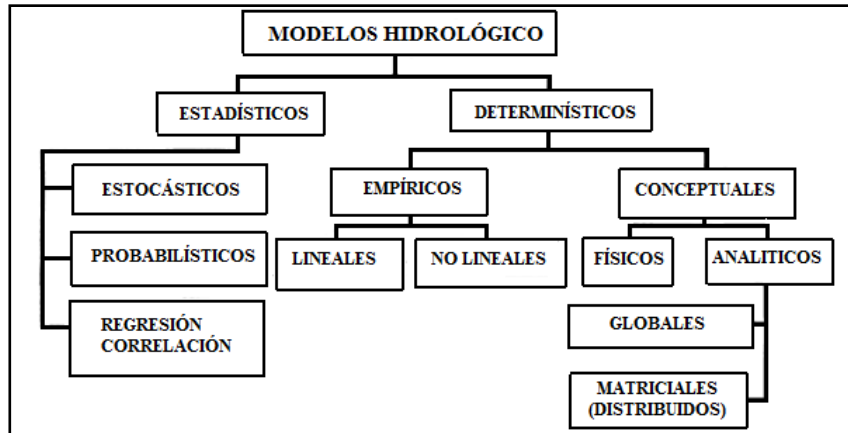


Figura 25. Tipos de modelos matemáticos en hidrología.
Fuente: KHALIDOU (2011)

a) Modelos determinísticos.

Hidrología determinística o paramétrica: En este modelo el hidrólogo determinista examina cada fenómeno regida por leyes físicas o analíticas e inalterables, considerando relaciones precisas de causa a efecto sin tener en cuenta el escenario aleatorio del fenómeno o sus componentes.

b) Modelos estadísticos.

Hidrología estadística: Dentro de los modelos estadísticos se encuentran los modelos probabilísticos y estocásticos.

Los modelos probabilísticos, estudian los fenómenos hidrológicos bajo un enfoque probabilístico y están en función al periodo de retomo y riesgo de falla.

Los modelos estocásticos o de series temporales carecen de bases físicas y expresan en términos de probabilidad el resultado de procesos altamente aleatorios (págs. 59-60).

2.24. Modelos hidráulicos

Según La Universidad del Cauca - CRC- INGEOMINAS, (2005), El estudio de la modelación numérica está desarrollándose aceleradamente, existiendo cuantiosos programas para modelar las condiciones morfológicas e hidráulicas en ríos. Los programas para modelación pueden catalogarse dependiendo de las dimensiones a usadas y de qué se va a calcular, dichos programas varían en el grado de fiabilidad y sofisticación, lo que hace que muchos de ellos sean para aplicaciones muy específicas.

2.24.1. Tipos de modelos hidráulicos

Gamion, F. (2014) clasifica a los modelos hidráulicos dependiendo:

De la variación del caudal y del traslado de sedimentos en función del tiempo. En el caso de la hidráulica fluvial existen varios tipos de modelos matemáticos y se clasifican en:

a) Modelos de lecho fijo o agua clara

Los modelos de lecho fijo proponen un cauce de sección transversal establecida. Por lo cual se solicitan información topográfica, hidráulica, sedimentológica y de calibración. En este tipo de modelos el sedimento se utiliza para evaluar las condiciones de rugosidad del cauce, mas no para calcular el arrastre.

b) Modelos de lecho móvil

Los modelos de lecho móvil empiezan una modelación anticipada de las características hidráulicas. Una vez calibrado el comportamiento hidráulico se inicia a incluir los datos complementarios que afectan a los sedimentos: zonas erosionable y no erosionable, profundidad de la zona erosionable,

granulometrías. Los modelos de lecho móvil, arrojan información importante una vez calibrados para el análisis del comportamiento hidráulico-morfológico de la corriente y su cauce.

c) Modelos de régimen no-permanente

Los modelos de régimen no permanente solicitan características, hidráulicas, topográficas, condiciones de caudal en función del tiempo y sedimentología de calibración. A lo expresado, se añade la complejidad de sus ecuaciones que se interpretan en problemas adicionales de convergencia y estabilidad numérica. Por cual, se debe realizar como primero paso un procedimiento de calibración en condiciones de régimen permanente y finalizando con un análisis de sensibilidad del modelo para los parámetros que se consideren inciertos.

d) Modelos matemáticos fluviales o de flujo libre

Este tipo de modelos son los que se aplican en la modelación de ríos y canales abiertos, con las herramientas informáticas existentes, la simulación o modelación del comportamiento hidráulico y morfológico de cauces aluviales es un recurso de fácil utilización que proporciona buenos resultados para el análisis de complejos problemas que se presentan en el área de la ingeniera fluvial. (págs. 60-62)

La tabla 7, figuran algunos modelos reconocidos de 1D, 2D y 3D dimensiones.

Tabla 7
Modelos reconocidos de 1D, 2D y 3D.

Modelos Unidimensionales	Modelos Bidimensionales	Modelos Tridimensionales
HEC 2	FLATMODEL	SSIIM – CFD
HEC - RAS	RIVER 2D	FLO 3D
RIVERCAD ISIS	FLO 2D	DELFT 3D
WSPRO	TITAN 2D	CH3D – SED
HEC – 6	FLDWAY	TRISULA
SEDIMOD	G – STARS	
FLUVIAL – 11	HYDRO 2 DE	
DBF – 1D	RAM – 2	
NWS - FLDWAV	DELFT 2D	

Fuente: Universidad del Cauca- CRC-INGEOMINAS, (2005).

2.25. Descripción del modelo hidráulico FLO-2D

Eder *et al.* (2017) Describe el modelo hidráulico FLO-2D como:

El desplazamiento de un fluido tan complejo como el que produce las avalanchas torrenciales no puede ser interpretado por medio de los métodos que se utilizan usualmente para fluidos como el agua. Esto debido a la enorme concentración de materia sólida en las avalanchas torrenciales, que hace que estos fluidos actúen como fluidos no-newtonianos, en los que es fundamental que ejerza un esfuerzo mayor a un esfuerzo crítico dado, para que el fluido se ponga en movimiento.

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D (O'Brien) simula flujo de fluidos no-newtonianos, como avalanchas torrenciales, en conos de descarga. El modelo acepta simular flujo en relieves complejos, como planicies de inundación y áreas pobladas, de la misma manera el intercambio de fluido entre la planicie de inundación y canales. Puede modelarse flujo hiperconcentrado de sedimentos, flujo de agua, avalanchas torrenciales (flujo de barro) y flujo de barro.

El programa Flo-2D necesita la topografía digital del terreno y valores estimados de rugosidad (“n”), la geometría del canal, concentración de sedimentos (Hidrograma líquido), propiedades reológicas de la mezcla agua-sedimento y precipitación (pág. 76).

2.25.1. Ecuaciones básicas

El modelo FLO 2D, según estudios de O'Brien and Julien (1985) utiliza las siguientes ecuaciones:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV_x}{\partial x} + \frac{\partial hV_y}{\partial y} = i \dots \dots \dots (34)$$

Ecuación de movimiento:

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \dots \dots (35)$$

$$S_{fy} = S_{0y} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \dots \dots (36)$$

Dónde: h es la profundidad del flujo, Vx y Vy son los elementos de la velocidad media, t es el tiempo, g la aceleración de la gravedad, S_f es la inclinación de fricción; S_o la inclinación del lecho e i es potencia de la precipitación.

2.25.2. Solución numérica

Gamion, F. (2014) describe la solución numérica:

El método diferencial de las fórmulas de continuidad y de momentum en el modelo FLO-2D es resuelto por medio de un esquema central de diferencias finitas. del mismo modo, el modelo dispone para el cálculo de la velocidad la ecuación de onda dinámica o la ecuación de onda difusiva.

En métodos matemáticos para solucionar ecuaciones diferenciales parciales, los cálculos se desarrollan en una malla localizada en plano x - t. La malla x - t es una red de puntos definida al coger incrementos de distancia de longitud Δx e incrementos de tiempo de duración Δt . Los esquemas numéricos transforman las ecuaciones diferenciales parciales en un conjunto de ecuaciones algebraicas de diferencias finitas.

El FLO-2D emplea un esquema explícito, que consta de un esquema simple que solicita valores pequeños de Δx y Δt para la convergencia del procedimiento numérico, para el resultado del método de diferencias finitas.

Para el equilibrio numérico de los cálculos, un requisito necesario mas no suficiente para el equilibrio de un esquema explícito es la condición de Courant-Friedrich-Lewy (CFL). El paso de tiempo Δt es limitado por:

$$\Delta t = C \frac{\Delta x}{(v + c)} \dots \dots \dots (37)$$

Donde:

C: es el número de Courant ($0.3 < C < 1.0$)

Δx : es el ancho del elemento de la malla cuadrada.

v: es la velocidad promedio de la sección transversal calculada.

c: es la celeridad de la onda calculada.

Para el movimiento de la onda dinámica, otro principio de equilibrio numérica aplicado en el modelo es el de Ponce y Theurer (1982). Este principio está en función de la descarga, la pendiente del lecho y el tamaño del elemento de grilla. El paso de tiempo es limitado por:

$$\Delta t = \frac{\zeta S_o \Delta x^2}{q_o} \dots \dots \dots (38)$$

Donde, S_o es la pendiente del lecho, q_o es la descarga unitaria y ζ es un coeficiente empírico (Ponce y Theurer, 1982).

Los pasos de tiempo Δt usualmente cambian de 0.1 segundo a 60 segundos. El modelo empieza con un paso de tiempo mínimo y lo incrementa hasta que uno de los principios de equilibrio numérico sea superado, por lo tanto, el paso de tiempo es disminuido. Si los principios de equilibrio siguen siendo superados, entonces el paso de tiempo es disminuido hasta que el paso de tiempo mínimo sea alcanzado. Los pasos de tiempo son una función de la descarga del flujo para un elemento de grilla y de su tamaño. (págs. 63-64)

2.25.3. Algoritmo del FLO - 2D

Banda, M. (2015) describe el algoritmo del Flo 2D:

El modelo usa un esquema centrado de diferencias finitas definido para la respuesta de las ecuaciones diferenciales de desplazamiento. El relieve del área se discretiza en una malla compuesta por celdas o componente cuadrados de tamaño constante para toda la zona en estudio y a cada componente se le designa una ubicación en la malla, un factor de rugosidad de Manning “n”, una elevación de

terreno y coeficientes de reducción del flujo que cruza la celda para simular bloqueo por edificaciones.

El método computacional para flujos en superficie implica el cálculo de la descarga por medio de cada contorno en las 8 posibles orientaciones del flujo y comienza con una evaluación lineal del tirante del flujo en cada contorno del componente de malla. La evaluación del tirante del flujo en el contorno es la media de las alturas del flujo en los componentes de las 2 mallas, que direccionará los caudales en una de las 8 orientaciones.

Para una celda y un tiempo dado, se mide el caudal neto que ingresa y sale por cada uno de los lados de dicho elemento. El cambio en el volumen resultante se reparte uniformemente en el área disponible del elemento. Los pasos de tiempo varían según el criterio de estabilidad de Courant, lo que resulta en pasos de tiempo relativamente cortos, (típicamente entre 0,1 y 30 segundos). Esto depende de los hidrogramas de entrada y del tamaño de la malla de cálculo.

Los siguientes pasos son la solución del algoritmo:

- a) Se calcula la media de la pendiente entre dos elementos de la malla, rugosidad y la geometría de flujo.
- b) Se estima el tirante del flujo “d” para establecer la velocidad por medio del contorno de la malla para el próximo nivel de tiempo (i+1) a partir del nivel de tiempo anterior i utilizando una interpolación lineal (la media del tirante del flujo entre dos elementos de malla).
- c) El primer cálculo de la velocidad se estima empleando la ecuación de onda difusiva. La única variable desconocida en la ecuación de onda difusiva es la velocidad. Este es para la ocurrencia de flujo sobre el río, terreno y calles.

- d) La velocidad calculada por la onda difusiva para el presente nivel de tiempo se emplea como información inicial en la solución de Newton-Raphson para definir la velocidad bajo la ecuación de la onda dinámica completa. Es esencial detallar que para flujos de sedimentos hiperconcentrados, tales como flujos de escombros (huaycos) y flujos de lodo, el cálculo de la velocidad incorpora los términos de esfuerzo de cedencia (τ) y de viscosidad adicional.
- e) La descarga Q por medio del contorno es estimada multiplicando el área de la sección transversal del flujo por la velocidad. Para flujos en relación al terreno, el ancho del flujo es ajustado por factores de reducción de ancho.
- f) Se suman para cada nivel de tiempo la descarga incremental por medio de los 8 contornos, y el cambio en el volumen es repartido sobre la zona de depósito disponible adentro de la malla o componente de canal para determinar un aumento incremental en el tirante del flujo.
- g) El principio de equilibrio numérico es chequeado para el nuevo tirante del flujo del componente de la malla. Si no se cumple el principio de equilibrio, el tiempo de simulación se reinicia en el nivel de tiempo anterior y se disminuye el intervalo de tiempo, se eliminan los cálculos de los niveles de tiempo anteriores y el cálculo de la velocidad se reinicia nuevamente.
- h) La simulación continúa incrementándose el nivel de tiempo hasta que el principio de equilibrio sea superado. (págs. 51-54)

La figura 26 indica el diagrama de flujo del modelo FLO 2D.

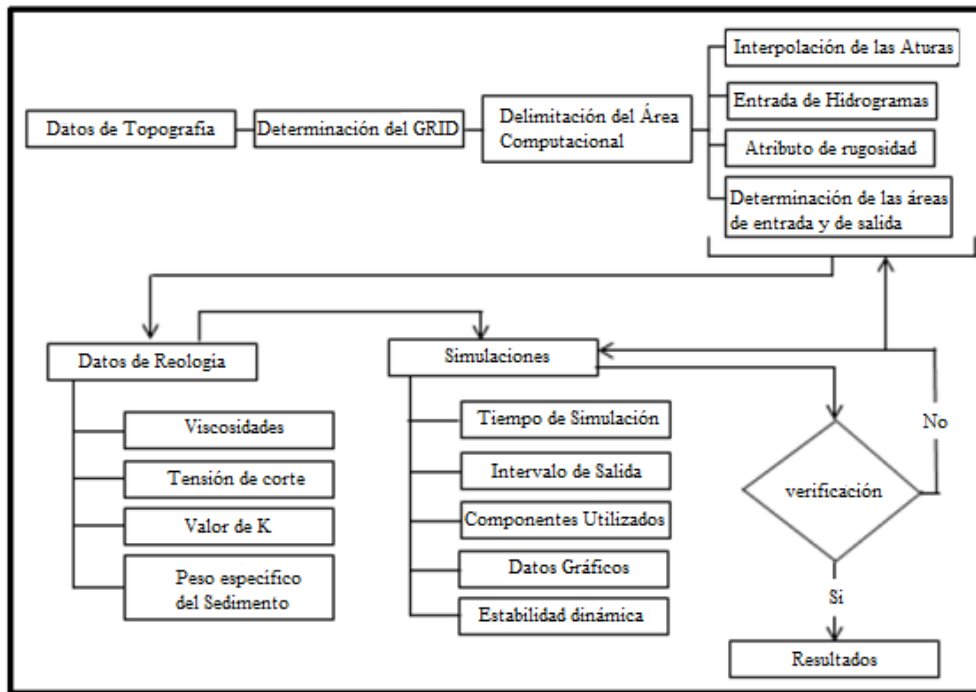


Figura 26. Diagrama de flujo del modelo FLO 2D.
Fuente: Manual USER FLO-2D

2.26. Medición de los parámetros reológicos

La viscosidad (η) y el esfuerzo de cedencia (τ_y) de mezclas agua y sedimentos, son parámetros reológicos necesarios para la aplicación de los modelos de cálculo de los flujos con altas concentraciones de sedimentos.

O'Brien y Julien (1988) realizaron un análisis de laboratorio de muestras recolectadas de depósitos naturales de flujos de lodo en Colorado Rocky Mountain cerca de las ciudades de Aspen y Glenwood Springs (ver tabla 8).

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 c_v} \dots \dots \dots (39)$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 c_v} \dots \dots \dots (40)$$

α_1 y α_2 : coeficientes empíricos (ver tabla 9)

Tabla 8

Propiedades de las matrices de flujos de lodo (sólo limo y arcilla).

Sample	Distribución del tamaño de sedimento				Límite líquido	Índice plástico
	Arcilla %	D16 (mm)	D50(mm)	D84 (mm)		
Glenwood original	4,8	0,010	0,034	0,062	-	-
Glenwood sample 1	6,8	0,009	0,023	0,050	-	-
Glenwood sample 2	3,0	0,016	0,035	0,061	-	-
Glenwood sample 3	4,8	0,011	0,025	0,053	-	-
Glenwood sample 4	7,6	0,001	0,018	0,032	-	-
Aspen Pit 1	31,3	0,001	0,011	0,032	0,32	0,11
Aspen natural soil	27,0	0,001	0,012	0,028	0,25	0,06
Aspen mine fill	27,8	0,001	0,013	0,030	0,24	0,06
Aspen natural soil source	31,6	0,001	0,016	0,039	-	-
Aspen mine fill source	25,2	0,001	0,018	0,061	-	-

Fuente: O'Brien y Julien (1988)

Tabla 9

Esfuerzo de cedencia y viscosidad en función de Cv

Fuente	$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 c_v}$		$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 c_v}$	
	α	β	α	β
Correlaciones de mediciones en Campo				
Aspen Pit 1	0,181	25,7	0,0360	22,1
Aspen Pit 2	2,72	10,4	0,0538	14,5
Aspen Natural Soil	0,152	18,7	0,00136	28,4
Aspen Mine Fill	0,0473	21,1	0,128	12,0
Aspen Watershed	0,0383	19,6	0,000495	27,1
Aspen Mine Source Area	0,291	14,3	0,000201	33,1
Glenwood 1	0,0345	20,1	0,00283	23,0
Glenwood 2	0,0765	16,9	0,0648	6,20
Glenwood 3	0,000707	29,8	0,00632	19,9
Glenwood 4	0,00172	29,5	0,000602	33,1
Correlaciones disponibles de la literatura				
lida (1938)	-	-	0,0000373	36,6
Dai et al. (1980)	2,60	17,48	0,00750	14,39
Kang and Zhan (1980)	1,75	7,82	0,0405	8,29
Qian et al. (1980)	0,00136	21,2	-	-
	0,050	15,48	-	-
Chien and Ma (1958)	0,0588	19, 1-32,7	-	-
Fei (1981)	0,166	25,6	-	-
	0,00470	22,2	-	-

Fuente: O'Brien y Julien (1988)

2.27. Concentración volumétrica de sedimentos C_v

Para cada evento de flujo de escombros, se debe estimar un valor de C_v en el tiempo partiendo de valores cercano a 0.2 y aumentando progresivamente de 0.35 a 0.45, dependiendo del tipo de sedimento encontrado en la cuenca. Valores cercanos a 0.45 se utilizan si la cuenca produce flujo de lodos y escombros. La ubicación del pico de C_v es minutos antes del pico del hidrograma líquido.

Una clasificación propuesta por O'Brien en su manual de FLO-2D se observa en la Tabla 10.

Tabla 10
Comportamiento del flujo de lodo como una función de Cv.

Descripción del Tipo de flujo	Concentración de sedimentos		Características del Flujo
	En Volumen	En Peso	
Deslizamientos	0.65 – 0.80	0.83 – 0.91	No hay flujo; falla por deslizamiento de bloques.
	0.55 – 0.65	0.76 – 0.83	Derrumbe de bloques con deformación interna durante el deslizamiento, movimiento paulatino del terreno antes de fallar.
Flujos de lodo (Mudflow)	0.48 – 0.55	0.72 – 0.76	Flujo evidente; deslizamiento lento sostenido por el flujo de lodo; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no se expande en la superficie.
	0.45 – 0.48	0.69 – 0.72	Flujo se extiende sobre la superficie; flujo cohesivo; algo de mezcla.
Avenida de lodo (Mud Flood)	0.40 – 0.45	0.65 – 0.69	El flujo se mezcla fácilmente; muestra las propiedades fluidas en la deformación; distribuido en la superficie horizontal, pero mantiene una superficie fluida inclinada; partículas grandes se depositan (peñones); aparecen ondas, pero se disipan rápidamente.
	0.35 – 0.40	0.59 – 0.65	Deposición marcada de gravas y cantos rodados; se expande casi completamente sobre la superficie horizontal; aparece la superficie líquida con dos fases del fluido; las olas viajan en la superficie.
Inundación de agua	0.30 – 0.35	0.54 – 0.59	Separación del agua en la superficie; las olas viajan fácilmente; la mayoría de las arenas y gravas se han sedimentado y se mueven como arrastre de fondo.
	0.20 – 0.30	0.41 – 0.54	Se distinguen claramente las olas y ondas; todas las partículas descansando en el fondo en condición inmóvil.
	< 0.20	< 0.41	Inundación de agua con carga suspendida convencional y arrastre de fondo.

Fuente: O'Brien (2000). Manual FLO – 2D.

El modelo FLO – 2D conserva la continuidad para el agua y sedimento, en cada grilla, el transcurso de tiempo, el volumen de agua y sedimento y los cambios que correspondan a la concentración de sedimentos serán calculados. La simulación completa reporta la cantidad de agua y sedimento (flujo de salida y flujo almacenado).

Algunas fórmulas que ayudan a relacionar los flujos de lodo y escombros, se describen a continuación:

$$C_v = \frac{\text{Volumen del sedimento}}{\text{Volumen del agua+volumen del sedimento}} \dots \dots \dots (41)$$

C_v descrito como concentración de sedimentos por peso.

$$C_v = \frac{c_w \gamma}{\gamma_s c_w (\gamma_s - \gamma)} \dots \dots \dots (42)$$

Donde: γ es el peso específico del agua.

γ_s es el peso específico del sedimento.

El peso específico de la mezcla de flujo de lodo γ_m es una función de la concentración de sedimentos por volumen.

$$\gamma_m = \gamma + C_v (\gamma_s - \gamma) \dots \dots \dots (43)$$

La densidad de la mezcla del flujo de lodo ρ_m esta dado por:

$$\rho_m = \rho + C_v (\rho_s - \rho) \dots \dots \dots (44)$$

$$\rho_m = \frac{\gamma_m}{g} \dots \dots \dots (45)$$

2.28. Formulación de hipótesis

2.28.1. Hipótesis general

El modelamiento y simulación permitirá controlar el flujo de escombros de la Quebrada Llocllamayo - Puno

2.28.2. Hipótesis específica

- a) La simulación de escenarios numéricos para los periodos de retorno t_r : 100, 500 y 1000 presentan la ocurrencia de un evento extraordinario.
- b) El planteamiento de medidas permitirá el control de flujo de escombros.

2.29. Variables

Definición conceptual de las variables de la hipótesis general

Variables de la hipótesis general

- Variable Independiente: Quebrada
Paso estrecho entre las montañas que forman el río.
- Variable Dependiente: Flujo de escombros
La combinación de agua y sólido producto por las descargas de precipitaciones y deslizamiento de material suelto de las laderas.

Definición conceptual de las variables de la hipótesis específica

Variables de las hipótesis específicas.

Hipótesis específica 1

- Variable Independiente: Tiempo de retorno.
Ocurrencia estadística de un evento en un determinado tiempo.
- Variable Dependiente: Evento determinado
Probabilidad de derrumbes de las laderas del material inestable.

Hipótesis específica 2

- Variable Independiente: Planteamiento de medidas
Propuestas de solución para el control de flujo de escombros.
- Variable Dependiente: Control de Flujo
Se refiere a las alternativas de solución para mejorar el caudal total.

CAPÍTULO III: DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y método de la investigación

El trabajo de investigación es de tipo aplicada, mediante la elaboración de un modelo numérico computacional se propone entender y visualizar el comportamiento del transporte de flujo para el control de escombros.

El método es analítico y deductivo considerando que se realizará un modelamiento y simulación.

3.2. Diseño de investigación

El diseño empleado en la investigación es cuasi experimental, con lo cual se desarrollará la propuesta para el control de flujo de escombros en forma cuasi experimental.

3.3. Población y muestra

3.4. Población

La población de estudio de la investigación se limita a la Quebrada Llocllamayo con un área de 0.31 km², ubicado en la región de Puno que afecta al Corredor Vial Interoceánico Sur Tramo IV en la progresiva del km 295+350.

3.5. Muestra

La muestra está delimitada por el deslizamiento de material suelto de las laderas en la quebrada de Llocllamayo en la región de Puno, afectando a los vehículos que transitan por el Corredor Vial interoceánico Sur Tramo IV.

3.6. Técnicas de recolección de datos

La metodología del estudio para la recopilación de datos de la investigación se desarrollará con la búsqueda de información bibliográfica, trabajo en campo, terminando con el procesamiento de datos.

Se utilizarán los métodos analítico y deductivo:

Para la elaboración del modelo digital de elevaciones, se ubico geográficamente la quebrada Llocllamayo a través de la imagen satelital Google Earth Pro y la imagen satelital CONIDA (Space Agency of Peru), con resolución de 0.7 m sobre la quebrada Llocllamayo de la zona 19S.

Para la geología se utilizarán las herramientas que ofrece el portal del Sistema de información geológico y catastral minero (GEOCATMIN).

Los parámetros hidrológicos de la quebrada Llocllamayo se referencian a los registros de la estación San Gaban, estación meteorológica ubicada a 5 km de distancia, perteneciente al pueblo de San Gaban y más próxima al lugar en estudio, procesados en tiempos de retorno con ayuda de la herramienta HEC-RAS.

Los parámetros geotécnicos se especifican siguiendo la norma ASTM.

3.7. Tipos de técnicas e instrumentación

Las imágenes satelitales (Google Earth Pro y CONIDA, son las encargadas del modelo digital de elevaciones y se utilizara para describir el relieve superficial de la Quebrada Llocllamayo.

Las estadísticas de SENAMHI estación San Gaban y el modelo HEC-RAS, son los encargados de procesar y dar resultado al análisis hidrológico.

Mediante la observación de los planos del IGN y INGEMMET Cuadrángulo 27-V (Masuco) e información de INDECI, se obtendrá la geología de la Quebrada Llocllamayo.

El reconocimiento de parámetros geotécnicos del suelo, se realizará a través de ensayos de laboratorio, teniendo conocimiento de las características de la zona en estudio.

Se utilizará el instrumento software FLO-2D el cual determinará los eventos extraordinarios en un tiempo definido para plantear medidas de control.

3.7.1. Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos

Las herramientas utilizadas para el desarrollo de la presente investigación, han sido seleccionados de fuentes de internet, libros de autores nacionales e internacionales, tesis de pre grado, tesis de maestrías y artículos científico nacionales como internacionales. Descritos en la bibliografía de la presente tesis.

3.7.2. Técnica para el procesamiento y análisis de datos

Con apoyo de la herramienta computacional FLO – 2D, modelaremos la quebrada Llocllamayo y simularemos el flujo para periodos de retorno de 100, 500 y 1000 años, analizaremos los resultados para el planteamiento de medidas de mitigación

Las técnicas definidas para el procedimiento y análisis de la información se detallan a continuación:

Oficce 2019 (Excel, Word), Autocad Civil 3D, modelo HEC-RAS, Global mapper versión 19, Modelo digital de elevaciones Qgis, Google earth pro, Programa Flo-2D.

CAPÍTULO IV: ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Metodología de trabajo

4.1.1. Etapa de preparación

La visita a campo de la zona en estudio, se realizará con la finalidad de observar y evaluar las condiciones naturales que dan lugar a las descargas de flujo de escombros, así como la observación in situ de las condiciones del uso del suelo, la geomorfología y parámetros hidráulicos que representen riesgo potencial a soluciones para el control del flujo.

4.1.2. Etapa de campo

El reconocimiento en campo fue orientado por la imagen satelital CONIDA (Space Agency of Peru), con resolución de 0.7 m sobre la quebrada Llocllamayo de la zona 19S.

El reconocimiento de la micro cuenca de la quebrada Llocllamayo permitió evaluar marcas reflejada por eventos de flujo de escombros, que adicionalmente sirven de patrón para la calibración del modelo FLO - 2D en la estimación del volumen representativo de escombros depositados por el flujo de detritos en el cono de deyección.

