

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE FLUJOS DE  
ESCOMBROS EN LA ZONA DE MARANURA  
LA CONVENCION – CUSCO**

Tesis para optar el Título de **INGENIERO CIVIL**, que presenta el bachiller:

**Frank Eduardo Escusa Arosquipa**

**ASESOR: MSc. Richard Paul Pehovaz Alvarez**

Lima, Setiembre del 2016

## Resumen

La presente tesis propone una metodología de trabajo para la estimación de peligros por flujos de escombros, cuyo desencadenamiento se produce debido a fuertes precipitaciones en las regiones con clima tropical típicas de la selva alta del Perú, y cuya componente principal en su matriz sea material granular.

La finalidad del presente trabajo es proponer una alternativa para la mejora de la gestión de riesgos por flujos de escombros, de tal forma que información base necesaria se pueda simplificar en tres rubros claves: [1] topografía, [2] pluviometría y [3] características geotécnicas. Para ello, se emplearon dos modelos numéricos de base reológica diferente, como son el Kanako 2D y el Titán 2D, evaluando la precisión y predictibilidad de cada uno de ellos, además de evaluar la dificultad de su empleo en un contexto donde no existen registros históricos que detallen las características de los flujos de escombros típicos. Ello se realizó utilizando como estudio de caso las quebradas anexas al distrito de Maranura, situado en la provincia de La Convención, Cusco, Perú.

## Abstract

The following thesis proposes a methodology for the estimation of the danger produced by the debris flows, whose triggering is caused by strong precipitations on regions with a tropical climate typical of the highland jungle of Peru, and whose main component on its matrix is granular material.

The aim of this work is to propose an alternative to the improvement of the risk management of debris flow hazards, in such way that the basic information required may be simplified on three key areas: [1] topography, [2] pluviometry and [3] geotechnical characteristics. To do so, two different numerical models with different rheological considerations were applied, Kanako 2D and Titan 2D, evaluating the precision and predictability of both, besides compare the difficulty on their use in a context where there is no available data about the characteristics of the typical debris flows. This was realized using as case of study the gullies nearby the district of Maranura, located on the province of La Convención, Cusco, Perú.

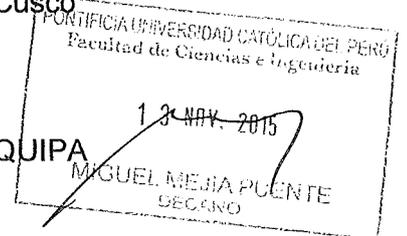
## Juñuska

Key tesisimi maskhan metodokunata qoyta watunapaq imayna peligrosun kanman chey lloqllakuna kamakunctin sinchi para chayactin yunka patapi perullactanchispi, oq q'oñi llactakunapipas, key lloqllakunan ujumpi apamunan ashka rumikunata aqotahuan.

Key trabajuyumi qosunki oq alternativata lloqllakuna chayamujtin mana sinchi peligrosokananpaq, cheymanhina key necesaria willaq kinsa rubrokunapi t'aqakunman: [1] chajrak alturanta, [2] jayk'atan paran, [3] imaynan jallp'a. Keypaqmi usasunchis iskay numérico modelokunata, Kanako 2D – Titan 2D tahuan; evaluaspa imayna k'achan, imayna allinmi kanman sapanka modelokuna key lloqllakuna watunapaq, jinaspapis imayna sasan kanman usay key modelokunata mana yachashuan imaynatan chayan chey lloqllakuna. Llapanmi ruhuakurqan Maranura huayq'okuna ujupi, La Convención provinciapi, Qosqo departamentupi, Peru llaqtanchispi.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : Análisis y Modelamiento de Flujos de Escombros en la Zona de Maranura, La Convención – Cusco  
Área : Medio Ambiente y Recursos Hídricos  
Asesor : Richard Paul Pehovaz Alvarez  
Alumno : FRANK EDUARDO ESCUSA AROSQUIPA  
Código : 2010.0416.412  
Tema N° : 10  
Fecha : Lima, 12 de noviembre de 2015



DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

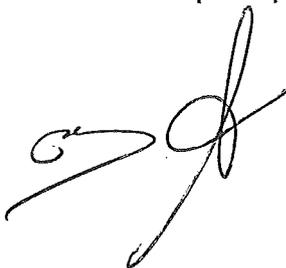
El presente proyecto consiste en la investigación del comportamiento y determinación de las características mecánicas de los flujos de escombros, en la zona de La Convención en el Cusco, particularmente del sector cercano a la provincia de Maranura. Para ello, se empleará el uso de modelos de simulación numérica, cuyos datos de ingreso son las propiedades mecánicas de los suelos existentes además de la pluviometría de la zona. Esta evaluación se realizará para diversos periodos de retornos a fin de establecer un mapa de peligros por flujos de escombros en la zona.

OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo principal de la presente tesis es predecir el comportamiento general de los flujos de escombros que se desarrollan dentro de la zona de Maranura. Es así que se estimará la altura de carga máxima, la altura de carga promedio al igual que las velocidades que pueden alcanzar dichos flujos. El conocimiento de estos parámetros podrá ser útil para establecer medidas de prevención frente a dichos desastres naturales, además de servir como lineamientos de diseño para estructuras de contención en caso se consideren éstas como una solución pertinente.

Junto a la determinación de estos parámetros, se presentará además lo siguiente:

- Caracterización topográfica en la zona (Planos topográficos)
- Caracterización geológica de la zona.
- Delimitación de las quebradas y caracterización hidrológica.
- Comparación del desarrollo de los flujos de escombros mediante diversos modelos y diferentes consideraciones.
- Mapa de peligros en la zona y sus poblaciones para diversos periodos de retorno.