El análisis de la prueba de mecánica de suelos tales como: la granulometría y contenido de humedad, serán tomado de los datos entregados por el Proyecto: Estudio del corredor vial interoceánico sur, tramo IV: Azángaro – puente Inambari, que realizo estudios en la Quebrada Llocllamayo. Realizada por la empresa Rumi Ingenieros Geotécnicos S.A.C. con lo cual se podrá definir parámetros reológicos de la zona.

4.1.3. Etapa de gabinete

La quebrada Llocllamayo comprende una longitud de cauce de 1.31 km. Desde la cabecera hacia el cono de deyección y desembocadura del río San Gabán.

La topografía empleada en la zona de estudio data del IGN y INGEMMET Cuadrángulo 27 - V Masuco, imagen satelital CONIDA (Space Agency of Peru) resolución a 0.70 m de la zona 19S, sobre la quebrada Llocllamayo, e imagen satelital Google Earth Pro, utilizados para los parámetros geomorfológicos donde se obtuvo la longitud, perfil longitudinal y delimitación de la cuenca, apoyados mediante el programa QGIS Software de libre.

El programa HEC-HMS se empleó para la estimación del hidrograma líquido, utilizando la metodología del Soil Conservation Service (SCS), para una tormenta de 24 horas de duración, con un hietograma sintético, para cada tiempo de retorno.

La literatura del libro Hidrología Aplicada Autor: Ven Te Chow, ayudo a estimar el valor de la curva número (CN) de escorrentía en un rango aproximado por las características de uso del suelo en análisis.

La estimación de los caudales máximos para flujo de detritos, se utilizó la metodología de JICA (Japan International Cooperation Agency), metodología basada en los en desarrollo de Takahashi y la metodología propuesta por O'Brien (2000), donde se estima el flujo de detritos a partir del hidrograma de flujo de agua multiplicado por un factor (BF).

En la etapa final de calibración se compara el volumen de escombros (Debris) del modelo matemático y el estimado en campo, haciendo comparaciones de los tirantes y variando la concentración de sedimentos.

4.2. Ubicación topográfica y límites

El área de interés, geográficamente se sitúa en la vertiente de la cordillera oriental del sur del Perú, políticamente en la provincia de Carabaya en el distrito de San Gabán; hidrológicamente, dentro del sistema de drenaje de la cuenca del río Inambari, contribuyente de la hoya del Atlántico, que junto al río Tampopata son afluentes del río Madre de Dios.

Particularmente el área de interés se emplaza en el rasgo morfológico perteneciente a la parte baja de la superficie del río San Gabán entre los niveles 500 y 600 msnm, en el piso sub tropical que muestra el verdor típico de la ceja de la selva.

Desde sus orígenes el río San Gabán desciende de la cordillera Carabaya y forma un valle sinuoso en U con aportes ramificados hasta su confluencia en el río Inambari. Esta caracterizado por laderas empinadas, desfiladeros y montañas agrestes. A esto se suma la geología con rocas graníticas fracturadas, bloques apilados, formando lo que geólogos denominan “caos graníticos”, corrientes de agua en régimen continuo y flujo intermitentes en forma de laderas, escombreras y torrenteras que transportan suspensiones de agua y solido con diferentes densidades.

La Quebrada Llocllamayo se localiza en Lanlacuni Bajo con coordenadas UTM: 351487.50 E, 8515283.40 N, sobre los 600 msnm. Provincia de Carabaya en el distrito de San Gabán, hidrográficamente, dentro del sistema de drenaje de la cuenca del río Inambari. Departamento de Puno.

La provincia de Carabaya limita con (Figura 27):

- Norte con el departamento de Madre de Dios.
- Sur con las provincias de Melgar; Azángaro y San Antonio de Putina.
- Este con la provincia de Sandía.
- Oeste con el departamento del Cusco.

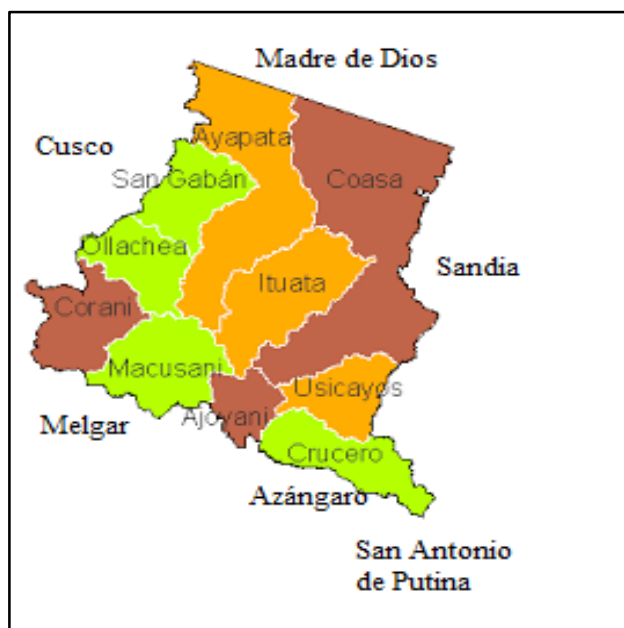


Figura 27. Mapa de la provincia de Carabaya y sus límites.

Fuente Google.com

4.3. Geología y geodinámica

El análisis de datos geológicos, corresponde al mapa geológico del cuadrángulo Masuco, hoja 27-V, Carta Geológica del Perú del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

Palacios *et al.* (1996) Boletín N° 81 serie A: Carta Geológica Nacional, Cuadrángulo Masuco.

a) Estratigrafía

Las unidades paleozoicas corresponden a rocas del Ordovícico, Silúrico y Devónico de origen marino, conformando el basamento que aflora con gran espesor en la Cordillera Oriental y Faja Sub andina. (pág. 27)

b) Geología regional

La geología regional está conformada por Eratema – Paleozoico y depósitos cuaternarios, sistema ordovícico, formación san José. (Figura 28)

▪ Formación San José

Formación inferior del grupo Carabaya, asignado a una edad ordoviciana, se extiende paralelo al rumbo de la cordillera oriental.

Esta formación está constituida en la parte inferior de limolitas calcáreas gris oscuras azulinas, en estratos delgados, con alteraciones amarillentas, conteniendo abundante fauna tal como trilobites, graptolites y gasterópodos, contiene pizarras con esquistosidad, hacia la parte superior continúan lutitas gris verdosas nodulosas, intercaladas con areniscas cuarzosas que intemperizan a un color pardo amarillento; lutitas calcáreas astillosas y limolitas cuarzosas en capas delgadas, seguidas de areniscas blanquecinas cuarzosas que pasa a la formación Sandia. (Págs. 33-34)

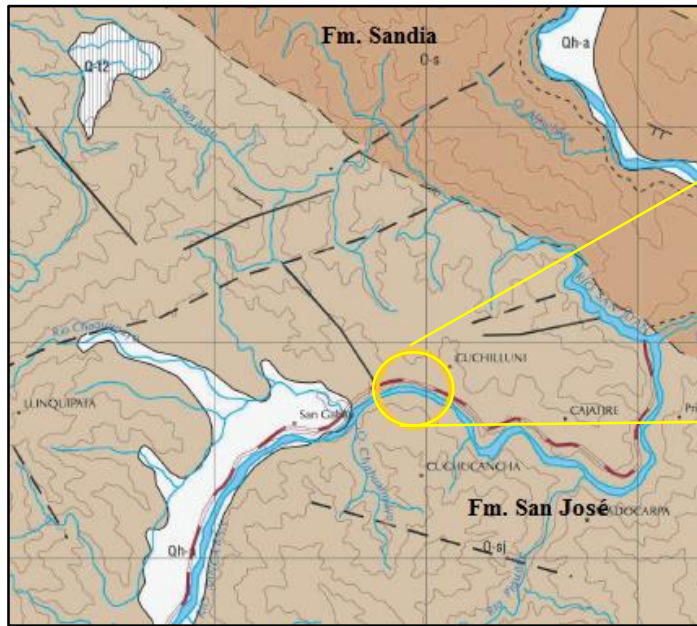
Edad y Correlación

Teniendo en cuenta el contenido faunístico se puede asignarle una edad llanvirniana, es decir que corresponde al nivel medio del Ordovícico. (Pág. 34)

▪ Cuaternario

Conglomerado Masuco conformado por matriz arenosa de color gris, contiene cantos sub redondeados a redondeados, acumulados en el fondo de los valles como en las partes altas (pág. 58).

La edad del conglomerado Masuco es coétanea, se postula para estos depósitos una edad pleistocénica, es decir, que corresponden a movimientos de avalanchas luego del levantamiento de la región cordillerana a fines del Plioceno.



ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	ROCAS INTRUSIVAS
CENOZOICA	CUATERNARIO	HOLOCENA	Qh-a Depósito aluvial	
		PLEISTOCENA	Qh-t4 Terraza 4	
	Qh-t3 Terraza 3			
	NEÓGENO	PLIOCENA	Qh-t2 Terraza 2	
Qh-t1 Terraza 1			Qp-md Formación Madre de Dios	
PALEÓGENO			NQ-i Formación Ipururo	
MESOZOICA	CRETACEO	SUPERIOR	P-h3 Huayabamba 3	Gr Granitoides
		INFERIOR	P-h2 Huayabamba 2	
PALEOZOICO	DEVÓNICO SILURÍCO		P-h1 Huayabamba 1	Paleozoico indiferenciado
	ORDOVÍCICO			
			Ks-v Formación Vivian	
			Ks-ch Formación Chonta	
			Ki-o Grupo Oriente	
			SD-a Formación Ananea	
			S-sg Formación San Gabán	
			O-s Formación Sandia	
			O-sj Formación San José	
				Pz-i

Figura 28. Mapa geológico Zona 27-V.

Fuente: Carta geológica del Perú – INGEMMET

c) Geología local

▪ Escarpes de derrumbe

Se trata de escarpes que delimitan la parte superior de los derrumbes, tienen un borde recto que delimita un cambio ordenado de la pendiente de la ladera y muestran generalmente una forma de arco que representa el límite de la zona de donde se originó el movimiento del depósito deslizado.

▪ Erosión Superficial

Es el desprendimiento, transporte y depósito de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por la acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua. El impacto de las gotas de lluvia contribuye al desprendimiento de las partículas o granos, lo cual produce sedimentación de materiales en el pie del talud. Los procesos de erosión son muy comunes en los suelos residuales poco cementados o en suelos aluviales, especialmente, en aquellos compuestos por limos y arenas finas donde la cobertura vegetal ha sido removida.

▪ Cobertura Vegetal

Cumple efectos protectores importantes, en la mayoría de los taludes protege contra la erosión y la infiltración del agua. Las condiciones hidrológicas de un talud son afectadas directamente por la vegetación, la cual cumple un efecto de estabilización por el refuerzo del suelo (raíces) y por la producción de materia orgánica, la cual ayuda a compactar las partículas del suelo.

Los coluviones son reforzados por el sistema de raíces que se generan y la pérdida de esta resistencia debido a la deforestación produce deslizamientos. Los sistemas de plantas incrementan la estabilidad de taludes de grandes pendientes. De tal forma se agrupan las partículas, en forma que se puedan mover en forma integrada (masa). En ocasiones las raíces de la vegetación anclan el coluvión a la roca subyacente, especialmente en coluviones de poco espesor.

La protección vegetal al ser eliminada deja expuesto el terreno a impacto de las gotas de lluvia, produciendo erosión laminar, seguida por formación de surcos, que tienden a convertirse en cárcavas. La situación se agrava aún más cuando se remueve la parte superficial del terreno o descapote, ya que éste funciona como una segunda capa de protección natural contra la erosión y la infiltración de agua.

4.4. Características hidrográficas e hidráulicas

4.4.1. Generalidades

Se conoce como riesgo geológico a la interacción entre los procesos y materiales litosféricos con los sistemas antrópicos, que conducen elevado costo sociales y económicos.

Por lo tanto, el entendimiento de la dinámica de la globalidad de la litosfera del sector desde la cabecera al cruce de la quebrada con la vía y su conocimiento cobra esencial relevancia a la hora de elaborar una estrategia de mitigación de los riesgos geológicos que, por su origen se clasifican en geodinámicas externas y geodinámicas internas.

Como todo análisis de riesgo considera las perspectivas de Peligrosidad, Exposición y Vulnerabilidad. Las estadísticas de las incidencias de los fenómenos naturales en este sector, da evidencia que los movimientos de las laderas constituyen el primer riesgo natural frente a otras como las inundaciones y terremotos.

4.4.2. Clima y biodiversidad

El clima en el área geográfica presenta muchos contrastes debido a la existencia de diferentes franjas climatológicas relacionadas con los cambios altitudinales y la variada configuración morfológica del terreno. En forma general, el clima está caracterizado por la alternancia de una estación seca (abril a agosto), con otra de precipitaciones pluviales incipientes (setiembre a diciembre), y tres meses con mucha lluvia (enero a marzo). Sin embargo, en las zonas bajas cerca de la franja de amortiguamiento del Parque Nacional

Bahuaque Sonene, la precipitación es abundante y se distribuye regularmente a lo largo del año.

El piso del valle bajo el río San Gabán ubicado entre 400 y 800 msnm, presenta un clima húmedo con un promedio de precipitación total anual entre 4812 y 9102.5 msnm y una biotemperatura media anual entre 15°C y 24°C. la vegetación se caracteriza por estar compuesta de bosque, arbusto de mediana altura, trepadoras, también hay epifitas y otras.

Entre los 800 y 1000 msnm, el clima es semi cálido y húmedo con un promedio de precipitación anual de 1800 y 3600 mm y una bio temperatura media anual entre 12°C y 21°C. La vegetación natural comprende gran cantidad de especies en semi bosques, arbóreas, arbustivas, bromeliáceas y plantaciones de cítricos.

Entre los 1000 y 1500 msnm, el clima varía de húmedo a sub húmedo y templado frío, con un promedio de precipitación total entre 12000 y 3500 mm y una biotemperatura media anual entre 10 °C y 20 °C. la vegetación natural es variable, entre 1000 y 1200 msnm está conformada por arbustos, epifitas, trepadoras y otros. Entre los 1200 y 1500 msnm el escenario vegetal está constituido por arbustos, gramíneas y otras hierbas gramíneas.

4.4.3. Parámetros geomorfológicos

La información de los parámetros geomorfológicos es muy importante con fines de caracterizar la fisiografía de la cuenca drenante, el índice de compacidad 1.27 indica que la cuenca de la Quebrada Llocllamayo tiende a ser de forma circular, lo cual implica que tiene mayores posibilidades de producirse avenidas debido a su simetría. El resumen de estos parámetros se encuentra en la tabla 11.

Tabla 11

Resumen de parámetros geomorfológicos de la Micro cuenca Llocllamayo

Micro cuenca	Área	Perímetro
Hidrografía	(Km ²)	(Km)
Llocllamayo	0.31	2.54
Parámetros Geomorfológicos		
Gravelius (Kc)	1.08	
L(Km)	1.13	
Cota máxima	980	
Cota Mínima	562	
Pendiente	38%	

Fuente: Elaboración propia (2019)

4.5. Mecanismo de desestabilización/rotura del movimiento de ladera en la quebrada Llocllamayo

La iniciación, desestabilización de una ladera siempre es controversial, a menudo es una decisión que pasa por diferentes criterios, entre los más aceptados están los atribuidos a tracción, flexión, pandeo y corte; en caso de la Quebrada Llocllamayo, de acuerdo a los rasgos observados en campo, puede asumirse que la iniciación del mecanismo del movimiento de la ladera es por corte.

La saturación, la infiltración y el ascenso del nivel freático, suma factores de efecto consecuencia en la desestabilización de la microcuenca.

4.6. Hidrología

Se obtuvieron los datos de precipitación de la estación San Gabán, estación correspondiente a la zona en estudio. Del periodo 1997 al 2017, recogidos del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos - snirh.ana.gob.pe, página proporcionada por SENAMHI. (ver anexo 5 de Hidrología).

4.6.1. Precipitaciones máximas 24 horas (P24)

La tabla 12 muestra las precipitaciones máximas para 24 horas por año, los datos son analizados para 21 valores.

Tabla 12
Precipitación máxima 24 horas - Estación san Gaban (mm)

AÑO	P24	Log(P24)
1997	135.1	2.1307
1998	195.0	2.2900
1999	365.7	2.5631
2000	221.0	2.3444
2001	224.6	2.3514
2002	278.9	2.4454
2003	112.6	2.0515
2004	112.9	2.0527
2005	234.0	2.3692
2006	150.4	2.1772
2007	683.4	2.8347
2008	428.2	2.6316
2009	207.9	2.3179
2010	126.9	2.1035
2011	187.6	2.2732
2012	268.0	2.4281
2013	124.0	2.0934
2014	160.3	2.2049
2015	246.3	2.3915
2016	118.2	2.0726
2017	150.4	2.1772

Fuente: SENAMHI.

4.6.2. Análisis de Bondad - Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov – Smirnov

Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov – Smirnov, fue aplicado a las distribuciones, Normal, Log normal, Pearson III, Log Pearson III y Gumbel, (Tabla 13 y Tabla 14). Presentando la mejor distribución la del Log Pearson III, por encontrar el menor “D” crítico. Para el análisis de las distribuciones se utilizó el programa Hidroesta 2, software que permite cálculos de parámetros estadísticos, autor: Máximo Villón Béjar. (ver anexo 5 de Hidrología).

Tabla 13

Análisis estadístico: prueba de la bondad del ajuste - grafica de probabilidades

N	NORMAL		GUMBEL		LOG NORMAL		PEARSON III		LOG PEARSON III	
	K _t	Esperado	K _t	Esperado	K _t	Esperado	K _t	Esperado	K _t	Esperado
1	1.6906	451.8	1.9420	485.5	1.6906	444.4	2.0771	503.6	1.9292	497.5
2	1.3352	404.2	1.3827	410.5	1.3352	375.6	1.3484	405.9	1.4092	389.0
3	1.0968	372.2	1.0470	365.6	1.0968	335.5	0.9340	350.4	1.0863	333.8
4	0.9085	347.0	0.8022	332.8	0.9085	306.9	0.6458	311.8	0.8455	297.9
5	0.7479	325.5	0.6068	306.6	0.7479	284.4	0.4258	282.3	0.6497	271.5
6	0.6046	306.3	0.4421	284.5	0.6046	265.8	0.2484	258.6	0.4825	250.8
7	0.4728	288.6	0.2983	265.3	0.4728	249.7	0.1003	238.7	0.3346	233.9
8	0.3488	272.0	0.1691	248.0	0.3488	235.5	-0.0266	221.7	0.2005	219.5
9	0.2299	256.1	0.0507	232.1	0.2299	222.6	-0.1373	206.9	0.0767	207.0
10	0.1142	240.6	-0.0597	217.3	0.1142	210.7	-0.2353	193.8	-0.0397	195.9
11	0.0000	225.3	-0.1643	203.3	0.0000	199.6	-0.3231	182.0	-0.1505	185.9
12	-0.1142	210.0	-0.2647	189.8	-0.1142	189.1	-0.4023	171.4	-0.2574	176.7
13	-0.2299	194.5	-0.3625	176.7	-0.2299	179.0	-0.4744	161.8	-0.3617	168.2
14	-0.3488	178.6	-0.4590	163.8	-0.3488	169.2	-0.5403	152.9	-0.4649	160.2
15	-0.4728	162.0	-0.5557	150.9	-0.4728	159.6	-0.6008	144.8	-0.5683	152.5
16	-0.6046	144.3	-0.6542	137.7	-0.6046	149.9	-0.6564	137.4	-0.6734	145.1
17	-0.7479	125.1	-0.7566	124.0	-0.7479	140.1	-0.7075	130.5	-0.7823	137.8
18	-0.9085	103.6	-0.8659	109.3	-0.9085	129.9	-0.7543	124.3	-0.8980	130.5
19	-1.0968	78.4	-0.9875	93.0	-1.0968	118.8	-0.7964	118.6	-1.0252	122.9
20	-1.3352	46.4	-1.1320	73.7	-1.3352	106.1	-0.8331	113.7	-1.1735	114.5
21	-1.6906	-1.2	-1.3299	47.1	-1.6906	89.7	-0.8611	109.9	-1.3698	104.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14

Análisis estadístico: prueba de la bondad de ajuste Kolmogorov – Smirnov.

m	x _m	F ₀ (x _m)	F(x _m) Normal	F ₀ (x _m)-F(x _m) Normal	F(y _m) Pearson III	F ₀ (y _m)-F(y _m) Pearson III	F(y _m) Log Pearson III	F ₀ (y _m)-F(y _m) Log Pearson III	F(x _m) GEV I	F ₀ (x _m)-F(x _m) GEV I
1	683.40	0.954545	0.99968629	0.04514	0.9865	0.0319	0.9825	0.0279	0.993	0.0385
2	428.20	0.909091	0.93505313	0.02596	0.9204	0.0113	0.9299	0.0208	0.9227	0.0136
3	365.70	0.863636	0.85267767	0.01096	0.8757	0.0121	0.892	0.0284	0.8638	0.0002
4	278.90	0.818182	0.65544537	0.16274	0.7663	0.0519	0.786	0.0322	0.7145	0.1036
5	268.00	0.772727	0.62502322	0.14770	0.7466	0.0262	0.765	0.0077	0.6886	0.0841
6	246.30	0.727273	0.56226722	0.16501	0.7018	0.0255	0.7154	0.0119	0.6318	0.0955
7	234.00	0.681818	0.52587558	0.15594	0.6727	0.0091	0.6818	0	0.5965	0.0853
8	224.60	0.636364	0.49790128	0.13846	0.6483	0.0119	0.653	0.0167	0.5682	0.0682
9	221.00	0.590909	0.48718295	0.10373	0.6384	0.0475	0.6413	0.0504	0.5571	0.0338
10	207.90	0.545455	0.44831539	0.09714	0.5998	0.0543	0.5945	0.049	0.5152	0.0303
11	195.00	0.500000	0.41051853	0.08948	0.5571	0.0571	0.5419	0.0419	0.4722	0.0278
12	187.60	0.454545	0.38918303	0.06536	0.5302	0.0757	0.5086	0.0541	0.4468	0.0077
13	160.30	0.409091	0.31375621	0.09533	0.4124	0.0033	0.3655	0.0435	0.3513	0.0578
14	150.40	0.363636	0.28803646	0.07560	0.3604	0.0033	0.3065	0.0571	0.3166	0.047
15	150.40	0.318182	0.28803646	0.03015	0.3604	0.0422	0.3065	0.0116	0.3166	0.0016
16	135.10	0.272727	0.25036624	0.02236	0.2663	0.0064	0.2114	0.0613	0.2641	0.0087
17	126.90	0.227273	0.23130772	0.00403	0.2064	0.0209	0.161	0.0663	0.2368	0.0096
18	124.00	0.181818	0.2247664	0.04295	0.183	0.0012	0.1437	0.0381	0.2274	0.0456
19	118.20	0.136364	0.2120036	0.07564	0.1313	0.005	0.1106	0.0258	0.209	0.0726
20	112.90	0.090909	0.20072045	0.10981	0.0752	0.0157	0.0828	0.0081	0.1926	0.1017
21	112.60	0.045455	0.20009275	0.15464	0.0716	0.0262	0.0813	0.0358	0.1917	0.1463
X	225.30									
S	133.97									
CS	2.287									
n	21									
α	0.05									
Δcrítico	0.28843									
			Δmáx	0.16501		0.07570		0.06630		0.14630
			Acritico > Amáx							
			Mejor Ajuste	Si se ajusta		Si se ajusta		Si se ajusta		Si se ajusta
				5		2		1		4

Fuente: Elaboración Propia

4.6.3. Precipitación máxima 24h

Obtenido el mejor ajuste (prueba de bondad - Log Pearson III), realizamos el ajuste de las precipitaciones para cada periodo de retorno (Tabla 15).

Tabla 15
Precipitación (mm). para diferentes periodos de retorno.

Tr (años)	P _{MAX} mm
2	185.9
3	228.8
5	286.5
10	375.5
20	481.4
25	519.8
50	655.1
100	818.6
200	1016.5
300	1151.2
500	1343.9
1000	1653.1

Fuente: Elaboración propia

4.6.4. Curva IDF

Obtenido las precipitaciones máximas para cada periodo de retorno y de acuerdo a lo explicado en el apartado 2.10 de la presente investigación, elaboramos la curva de intensidad de duración de frecuencia para cada periodo de retorno del estudio (Figura 29).

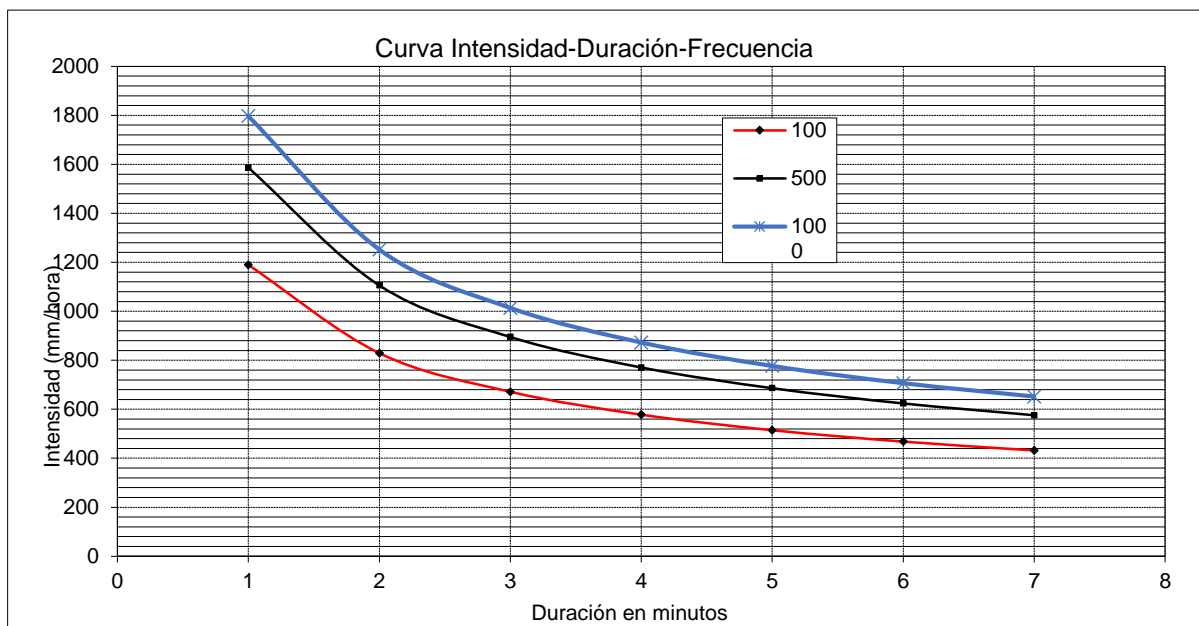


Figura 29. Curva Intensidad Duración Frecuencia
Fuente: Elaboración propia

4.6.5. Determinación del Caudal

Según el apartado 2.15.1 Método racional, se selecciona el coeficiente de escorrentía respecto a las características de la superficie, el cual corresponde a áreas no desarrolladas con pendientes superiores a 7%. Ver tabla 16.

Tabla 16
Coeficiente de escorrentía C.

CARACTERISTICAS DE LA SUPERFICIE	PERÍODOS DE RETORNO (AÑOS)						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas no desarrolladas							
Áreas de cultivo							
Plano 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.4	0.43	0.47	0.57
Promedio 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastizales							
Plano 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Bosques							
Plano 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Fuente: Hidrología Aplicada – Ven Te Chow.

Los coeficientes de escorrentía para nuestras condiciones comprenden desde 0.39 al 0.61, para el caso de 1000 años se hace una interpolación de datos.

4.6.6. Tiempo de concentración

Apartado 2.11 tiempo de concentración, utilizamos la fórmula de California Culverts Practice (1942).

Utilizando la ecuación número 15, se halla el tiempo de concentración.

$$tc = 0.0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} = 6.415 \text{ min}$$

Donde:

L = longitud del curso de agua más largo, m.

H = diferencia desnivel entre la divisoria de aguas y la salida.

Resultando un valor de 6.415 minutos.

4.6.7. Tiempo de retardo

Cálculo del tiempo de retardo para la zona de la quebrada Llocllamayo.

$$tr = 0.6tc = 3.85 \text{ min}$$

4.6.8. Coeficiente de rugosidad de Manning

El cálculo del coeficiente de rugosidad en la zona que comprende la quebrada Llocllamayo, será determinado por el Estudio del corredor vial interoceánico sur, Tramo IV – Puente Inambari y la clasificación propuesta por O'Brien en su manual de FLO-2D (Tabla 17).

Tabla 17
Coeficiente de Manning.

Tiempo de retorno (años)	Coeficiente de Rugosidad de Manning	Concentración de sedimentos (C%)
100	0.065	25 – 43
500	0.055	35 – 45
1000	0.050	35 – 55

Fuente: Rumi Ingenieros Geotécnicos S.A.C

4.6.9. Hidrograma de avenidas líquido

El apartado 2.13.1 Método SCS para abstracciones, describe la metodología utilizada del Soil Conservation Service (SCS). El modelo hidrológico HEC – HMS es utilizado para estimar el hidrograma de avenida, para tormentas de 24 horas, el cálculo del hidrograma se emplea con una Numero de curva de 85, previamente calculada de las tablas 1 y 2.

Cálculo del hidrograma líquido para CN=85.

4.6.9.1. Tiempo de retorno 100 años

La figura 30 indica el resultado de la descarga máxima estimada para 100 años.

Project: tr100 Simulation Run: Run 1

Start of Run: 15ene2019, 08:00 Basin Model: Cuenca
 End of Run: 15ene2019, 09:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 23sep2019, 18:07:07 Control Specifications: Control 1

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
Lludlamayo	0.31	23.1	15ene2019, 08:14	58.57
Salida	0.31	23.1	15ene2019, 08:14	58.57

Figura 30. Resumen global Tr: 100 años.

Fuente: Elaboración propia

La figura 31 indica el resumen de resultados para la micro cuenca Llocllamayo.

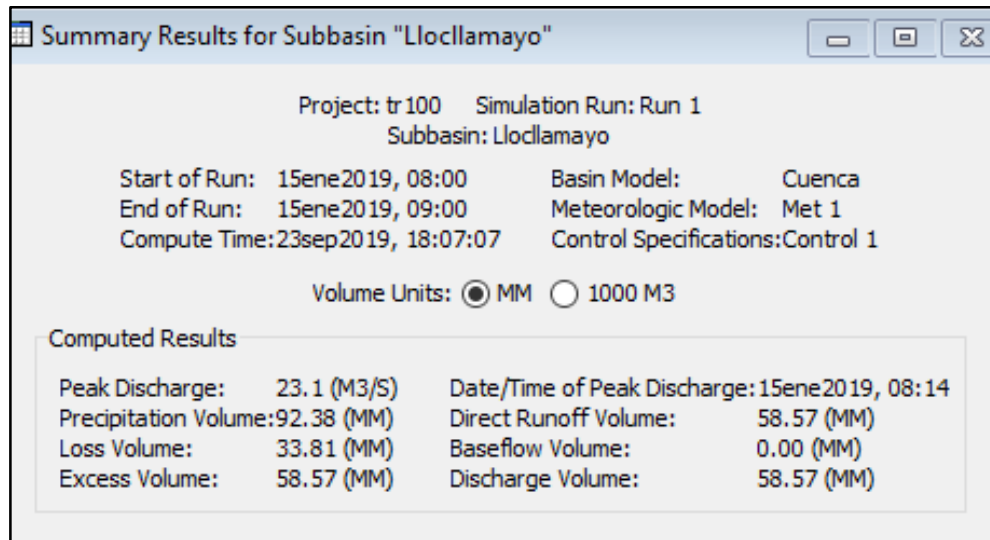


Figura 31. Resumen Tr: 100 años.
Fuente: Elaboración propia

La figura 32 grafica el hidrograma para la micro cuenca Llocllamayo.

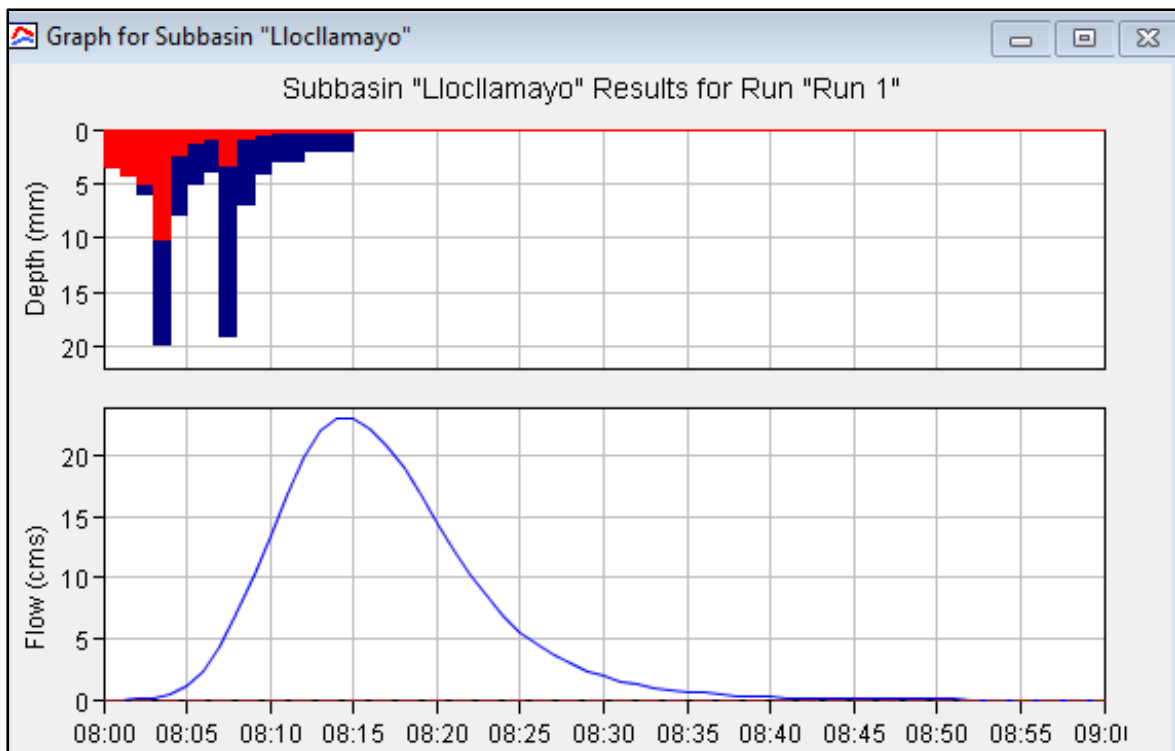


Figura 32. Hidrograma Tr: 100 años.
Fuente: Elaboración propia

4.6.9.2. Tiempo de retorno 500 años

La figura 33 indica el resultado de la descarga máxima estimada para 500 años.

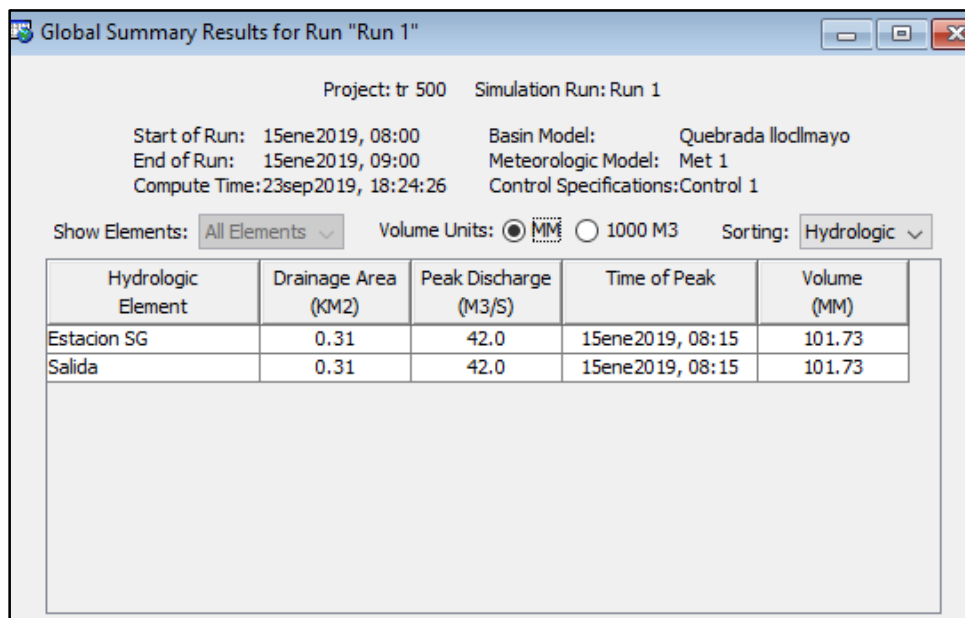


Figura 33. Resumen global Tr: 500 años.
 Fuente: Elaboración propia

La figura 34 indica el resumen de resultados para la micro cuenca Llocllamayo.

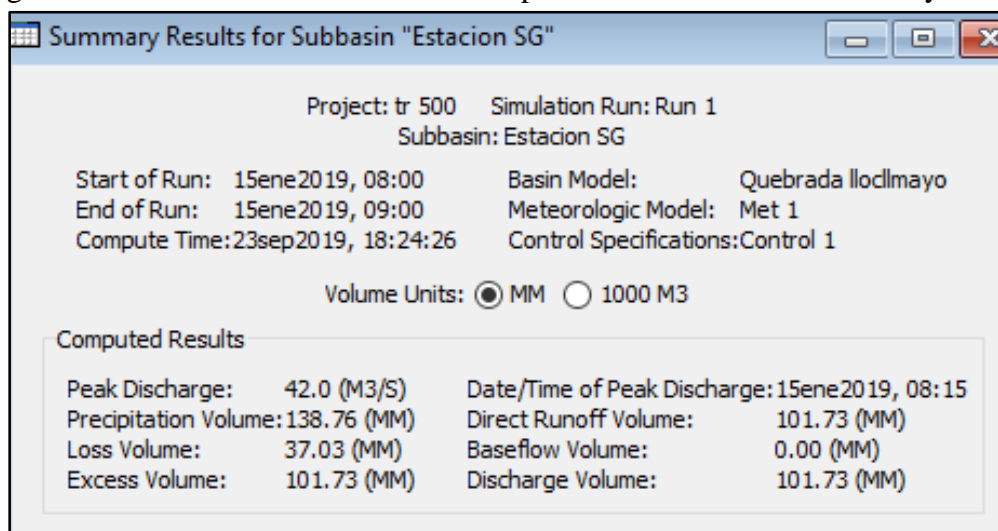


Figura 34. Resumen Tr: 500 años.
 Fuente: Elaboración propia

La figura 35 grafica el hidrograma para la micro cuenca Llocllamayo.

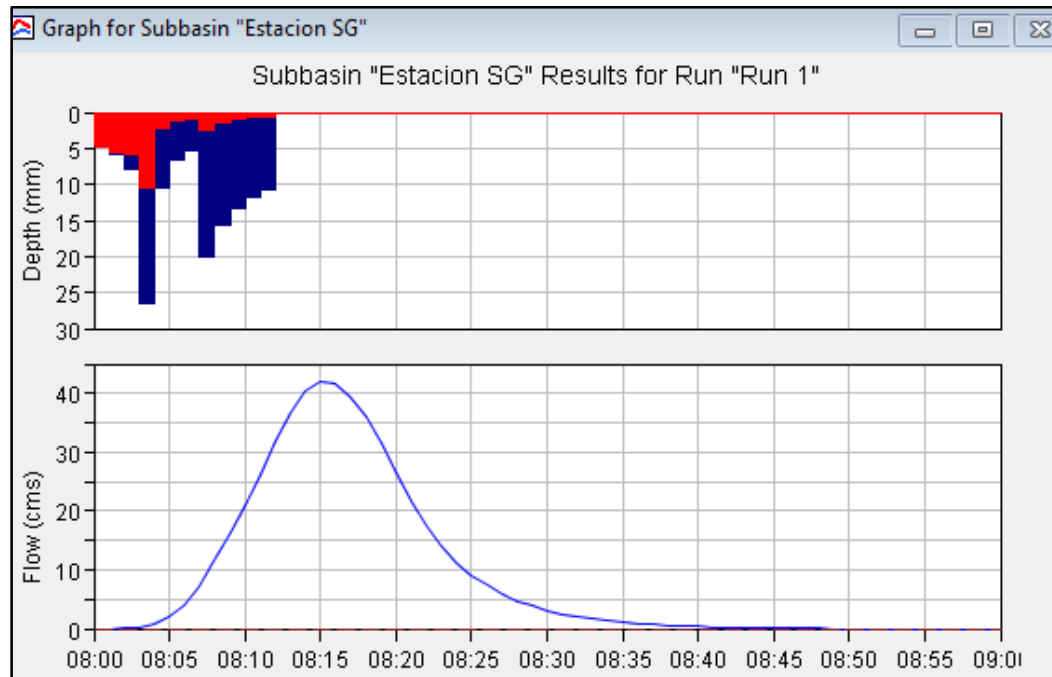


Figura 35. Hidrograma Tr: 500 años.

Fuente: Elaboración propia

4.6.9.3. Tiempo de retorno 1000 años

La figura 36 indica el resultado de la descarga máxima estimado para 1000 años.

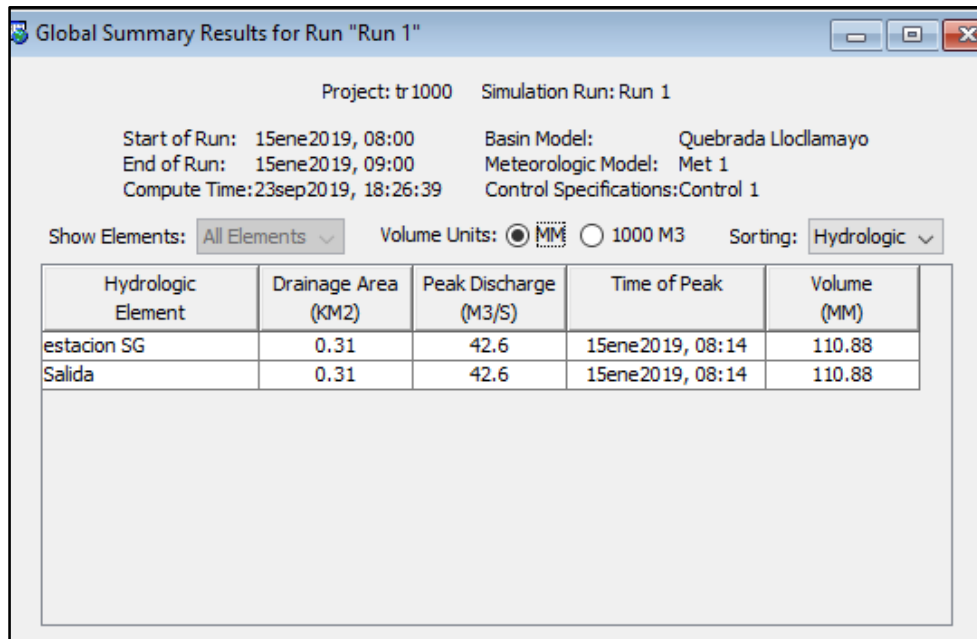


Figura 36. Resumen global Tr: 1000 años.

Fuente: Elaboración propia

La figura 37 indica el resumen de resultados para la micro cuenca Llocllamayo.

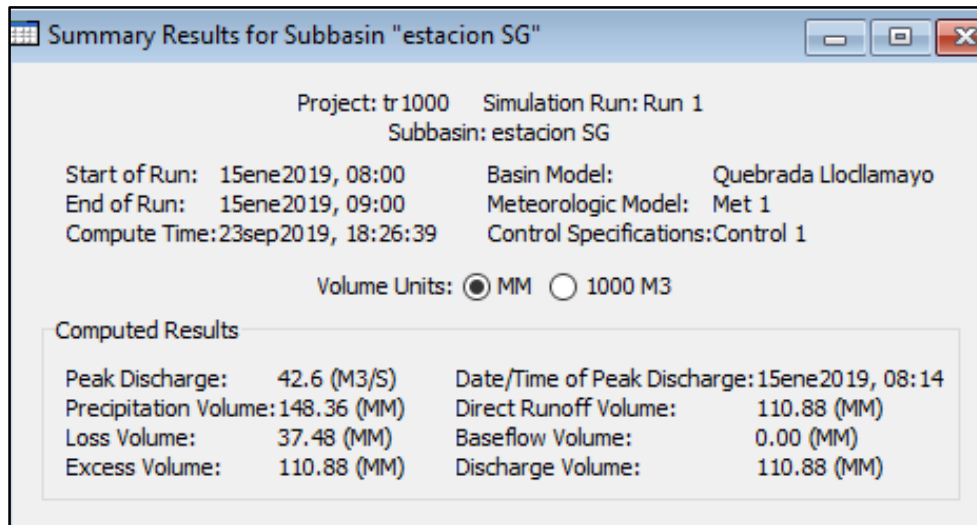


Figura 37. Resumen Tr: 1000 años.

Fuente: Elaboración propia

La figura 38 grafica el hidrograma para la micro cuenca Llocllamayo.

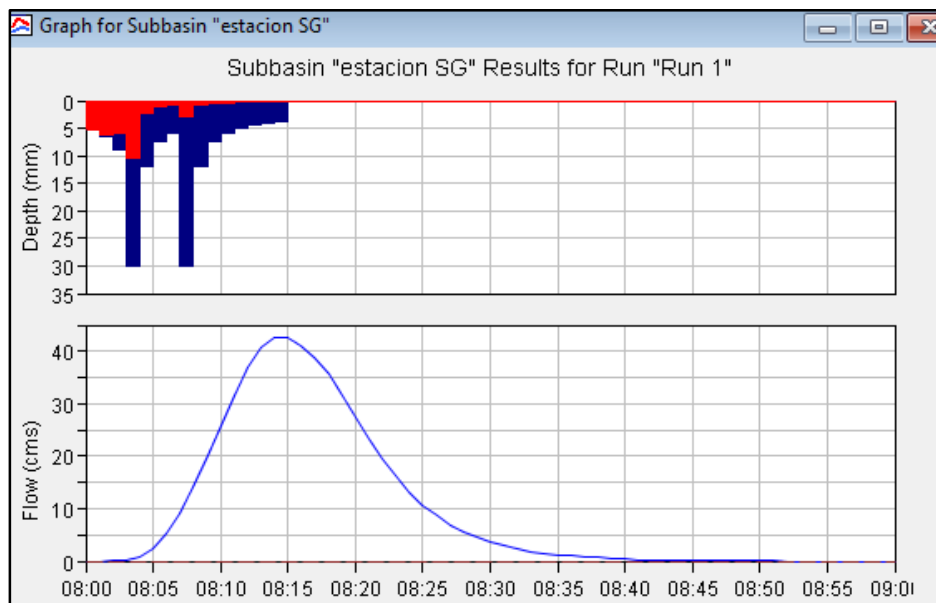


Figura 38. Hidrograma Tr: 1000 años.

Fuente: Elaboración propia

La tabla 18 indica el resumen de la máxima descarga en m³/s, para cada periodo de tiempo analizado.

Tabla 18
Caudales para periodos de retorno.

Periodo de retorno	Descarga (m ³ /s)
100	23.1
500	42.0
1000	42.6

Fuente: Elaboración propia

4.6.10. Valores de caudales totales

El apartado 2.21.3 Estimación de los caudales máximos, se utilizan para calcular los caudales totales, con la metodología de JICA (Japan International Cooperation Agency) y la metodología propuesta por O'Brien (2000). A partir del hidrograma de flujo de agua multiplicado por un factor (BF), con el cual se estima el flujo de detritos.

La tabla 19 indica el Bulking Factor para cada periodo de retorno.

Tabla 19
Elaboración del Bulking Factor.

	Km2	Ha	m2
Años	100	500	1000
Área	0.15	15	150000
Profundidad de calado (m)	0.05	0.10	0.15
Volumen Sedimentos (m ³)	7500	15000	22500
Tc (min)	7	7	7
Caudal m ³ /s	23.1	42.0	42.6
Volumen de agua (m ³)	9702	17640	17892
Cv	0.436	0.459	0.557
Bulking Factor	1.77	1.84	2.25
Q total (m ³ /s)	40.89	77.28	95.85

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 20 indica los caudales totales para cada periodo de retorno.

Tabla 20
Caudales totales para cada periodo de retorno.

Periodo de Retorno (años)	Caudales Máximos (m ³ /s)
100	40.89
500	77.28
1000	95.85

Fuente: Elaboración propia

4.7. Imagen Satelital CONIDA

Para la delimitación de la Quebrada Llocllamayo hemos utilizado la imagen satelital CONIDA (Space Agency of Peru) con una precisión al 0.70 m. (Figura 39), para la obtención de las curvas de nivel se procesó el archivo ráster obtenido del MINAM utilizando el programa QGIS 3.4.2.

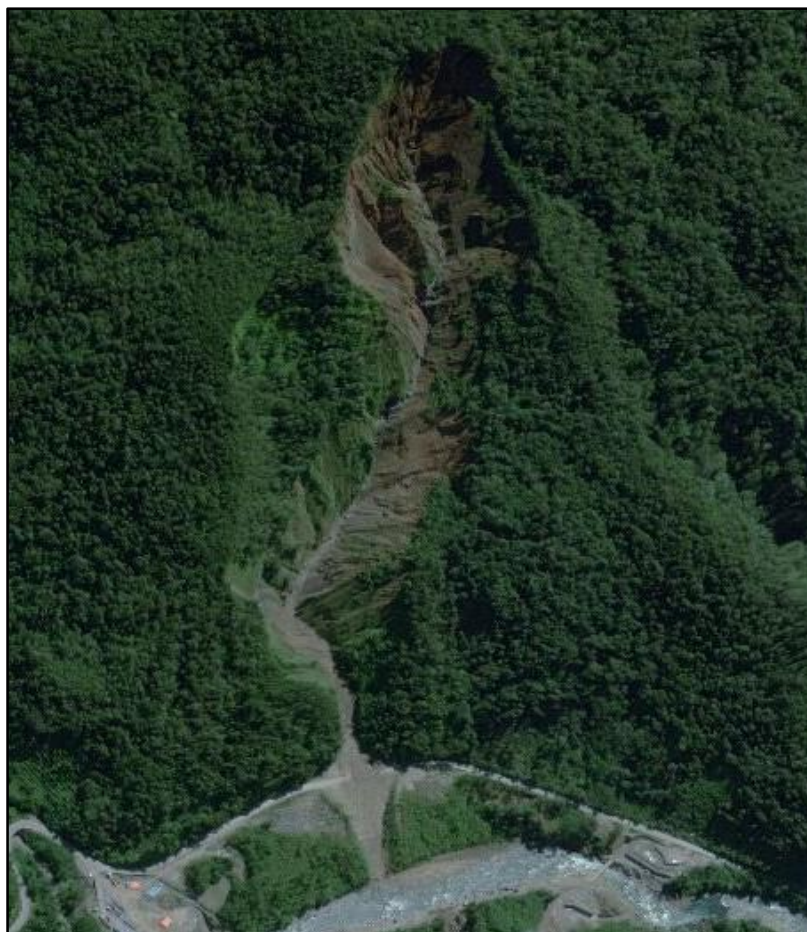


Figura 39. Imagen Satelital CONIDA
Fuente: Satélite Conida.

4.8. Características geotécnicas

- Mecánica de suelo

a) Análisis granulométrico

Del Proyecto: “Estudio del corredor vial interoceánico sur”, tramo IV: Azángaro – puente Inambari, la cual realizo estudios en la Quebrada Llocllamayo (2008). Se han tomado muestras en las progresivas 295 + 395 y 295 + 430, a profundidad superficial sobre el flujo de escombros en el abanico,

cada muestra refleja los análisis granulométricos, los límites de consistencia y la determinación de su contenido de humedad.

Los resultados indican muestras de baja plasticidad en grava arcillosa con arena GC a una grava pobremente gradadas con limo y arena GP – GM, en los esquemas de clasificación de suelo unificado (SUCS) Ver tabla 21, para material menor de 3”.

Tabla 21
Resultados de la granulométrica - ASTM D422.

Muestra	Diámetro (d)		Límite de consistencia			SUCS
	3” <d< N°200	D < N°200	%LL	%LP	%IP	
MII	84.1	15.9	32	22	10	GC
MIII	89.4	10.6	-	NP	-	GP-GM

Fuente: Rumi Ingenieros Geotécnicos S.A.C

b) Contenido de humedad

A los ensayos se le realizo las pruebas de contenido de humedad, los resultados se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22
Contenido de Humedad - ASTM D-2216.

Muestra	M II	M III
Resultado	14.5	16.5

Fuente: Rumi Ingenieros Geotécnicos S.A.C

Mayor detalle de las muestras de laboratorio ver Anexo 04 - Ensayos de laboratorio.

CAPÍTULO V: MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN

5.1. Simulación con el modelo FLO – 2D

5.1.1. Información básica

Se recopilaron las características de la quebrada, fotografías satelitales, el hidrograma de caudal total, la topografía digital, estudios previos, los cuales son la información necesaria para el procesamiento del estudio.

a) Fotografías satelitales

Para el estudio de la presente se obtuvieron imágenes satelitales– Satélite Conida (Space Agency of Peru), con resolución de 0.7 m sobre la quebrada Llocllamayo de la zona 19 S, e imagen satelital de Gloogle Earth Pro.

b) Planos topográficos

Se obtuvieron de la zona de estudio data del IGN y INGEMMET Cuadrángulo 27–V, área que emplaza la quebrada, sobre esta base se delimito la microcuenca, mediante el Sistema de Información geográfica, procesada por el software Q-GIS, las imágenes satelitales sirvieron de apoyo en análisis adicionales.

c) Hidrología

En el apartado 4.6.9 Hidrograma de avenidas líquido, apoyados por el programa HEC-HMS se utiliza para la estimación del hidrograma líquido, para una CN=85

d) Estimación de los caudales máximos para flujo de detritos

En el apartado 4.6.10 se realizó el cálculo de los caudales máximos a partir del hidrograma de flujo de agua multiplicado por un factor (BF).

5.2. Definición de parámetros reológicos

El apartado 2.26 Medición de los parámetros reológicos, estos parámetros se fijados a partir de la similitud de las muestras de campo, la muestra tiene un límite líquido de 32% el cual en la Tabla 8 de la Página. 85 se asemeja al material de la muestra de Aspen Pit 1.

Las ecuaciones que satisfacen el modelo O'Brien and Julien (Glenwood 2). Donde α_1 y α_2 son coeficientes empíricos determinados de la Tabla 9 Página 85.

5.3. Descripción de la simulación con el FLO – 2D

Para la simulación, el primer paso es procesar la topografía existente, una vez obtenido el modelo de elevación del terreno (DEM) en un sistema GIS, se exporta la topografía al pre procesador Grid Developer System (GDS) que nos ayuda a definir las grillas utilizadas para la simulación.

Dentro del pre procesador GDS, una vez obtenida las grillas y la delimitación de la zona de simulación, se procede a asignar los coeficientes de Manning y la ubicación del hidrograma de entrada (INFLOW) en la grilla correspondiente. Finalmente se crea una capa de grillas cuadradas, donde cada celda posee una cota y un coeficiente de Manning asignado automáticamente por el software. Además, en la parte del cono deyectivo se define las grillas que son de salida de flujo como (OUTFLOW)

Para la modelación de un flujo para el control de escombros con el programa FLO – 2D se requiere como 7 archivos cuya extensión es .DAT. estos archivos son:

- FPLAIN.DAT
- CADPTS.DAT
- CONT.DAT
- TOLER.DAT
- INFLOW.DAT

- OUTFLOW.DAT
- SED.DAT

Los archivos FPLAN.DAT y CADPTS.DAT, son creados por el pre procesador GDS y nos indican el número de grillas utilizadas con su respectiva numeración. La cota del terreno y el coeficiente de Manning que corresponde a cada rejilla son ingresados en estos datos.

El archivo CONT.DAT, es el archivo principal del programa donde se define el tiempo de simulación y el proceso físico a analizar. Para nuestro de caso de simulación el proceso debe ser Mud/Debris.

El archivo TOLER:DAT, indican las variables de control del sistema donde se indica el tiempo transcurrido en la simulación.

El archivo INFLOW:DAT, es donde se describe el hidrograma de entrada y la numeración de la grilla de inicio, para nuestro caso el hidrograma liquido va acompañado de una distribución de sedimentos, el software se encarga de calcular el hidrograma de la mezcla para después preceder a simular su avance aguas abajo.