## METODOLOGÍA Y RESULTADOS ESPERADOS

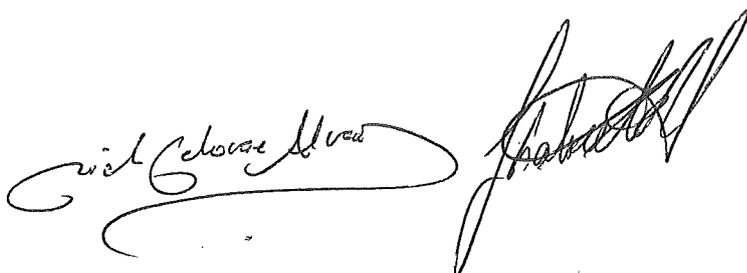
El trabajo se divide en dos fases, trabajo de campo y trabajo de gabinete. El trabajo de campo implica realizar un reconocimiento de la zona, para evaluar el estado de las quebradas, además de recopilar muestras significativas que permitan estimar las propiedades mecánicas de los suelos frente al fenómeno a estudiar.

En el trabajo de gabinete se procesará la información de campo además de procesar la data topográfica y pluviométrica de la zona para realizar la simulación de los flujos de escombros en cuatro quebradas aledañas a la provincia de Maranura. La información topográfica es proporcionada por el INGEMET, mientras que la información pluviométrica son datos facilitados por el SENAMHI. Para el procesamiento de información se recurrirán a dos modelos numéricos de simulación de flujos de escombros, el primero un modelo de base hidrológica utilizado en Japón propuesto originalmente por Takahashi y reestructurado por Nakatani en su software de uso libre "Kanakano"; el segundo es un modelo de base geotécnica propuesto originalmente por Iverson y modificado para la simulación de avalanchas y flujos de escombros por la Universidad de Buffalo en su software de uso libre "Titan2D".

Se espera que las simulaciones realizadas muestren un comportamiento similar a los flujos de escombros reales registrados en la zona. Más aún, se espera que el modelo de base hidrológica presente un mejor desempeño dadas las condiciones geomorfológicas y climáticas de la zona. De confirmarse esta hipótesis, podría emplearse esta metodología para simular flujos de escombros de forma acertada en quebradas que presenten parámetros similares.

### NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.



## Dedicatoria

*“Y todo lo que hagan, de palabra o de obra, háganlo en el nombre de Jesucristo, dando gracias a Dios el Padre por medio de él.”*

Colosenses 3:17

Le dedico esta tesis a mi familia, por haberme apoyado durante toda mi existencia. Principalmente a mi madre María Arosquipa por la fortaleza que me permitió salir adelante durante esta experiencia, a mi abuelo Lorenzo Arosquipa, por el ejemplo que nos inculcó en virtudes y trabajo, y a mi tía Graciela Arosquipa por la constante ayuda frente a las dificultades.

## Agradecimientos

Si tuviese que hacer mención a todos aquellos que aportaron incluso en lo más mínimo para sacar este proyecto adelante, esta sección sería más extensa que la misma tesis. Sin embargo debo destacar a quienes sin su ayuda esta investigación hubiese sido imposible:

En primer lugar, quiero agradecer a mi asesor, Richard Pehovaz por creer en este proyecto cuando ya había sido descartado por todos, y por la constante ayuda a lo largo del mismo. A mi tío, Ignacio Solís por la idea y lineamientos iniciales que permitieron tomar el rumbo adecuado en el desarrollo del mismo. A José Pinco, Benigno Gallegos y Felipe Toma por su gran ayuda durante los ensayos de laboratorio y por la gran paciencia que me tuvieron al realizar los mismos. A José Cabrera por las labores asignadas que me permitieron generar un ingreso para sacar este proyecto y desarrollarme profesionalmente. A Vladimir Caballero por el apoyo con los planos, sin los cuales hubiese sido imposible la culminación de la misma. A Ronald Gutiérrez por los consejos en función como orientar este proyecto en lo que a investigación refiere. A Miguel Aréstegui por el código de automatización para Kanako 2D, mediante el cual se pudo ejecutar correctamente este trabajo. A Rodrigo Canchaya por la ayuda en la parte gráfica, la cual le da mejor presentación a este documento. Y finalmente una mención especial a mi padrino Sebastián Vallejos, gracias a quien aprendí el valor del trabajo y la templanza, lo cual hoy me permite seguir frente a las adversidades.

Esta tesis fue realizada gracias al apoyo financiero del Vicerrectorado de Investigación de la PUCP y la facultad de Ingeniería Civil, los cuales cubrieron los costos de los estudios de campo y difusión científica del presente proyecto.

## Índice

1	Generalidades.....	1
1.1	Objetivos .....	2
1.2	Justificación .....	3
2	Marco Teórico .....	4
2.1	Conceptos de la Mecánica de Suelos.....	5
2.2	Conceptos de la Mecánica de Fluidos Computacional.....	11
2.3	Conceptos de la Hidrología.....	12
2.4	Hidráulica de los Flujos de Escombros .....	17
2.4.1	Clasificación y Características de los Flujos de Escombros.....	19
2.4.2	Factores que Desencadenan los Flujos de Escombros .....	25
2.4.3	Mecánica de los Flujos de Escombros.....	29
2.4.4	Reología de los Flujos de Escombros.....	33
2.5	Modelos Numéricos de Simulación.....	40
2.5.1	Modelo Kanako 2D.....	40
2.5.2	Modelo Titan2D .....	45
3	Metodología y Datos .....	48
3.1	Limitaciones del Estudio .....	51
3.2	Descripción de la Zona de Estudio .....	53
3.3	Caracterización Topográfica .....	53
3.4	Caracterización Geotécnica.....	57
3.5	Caracterización Hidrológica .....	59
4	Resultados y Discusión.....	60
4.1	Quebrada Chaupimayo.....	61
4.2	Quebrada Ayunay.....	70
4.3	Quebrada Yuracmayo.....	77
4.4	Quebrada Chinche .....	86
4.5	Generación de Mapas de Peligro.....	94
5	Conclusiones .....	96
6	Observaciones .....	97
7	Referencias Bibliográficas.....	98

## Lista de Figuras

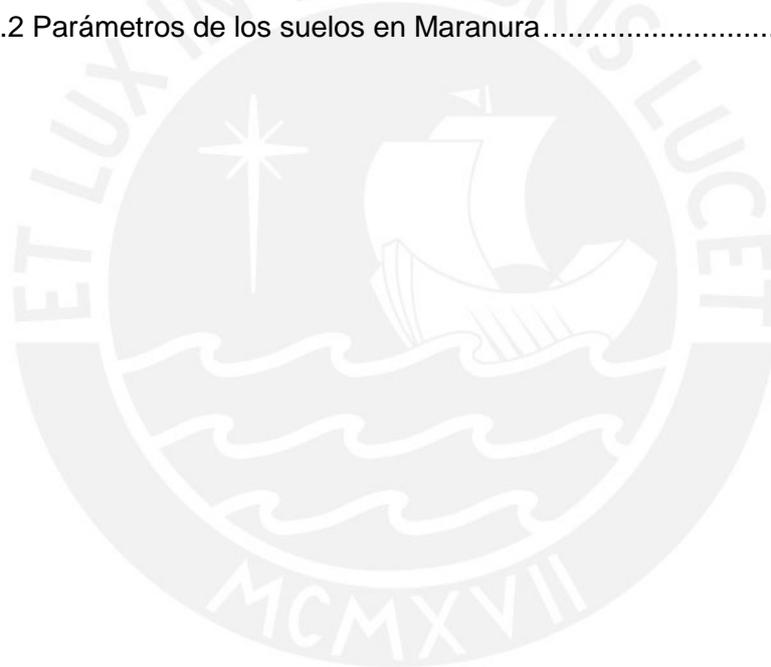
Figura 2.1 Suelo en su estado natural y sus fases. Adaptado de:Das (2010) .....	5
Figura 2.2 Círculo de Mohr indicando la falla interna y modificación del lecho. Adaptado de: Iverson (1997) .....	9
Figura 2.3 Diversos tipos de fallas masivas. Adaptado de:Geólogos del Mundo (2007) .....	10
Figura 2.4 Esquema de una cuenca como sistema hidrológico. Adaptado de:Chow et al. (1988) .....	12
Figura 2.5 Hidrograma unitario según el SCS. Adaptado de:Chow et al. (1988) .....	14
Figura 2.6 Tipos de distribución de precipitaciones según el NRCS. Adaptado de:Natural Resources Conservation Service (1997) .....	17
Figura 2.7 Diferentes regiones dentro de un flujo de escombros. Adaptado de:Pierson (1986) .....	18
Figura 2.8 Clasificación de los movimientos masivos. Adaptado de:Coussot and Meunier (1996) .....	20
Figura 2.9 Clasificación de Iverson para los desastres naturales de origen terreo. Adaptado de:Iverson (1997) .....	20
Figura 2.10 Clasificación de Takahashi para los flujos de escombros. Adaptado de:Takahashi (2007) .....	23
Figura 2.11 Esquema de un flujo sobre una cama erosionable. Adaptado de:Takahashi (2009) .....	27
Figura 2.12 Perfil longitudinal de un flujo de escombros y sus concentraciones. Adaptado de:Takahashi (2007) .....	28
Figura 2.13 Transformación de un derrumbe en un flujo de escombros. Adaptado de:Jakob and Hungr (2005) .....	29
Figura 2.14 Transferencia de energía de un flujo de escombros .....	30
Figura 2.15 Desarrollo de un flujo de escombros hasta su deposición. Adaptado de:Iverson (1997) .....	30
Figura 2.16 Sección del flujo de escombros en el plano cartesiano. Adaptado de:Jakob and Hungr (2005) .....	32
Figura 2.17 Curvas constitutivas para diferentes fluidos no newtonianos. ....	34
Figura 2.18 Roca de gran tamaño en un flujo de escombros. Adaptado de:Takahashi (1991) .....	39
Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología aplicada .....	49
Figura 3.2 Quebradas existentes en Maranura .....	53
Figura 3.3 Zona de estudio en la quebrada Yuracmayo y sus puntos de control ....	55