El archivo OUTFLOW.DAT, se indican las grillas por donde el flujo seguirá su camino. Para nuestro caso estas grillas se ubican en el cono deyectivo. Estas grillas de flujo de salida deben indicarse para el caso de las curvas de nivel topográficos.

Le archivo SED.DAT, se indican las propiedades físicas del flujo, estos dependen del tipo de material existente en la quebrada de estudio, ingresados estos parámetros de tipo de flujo procedemos a simular.

5.4. Definición de parámetros para la simulación

El plano de topográfico cuenta con curvas cada 2 metros en la zona de depósito y aguas arriba cada 50 metros en el trayecto de la Quebrada Llocllamayo, para la simulación se creó una malla con celdas de 20m x 20m en todo el perímetro de la quebrada, teniendo una longitud de cauce de 1.31 km.

Se introdujo el hidrograma de caudal líquido proveniente con su respectiva distribución de sedimentos, propiedades de sedimento y parámetros geológicos. Para el parámetro de rugosidad se asignaron los valores que varían desde 0.05 hasta 0.065. Las concentraciones de sedimentos varían 0.43 hasta 0.55. Se analiza un tiempo de simulación de 3.45 hrs. para un hidrograma con tiempo de retorno de 100 años, para un tiempo de retorno de 500 años se analizó el tiempo de simulación 3.58 hrs y para un tiempo de retorno de 1000 años se analizó un tiempo de simulación de 3.59 hrs.

5.5. Simulación del FLO – 2D en la Quebrada Llocllamayo

Se generó 3 escenarios de simulación para la Quebrada Llocllamayo, se toma la topografía digitalizada (Figura 40) con las curvas de nivel ya mencionados, cuales fueron procesados en el programa QGIS 3.4.2, una vez obtenida dicha información se procedió a introducirla al software FLO – 2D mediante la opción GDC, para posterior delimitar la cuenca y generar las celdas.

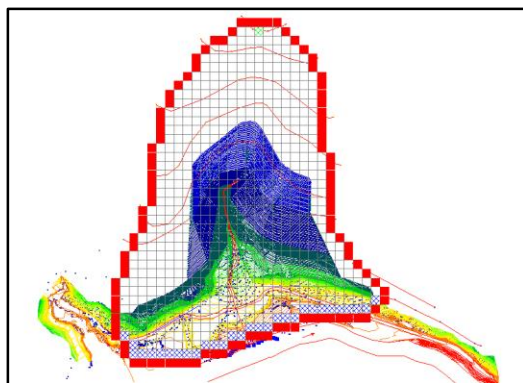


Figura 40. Vista del sistema desarrollado en grillas (GDS)
Fuente: Elaboración propia

Después de generar las celdas, se procede a interpolar las alturas de las celdas de la grilla, ya que no siempre dentro de cada de una celda va haber un punto de elevación, entonces al interpolar las alturas, las celdas que no tienen puntos de elevación, toman un promedio de las cuatro celdas vecinas, creando una imagen en error, el cual debe ser corregido manualmente.

Ingresamos en la celda el hidrograma de entrada (inflow) (figura 41), que es el que corresponde a los valores de tiempo y caudal para tiempos de retorno de 100, 500 y 1000 años, para que el flujo no se estanque donde las curvas topográficas bordeen el límite de la zona de simulación o por criterio se delimite la zona final de simulación, se pone elementos de salida (Outflow), así el programa interpretara que no existe un impedimento para que el flujo se acumule y continúe fluyendo.

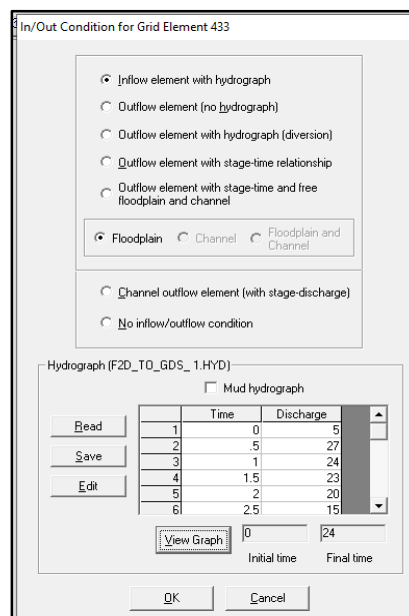


Figura 41. Ingreso de los datos del hidrograma (Inflow)

Fuente: elaboración propia

Una vez preparado todo el escenario para la simulación de flujo en la Quebrada Llocllamayo, se procede a simular el flujo (Figura 42), donde se indica el tiempo de duración del hidrograma líquido, el tipo de flujo, el modo de visualización de la simulación ya sea grafico o texto, intervalos de actualización del tiempo de simulación entre otros.

Figura 42. Introducción de parámetros correspondientes al escenario a simular.

Fuente: elaboración propia.

5.6. Utilización del post procesador (Mapper) en FLO- 2D

El post-procesador es la parte del FLO – 2D que se usa para el tratamiento de datos generados, los cuales se explicaron líneas arriba.

Con este programa se puede acceder a los datos de velocidad de flujo, altura máxima de los flujos, generar mapas de peligro digitales según los parámetros del escenario simulado.

5.6.1. Partes del Mapper

A continuación, paso a describir las diferentes aplicaciones del Mapper

a. Mapa de elevación de la superficie del terreno

Estas diferencias de elevación están representadas en la escala de colores ubicada al extremo derecho de la figura 43, indicando las variaciones de altitudes mediante una gradación de colores variando desde el azul para los elementos de grilla con una cota más baja, hasta el color rojo que representa la grilla con la cota más alta.

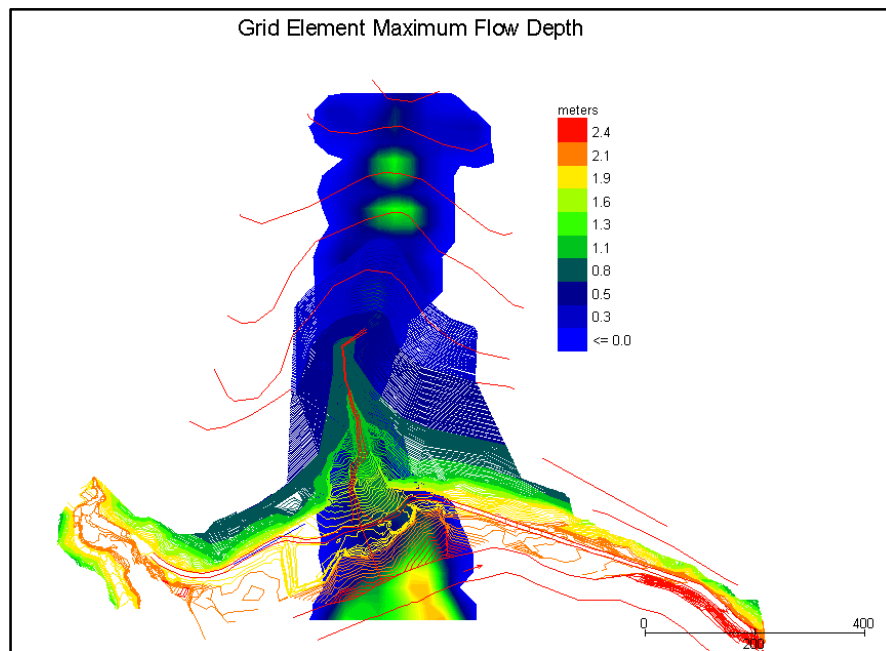


Figura 43. Elevación de la superficie del terreno, modelo FLO -2D.
Fuente: Elaboración propia.

b. Mapa de máximas velocidades del flujo en el terreno

Estas diferencias de velocidades están representadas en la escala de colores ubicada en extremo derecho de la figura 44, indicando las variaciones de velocidad de flujo mediante una gradación de colores variando desde el color azul para los elementos de grilla con una velocidad de flujo menor, hasta el color rojo para elementos de grilla con velocidad de flujo mayor.

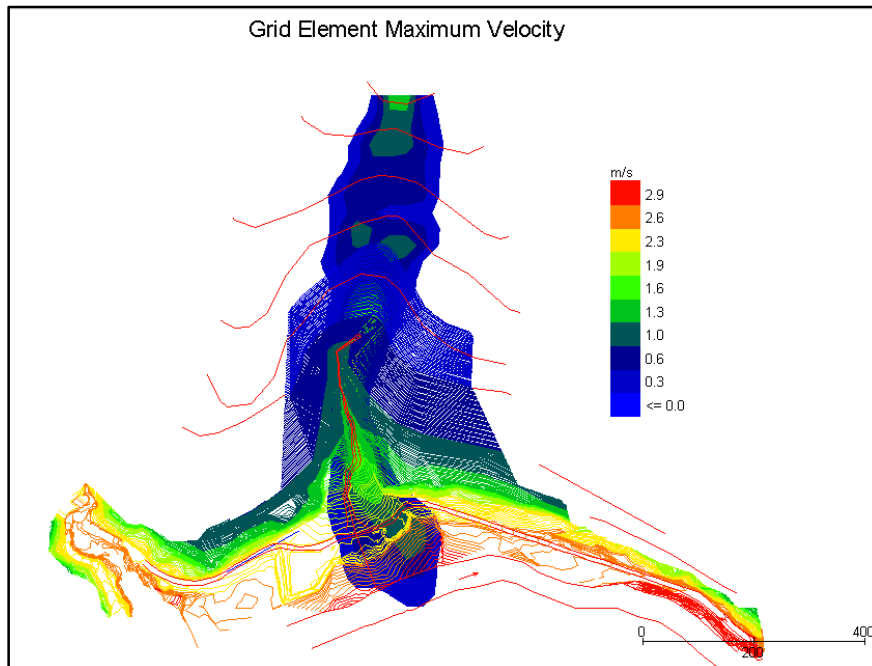


Figura 44. Velocidad de flujo máxima.
Fuente: Elaboración propia.

c. Mapa de peligro digital

Esta es una de las opciones más importantes de la modelación FLO -2D, mediante la ejecución de la ventana MAPPER, en la cual de acuerdo a los datos simulados y calculados previos realizados por el software, se genera el mapa de peligro digital (Figura 45), para lo cual se toma en cuenta los parámetros de altura, velocidad, profundidad que el flujo presenta en todo su recorrido, para finalmente asignar una coloración a cada celda, indicando un grado de peligro que representa cada zona.

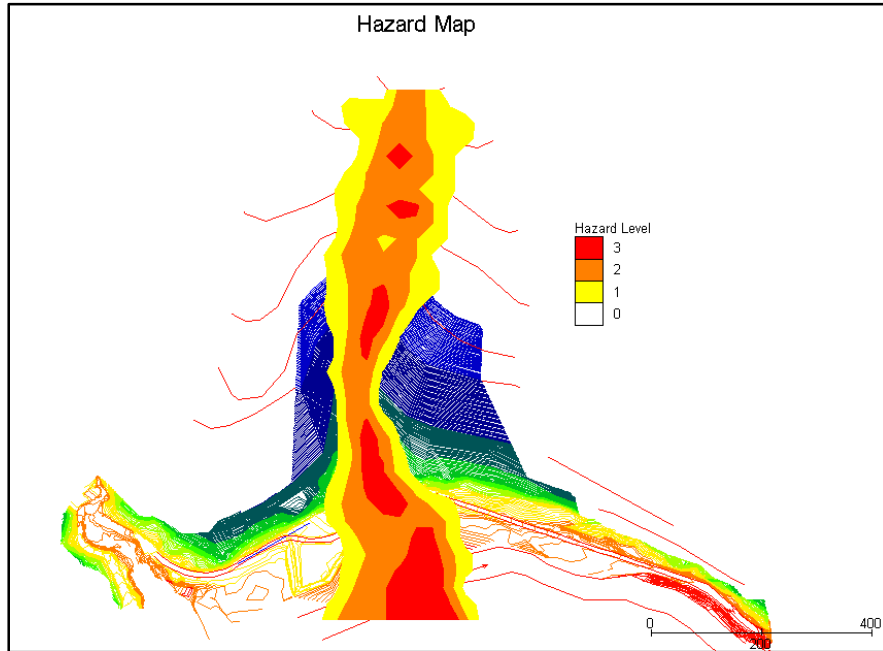


Figura 45. Mapa de peligro.
Fuente: Elaboración propia.

5.6.2. Validación

El modelo se valida mediante la comparación de altura de sedimentación calculadas utilizando el programa FLO-2D. Realizada por Rumi Ingenieros Geotécnicos S.A.C, para el “Estudio del corredor Vial Interoceánico Sur” Tramo IV: Azángaro – Puente Inambari. Informe “Estudio de flujo de residuos en la zona tropical de la quebrada Llocllamayo” de fecha Febrero del 2010.

La variable de la concentración volumétrica de sedimentos (C_v) en el modelo FLO-2D, es la llamada a ser modificada variando en el orden de 25% 35% hasta el 45% respectivamente para cada tiempo de retorno haciendo referencia a la tabla 10 - Comportamiento del flujo de lodo como una función de C_v . de O’Brien (2000). Manual FLO - 2D. Pudiendo así, hacer coincidir las alturas de sedimentación entre los modelos.

CAPÍTULO VI: PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1 Introducción

Aquí se presentan los resultados de los gráficos obtenidos en la simulación para los diferentes escenarios de la micro cuenca, tales como: mapa de elevaciones, profundidades máximas, velocidades del torrente y mapa de riesgo o peligro.

6.1.1 Resultados para el periodo de retorno $Tr = 100$ años

La figura 46, representa una escala de colores donde se muestra la profundidad de deposición máxima de escombros en la micro cuenca, la cual varía de 1.3 – 1.9 m.

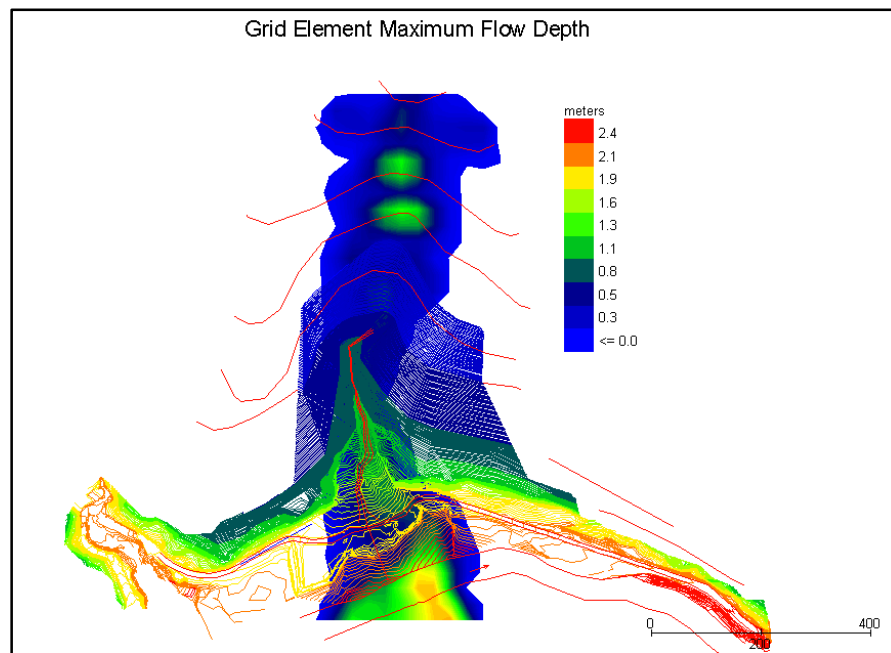


Figura 46. Profundidad máxima del flujo - periodo de retorno de 100 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 47, representa la elevación de la superficie del terreno y la elevación máxima del flujo de escombros.

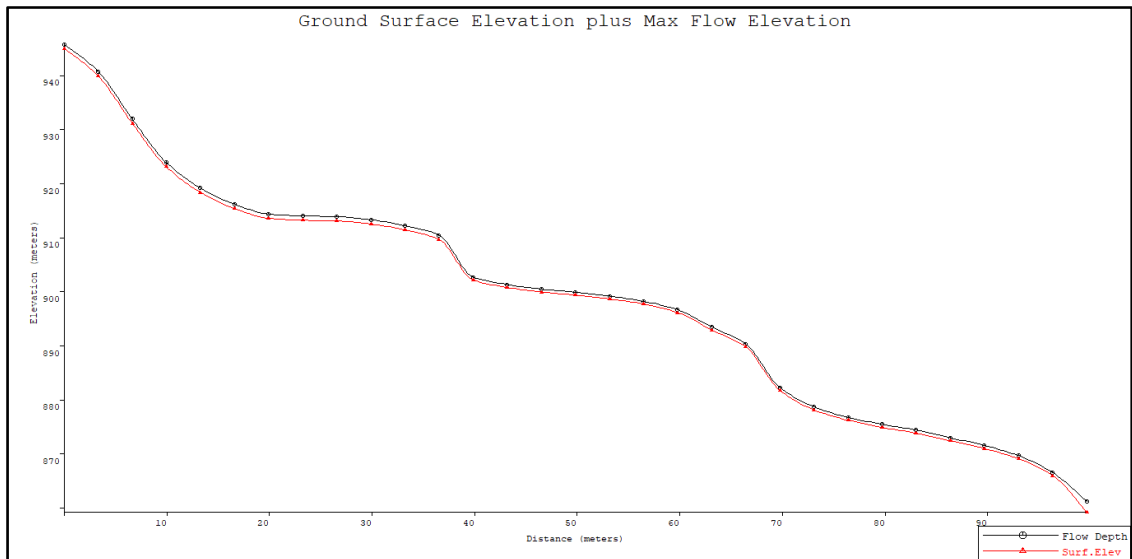


Figura 47. Elevación de la superficie de la quebrada y elevación máxima del flujo - periodo de retorno de 100 años.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 48, representa una escala de colores donde se muestra la velocidad que alcanza el torrente, esta varia de 0.6 – 1.3 m/s.

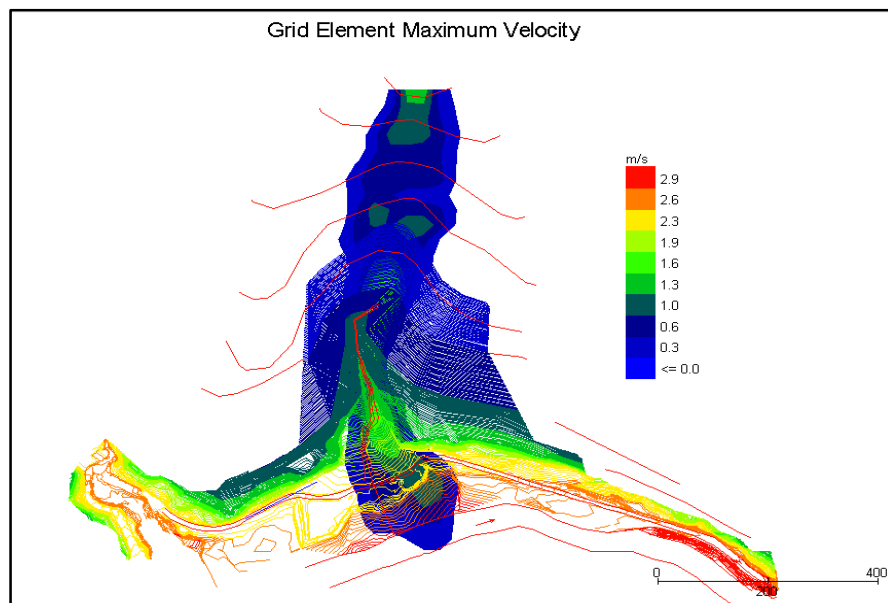


Figura 48. Velocidad de flujo máxima - periodo de retorno de 100 años.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 49, expresa la velocidad de flujo máxima por grilla.

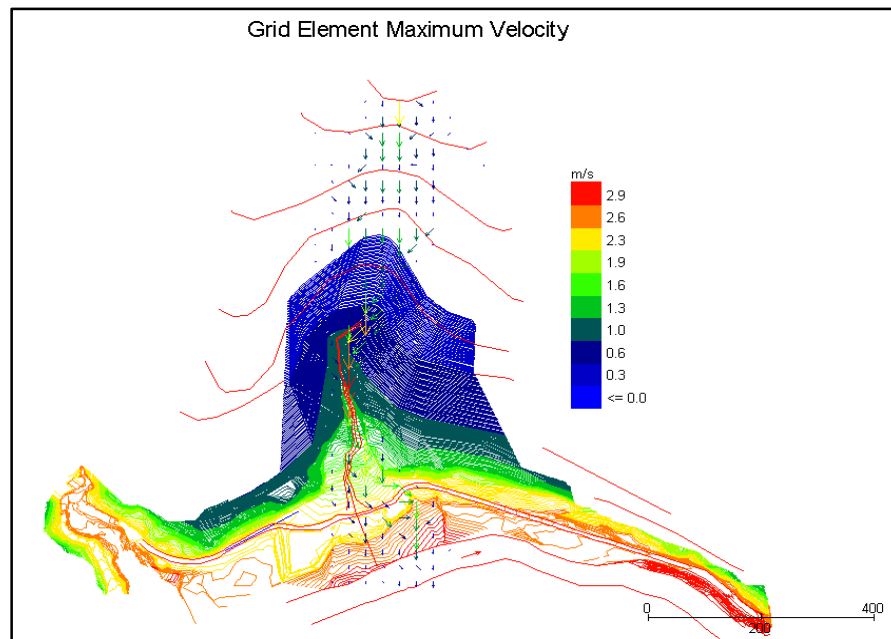


Figura 49. Velocidad de flujo máxima por grilla.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 50, expresa el peligro por el lujo de detritos de la zona en estudio micro cuenca Llocllamayo para un caudal de $40.89 \text{ m}^3/\text{s}$.

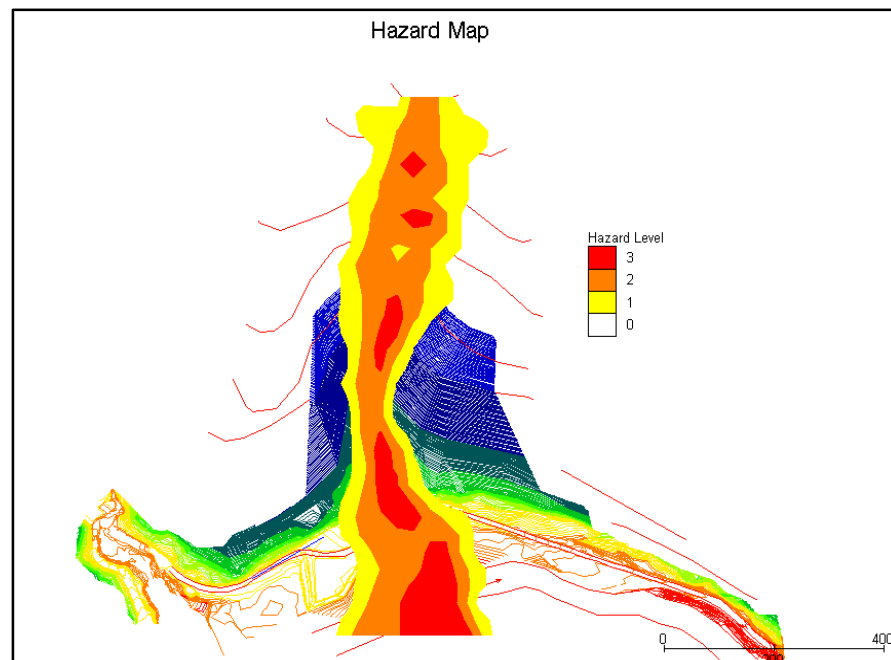


Figura 50. Mapa de peligro - periodo de retorno de 100 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 51, expresa el peligro de inundación el por flujo de detritos de la micro cuenca Llocllamayo para un caudal de 40.89 m³/s.

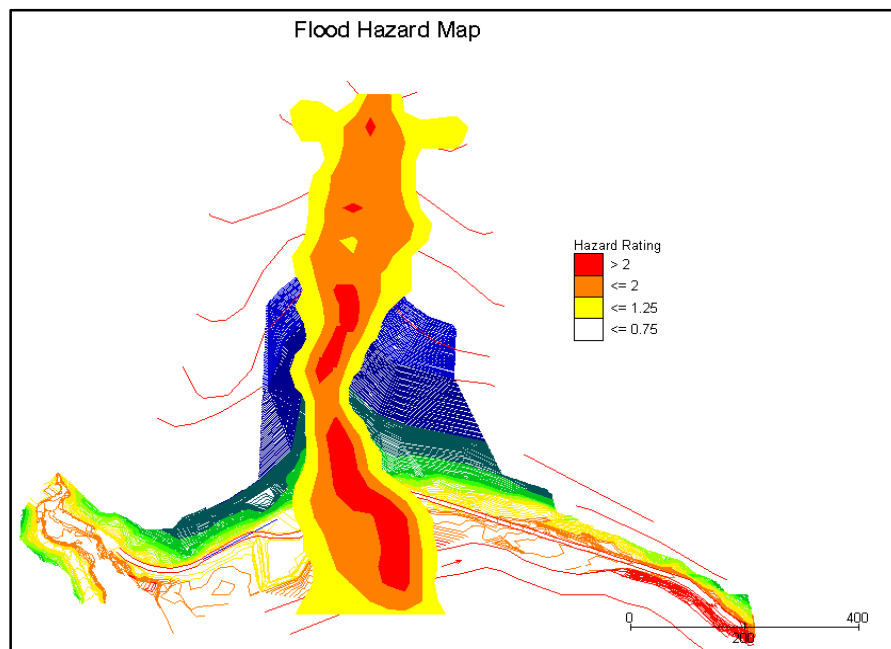


Figura 51. Mapa de peligro de inundación - periodo de retorno de 100 años.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23

Resultados de la simulación para un caudal total de 40.89 m³/s.

Figura	Página	Interpretación del modelo	Valor	Unidad
46	127	Profundidad de deposición máxima del flujo de escombros.	1.3 - 1.9	m
48	128	Velocidad máxima del flujo que alcanza el torrente.	0.6 - 1.3	m/s
50	129	Mapa de riesgo o amenaza del torrente.		

Fuente: Elaboración propia

Para los pronósticos en cuanto a la estimación para el periodo de retorno de 100 años.
(Tabla 23)

La Figura 46 se puede observar:

- El resultado de la simulación entrega una altura de sedimentación, la cual varía desde 1.3 hasta 1.9 medida en metros.

La Figura 48 se puede observar:

- En relación a las velocidades que alcanza el torrente, estas varían de 0.6 a 1.3 m/s.

La Figura 50 se puede observar:

- El mapa de riesgo o amenaza indica una intensidad de peligro alta en el canal recolecto para el periodo de retorno analizado.
- La figura expresa el peligro para el flujo de detritos de la micro cuenca Llocllamayo para un caudal total de 40.89 m³/s.

6.1.2 Resultado para el periodo de retorno $T_r = 500$ años

La figura 52, muestra el cambio en la elevación del terreno de la micro cuenca Llocllamayo.

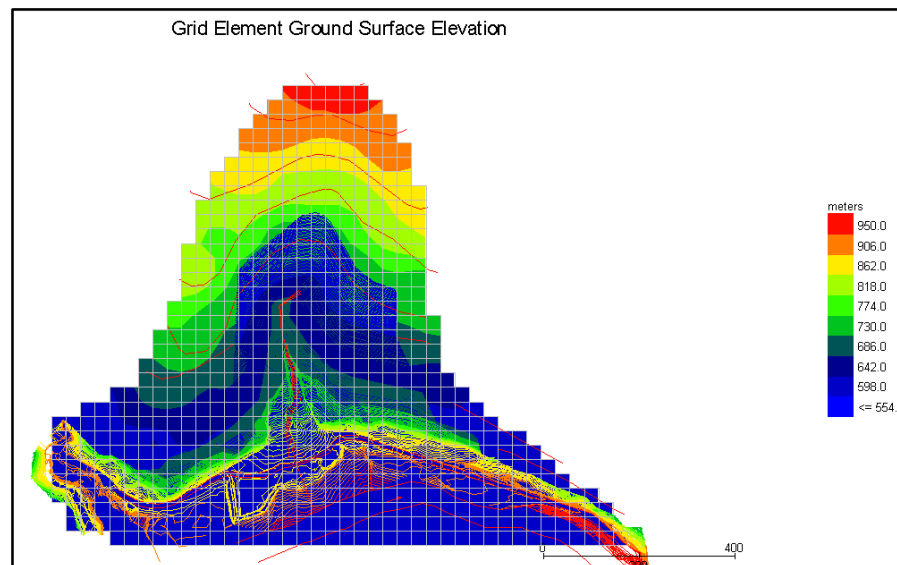


Figura 52. Elevación de la superficie del terreno - periodo de retorno de 500 años.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 53, muestra las alturas donde el fluido del agua invade el terreno de la micro cuenca Llocllamayo.