Figura 3.4 Zona de estudio en la quebrada Chaupimayo y sus puntos de control...	56
Figura 3.5 Zona de estudio en la quebrada Chinche y sus puntos de control .....	56
Figura 3.6 Zona de estudio en la quebrada Ayunay y sus puntos de control.....	57
Figura 3.7 Hietogramas de diseño para múltiples periodos de retorno.....	60
Figura 4.1 Hidrogramas líquido y de flujo de escombros en Chaupimayo.....	62
Figura 4.2 Compendio de parámetros en Cha P1, Chaupimayo .....	63
Figura 4.3 Números de Reynolds y Bagnold para Cha P1 con $D = 10$ cm .....	64
Figura 4.4 Números de Reynolds y Bagnold para Cha P1 con $D = 50$ cm .....	64
Figura 4.5 Compendio de parámetros en Cha P2, Chaupimayo .....	65
Figura 4.6 Números de Reynolds y Bagnold para Cha P2 con $D = 10$ cm .....	66
Figura 4.7 Números de Reynolds y Bagnold para Cha P2 con $D = 50$ cm .....	66
Figura 4.8 Mancha de elevaciones máximas de flujo de escombros, Chaupimayo .	67
Figura 4.9 Mancha de deposición máxima de flujo de escombros, Chaupimayo ....	68
Figura 4.10 Mancha de erosión máxima de flujo de escombros, Chaupimayo .....	69
Figura 4.11 Comparación de manchas entre Titan2D y Kanako 2D, Chaupimayo ..	70
Figura 4.12 Hidrogramas líquido y de flujo de escombros en Ayunay .....	70
Figura 4.13 Compendio de parámetros en Ayu P1, Ayunay.....	71
Figura 4.14 Números de Reynolds y Bagnold para Ayu P1 con $D = 10$ cm.....	72
Figura 4.15 Números de Reynolds y Bagnold para Ayu P1 con $D = 50$ cm.....	72
Figura 4.16 Compendio de parámetros en Ayu P2, Ayunay.....	73
Figura 4.17 Números de Reynolds y Bagnold para Ayu P2 con $D = 10$ cm.....	73
Figura 4.18 Números de Reynolds y Bagnold para Ayu P2 con $D = 50$ cm.....	74
Figura 4.19 Mancha de elevaciones máximas de flujo de escombros, Ayunay .....	74
Figura 4.20 Mancha de deposición máxima de flujo de escombros, Ayunay.....	75
Figura 4.21 Mancha de erosión máxima de flujo de escombros, Ayunay .....	76
Figura 4.22 Comparación de manchas entre Titan2D y Kanako 2D, Ayunay .....	77
Figura 4.23 Hidrogramas líquido y de flujo de escombros en Yuracmayo .....	77
Figura 4.24 Compendio de parámetros en Yur P1, Yuracmayo .....	78
Figura 4.25 Números de Reynolds y Bagnold para Yur P1 con $D = 10$ cm .....	79
Figura 4.26 Números de Reynolds y Bagnold para Yur P1 con $D = 50$ cm .....	79
Figura 4.27 Compendio de parámetros en Yur P2, Yuracmayo .....	80
Figura 4.28 Números de Reynolds y Bagnold para Yur P2 con $D = 10$ cm .....	81
Figura 4.29 Números de Reynolds y Bagnold para Yur P2 con $D = 50$ cm .....	81
Figura 4.30 Compendio de parámetros en Yur P3, Yuracmayo .....	82
Figura 4.31 Números de Reynolds y Bagnold para Yur P3 con $D = 10$ cm .....	83
Figura 4.32 Números de Reynolds y Bagnold para Yur P3 con $D = 50$ cm .....	83
Figura 4.33 Mancha de elevaciones máximas de flujo de escombros, Yuracmayo .	84

Figura 4.34 Mancha de deposición máxima de flujo de escombros, Yuracmayo ....	84
Figura 4.35 Mancha de erosión máxima de flujo de escombros, Yuracmayo.....	85
Figura 4.36 Comparación de manchas entre Titan2D y Kanako 2D, Yuracmayo ....	86
Figura 4.37 Hidrogramas líquido y de flujo de escombros en Chinche.....	87
Figura 4.38 Compendio de parámetros en Chi P1, Chinche .....	87
Figura 4.39 Números de Reynolds y Bagnold para Chi P1 con $D = 10$ cm .....	88
Figura 4.40 Números de Reynolds y Bagnold para Chi P1 con $D = 50$ cm .....	89
Figura 4.41 Compendio de parámetros en Chi P2, Chinche .....	89
Figura 4.42 Números de Reynolds y Bagnold para Chi P2 con $D = 10$ cm .....	90
Figura 4.43 Números de Reynolds y Bagnold para Chi P2 con $D = 50$ cm .....	91
Figura 4.44 Mancha de elevaciones máximas de flujo de escombros, Chinche .....	91
Figura 4.45 Mancha de deposición máxima de flujo de escombros, Chinche .....	92
Figura 4.46 Mancha de erosión máxima de flujo de escombros, Chinche.....	93
Figura 4.47 Comparación de manchas entre Titan2D y Kanako 2D, Chinche.....	94
Figura 4.48 Mapa de peligros por flujo de escombros, Yuracmayo .....	95
Figura 4.49 Mapas de peligros por deposición y erosión de sedimentos, Yuracmayo .....	95

## Lista de Tablas

Tabla 2.1 Propiedades índice de los suelos.....	6
Tabla 2.2 Clasificación sencilla de los suelos según su tamaño .....	6
Tabla 2.3 Tiempo de concentración según múltiples autores.....	15
Tabla 2.4 Parámetros de la clasificación de los flujos de escombros. Adaptado de:Iverson and Vallance (2001) .....	21
Tabla 2.5 Valores típicos de un flujo de escombros. Adaptado de:Iverson (1997) ..	22
Tabla 2.6 Tipos de regímenes de flujos de escombros según Bagnold.....	35
Tabla 2.7 Cálculo de los esfuerzos según Bagnold.....	36
Tabla 2.8 Tabla de parámetros experimentales según Bagnold. Adaptado de:Hunt et al. (2002) .....	36
Tabla 3.1 Resumen de dimensiones de las quebradas.....	54
Tabla 3.2 Parámetros de los suelos en Maranura.....	58



## Lista de Símbolos

$\nabla$	Operador gradiente	$\sigma$	Esfuerzo normal
$\alpha_c$	Coeficiente de esfuerzo cortante crítico	$\tau$	Esfuerzo cortante
$\alpha_i$	Ángulo de fricción dinámico	$\tau_*$	Esfuerzo cortante unitario
$\gamma$	Peso específico	$\tau_{*c}$	Esfuerzo cortante basal unitario crítico
$\dot{\gamma}$	Tasa de deformación por corte	$\tau_\kappa$	Esfuerzo cortante por mezcla macro-turbulenta
$\gamma_d$	Peso específico seco	$\tau_\lambda$	Esfuerzo cortante por colisión entre partículas
$\gamma_{sat}$	Peso específico saturado	$\tau_\mu$	Esfuerzo cortante por deformación del fluido
$\gamma_w$	Peso específico del agua	$\tau_\sigma$	Esfuerzo cortante por aporte cuasi-estático
$\delta$	Ángulo de deslizamiento basal	$\tau_y$	Esfuerzo cortante de fluencia
$\delta_D$	Coeficiente de deposición	$\phi$	Ángulo de fricción interna
$\delta_E$	Coeficiente de erosión	$\phi_r$	Ángulo residual de fricción
$\eta$	Porosidad	$\psi$	Operador adimensional
$\theta$	Pendiente	$\omega$	Humedad
$\theta_w$	Pendiente de la superficie del flujo	A	Función de cambio de aceleración vertical
$\kappa$	Constante de Von Karman	B	Función de cambio de espesor de la cama erosionable
$\lambda$	Concentración lineal	a	Aceleración
$\mu$	Viscosidad dinámica	a	Altura de la cama erosionable
$\xi$	Coeficiente de esfuerzo cortante inercial	b	Ancho
$\pi$	Número Pi	c	Cohesión
$\rho$	Densidad		
$\rho_s$	Densidad del sólido		
$\rho_f$	Densidad del líquido		

$d_p$	Duración de una lámina de precipitación	$t_p$	Tiempo de ocurrencia del caudal pico
$e$	Número de Euler	$t_r$	Tiempo de retraso
$e_r$	Coefficiente de restitución	$u$	Velocidad en dirección $x$
$e_v$	Relación de vacíos	$v$	Velocidad en dirección $y$
$g$	Gravedad de la Tierra	$w$	Velocidad en dirección $z$
$g'$	Aceleración vertical total	$x$	Coordenada $x$
$h$	Altura del flujo	$y$	Coordenada $y$ ; Tirante
$i$	Número de orden	$z$	Coordenada $z$ ; Profundidad
$i_{E/D}$	Ratio de erosión o deposición	$A$	Área
$k$	Permeabilidad hidráulica	$C_*$	Concentración estacionaria del terreno
$k_{a/p}$	Coefficiente de presión del suelo	$C_\infty$	Concentración volumétrica de equilibrio
$l_m$	Longitud máxima de la mezcla de Prandtl	$C_d$	Concentración volumétrica de sólidos
$n$	Coefficiente de Manning	$C_f$	Concentración volumétrica de líquidos
$p$	Presión	$C_i$	Concentración volumétrica de la fase $i$
$p_{ex}$	Probabilidad de exedencia	$C_C$	Coefficiente de curvatura
$q$	Caudal específico	$C_U$	Coefficiente de uniformidad
$q_d$	Caudal específico de flujo de escombros	$CN$	Número de curva
$q_p$	Caudal pico unitario	$D$	Diámetro de partícula
$q_s$	Caudal específico de sólidos	$D_{10}$	Diámetro efectivo de partícula (10%)
$r_a$	Radio de curvatura de la cama erosionable local	$D_{30}$	Diámetro efectivo de partícula (30%)
$t$	Tiempo		
$t_b$	Tiempo base		
$t_c$	Tiempo de concentración		

$D_{50}$	Diámetro promedio de partícula (50%)	$R$	Coefficiente de resistencia
$D_{60}$	Diámetro efectivo de partícula (60%)	$R_h$	Radio hidráulico
$E$	Coefficiente de compresión	$S$	Potencial máximo de infiltración
$F$	Fuerza	$S_f$	Pendiente de la línea de energía
$G_s$	Gravedad relativa	$S_o$	Pendiente del terreno
$H$	Altura	$S_r$	Grado de saturación
$I_a$	Abstracción inicial	$T$	Ancho superficial
$K$	Conductividad hidráulica	$T_r$	Periodo de retorno
$L$	Longitud	$U$	Velocidad media
$LL$	Límite líquido del suelo	$V$	Volumen
$LP$	Límite plástico del suelo	$V_a$	Volumen del aire
$M$	Masa	$V_s$	Volumen del suelo
$N_{\Sigma i}$	Cantidad de datos	$V_w$	Volumen del agua
$N_{Bag}$	Número de Bagnold	$W$	Peso
$N_{Dar}$	Número de Darcy	$W_s$	Peso del suelo
$N_{Fro}$	Número de Froude	$W_w$	Peso del agua
$N_{Mas}$	Número de Masa	$\mathbb{F}_{(U)}$	Vector de masa y momento en la dirección $x$
$N_{Rey}$	Número de Reynolds	$\mathbb{G}_{(U)}$	Vector de masa y momento en la dirección $y$
$N_{Sav}$	Número de Savage	$\mathbb{S}_{(U)}$	Vector de conducción y de fuentes disipativas
$P$	Precipitación	$\mathbb{U}$	Vector de conservación de flujo
$P_e$	Precipitación en exceso	$\mathbb{T}$	Tensor de esfuerzos
$P_m$	Perímetro mojado		
$PI$	Índice de plasticidad		
$Q$	Caudal		

## 1 Generalidades

Mediante el presente trabajo, se busca fortalecer la gestión de riesgos en lo referente a flujos de escombros. Particularmente se evaluó la zona de Maranura, perteneciente a la provincia de La Convención en Cusco, debido a que en dicha región, los flujos de escombros son frecuentes, sin embargo no existe mayor conocimiento del desarrollo de los mismos ni se tienen medidas de seguridad o prevención adecuadas. Para el desarrollo de la evaluación de los flujos de escombros existentes en Maranura, se emplearon modelos de simulación numérica que requieren información de carácter topográfico, hidrológico y geotécnico. A dicho estudio se le da un carácter predictivo al establecer una relación entre los caudales de avenida y su periodo de retorno, con la ocurrencia y magnitud de los flujos de escombros probables. Mediante la evaluación de múltiples escenarios que contemplen diversos periodos de retorno, es posible generar mapas de peligros por flujos de escombros en la zona.

En general, los deslizamientos y sus derivados como son los flujos de escombros, o “huaycos” como son conocidos popularmente en nuestro medio, son responsables de al menos un 14% de muertes anuales a nivel mundial (Aleotti & Chowdhury, 1999). En el Perú, son frecuentes estos tipos de fenómenos debido a las condiciones climáticas que se presentan, esto sumado a factores locales como por ejemplo el fenómeno del Niño (Fidel et al., 2006). Es por esa razón que resulta indispensable para nuestro contexto, entender el funcionamiento de los flujos de escombros, con la finalidad de generar propuestas de mitigación de riesgo viables, según las condiciones de cada zona de estudio contemplada en nuestro país (Mizuyama, 2008).