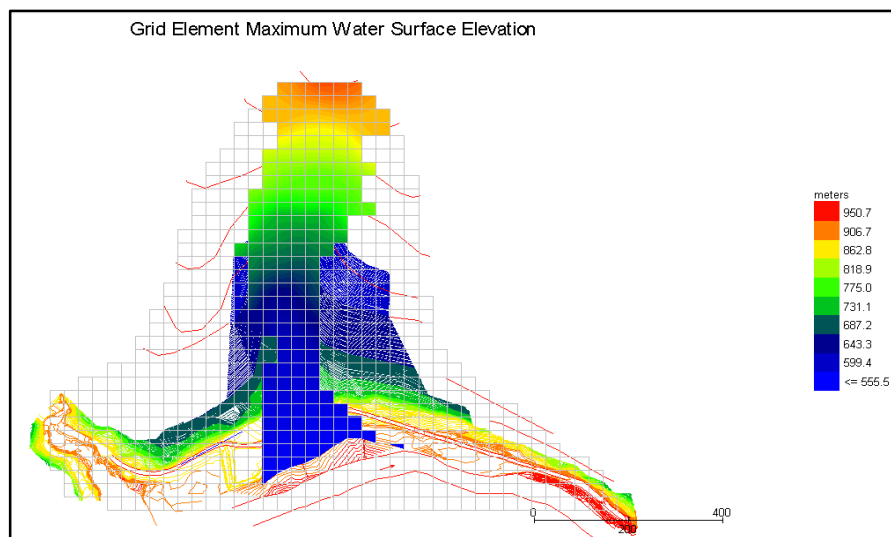


Figura 53. Elevación máxima del agua - periodo de retorno de 500 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 54, representa una escala de colores donde se muestra la profundidad de deposición máxima de escombros en la micro cuenca, la cual varía de 1.1 – 2.3 m.

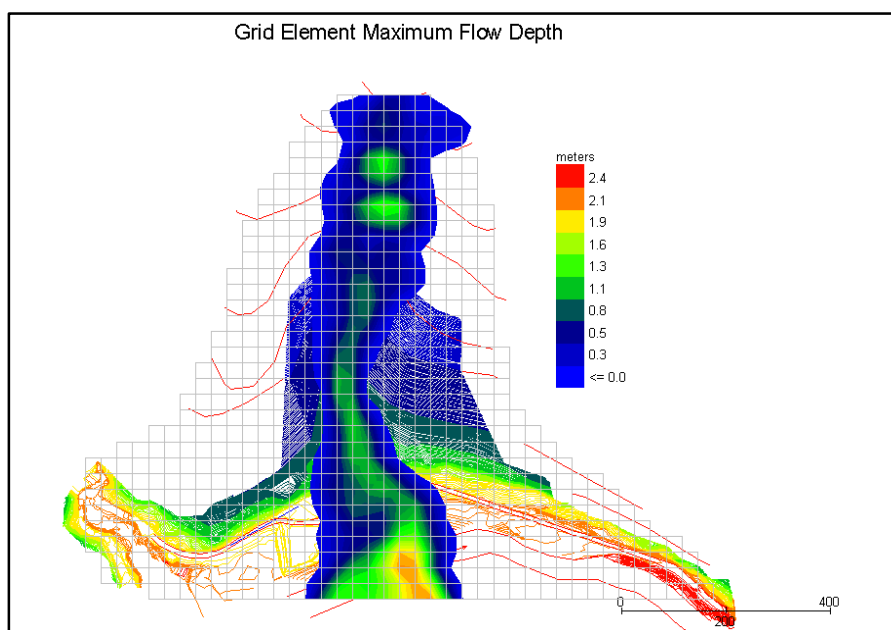


Figura 54. Profundidad de flujo máxima - periodo de retorno de 500 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 55, representa la profundidad del flujo para cada grilla.

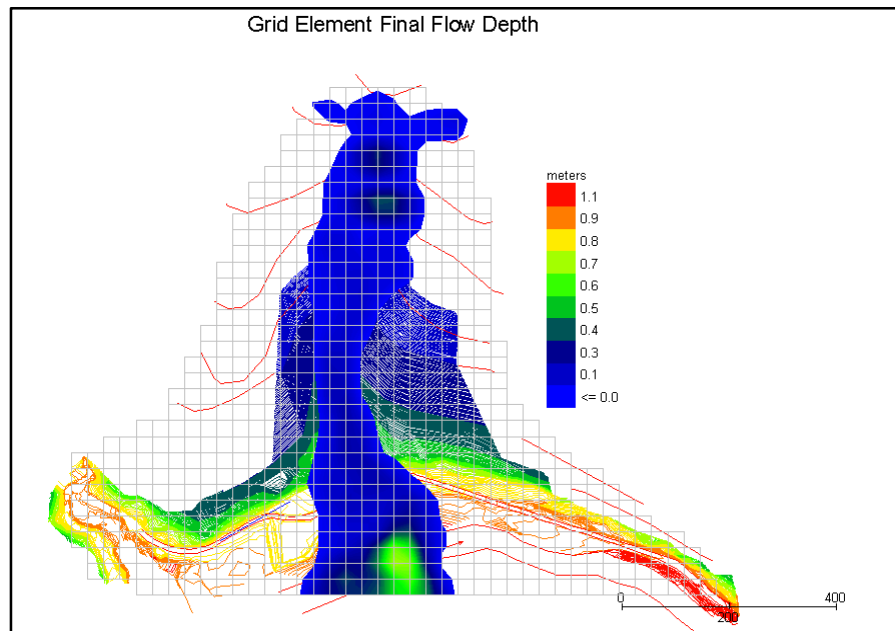


Figura 55. Profundidad del flujo final - periodo de retorno de 500 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 56, representa la elevación de la superficie del terreno y la elevación máxima del flujo de escombros.

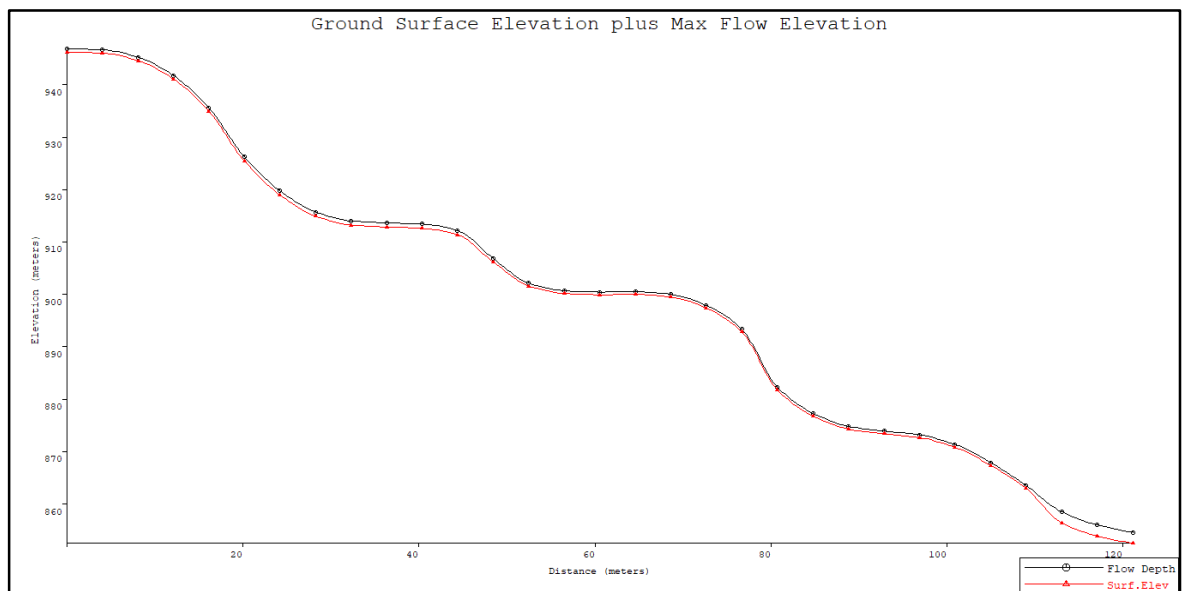


Figura 56. Elevación de la superficie de la quebrada y elevación máxima del flujo - periodo de retorno de 500 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 57, representa el contorno de velocidad de flujo.

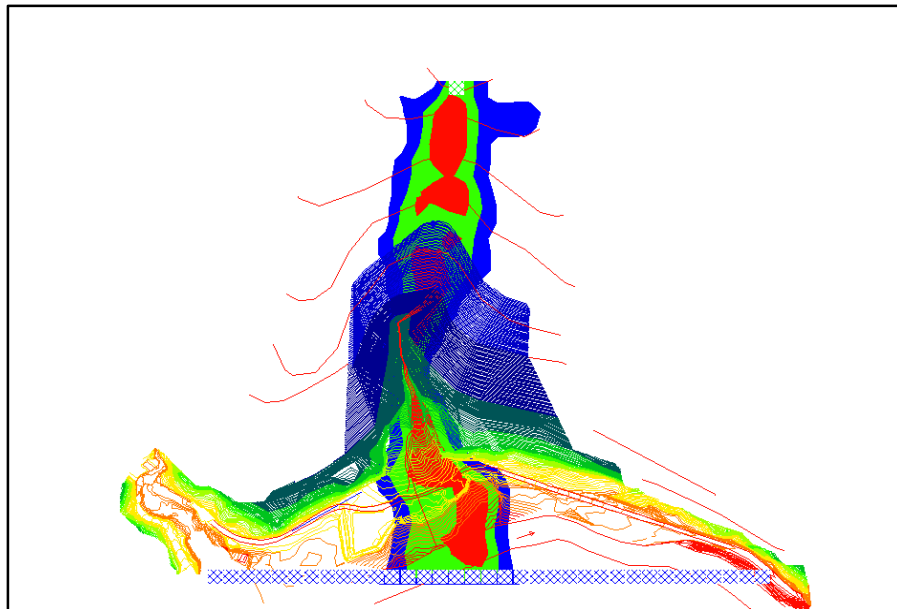


Figura 57. Contorno de velocidades flujo - periodo de retorno de 500 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 58, representa una escala de colores donde se muestra la velocidad que alcanza el torrente, esta varía de 2.1 – 2.9 m/s.

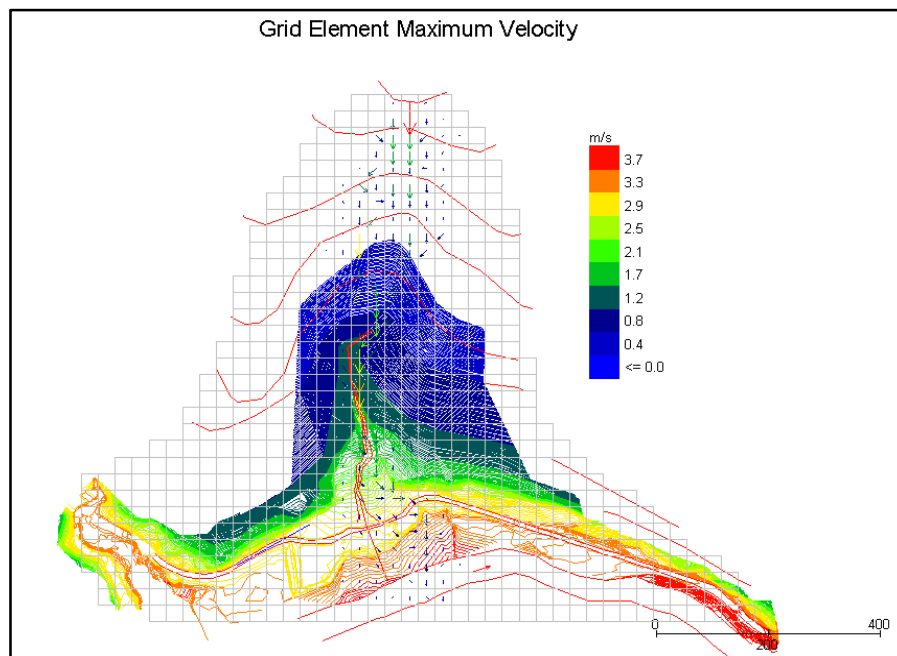


Figura 58. Velocidad de flujo máxima - periodo de retorno de 500 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 59, representa la fuerza de impacto en cada grilla.

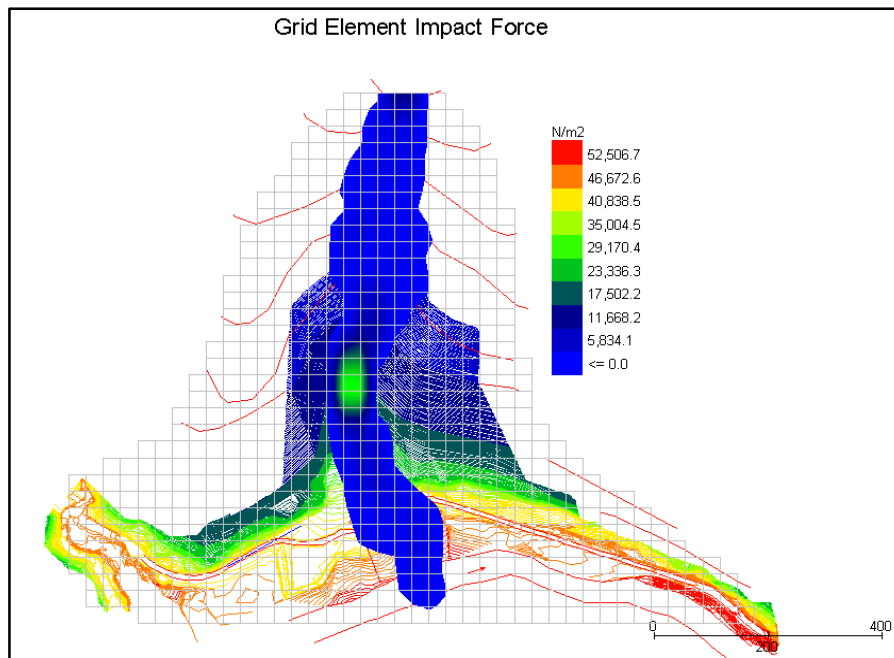


Figura 59. Fuerza de impacto del elemento de rejilla - periodo de retorno de 500 años.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 60, representa la presión estática del elemento de cada grilla.

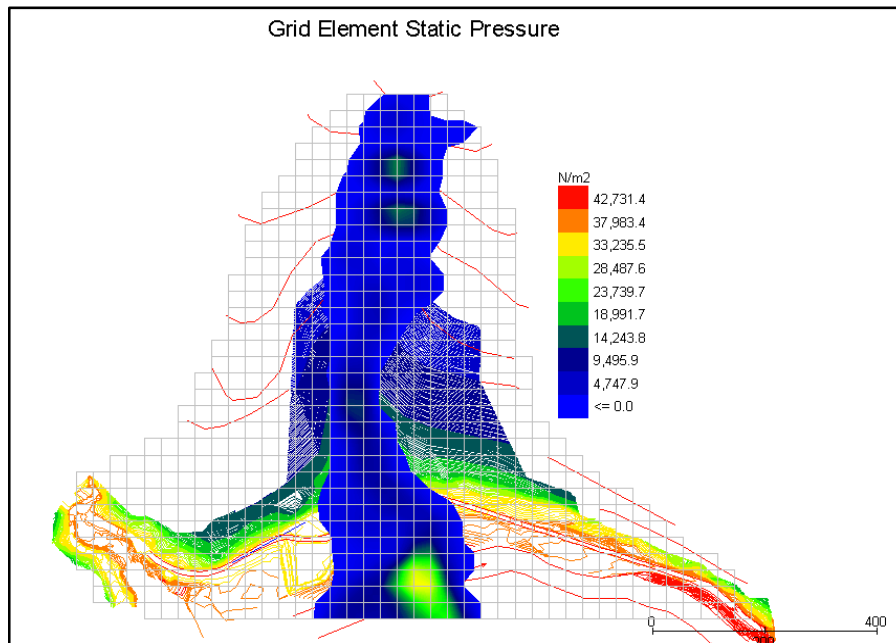


Figura 60. Presión estática del elemento de rejilla - periodo de retorno de 500 años.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 61, representa el tiempo del elemento por grilla.

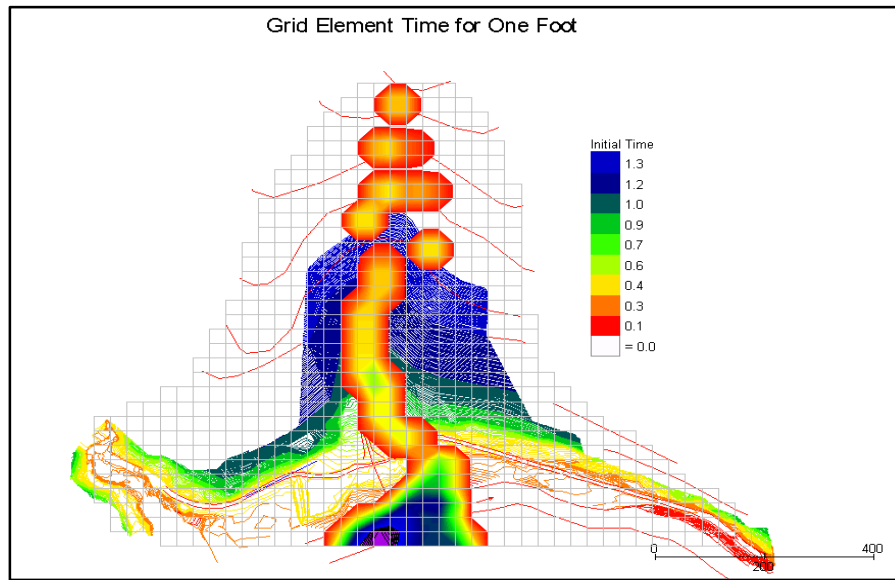


Figura 61. Tiempo de elemento de cuadrícula para un pie - periodo de retorno de 500 años.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 62, representa el tiempo del elemento por grilla, para la máxima profundidad.

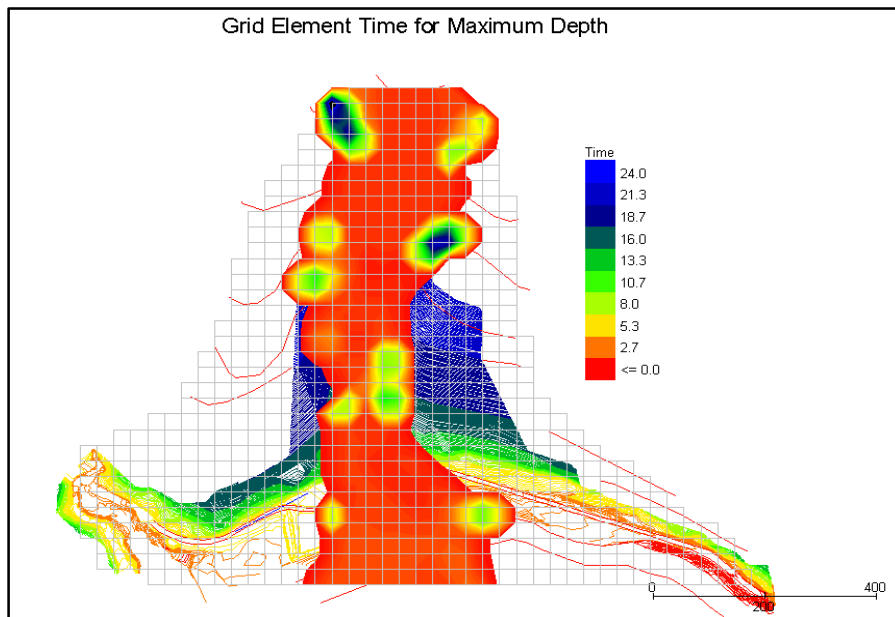


Figura 62. Tiempo del elemento de la cuadrícula para la máxima profundidad - periodo de retorno de 500 años.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 63, expresa el peligro por el flujo de detritos de la zona en estudio micro cuenca Llocllamayo para un caudal de 77.28 m³/s.

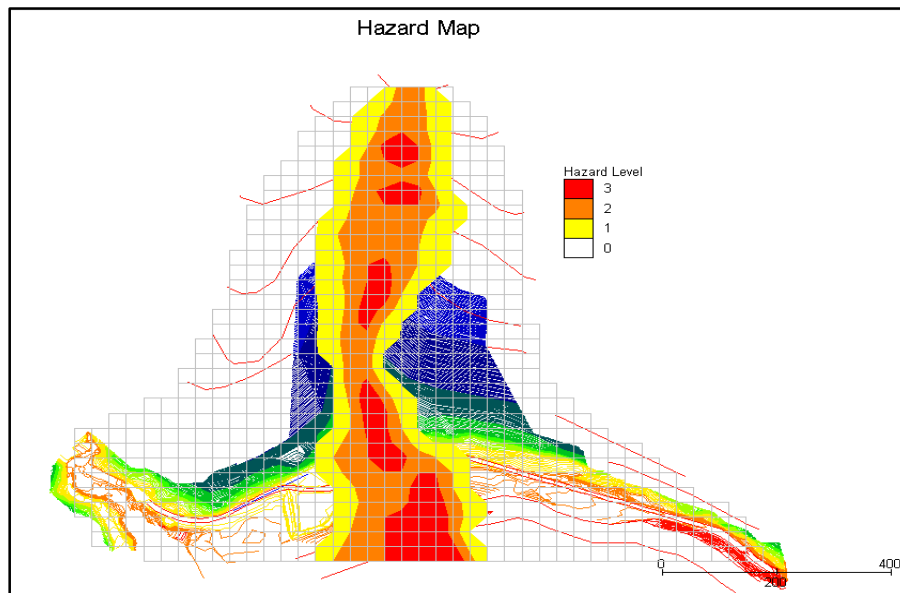


Figura 63. Mapa de peligro - periodo de retorno de 500 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 64, expresa el peligro de inundación por el flujo de detritos de la micro cuenca Llocllamayo para un caudal de 77.28 m³/s.

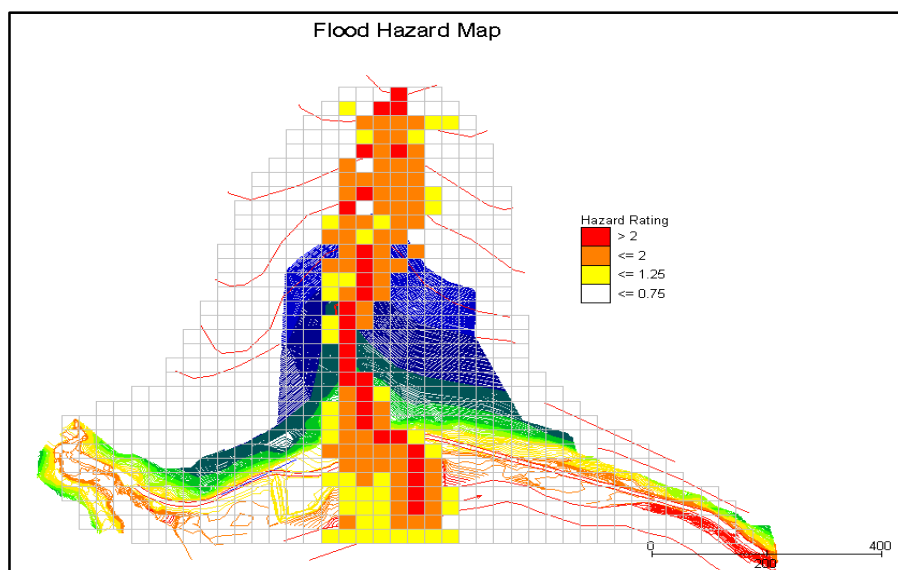


Figura 64. Mapa de peligro de inundación - periodo de retorno de 500 años.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24

Resultados de la simulación para un caudal total de 77.28 m³/s.

Figura	Página	Interpretación del modelo	Valor	Unidad
54	132	Profundidad de deposición máxima del flujo de escombros.	1.1 - 2.3	m
58	134	Velocidad máxima del flujo que alcanza el torrente.	2.1 - 2.9	m/s
63	137	Mapa de riesgo o amenaza del torrente.		

Fuente: Elaboración propia.

Para los pronósticos en cuanto a la estimación para el periodo de retorno de 500 años. (Tabla 24).

Figura 54 se puede observar:

- El resultado de la simulación entrega una altura de sedimentación, la cual varía desde 1.1 hasta 2.3 medida en metros.

Figura 58 se puede observar:

- En relación a las velocidades que alcanza el torrente, estas varían de 2.1 a 2.9 m/s.

Figura 63 se puede observar:

- El mapa de riesgo o amenaza indica una intensidad de peligro alta en el canal recolector para el periodo de retorno analizado.
- La figura expresa el peligro para el flujo de detritos de la micro cuenca Llocllamayo para un caudal total de 77.28 m³/s.

6.1.3 Resultados para el periodo de retorno $Tr=1000$ años

La figura 65, muestra el cambio en la elevación del terreno de la micro cuenca.

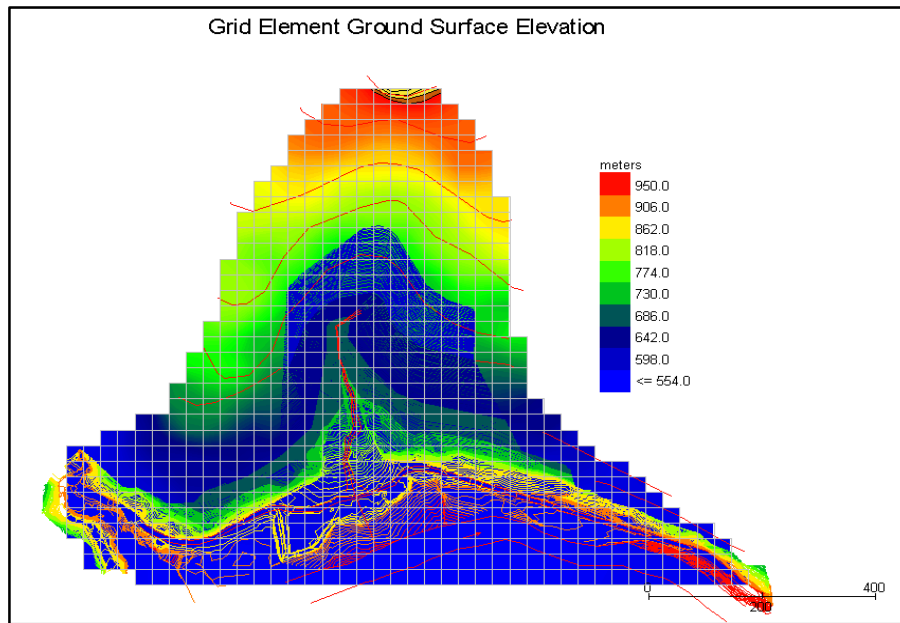


Figura 65. Elevación de la superficie del terreno - periodo de retorno de 1000 años.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 66, muestra las alturas donde el fluido del agua invade el terreno de la micro cuenca Llocllamayo.

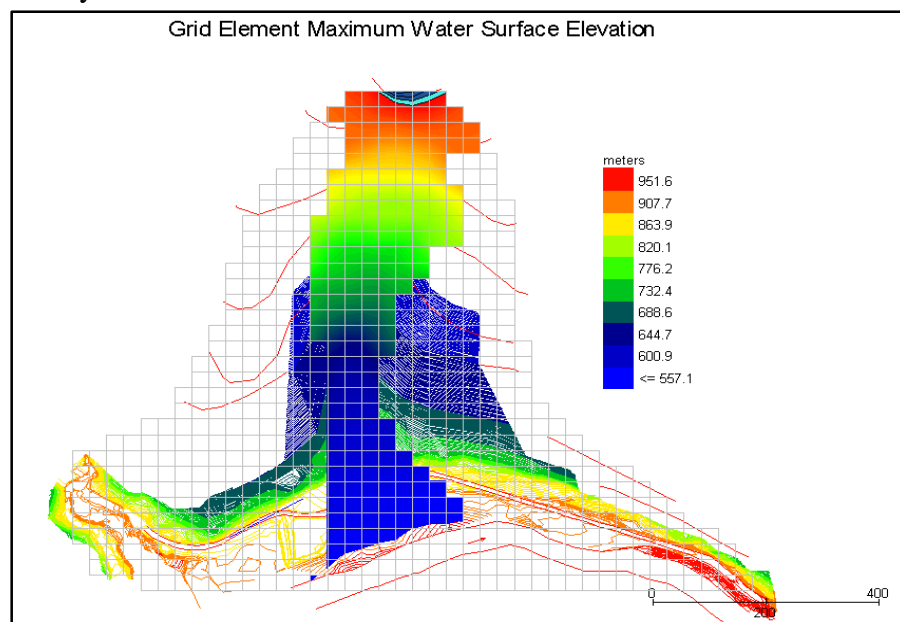


Figura 66. Elevación máxima del agua - periodo de retorno de 1000 años.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 67, representa una escala de colores donde se muestra la profundidad de deposición máxima de escombros en la micro cuenca, la cual varía de 2.4 – 5.2 m.

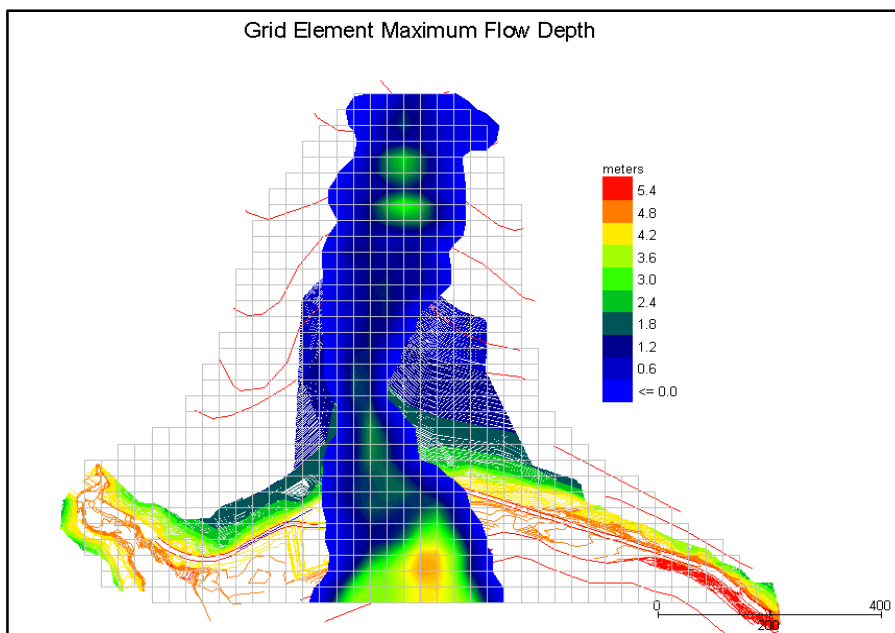


Figura 67. Profundidad del flujo máxima - periodo de retorno de 1000 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 68, representa la profundidad del flujo para cada grilla.

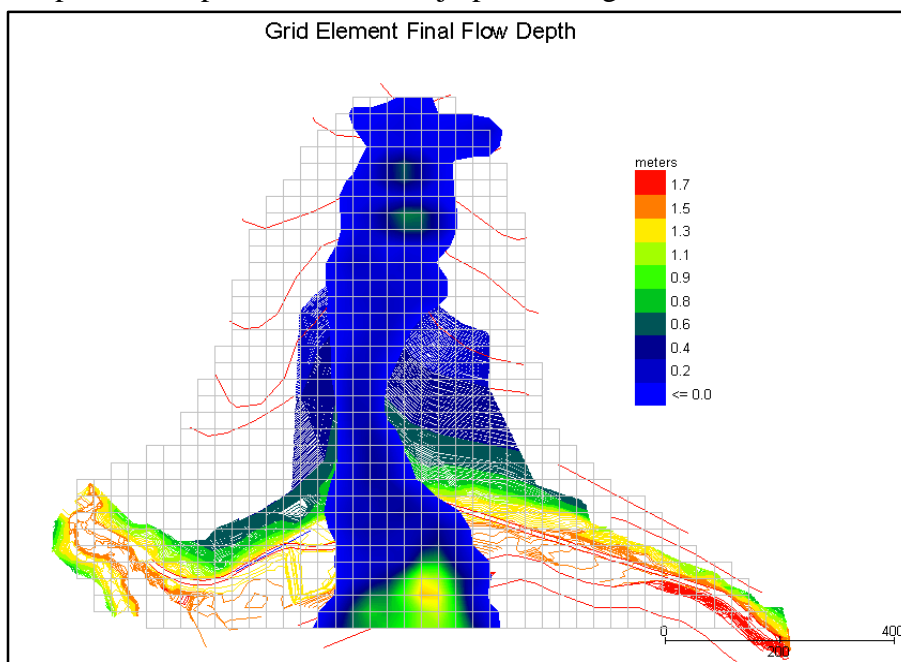


Figura 68. Profundidad del flujo final - periodo de retorno de 1000 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 69, representa la elevación de la superficie del terreno y la elevación máxima del flujo de escombros.

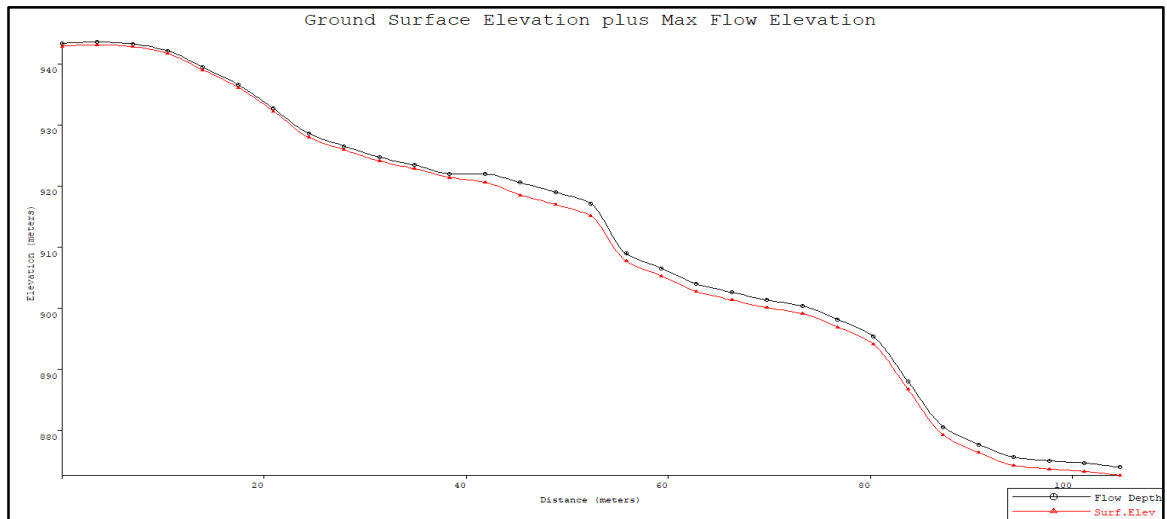


Figura 69. Elevación de la superficie de la quebrada y elevación máxima del flujo - periodo de retorno de 1000 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 70, representa el contorno de velocidades del flujo de escombros.

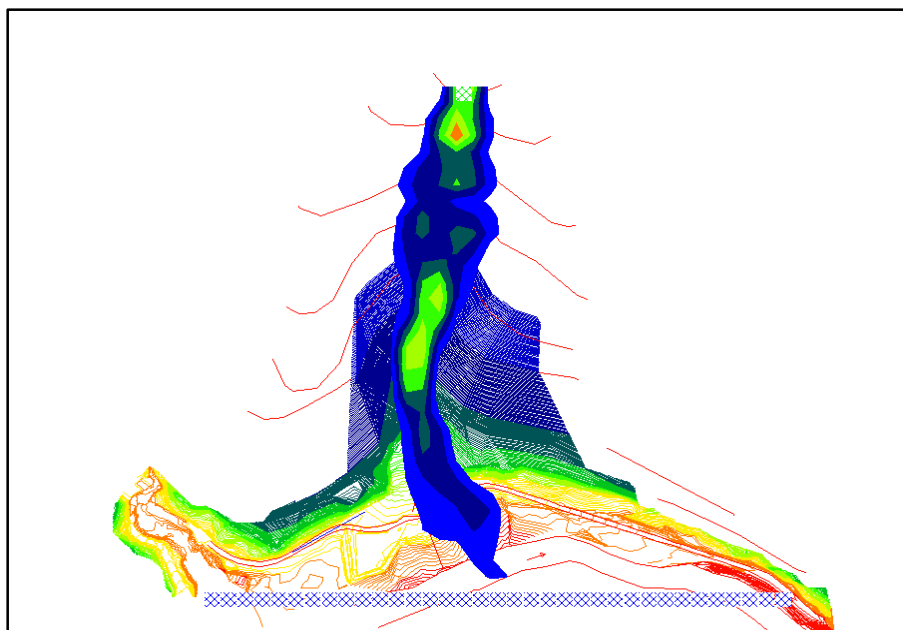


Figura 70. Contorno de velocidades flujo - periodo de retorno de 1000 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 71, representa una escala de colores donde se muestra la velocidad que alcanza el torrente, esta varia de 2.5 – 3.2 m/s.

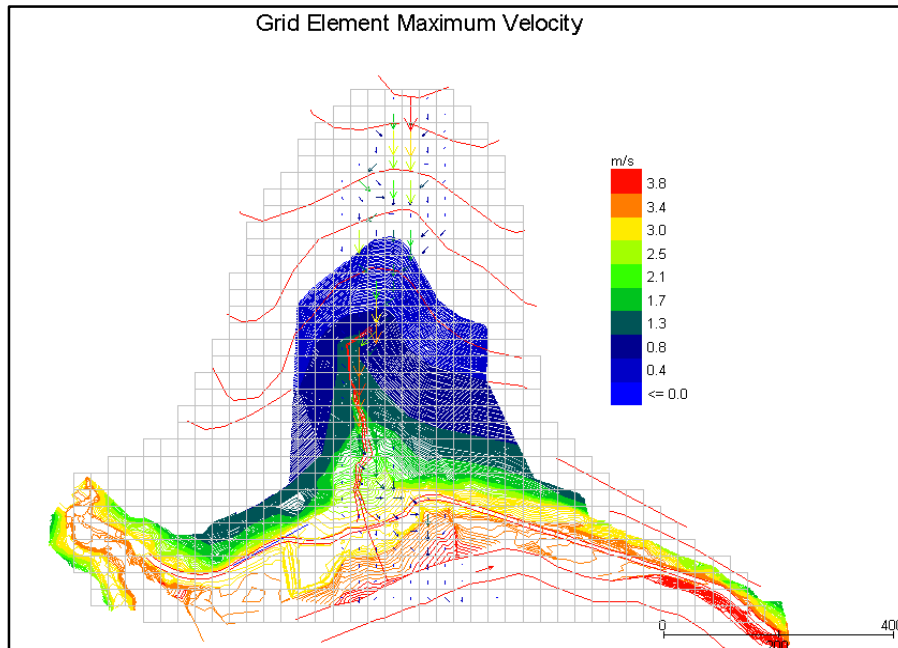


Figura 71. Velocidad de flujo máxima - periodo de retorno de 1000 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 72, representa la fuerza de impacto para cada grilla.

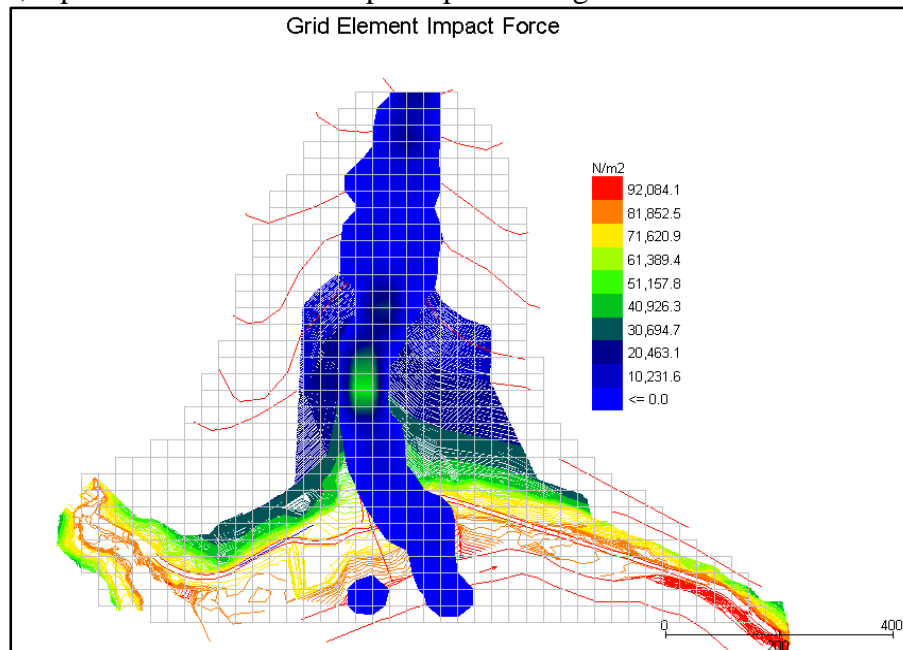


Figura 72. Fuerza de impacto - periodo de retorno de 1000 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 73, representa la presión estática del elemento de cada grilla.

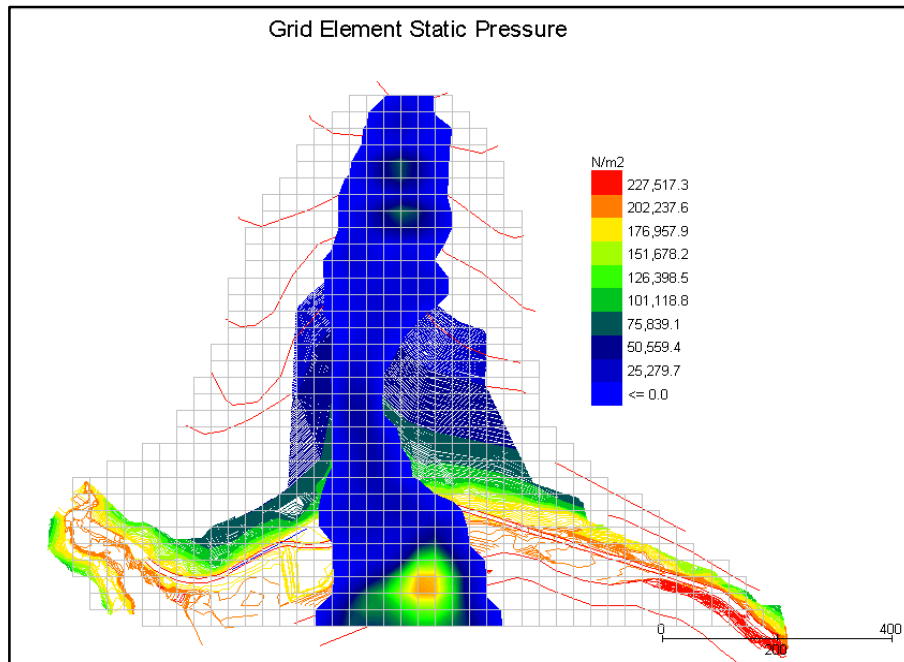


Figura 73. Presión estática - periodo de retorno de 1000 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 74, representa el tiempo del elemento por grilla.

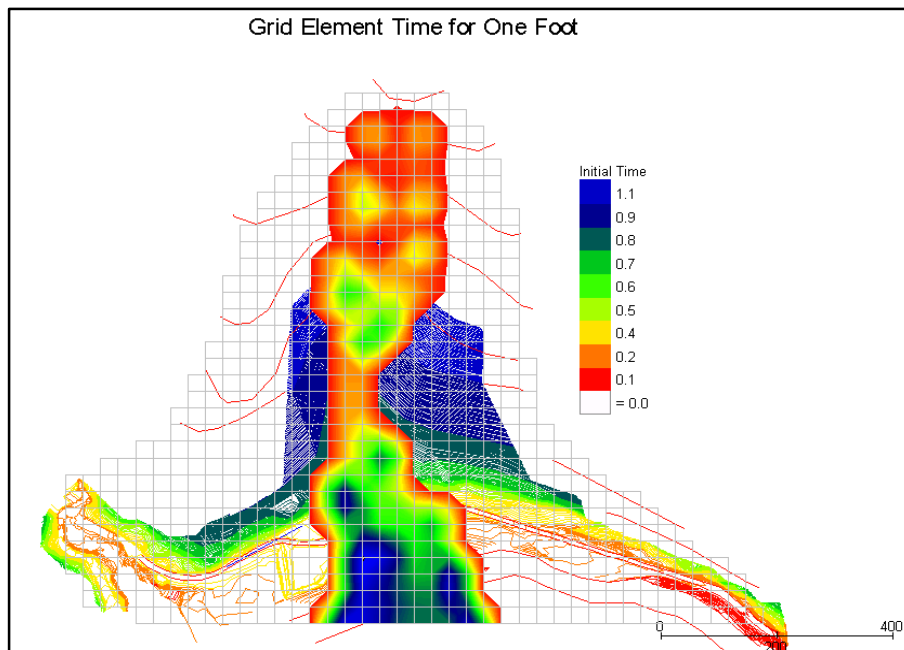


Figura 74. Tiempo de elemento de cuadrícula para un pie - periodo de retorno de 1000 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 75, expresa el peligro por el flujo de detritos de la micro cuenca Llocllamayo para un caudal de $95.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

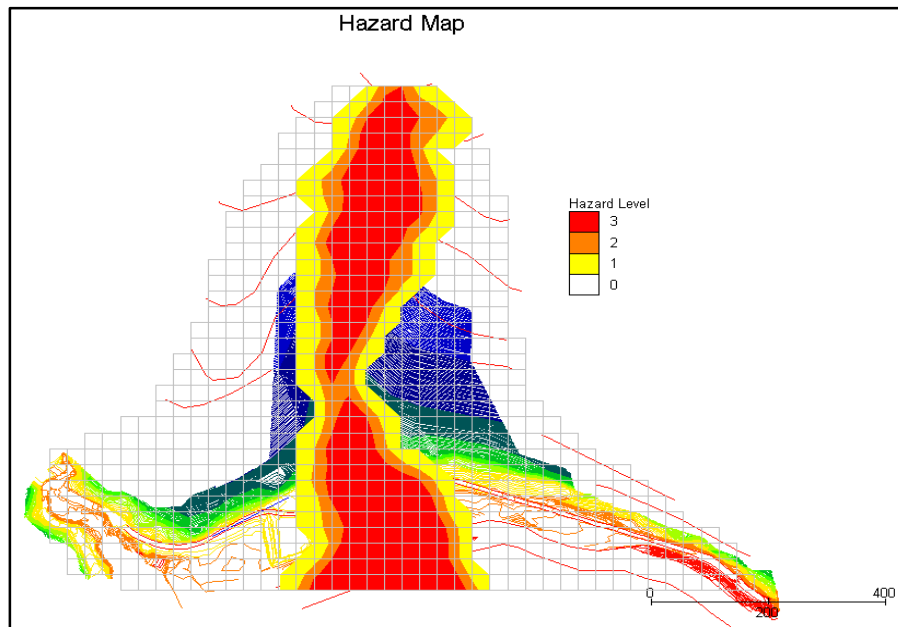


Figura 75. Mapa de peligro - periodo de retorno de 1000 años.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 76, expresa el peligro de inundación por el flujo de detritos de la micro cuenca Llocllamayo para un caudal de $95.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

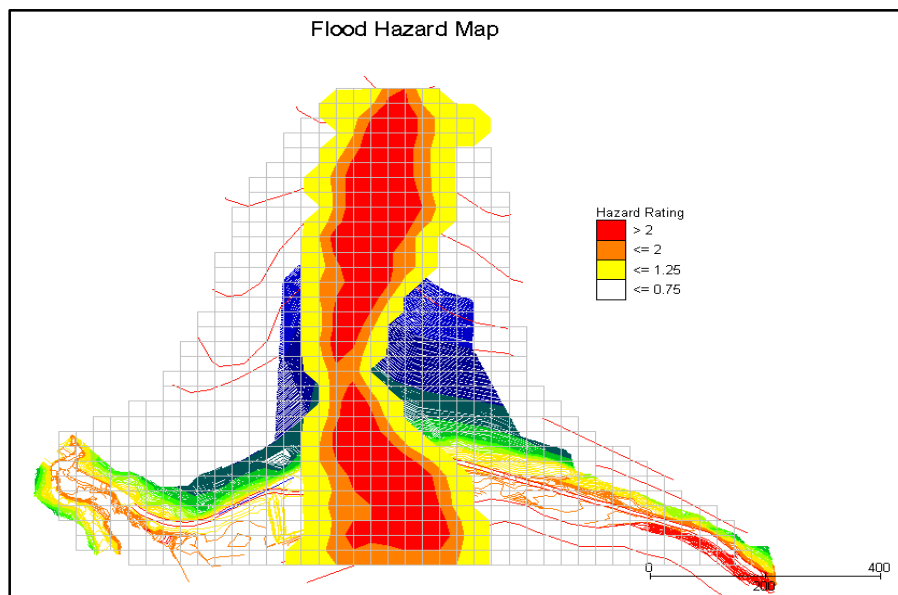


Figura 76. Mapa de peligro de inundación - periodo de retorno de 1000 años.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25

Resultados de la simulación para un caudal total de 95.85 m³/s.

Figura	Página	Interpretación del modelo	Valor	Unidad
67	140	Profundidad de deposición máxima del flujo de escombros.	2.4 - 5.2	m
71	142	Velocidad máxima del flujo que alcanza el torrente.	2.5 - 3.2	m/s
75	144	Mapa de riesgo o amenaza del torrente.		

Fuente: Elaboración propia.

Para los pronósticos en cuanto a la estimación para el periodo de retorno de 1000 años. (Tabla 25).

Figura 67 se puede observar:

- El resultado de la simulación entrega una altura de sedimentación, la cual varía desde 2.4 hasta 5.2 medida en metros.

Figura 71 se puede observar:

- En relación a las velocidades que alcanza el torrente, estas varían de 2.5 a 3.2 m/s.

Figura 75 se puede observar:

- El mapa de riesgo o amenaza indica una intensidad de peligro alta en el canal recolector para el periodo de retorno analizado.
- La figura expresa el peligro para el flujo de detritos de la micro cuenca Llocllamayo para un caudal total de 95.85 m³/s.

6.2 Discusión

La resultante de la simulación es la respuesta al procesamiento de datos obtenidos de la topografía digital (altura y profundidad simulado), caudal total a partir del caudal líquido, coeficiente de rugosidad de Manning para cada terreno, entre otros.

El modelo FLO-2D trabaja concentraciones complejas tales como los flujos de detritos, el comportamiento de las grillas para el flujo es representado según la velocidad, la altura, la densidad, asignados por el software con colores. Estos colores estandarizados son generados para los escenarios propuestos. Determinando, alturas de sedimentación máximas, velocidades máximas y mapas de peligro.

Por ejemplo, para el periodo de retorno de 100 años, el resultado de la simulación para un caudal total de $40.89 \text{ m}^3/\text{s}$. se puede observar una altura de sedimentación que varía aproximadamente de 1.30 m. a 1.90 m. con una velocidad máxima de 0.60 m/s a 1.30 m/s, haciendo coincidir la altura inicial y la velocidad máxima de simulación, con el modelo Flo-2D calculado en el “Estudio del corredor Vial Interoceánico Sur” Tramo IV: Azángaro – Puente Inambari.

El mapa de riesgo o amenaza, indica una intensidad 2 a 3 de color naranja a rojo, los cuales determinan un peligro alto en el canal recolector.

En el modelo FLO-2D, la variable de la concentración volumétrica de sedimentos (C_v) es modificada variando en el orden de 25% 35% hasta el 45% respectivamente para cada tiempo de retorno.

Experiencias al respecto sobre el tema para el estudio de la: Sub cuenca del río Shullcas (Gamion, 2014) , Río seco zona urbana - Tacna (Banda, 2015) y Quebrada Tantarará (Ecobar & Poma, 2018), han demostrado la eficacia del modelo a la hora de simular escenarios para flujo de escombros. Puesto que este software genera una infinidad de escenarios de acuerdo a los parametros caracterizados por el entorno de estudio.

En el caso de escurrimiento y sedimentos estos procesos se afirman hacia el cono de deyección de la quebrada Llocllamayo por las fuertes precipitaciones y elementos que estimulan la erosión de masas en las laderas con grandes pendientes, generando riesgo potencial en la región.

CONCLUSIONES

- 1) La simulación del modelo numérico FLO - 2D empleado en la Quebrada Llocllamayo, correspondientes a la estimación del comportamiento del flujo de escombros se observa.

Periodo de retorno 100 años, caudal 40.89 m³/s entrega los siguientes resultados:

- Altura de sedimentación, la cual varia de 1.30 a 1.90 m.
- Velocidad máxima del flujo que alcanza el torrente de 0.6 a 1.3 m/s
- Mapa de riesgo o amenaza indicando una intensidad de peligro alta en la zona de desprendimiento, el canal recolecto y en la zona de deposición, expresando el peligro para el flujo de detritos de la micro cuenca.

Periodo de retorno 500 años, caudal 77.28 m³/s entrega los siguientes resultados:

- Altura de sedimentación, la cual varia de 1.10 a 2.30 m.
- Velocidad máxima del flujo que alcanza el torrente de 2.1 a 2.9 m/s
- Mapa de riesgo o amenaza indicando una intensidad de peligro alta en la zona de desprendimiento, el canal recolecto y en la zona de deposición, expresando el peligro para el flujo de detritos de la micro cuenca.

Periodo de retorno 1000 años, caudal 95.85 m³/s entrega los siguientes resultados:

- Altura de sedimentación, la cual varia de 2.40 a 5.20 m.
- Velocidad máxima del flujo que alcanza el torrente 2.5 a 3.2 m/s.
- Mapa de riesgo o amenaza indicando una intensidad de peligro alta en la zona de desprendimiento, el canal recolecto y en la zona de

deposición, expresando el peligro para el flujo de detritos de la micro cuenca.

- 2) De acuerdo a los resultados obtenidos del modelamiento y simulación en el modelo numérico FLO – 2D para cada periodo de retorno, la propuesta para controlar el flujo de escombros en la Quebrada Llocllamayo, es construir un dique de contención de una altura de 2 m. el cual se encargará de romper la dinámica del traslado de energía, ubicado en el eje principal del cauce.
- 3) Para el control de deslizamiento en las laderas se propone instalar barreras dinámicas, las cuales son utilizadas como solución integral en la reducción a la vulnerabilidad, utilizadas en nuestro país, con capacidad de retener material originados por efectos dinámicos de flujo de detritos.
- 4) Una técnica de estabilización de laderas en la micro cuenca de la quebrada Llocllamayo, es la acción biológica con cobertura vegetal y reforestación con plantas nativas, con la finalidad de infiltrar el agua procedente de lluvia uniformemente tratando de controlar la erosión que se puede originar.
- 5) La estimación de caudales para cada periodo de retorno de estudio, se ha utilizado el software HMS, obteniendo como resultado el hietograma, el caudal líquido, dato fundamental para el software FLO – 2D, a la vez sumando el caudal solido se tiene como resultado el caudal total, dato importante para la simulación en el software FLO – 2D, y de esa manera analizar los escenarios para cada periodo de retorno.
- 6) Para simular flujo de detritos, se debe definir el hidrograma líquido, a partir del cual se calcula el caudal total, los parámetros reológicos, la concentración de sedimentos y la topografía.
- 7) El estudio de mecánica de suelos, se realiza a través de muestras representativas del área de interés, como el cono de deyección y el cauce. De las cuales sus características

son comparadas con muestras estandarizadas según el criterio O'Brien y Julien (1988), la cual en el caso de nuestra muestra es similar al de Aspen Pit 1.