Para entender la mecánica de los flujos de escombros, se debe partir por el análisis de la topografía del terreno donde éstos se desencadenan, así como determinar los depósitos aluviales y material existente en los lechos (Ellen & Fleming, 1987). En función a dichos depósitos, se debe establecer cuál es el origen del flujo de escombros, sea éste producto de una falla de talud o si este es alimentado por procesos superficiales como es la erosión de depósitos coluvionales (Takahashi, 2009). Con dicha información es posible estimar la proporción volumétrica inicial de sedimentos en un flujo de escombros, la cual afecta directamente al estado de presiones que presenta el flujo con el lecho en el cual se desarrolla (Iverson, 1997). Sin embargo, adicionalmente es necesario asumir un tipo de reología mediante el cual el flujo de escombros se va a desarrollar. En la mayoría de casos, esta información es difícil de conocer por la dificultad de medir los estados de deformación

y esfuerzos en un flujo de escombros real, por lo que se recurren a modelos empíricos desarrollados en laboratorio o modelos teóricos (O'Brien & Julien, 1988).

Generalmente, se compara la mecánica que desarrolla un flujo de escombros con la mecánica en la cual se desenvuelven flujos de avenida en canales que presentan problemas de hiperconcentración de lodos y sedimentos (Bateman et al., 2006). Incluso, múltiples autores consideran a los flujos de escombros como una subclasificación de los desastres producidos por movimientos de tierra, debido principalmente a los procesos continuos de erosión y deposición que presentan en su desarrollo (Julien, 2010). Este hecho es conocido debido a la evidencia de campo que dejan los flujos de escombros, por lo cual, resulta fácil identificar cambios notables en el lecho donde dichos flujos se desarrollan (Parrilla & Zamorano, 1996).

Cabe resaltar que las propiedades de un flujo de escombros pueden resultar muy variables, por lo que resulta difícil obtener parámetros precisos en campo o laboratorio que indiquen acertadamente cómo se desarrollan los flujos de escombros, por lo que se recurre a múltiples asunciones que usualmente acarrearán un porcentaje significativo de error al realizar las simulaciones. Es por ello que la mayoría de investigaciones que existen respecto a los flujos de escombros buscan mayormente validar los modelos propuestos (Takahashi, 2007). Actualmente, existen diversas formas de simular los flujos de escombros, y dichas metodologías suelen obedecer a los tres factores clave previamente descritos: topografía, hidrología y geotecnia (Armanini & Michiue, 1997).

## 1.1 Objetivos

Se tiene como objetivo principal, estimar el comportamiento de los flujos de escombros probables en las quebradas de Maranura mediante dos modelos computacionales diferentes para diversos periodos de retornos. Dicha evaluación se realizará con tres parámetros que indiquen la peligrosidad de cada evento: [1] la altura máxima que alcanza el flujo de escombros, [2] la velocidad máxima que alcanza el flujo de escombros, y [3] la envergadura de los depósitos en la zona de estudio o también llamada "mancha por flujo de escombros". Además se espera que el planteamiento a seguir en este documento, sirva como referencia para quienes busquen realizar estudios de este tipo bajo diferentes condiciones.

Por otro lado, se tienen como objetivos secundarios para el presente trabajo los siguientes puntos:

- Metodología de trabajo para el estudio de los flujos de escombros.

- Caracterización topográfica de la zona.
- Caracterización geológica de la zona.
- Delimitación de las quebradas y caracterización hidrológica.
- Predicción de los caudales de avenidas para dichas quebradas.
- Comparación de dos modelos de simulación aplicados al caso de estudio
- Mapa de peligros de la zona y sus poblaciones por flujo de escombros.

## 1.2 Justificación

Como se mencionó previamente, los flujos de escombros son comunes en el Perú, la provincia de La Convención no es la excepción. Usualmente, el desencadenamiento de un flujo de escombros significa la destrucción de numerosas carreteras, e incluso parte importante de los poblados. La eventualidad de los flujos de escombros en La Convención es relativamente frecuente. Según reportes periodísticos, dos de estos eventos se producen al año como mínimo (Torres, 2013; Zora, 2013). Para los pobladores de la región ya resulta común la existencia de estos fenómenos, e incluso les resulta conocido en que fechas se desarrollan los flujos de escombros y cuánto daño causan. Según los pobladores y según noticias, es común encontrar flujos de escombros entre los meses de Enero y Marzo, que son los meses de mayor precipitación (SENAMHI, 2011), mostrando una correlación entre las precipitaciones y dichos eventos.

La existencia de los flujos de escombros en La Convención, y en particular en Maranura, representa una gran problemática al ocasionar la destrucción de carreteras en los tramos Urubamba-Machu Picchu-Quillabamba. El corte de estas vías implica el cierre a la reserva arqueológica de Machu Picchu, lo que se traduce en grandes pérdidas para el sector turístico, además se cortan comunicaciones con el distrito de Quillabamba y sus anexos, dejando como única alternativa de acceso la carretera desde Kiteni, la cual no es de fácil acceso debido a que se sitúa en el VRAEM, la cual a su vez ha sido declarada por el estado como zona de emergencia, lo que la hace poco viable.

En Maranura, la problemática es mayor, ya que los principales flujos de escombros se desarrollan en las quebradas Yuracmayo y Chinche, las cuales se encuentran en las inmediaciones de los centros poblados, siendo que estos flujos ya han cobrado víctimas mortales en numerosas ocasiones (Hurtado, 2013). La población misma es consciente de la peligrosidad de la zona, lo cual se refleja claramente al inspeccionar el terreno, ya que las condiciones que presenta Maranura son propicias para la generación de un flujo de escombros. Maranura es un distrito situado en medio de

numerosas quebradas que son afluentes al río Vilcanota, y éstas presentan formaciones rocosas débiles como son las pizarras y material granular limoso, que no provee de gran resistencia portante ni resistencia a la intrusión de agua (Marocco, 1978). Esta situación, sumada a la naturaleza climatológica de Maranura, la cual presenta lluvias de carácter convectivo (Espinoza et al., 2009), facilitan la formación de los flujos de escombros.