- 8) El software Bidimensional FLO-2D, como instrumento para obtención y análisis de información es un gran aporte a la investigación de flujo de detritos. Puesto que genera un sin fin de escenarios, observando las características del área a estudiar y cambiando los parámetros de acuerdo a sus características.
- 9) El modelo FLO – 2D, es una herramienta importante para la elaboración de mapas de peligro por flujos de escombros, como podemos observar en los resultados de la simulación de la Quebrada Llocllamayo.
- 10) En el caso de la presente tesis se utilizó para el control de escombros, puesto que estos movimientos de ladera de tipo torrentoso constituyen el primer riesgo natural en la quebrada Llocllamayo.
- 11) Se ha observado que la precipitación máxima de 24 hr registrada en el año 2007 de 683.4 mm ha superado ampliamente a las precipitaciones máximas registradas en el periodo de estudio, por lo que se han obtenido caudales altos.
- 12) La Quebrada Llocllamayo es una quebrada joven que se encuentra en constante cambio, se ha observado que varios tramos en los taludes de las laderas en la quebrada son inestables, lo cual con la presencia de lluvias produce el arrastre de materiales y el depósito en la zona del cono de deyección de la quebrada.

RECOMENDACIONES

- 1) De acuerdo a los resultados obtenidos de la simulación FLO - 2D, se recomienda realizar una variante en el tramo de la carretera interoceánica, que comprende la quebrada Llocllamayo, la evaluación técnica y económica de la alternativa propuesta es causal de otro estudio.
- 2) De acuerdo a la propuesta para controlar el flujo de escombros en la Quebrada Llocllamayo, el diseño de la estructura del dique es causal para una siguiente etapa de investigación.
- 3) Se recomienda que los estudios de las cuencas deben tener como fin el planteamiento integral del desarrollo de esta unidad, como el control de deslizamientos; este planteamiento se realizara de acuerdo a las necesidades del lugar de estudio, con el objetivo del desarrollo de la región.
- 4) Se debe tener un registro histórico de las cuencas, esto con la finalidad de realizar un mejor estudio y detallado, a la vez contar con mayores datos para la calibración de los modelos de flujo escombros.
- 5) Se ha demostrado que el modelo bidimensional FLO - 2D, es una alternativa muy eficiente para la modelación y simulación de flujos de detritos, obteniendo resultados satisfactorios, por lo tanto, se recomienda el uso para el estudio de cuencas.
- 6) La Quebrada Llocllamayo es una cuenca joven que se encuentra en constante cambio, por lo tanto, recomendamos realizar un sistema de monitoreo de cuenca para obtener mejores resultados y calibrar el modelo numérico FLO - 2D, para aproximarnos a mejores escenarios y mejorar el diseño del dique.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, P., & Moncada, O. (2000). *Flujo y deposición de barros y escombros*. Venezuela: Universidad de Los Andes.
- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México D.F, México: LIMUSA. Obtenido de <http://webdelprofesor.ula.ve>
- Banda, M. (2015). *Análisis Comparativo de un Modelo Hidrodinámico Unidimensional para Flujo Newtonianos y no Newtonianos del Río Seco zona urbana Tacna*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna-Perú. Obtenido de <http://repositorio.unjbg.edu.pe>
- Castillo, L. (2006). *Aplicación de un Modelo Numérico de Flujos de Escombros y Lodo en una Quebrada en el Perú* (Tesis de pregrado) Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe>
- Daming, L., Hongqiang, Z., Yanqing, L., Zhen, Z., Shilong, B., Xingchen, T., . . . Xiong, M. (2019). *Hazard assessment of debris flow in Guangxi, China based on hydrodynamics mechanism*. Environmental Earth Sciences. 1-17. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8040-z>
- Ecobar, P., & Poma, V. (2018). *Análisis de Amenaza por el Transporte de Detritos Aplicado a la Quebrada de Tantará del Distrito de Tantará, Provincia de Castrovirreyna de la Región de Huancavelica*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica-Perú. Obtenido de <http://repositorio.unh.edu.pe>
- Eder, M., Barbeito, O., Ambrosino, S., Hillman, G., Moya, G., & Rodríguez, A. (2017). *Análisis y Modelo Hidráulico (2D) de Flujos Hiperconcentrados en Piedemonte Occidental de la Sierra de Ambato, Catamarca, Argentina*. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil , 16(1), 65-87. Obtenido de <https://www.scipedia.com>

- Escusa, F. (2016). *Análisis y Modelamiento de Flujos de Escombros en la Zona de Maranura La Convención-Cusco* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima-Perú. Obtenido de <http://tesispuccp.edu.pe>
- Gamion, F. (2014). *Modelo de Flujo de Escombros y Lodo Aplicando Flo - 2D, caso Sub Cuenca del Río Shullcas* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del centro del Perú, Huancayo-Perú. Obtenido de <http://repositorio.uncp.edu.pe>
- Garcia, R. (2016). *Alternativa para la Estabilización de la Quebrada Cantuta II con fines de Mitigación de huaycos*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima-Perú. Obtenido de <http://repositorio.lamolina.edu.pe>
- Heping, S., Jinzhu, M., Haichao, Y., Shuyuan, R., & Shi, Q. (2018). *Debris-flow Risk Assessment: From Catchment to Regional Scale: A Case Study from Southern Gansu Province, China*. *Ekoloji*, 28(107), 2319-2333. Obtenido de EBSCO: <http://web.a.ebscohost.com>
- Instituto del Mar del Perú, IMARPE. (s.f.). *Estudio nacional del fenómeno del niño*. (sf), IMARPE. Obtenido de <http://www.imarpe.pe>
- Luque, R., & Alva, J. (s.f.). *Estimación y Evaluación de Escombros*. *Geotecnia*, 53-57. Obtenido de <http://www.jorgealvahurtado.com>
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2008). *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje*. Obtenido de <http://transparencia.mtc.gob.pe>
- Manual de utilización del programa HEC - HMS. (s.f.). Obtenido de <https://portal.camins.upc.edu>
- Manual FLO - 2D. (2009). Obtenido de <https://www.flo-2d.com>
- Manual para la Evaluación de Riesgos originados por fenómenos naturales. (2014). Obtenido de <https://www.cenepred.gob.pe>

- Mociño, K. (2015). *La Cobertura y Uso del Suelo en la producción de Sedimentos y Escurrimientos Superficiales en la Cuenca El Tejocote, México, Mediante el Modelo Hidrológico SWAT*. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca-México. Obtenido de <https://core.ac.uk>
- Palacios, O., Molina, O., Galloso, A., & Reyna, C. (1996). *Boletín N° 81 Serie Carta Geológica Nacional, cuadrangulo Masuco*. Obtenido de <http://www.ingemmet.gob.pe>
- Rocha, A. (2007). *Problemática de las Inundaciones y Huaicos en el Perú. Exposición realizada con el motivo del Primer Symposium Inundaciones y Huycos, Organizado por el Instituto para la mitigación de los Efectos del Fenómeno de El Niño (UNI), Lima*. Perú. Obtenido de <http://repo.floodalliance.net>
- Rumi Ingenieros Geotécnicos S.A.C. (2010). *Estudio de flujo de residuos en la zona tropical de la quebrada Llocllamayo*. Perú.
- SNIRH. (2019). *SNIRH - HERRAMIENTAS SNIRH*. Obtenido de <http://snirh.ana.gob.pe>
- Suárez, J. (2001). *Control de Erosión en Zonas Tropicales*. Obtenido de <https://www.erosion.com.co>
- Suárez, J. (2004). *Deslizamientos: Análisis geotécnicos*. Obtenido de <https://www.erosion.com.co>
- Suárez, J. (2004). *Deslizamientos: Técnicas de remedación*. Obtenido de www.erosion.com.co
- Takahashi, T. (2014). *Debris Flow. Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Londres, Reino Unido. CRC Press / Balkema.
- TDM Ingeniería. (2016). *Estabilidad y contención barreras dinámicas contra huaycos Chosica*. Obtenido de <http://www.tdm.com.pe>

- Vásquez, A., Mejía, A., Faustino, J., Terán, R., Vásquez, I., Díaz, J., . . . Alcántara, j. (2016). *Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas*. Lima, Perú: UNALM. Obtenido de <https://civilgeeks.com>
- Ven Te, C., David R, M., & Larry W, M. (2000). *Hidrología aplicada*. Colombia: Nomos S.A.
- Villón Bejar, M. (2011). *Hidrológia*. Lima,perú, Perú: Editorial Villón.
- Zhang, K., & Hongjun, B. (2019). *Characteristics and influencing factors of rainfall-induced landslide and debris flow hazards in Shaanxi Province, China*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (19), 93-105. Obtenido de <http://web.a.ebscohost.com>

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia.

Matriz de consistencia.

HIPOTESIS	VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	INDICADOR	MEDICION
Hipótesis General: El modelamiento y simulación permitirá controlar el flujo de escombros de la Quebrada Llocllamayo - Puno	Variable Independiente: Quebrada	Paso estrecho entre las montañas que forman el río.	Área	m ²
	Variable Dependiente: Flujo de Escombros	La combinación de agua y sólidos producto por las descargas de precipitaciones y deslizamiento de material suelto de las laderas.	Precipitación	mm
Hipótesis Especifico 1: La simulación de escenarios numéricos para los periodos de retorno tr: 100, 500 y 1000 presentan la ocurrencia de un evento extraordinario.	Variable independiente: Tiempo de retorno	Ocurrencia estadística de un evento en un determinado tiempo.	Caudal	m ³ /s
	Variable Dependiente: Evento determinado	Probabilidad de derrumbes de las laderas del material inestable.	Tiempo	años
Hipótesis Especifico 2: El planteamiento de medidas permitirá el control de flujo de escombros	Variable Independiente: Planteamiento de medidas	Propuestas de solución para el control de flujo de escombros.	Dique	unid
	Variable Dependiente: Control de Flujo	Se refiere a las alternativas de solución para mejorar el caudal total.	Caudal	m ³ /s

Fuente : (Elaboración Propia, 2019)

Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables.

Matriz de operacionalización de variables.

HIPOTESIS	VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	INDICADOR	MEDICION
Hipótesis General: El modelamiento y simulación permite controlar el flujo de escombros de la sub cuenca de la Quebrada Tambo - Puno	Variable Independiente: Quebrada	Paso estrecho entre las montañas que forman el río.	Área	m ²
	Variable Dependiente: Flujo de Escombros	La combinación de agua y sólidos producto por las descargas de precipitaciones y deslizamiento de material suelto de las laderas.	Precipitación	mm
Hipótesis Específico 1: La simulación de escenarios numéricos para los tiempos de retorno tr: 100, 500 y 1000 presentan la ocurrencia de un evento extraordinario.	Variable independiente: Tiempo de retorno	Ocurrencia estadística de un evento en un determinado tiempo.	Caudal	m ³ /s
	Variable Dependiente: Evento determinado	Probabilidad de derrumbes de las laderas del material inestable.	Tiempo	años
Hipótesis Específico 2: El planteamiento de medidas permite el control de flujo de escombros	Variable Independiente: Planteamiento de medidas	Propuestas de solución para el control de flujo de escombros.	Dique	unid
	Variable Dependiente: Control de Flujo	Se refiere a las alternativas de solución para mejorar el caudal total.	Caudal	m ³ /s

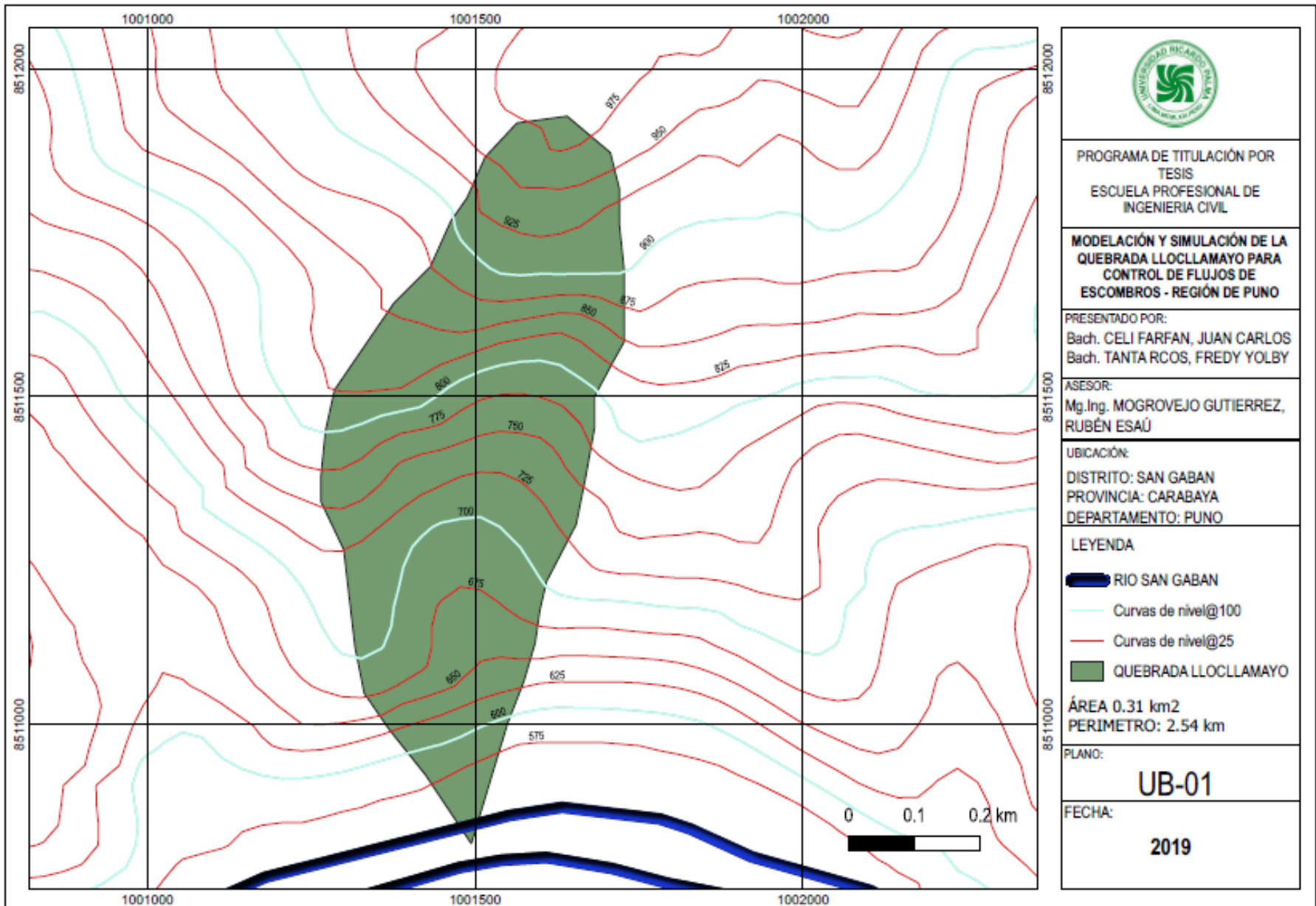
Fuente : (Elaboración Propia, 2019)

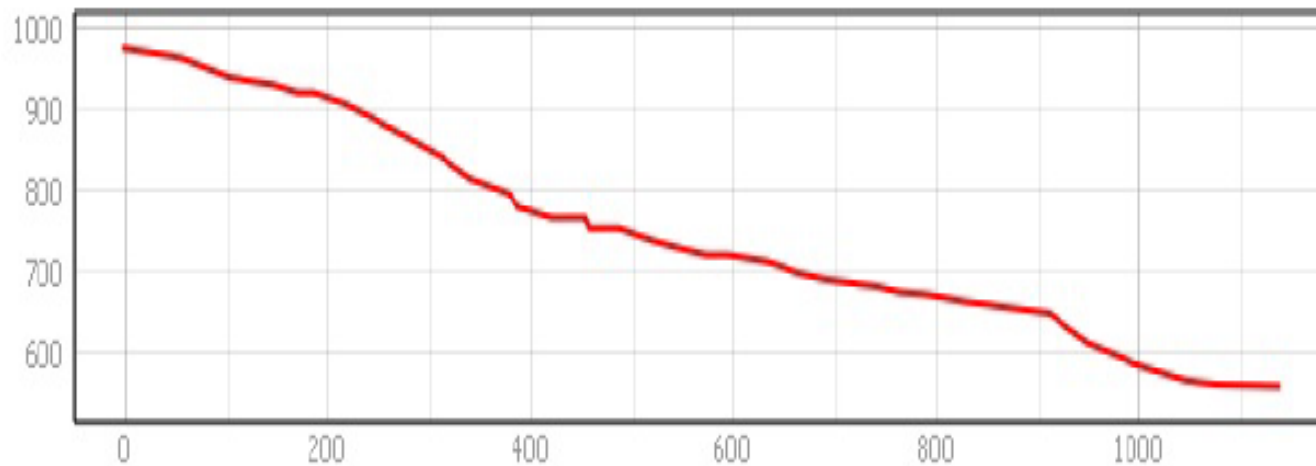
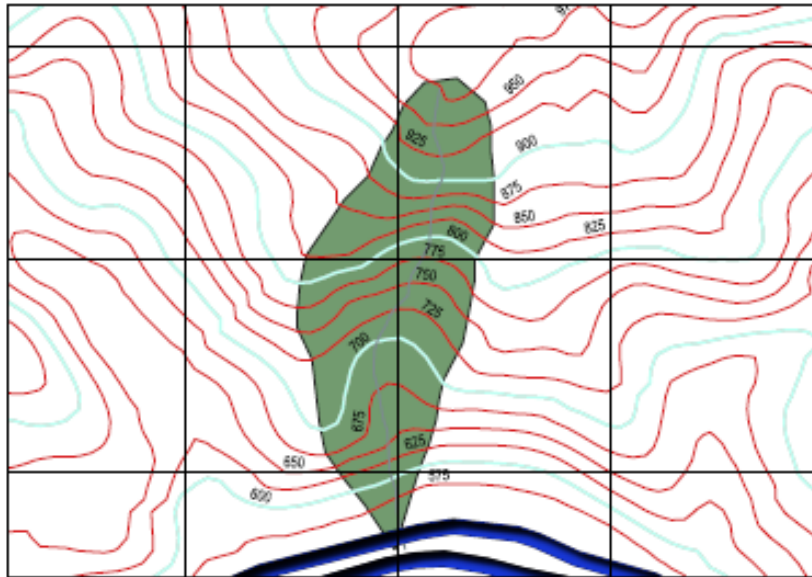
Anexo 3: Planos

Plano UB-01: Plano de ubicación.

Plano PR-01: Plano de pendiente.

Plano SE-01: Plano de secciones.





PROGRAMA DE TITULACIÓN POR
TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA CIVIL

**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE LA
QUEBRADA LLOCLLAMAYO PARA
CONTROL DE FLUJOS DE
ESCOMBROS - REGIÓN DE PUNO**

PRESENTADO POR:

Bach. CELI FARFAN, JUAN CARLOS
Bach. TANTARCOS, FREDY YOLBY



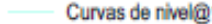
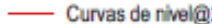

ASESOR:

Mg.Ing. MOGROVEJO GUTIERREZ,
RUBÉN ESAÚ

UBICACIÓN:

DISTRITO: SAN GABAN
PROVINCIA: CARABAYA
DEPARTAMENTO: PUNO

LEYENDA

-  RIO SAN GABAN
-  longitud de cauce_quebrada Llocllamayo
-  Curvas de nivel@100
-  Curvas de nivel@25
-  **AREA QUEBRADA LLOCLLAMAYO**
PERIMETRO: 2.54 km

PLANO:

PR - 01

FECHA:

2019



PROGRAMA DE TITULACIÓN POR
TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA CIVIL

**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE LA
QUEBRADA LLOCLLAMAYO PARA
CONTROL DE FLUJOS DE
ESCOMBROS - REGIÓN DE PUNO**

PRESENTADO POR:

Bach. CELI FARFAN, JUAN CARLOS
Bach. TANTA RCOS, FREDY YOLBY

ASESOR:

Mg.Ing. MOGROVEJO GUTIERREZ,
RUBÉN ESAÚ

UBICACIÓN:

DISTRITO: SAN GABAN
PROVINCIA: CARABAYA
DEPARTAMENTO: PUNO

LEYENDA

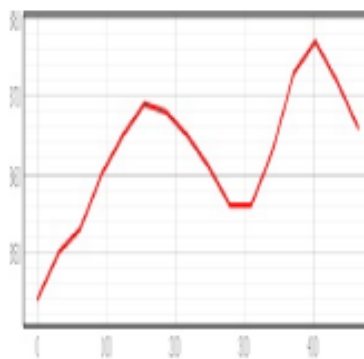
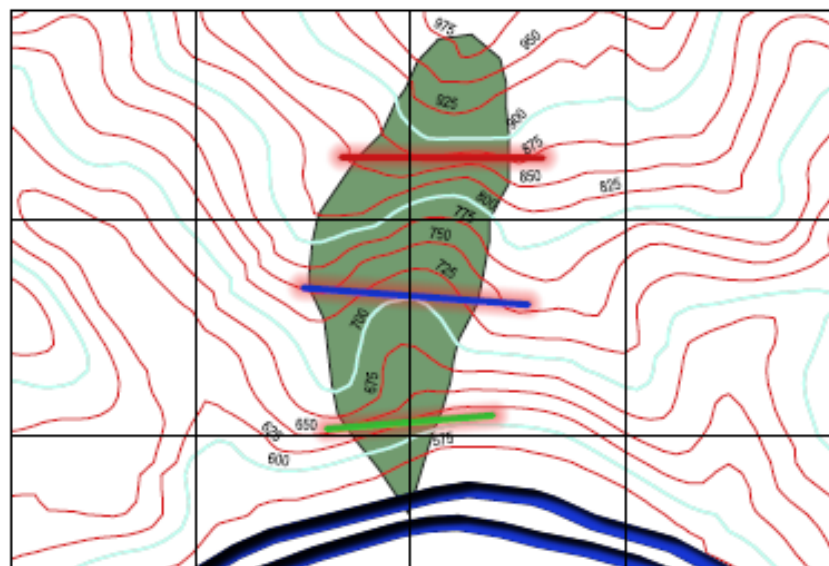
-  RIO SAN GABAN
-  SECCION C
-  SECCION B
-  SECCION A
-  Curvas de nivel@100
-  Curvas de nivel@25

PLANO:

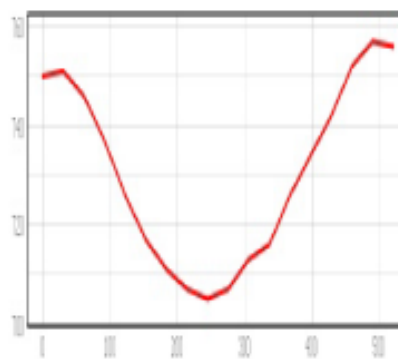
SE - 01

FECHA:

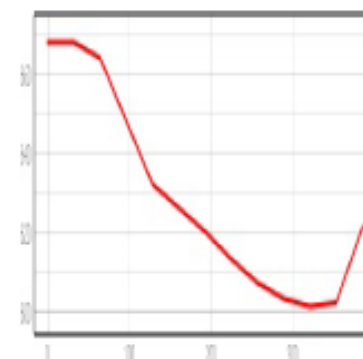
2019



SECCIÓN - A



SECCIÓN - B



SECCIÓN - C

Anexo 4: Ensayos de laboratorio.

ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACIÓN Y ENSAYOS DE CONTENIDO DE HUMEDAD – Información extraída del “Estudio de Flujo de Residuos en la Zona Tropical de la Quebrada Llocllamayo”, 2010.



LABORATORIO GEOTECNICO

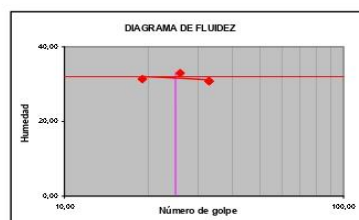
ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACIÓN

COD. PROY.: RU4608
PROYECTO: ESTUDIO DEL CORREDOR VIAL INTEROCEANICO SUR TRAMO 4:
 AZANGARO-PUENTE INAMBARÍ
SOLICITANTE: INTERSUR
UBICACIÓN: QDA. LLOCLLAMAYO PG 295+395 M II
SONDAJE:
MUESTRA: M-II
PROFUNDIDAD: Superficial

F. de Ejecución: 27/12/2008

Realizado: Téc. R.V.L.
Revisado: Ing. Y. A. B.

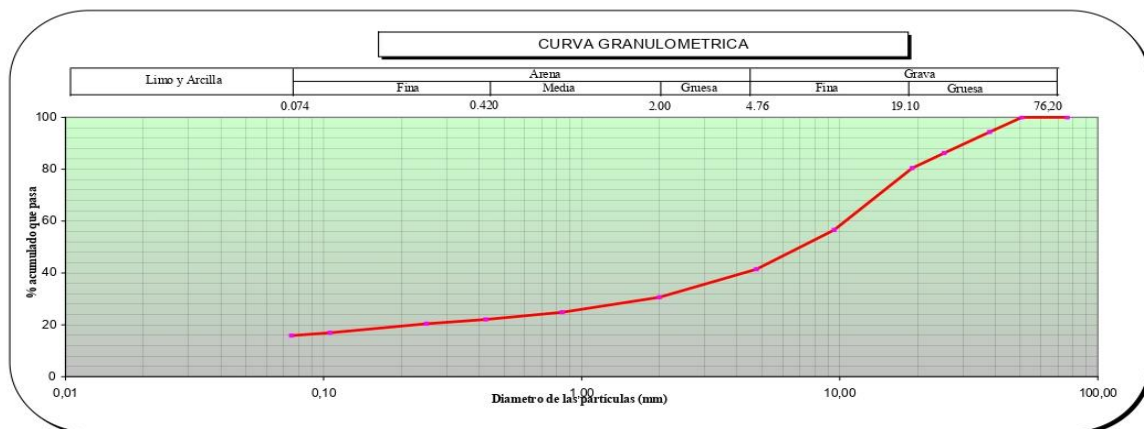
Granulometría por Tamizado; ASTM D422		
Malla		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
3 "	76,200	100,0
2 "	50,800	100,0
1 1/2 "	38,100	94,3
1 "	25,400	86,2
3/4"	19,100	80,5
3/8"	9,520	56,6
N° 4	4,760	41,4
N° 10	2,000	30,6
N° 20	0,840	24,9
N° 40	0,425	22,0
N° 60	0,250	20,4
N° 140	0,106	17,0
N° 200	0,075	15,9



Límites de Consistencia			
Límite Líquido (LL)	ASTM-D4318	(%)	32
Límite Plástico (LP)	ASTM-D4318	(%)	22
Índice Plástico (IP)		(%)	10

Clasificación; ASTM - D2487 / D3282	
Clasificación (S.U.C.S.)	GC
Clasificación (AASHTO)	A-2-4
Índice de Grupo	0
Nombre de grupo:	Grava arcillosa con arena

Distribución Granulométrica			
% Grava	Grava Gruesa		19,5
	Grava Fina		58,6
% Arena	Arena Gruesa		10,8
	Arena Media		8,6
	Arena fina		25,6
% Finos			15,9



Observaciones: _____

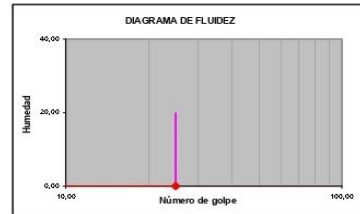
ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACIÓN

COD. PROY. : RU4608
PROYECTO : ESTUDIO DEL CORREDOR VIAL INTEROCEANICO SUR TRAMO 4:
 AZANGARO-PUENTE INAMBAR!
SOLICITANTE : INTERSUR
UBICACIÓN : QDA. LLOCLLAMAYO PG 295+430 M III
SONDAJE :
MUESTRA : M-II
PROFUNDIDAD: Superficial

F. de Ejecución: 27/12/2008

Realizado : Téc. R.V.L.
Revisado : Ing. Y. A. B.

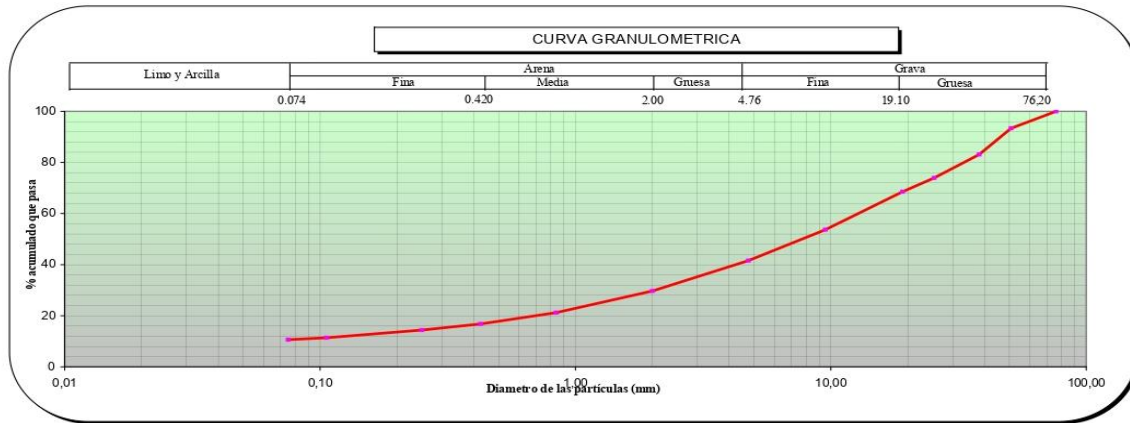
Granulometría por Tamizado; ASTM D422		
Malla		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
3"	76,200	100,0
2"	50,800	93,4
1 1/2"	38,100	83,1
1"	25,400	74,0
3/4"	19,100	68,5
3/8"	9,520	53,7
N° 4	4,760	41,6
N° 10	2,000	29,7
N° 20	0,840	21,2
N° 40	0,425	16,8
N° 60	0,250	14,4
N° 140	0,106	11,4
N° 200	0,075	10,6



Límites de Consistencia			
Límite Líquido (LL)	ASTM-D4318	(%)	-
Límite Plástico (LP)	ASTM-D4318	(%)	NP
Índice Plástico (IP)		(%)	-

Clasificación: ASTM - D2487 / D3282
 Clasificación (S.U.C.S.) : GP - GM
 Clasificación (AASHTO) : A-1-a
 Índice de Grupo : 0
Nombre de grupo: Grava pobremente gradada con limo y arena

Distribución Granulométrica			
% Grava	Grava Gruesa	31,5	58,4
	Grava Fina	27,0	
% Arena	Arena Gruesa	11,9	31,0
	Arena Media	12,9	
	Arena fina	6,2	
% Finos		10,6	



Observaciones: _____

**CONTENIDO DE HUMEDAD
ASTM D-2216**

COD. PROY. : RU4608
PROYECTO : ESTUDIO DEL CORREDOR VIAL INTEROCEANICO SUR
 TRAMO 4. ZANGARO-PUENTE INAMBARI
SOLICITANTE : INTERSUR
UBICACIÓN : QDA. LLOCLLAMAYO PG 295+395
SONDAJE :
MUESTRA : M-II
PROFUNDIDAD (m) : Superficial

Fecha de ejecución : 27/12/2008
Realizado : R.V.L
Revisado : Y.A.B

Tamaño máximo		3/4"	
Peso de tara	(g)	362,9	491,4
Peso tara + muestra húmeda	(g)	3688,6	3358
Peso tara + muestra seca	(g)	3257,9	3002,4
Peso de agua	(g)	430,7	355,6
Peso de suelo seco	(g)	2895	2511
Contenido de humedad	(%)	14,9	14,2
Contenido de humedad Promedio	(%)	14,5	

Comentarios del Ensayo:

- El peso de la muestra cumple con lo especificado en la Norma

Observaciones:

**CONTENIDO DE HUMEDAD
ASTM D-2216**

COD. PROY. : RU4608
PROYECTO : ESTUDIO DEL CORREDOR VIAL INTEROCEANICO SUR
 TRAMO 4. ZANGARO-PUENTE INAMBARÍ
SOLICITANTE : INTERSUR
UBICACIÓN : QDA. LLOCLLAMAYO PG 295+430
SONDAJE :
MUESTRA : M-III
PROFUNDIDAD (m) : Superficial

Fecha de ejecución : 27/12/2008
Realizado : R.V.L
Revisado : Y.A.B

Tamaño máximo		3/4"	
Peso de tara	(g)	416,8	477
Peso tara + muestra húmeda	(g)	4367,7	3943,9
Peso tara + muestra seca	(g)	3799,7	3462,6
Peso de agua	(g)	568	481,3
Peso de suelo seco	(g)	3382,9	2985,6
Contenido de humedad	(%)	16,8	16,1
Contenido de humedad Promedio	(%)	16,5	

Comentarios del Ensayo:

- El peso de la muestra cumple con lo especificado en la Norma

Observaciones:

Anexo 5: Análisis Hidrológico

5.1 Registro de precipitaciones máximas 24 horas (P24)

Los datos pluviométricos de la estación San Gaban fueron recogidos del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos - snirh.ana.gob.pe de la página web de la Autoridad Nacional del Agua - <http://snirh.ana.gob.pe/consultassnirh/oHerramientasSnirh.aspx>

5.2 Análisis de precipitación máxima en 24 horas – Estación San Gabán

Nº	AÑO	P24	Log(P24)
1	1997	135.1	2.1307
2	1998	195.0	2.2900
3	1999	365.7	2.5631
4	2000	221.0	2.3444
5	2001	224.6	2.3514
6	2002	278.9	2.4454
7	2003	112.6	2.0515
8	2004	112.9	2.0527
9	2005	234.0	2.3692
10	2006	150.4	2.1772
11	2007	683.4	2.8347
12	2008	428.2	2.6316
13	2009	207.9	2.3179
14	2010	126.9	2.1035
15	2011	187.6	2.2732
16	2012	268.0	2.4281
17	2013	124.0	2.0934
18	2014	160.3	2.2049
19	2015	246.3	2.3915
20	2016	118.2	2.0726
21	2017	150.4	2.1772

Numero de datos n	21	21
Suma Σ	4731.4	48.3045
Máximo	683.4	2.8347
Mínimo	112.6	2.0515
Promedio \bar{x}	225.3	2.3002
Desviación estándar s	133.9666	0.2056
Coficiente asimetría Cs	2.2867	0.9250
Cs/6 k	0.3811	0.1542

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

PRUEBA DE DATOS DUDOSOS

$$n = 21$$

$$Kn = 2.768 \quad (\text{Referencia: Tabla 12.5.3 - Hidrología Aplicada, Ven Te Chow}).$$

Umbral de datos dudosos altos

$$y_H = \bar{y} + Kn \cdot s$$

$$y_H = 2.8693$$

$$QH = 740.1$$

El mayor valor registrado 683.4, no excede el valor del umbral. La muestra no contiene datos dudosos altos.

Umbral de datos dudosos bajos

$$y_L = \bar{y} - Kn \cdot s$$

$$y_L = 1.7311$$

$$QL = 53.8$$

El menor valor registrado 112.9, es superior al valor del umbral. La muestra no contiene datos dudosos bajos.

5.3 Análisis estadístico: prueba de la bondad del ajuste - grafica de probabilidades

N	NORMAL		GUMBEL		LOG NORMAL		PEARSON III		LOG PEARSON III	
	K _T	Esperado	K _T	Esperado	K _T	Esperado	K _T	Esperado	K _T	Esperado
1	1.6906	451.8	1.9420	485.5	1.6906	444.4	2.0771	503.6	1.9292	497.5
2	1.3352	404.2	1.3827	410.5	1.3352	375.6	1.3484	405.9	1.4092	389.0
3	1.0968	372.2	1.0470	365.6	1.0968	335.5	0.9340	350.4	1.0863	333.8
4	0.9085	347.0	0.8022	332.8	0.9085	306.9	0.6458	311.8	0.8455	297.9
5	0.7479	325.5	0.6068	306.6	0.7479	284.4	0.4258	282.3	0.6497	271.5
6	0.6046	306.3	0.4421	284.5	0.6046	265.8	0.2484	258.6	0.4825	250.8
7	0.4728	288.6	0.2983	265.3	0.4728	249.7	0.1003	238.7	0.3346	233.9
8	0.3488	272.0	0.1691	248.0	0.3488	235.5	-0.0266	221.7	0.2005	219.5
9	0.2299	256.1	0.0507	232.1	0.2299	222.6	-0.1373	206.9	0.0767	207.0
10	0.1142	240.6	-0.0597	217.3	0.1142	210.7	-0.2353	193.8	-0.0397	195.9
11	0.0000	225.3	-0.1643	203.3	0.0000	199.6	-0.3231	182.0	-0.1505	185.9
12	-0.1142	210.0	-0.2647	189.8	-0.1142	189.1	-0.4023	171.4	-0.2574	176.7
13	-0.2299	194.5	-0.3625	176.7	-0.2299	179.0	-0.4744	161.8	-0.3617	168.2
14	-0.3488	178.6	-0.4590	163.8	-0.3488	169.2	-0.5403	152.9	-0.4649	160.2
15	-0.4728	162.0	-0.5557	150.9	-0.4728	159.6	-0.6008	144.8	-0.5683	152.5
16	-0.6046	144.3	-0.6542	137.7	-0.6046	149.9	-0.6564	137.4	-0.6734	145.1
17	-0.7479	125.1	-0.7566	124.0	-0.7479	140.1	-0.7075	130.5	-0.7823	137.8
18	-0.9085	103.6	-0.8659	109.3	-0.9085	129.9	-0.7543	124.3	-0.8980	130.5
19	-1.0968	78.4	-0.9875	93.0	-1.0968	118.8	-0.7964	118.6	-1.0252	122.9
20	-1.3352	46.4	-1.1320	73.7	-1.3352	106.1	-0.8331	113.7	-1.1735	114.5
21	-1.6906	-1.2	-1.3299	47.1	-1.6906	89.7	-0.8611	109.9	-1.3698	104.4

Fuente: Elaboración propia

5.4 Análisis de Bondad - Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov – Smirnov

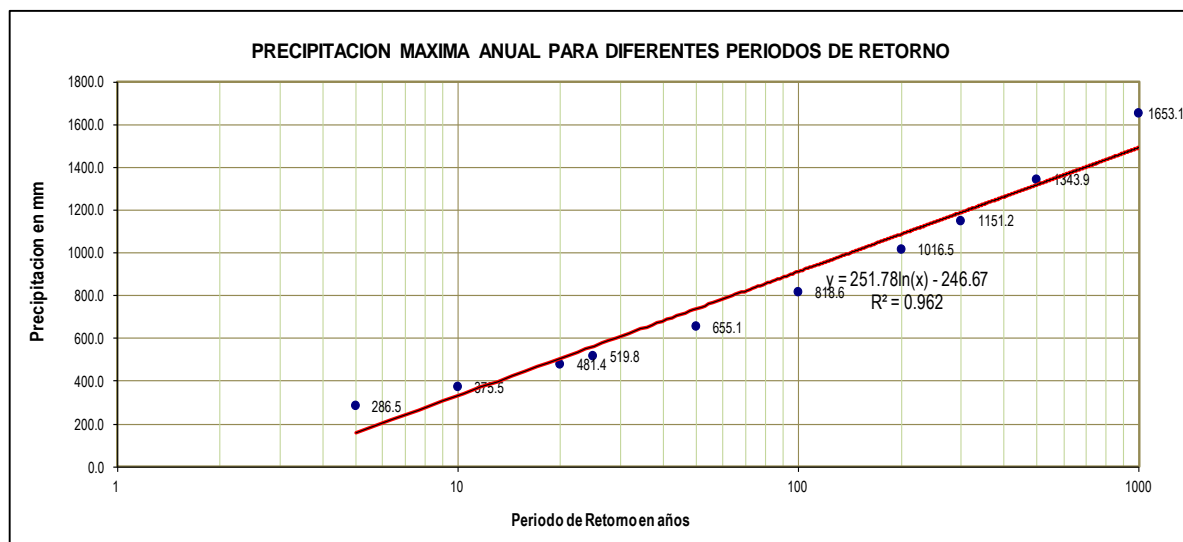
m	x_m	$F_o(x_m)$	$F(x_m)$ Normal	$ F_o(x_m)-F(x_m) $ Normal	$F(y_m)$ Pearson III	$ F_o(y_m)-F(y_m) $ Pearson III	$F(y_m)$ Log Pearson III	$ F_o(y_m)-F(y_m) $ Log Pearson III	$F(x_m)$ GEV I	$ F_o(x_m)-F(x_m) $ GEV I
1	683.40	0.954545	0.99968629	0.04514	0.9865	0.0319	0.9825	0.0279	0.993	0.0385
2	428.20	0.909091	0.93505313	0.02596	0.9204	0.0113	0.9299	0.0208	0.9227	0.0136
3	365.70	0.863636	0.85267767	0.01096	0.8757	0.0121	0.892	0.0284	0.8638	0.0002
4	278.90	0.818182	0.65544537	0.16274	0.7663	0.0519	0.786	0.0322	0.7145	0.1036
5	268.00	0.772727	0.62502322	0.14770	0.7466	0.0262	0.765	0.0077	0.6886	0.0841
6	246.30	0.727273	0.56226722	0.16501	0.7018	0.0255	0.7154	0.0119	0.6318	0.0955
7	234.00	0.681818	0.52587558	0.15594	0.6727	0.0091	0.6818	0	0.5965	0.0853
8	224.60	0.636364	0.49790128	0.13846	0.6483	0.0119	0.653	0.0167	0.5682	0.0682
9	221.00	0.590909	0.48718295	0.10373	0.6384	0.0475	0.6413	0.0504	0.5571	0.0338
10	207.90	0.545455	0.44831539	0.09714	0.5998	0.0543	0.5945	0.049	0.5152	0.0303
11	195.00	0.500000	0.41051853	0.08948	0.5571	0.0571	0.5419	0.0419	0.4722	0.0278
12	187.60	0.454545	0.38918303	0.06536	0.5302	0.0757	0.5086	0.0541	0.4468	0.0077
13	160.30	0.409091	0.31375621	0.09533	0.4124	0.0033	0.3655	0.0435	0.3513	0.0578
14	150.40	0.363636	0.28803646	0.07560	0.3604	0.0033	0.3065	0.0571	0.3166	0.047
15	150.40	0.318182	0.28803646	0.03015	0.3604	0.0422	0.3065	0.0116	0.3166	0.0016
16	135.10	0.272727	0.25036624	0.02236	0.2663	0.0064	0.2114	0.0613	0.2641	0.0087
17	126.90	0.227273	0.23130772	0.00403	0.2064	0.0209	0.161	0.0663	0.2368	0.0096
18	124.00	0.181818	0.2247664	0.04295	0.183	0.0012	0.1437	0.0381	0.2274	0.0456
19	118.20	0.136364	0.2120036	0.07564	0.1313	0.005	0.1106	0.0258	0.209	0.0726
20	112.90	0.090909	0.20072045	0.10981	0.0752	0.0157	0.0828	0.0081	0.1926	0.1017
21	112.60	0.045455	0.20009275	0.15464	0.0716	0.0262	0.0813	0.0358	0.1917	0.1463
X	225.30									
S	133.97									
CS	2.287									
n	21		$\Delta_{\text{máx}}$	0.16501		0.07570		0.06630		0.14630
α	0.05		$\Delta_{\text{crítico}} > \Delta_{\text{máx}}$	Si se ajusta		Si se ajusta		Si se ajusta		Si se ajusta
$\Delta_{\text{crítico}}$	0.28843		Mejor Ajuste	5		2		1		4

Fuente: Elaboración propia

5.5 Precipitaciones máximas 24h

ESTACIÓN SAN GABAN														
		Promedio :		x = 225.3048		y = 2.3002								
		Desviación estándar :		s = 133.9666		sy = 0.2056								
		Cs/6 :		k = 0.3811		k = 0.1542								
Tr (años)	P(X≤x _T)	DISTRIB. NORMAL		DISTRIB. GUMBEL		DISTRIB. LOGNORMAL			DISTRIB. PEARSON III		DISTRIB. LOG PEARSON III			P _{MAX} mm
		K _T	x _T	K _T	x _T	K _T	x _T	10 ^x x _T	K _T	x _T	K _T	Xt	10 ^x x _T	
2	0.500	0.0000	225.3	-0.1643	203.3	0.00	2.3002	199.6	-0.3231	182.0	-0.1505	2.2693	185.9	185.9
3	0.667	0.4307	283.0	0.2538	259.3	0.43	2.3888	244.8	0.0559	232.8	0.2886	2.3595	228.8	228.8
5	0.800	0.8416	338.1	0.7195	321.7	0.84	2.4732	297.3	0.5514	299.2	0.7629	2.4571	286.5	286.5
10	0.900	1.2816	397.0	1.3046	400.1	1.28	2.5637	366.2	1.2502	392.8	1.3347	2.5746	375.5	375.5
20	0.950	1.6449	445.7	1.8658	475.3	1.64	2.6384	434.9	1.9755	490.0	1.8596	2.6825	481.4	481.4
25	0.960	1.7507	459.8	2.0438	499.1	1.75	2.6601	457.2	2.2142	521.9	2.0218	2.7159	519.8	519.8
50	0.980	2.0537	500.4	2.5923	572.6	2.05	2.7224	527.8	2.9708	623.3	2.5103	2.8163	655.1	655.1
100	0.990	2.3263	537.0	3.1367	645.5	2.33	2.7785	600.5	3.7491	727.6	2.9809	2.9130	818.6	818.6
200	0.995	2.5758	570.4	3.6791	718.2	2.58	2.8298	675.7	4.5476	834.5	3.4384	3.0071	1016.5	1016.5
300	0.997	2.7131	588.8	3.9959	760.6	2.71	2.8580	721.1	5.0237	898.3	3.7012	3.0611	1151.2	1151.2
500	0.998	2.8782	610.9	4.3947	814.0	2.88	2.8919	779.7	5.6325	979.9	4.0282	3.1284	1343.9	1343.9
1000	0.999	3.0902	639.3	4.9355	886.5	3.09	2.9355	862.0	6.4742	1092.6	4.4657	3.2183	1653.1	1653.1

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

5.6 Precipitación de diseño para duración de 1 hora

T	P.Max	Duración en minutos					
		24 horas	5	10	15	20	30
1000	1868.04	55.9	83.6	102.3	116.7	138.8	182.3
500	1518.58	51.8	77.5	94.7	108.0	128.5	168.8
200	1148.63	46.3	69.3	84.7	96.7	115.0	151.0
100	924.96	42.2	63.1	77.2	88.0	104.7	137.5
50	740.24	38.0	56.9	69.6	79.4	94.5	124.1
25	587.41	33.9	50.8	62.1	70.8	84.2	110.6
10	424.32	28.5	42.6	52.1	59.4	70.7	92.2
5	323.70	24.3	36.4	44.5	50.8	60.4	79.4
3	258.59	21.3	31.9	39.0	44.4	52.9	69.4
2	210.06	18.9	28.2	34.5	39.4	46.9	61.6

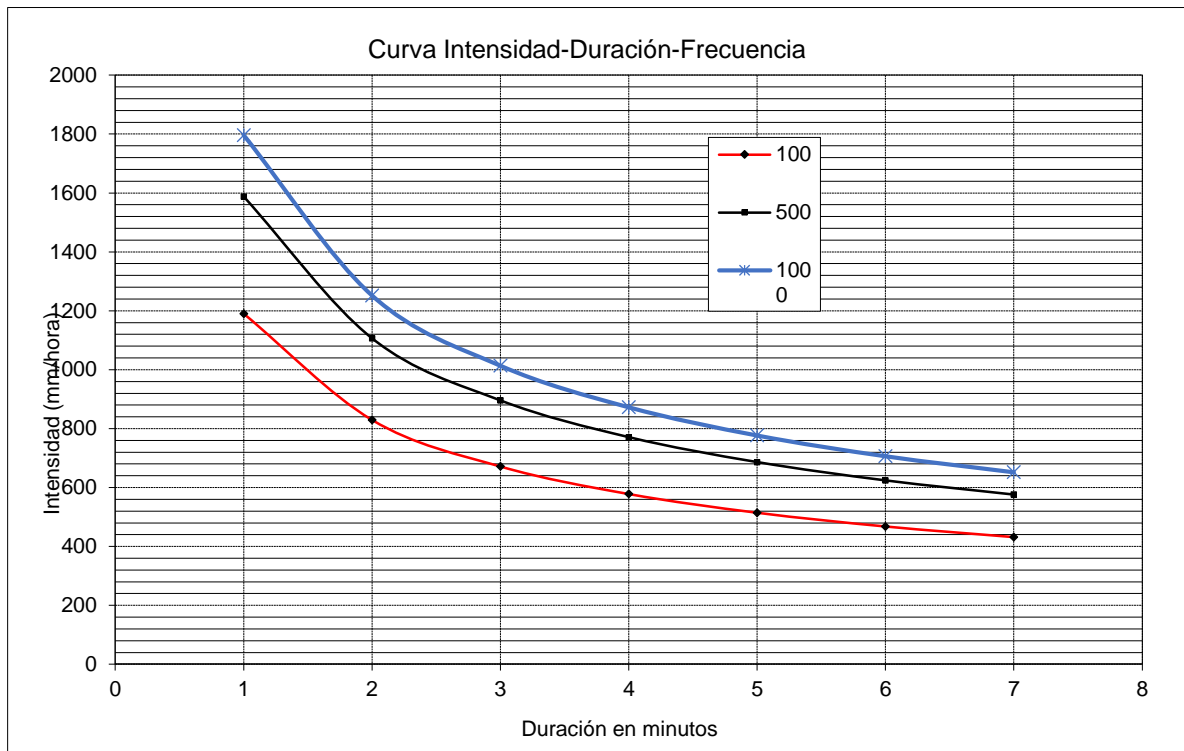
Fuente: Elaboración propia

5.7 Intensidades máximas (mm/hr)

T	P.Max	Duración en minutos					
		24 horas	5	10	15	20	30
1000	1868.04	670.5	501.9	409.0	350.0	277.6	182.3
500	1518.58	621.0	464.8	378.8	324.1	257.1	168.8
200	1148.63	555.5	415.8	338.9	290.0	230.0	151.0
100	924.96	506.0	378.7	308.7	264.1	209.5	137.5
50	740.24	456.5	341.6	278.5	238.3	189.0	124.1
25	587.41	406.9	304.6	248.2	212.4	168.5	110.6
10	424.32	341.5	255.6	208.3	178.2	141.4	92.2
5	323.70	291.9	218.5	178.1	152.4	120.9	79.4
3	258.59	255.4	191.2	155.8	133.3	105.8	69.4
2	210.06	226.5	169.5	138.1	118.2	93.8	61.6

Fuente: Elaboración propia

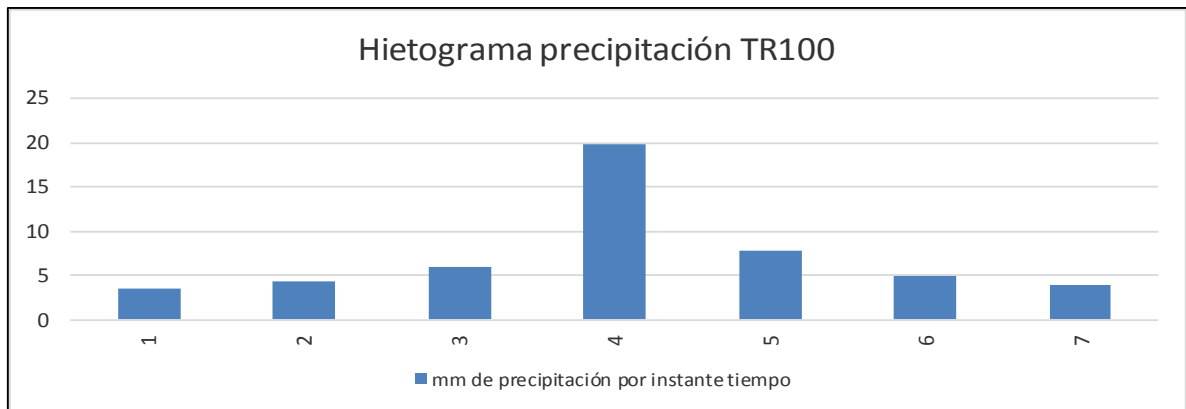
5.8 Curva IDF



Fuente: Elaboración propia

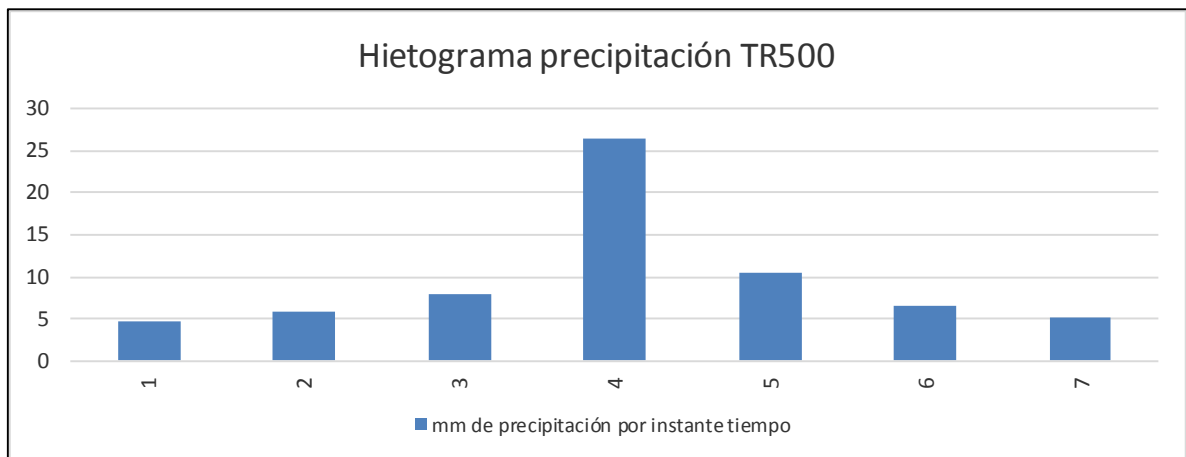
5.9 Hietograma

Tiempo de retorno 100 años



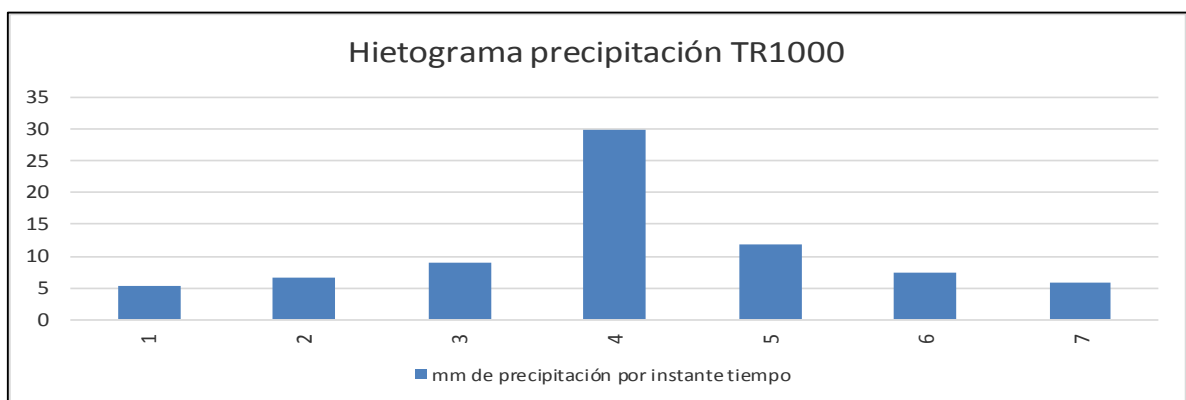
Fuente: Elaboración propia

Tiempo de retorno 500 años



Fuente: Elaboración propia

Tiempo de retorno 1000 años



Fuente: Elaboración propia

Anexo 6: Panel fotográfico

Fotografía frontal de la quebrada Llocllamayo



Fuente: Informe - Estudio del flujo de residuos en la zona tropical de la quebrada Llocllamayo.

Material acumulado en la parte frontal de la quebrada Llocllamayo.



Fuente: Informe - Estudio del flujo de residuos en la zona tropical de la quebrada Llocllamayo.

Se observa los surcos dejados por el flujo de material por producto de lluvias.



Fuente: Informe - Estudio del flujo de residuos en la zona tropical de la quebrada Llocllamayo.

Se aprecia una zona con desprendimiento de masas, geometría del canal con una escorrentía de flujo granular, producto de las lluvias y la pendiente de la quebrada Llocllamayo.



Fuente: Informe - Estudio del flujo de residuos en la zona tropical de la quebrada Llocllamayo.

Fotografía de la zona de descarga de la quebrada Llocllamayo,



Fuente: Informe - Estudio del flujo de residuos en la zona tropical de la quebrada Llocllamayo.

Panorámica del cono de deyección.



Fuente: Informe - Estudio del flujo de residuos en la zona tropical de la quebrada Llocllamayo.