## 2 Marco Teórico

El estudio de la mecánica de un flujo de escombros puede resultar bastante complejo debido a su naturaleza mixta (Iverson, 1997), debido a que dentro del flujo de escombros, interactúan material granular de diversos tamaños, además de sedimentos, agua y en menor medida, aire. Es por ello que no existe un enfoque único para el tratamiento de los flujos de escombros. Existen diferentes modelos que definen el comportamiento de los flujos de escombros según sea el origen de éstos y acorde a qué parámetro se le considera como el más importante para su desarrollo (Jakob & Hungr, 2005). En general, existen dos acercamientos típicos a los problemas de flujo de escombros que parten de cómo se genera éste y qué interacción tiene con el medio, siendo éstos los modelos de bloque suelto y los modelos dinámicos continuos (Rickenmann, 2005). Después de iniciado el flujo de escombros, cada modelo suele tomar como base, los modelos de flujos de múltiples fases, dando prioridad o a las condiciones de borde que presenta el terreno, o a la interacción entre partículas granulares del flujo o a la fase líquida que compone el agua y barros existentes (Takahashi, 2007).

Una vez definido el origen de los flujos de escombros, lo que hace diferente a un modelo con respecto a otro, es la consideración reológica que posee. Para los estándares internacionales, la reología de un modelo debe ser calibrada acorde a un estudio de caso y de ser certeros los resultados, éstos solo podrían ser considerados como ciertos para escenarios que presenten exactamente las mismas condiciones (Cesca & D'Angostino, 2008). Mayormente, estos estudios van acompañados de investigación de laboratorio que permita reproducir la reología que desarrollan los diversos tipos de materiales existentes en los flujos de escombros (O'Brien & Julien, 1988).

Según lo expuesto, para comprender completamente cómo trabaja un flujo de escombros, es necesario entender disciplinas como son la mecánica de suelos, la cual dará indicios del comportamiento de la materia que contiene el flujo de escombros, la mecánica de fluidos computacional, que desarrollará la continuidad del

flujo mismo; y la hidrología, que usualmente aporta con los factores de desencadenamiento y desarrollo de los flujos de escombros. Todo lo anterior va relacionado con comprender el funcionamiento de los diversos modelos reológicos existentes y cual se adecua a cada caso.

## 2.1 Conceptos de la Mecánica de Suelos

En lo que respecta a la mecánica de suelos, son importantes dos conceptos que se aplican a la mecánica de los flujos de escombros: [1] la composición de lo que significa el suelo en sí, y [2] las propiedades físicas que éste presenta y que gobiernan la interacción estática y dinámica de sus componentes. Un suelo en estado natural consta de tres fases, divididas en sólidos, agua y aire (Das, 2010); tal como se puede apreciar en la Figura 2.1.

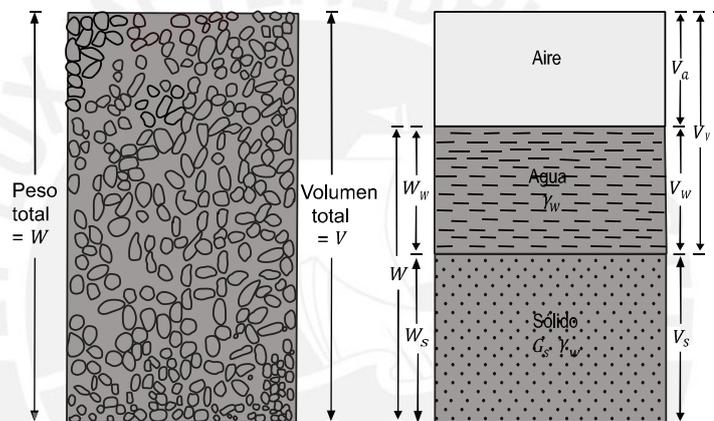


Figura 2.1 Suelo en su estado natural y sus fases. Adaptado de: Das (2010)

Si se toma un bloque de suelo, éste puede ser dividido en las tres fases mencionadas anteriormente según volúmenes y peso, siendo los volúmenes  $V_a$ ,  $V_w$  y  $V_s$  el volumen que ocupa el aire, agua y suelo respectivamente. La suma de estos tres constituyen el volumen total del bloque de suelo tomado  $V$ . Lo mismo se aplica para los pesos  $W_w$  y  $W_s$  que suman el peso total del suelo  $W$ , recordando que el peso del aire es despreciable para efectos prácticos. En un flujo de escombros se puede mantener este mismo concepto, estableciendo qué fracción de volumen ocupa cada fase (Nakatani et al., 2011). Evidentemente la concentración de cada uno de estos materiales no será constante a lo largo del desarrollo de los flujos de escombros ni igual a los que tienen los suelos en estado natural.

Conocidos los porcentajes o totales de volúmenes y pesos que posee el material a estudiar, se puede establecer las llamadas propiedades índice (Terzaghi et al., 1996), las cuales son relaciones entre los contenidos del material, y que al conocer una de

tres de éstas, es posible conocer las proporciones de cada fase del suelo para cualquier volumen. Estas relaciones se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Propiedades índice de los suelos

Propiedad	Fórmula
Relación de Vacíos ( $e_v$ )	$\frac{V_a + V_w}{V_s}$
Porosidad ( $\eta$ )	$\frac{V_a + V_w}{V}$
Grado de Saturación ( $S_r$ )	$\frac{V_w}{V_a + V_w}$
Contenido de Humedad ( $\omega$ )	$\frac{W_w}{W_s}$
Peso Específico ( $\gamma$ )	$\frac{W}{V}$
Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ )	$\frac{W_s}{V}$
Gravedad Específica ( $G_s$ )	$\frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w}$
Peso Específico Saturado ( $\gamma_{sat}$ )	$\frac{(G_s + e_v) \cdot \gamma_w}{1 + e_v}$

Nuevamente, dichas propiedades son válidas para el suelo en su estado natural, y en un flujo de escombros, la única constante resulta ser el valor de  $G_s$  ya que esta depende sólo de la matriz sólida.

Adicionalmente, la fracción sólida de los suelos tiene características propias, dependiendo principalmente de cuál es el diámetro de partícula característico de las mismas. Según la International Organization for Standardization (ISO, 2002), se puede decir que el suelo pertenece a una categoría determinada según dicho diámetro, lo cual se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Clasificación sencilla de los suelos según su tamaño

Clase	Tipo	Rango (mm)
Suelos muy Gruesos	Fragmento de Roca	> 630
	Bolón	200 – 630
	Piedra	63 – 200
Suelos Gruesos	Grava Gruesa	20 – 63
	Grava Media	6.3 – 20

	Fina	2 – 6.3	
	Gruesa	0.63 – 2	
Arena	Media	0.2 – 0.63	
	Fina	0.063 – 0.2	
Suelos Finos	Grueso	0.02 – 0.063	
	Limo	Medio	0.0063 – 0.02
		Fino	0.002 – 0.0063
	Arcilla	< 0.002	

Sin embargo, en la realidad, los suelos no poseen un único tamaño de partícula. En la matriz de cada suelo, existen diversos tamaños interactuando al mismo tiempo, al igual que en los flujos de escombros. Es por ello que la American Society for Testing and Materials (ASTM International, 2011a) propone una clasificación que englobe la granulometría completa del suelo para establecer que grupo es el predominante en la mezcla. Para ello se emplean los lineamientos establecidos por la misma ASTM utilizando tamaños de tamices ya normalizados (ASTM International, 2013) y ensayos que permitan caracterizar los diámetros más pequeños mediante el uso de instrumentos de mayor precisión como son los hidrómetros (ASTM International, 2007).

Dicha clasificación propuesta es llamada el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Das, 2010), la cual para las fracciones gruesas se basa en los diámetros característicos  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{60}$ ; siendo cada subíndice un cuantil de la muestra. Las relaciones entre los diámetros de estos cuantiles son las mostradas en las ecuaciones (2.1) y (2.2)

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.1)$$

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (2.2)$$

Las ecuaciones (2.1) y (2.2) son los coeficientes de uniformidad y de curvatura respectivamente. Estos dos coeficientes son aplicables mayormente a la fracción gruesa del material. Por otro lado, para trabajar con la matriz fina del material es necesario evaluar la plasticidad y capacidad de retención de agua de la misma. Dicha evaluación se hace con la fracción que atraviesa por la malla No. 40 o 425 micrómetros (ASTM International, 2013). Con esta fracción del suelo, se procede a

establecer los Límites de Atterberg, principalmente el Límite Líquido ( $LL$ ), el Límite Plástico ( $LP$ ) y el Índice de Plasticidad ( $PI$ ), los cuales obedecen la ecuación (2.3).

$$PI = LL - LP \quad (2.3)$$

El procedimiento para el cálculo de dicho límites se realiza mediante el uso de la Cuchara de Casagrande, la Carta de Plasticidad del SUCS y el procedimiento de la ASTM (ASTM International, 2010).

Cabe resaltar que, según las investigaciones de Hungr (Jakob & Hungr, 2005), un flujo de escombros suele darse en material con un Índice de Plasticidad cercano a 5%. Para valores mayores, el flujo podría ser clasificado como un flujo de lodos.

Respecto a las propiedades físicas de los suelos, aquellas que determinan principalmente los mecanismos de falla de un bloque de tierra, son la cohesión del suelo y el ángulo de fricción interna que presenta. El criterio de falla más utilizado en la mecánica de suelos, es el criterio de Mohr-Coulomb, el cual indica que el material falla debido a la combinación crítica de un esfuerzo máximo normal con un esfuerzo máximo cortante (Das, 2010), relacionados conforme lo indica la ecuación (2.4).

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi) \quad (2.4)$$

Donde  $\tau$  representa el esfuerzo cortante del suelo,  $\sigma$  el esfuerzo normal,  $c$  la cohesión del suelo y  $\phi$  su ángulo de fricción interna. Dicha expresión genera un círculo de fallas al cual se le conoce como círculo de Mohr, y la manera de determinarlo para una muestra de suelo, está descrito según códigos de la ASTM (ASTM International, 2011b). Las diferentes combinaciones de valores para  $\tau$  y  $\sigma$ , generan también un tensor de esfuerzos llamado el tensor de Cauchy usualmente identificado por la letra  $\mathbb{T}$  (Gidaspow, 1994), el cual posee la estructura general, mostrada en la ecuación (2.5).

$$\mathbb{T} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

De forma análoga, al realizar los ensayos de determinación de los valores de los esfuerzos existentes en el tensor  $\mathbb{T}$ , como son los ensayos triaxiales (ASTM International, 2011b), existe un valor generado  $\phi_r$ , llamado ángulo residual de fricción (Hoek et al., 2000). Dicho ángulo de fricción se origina cuando la cohesión aparente en la muestra se anula, y no suele tener fines prácticos más que algunos cálculos intermedios. Sin embargo debido a que en los flujos de escombros los procesos de

movilización incluyen una fracción importante de agua, dicho ángulo puede ser comparable al ángulo de fricción dinámico del suelo  $\alpha_i$  y al ángulo de desplazamiento basal  $\delta$ . En función a éste último, se puede obtener un círculo de Mohr que relacione los esfuerzos de un suelo por su propio peso y durante el desarrollo del flujo de escombros en un lecho erosionable (ver Figura 2.2). La relación de estos dos estados indica la movilización del flujo de escombros mostrando si el proceso es de erosión (activo) o de deposición (pasivo).

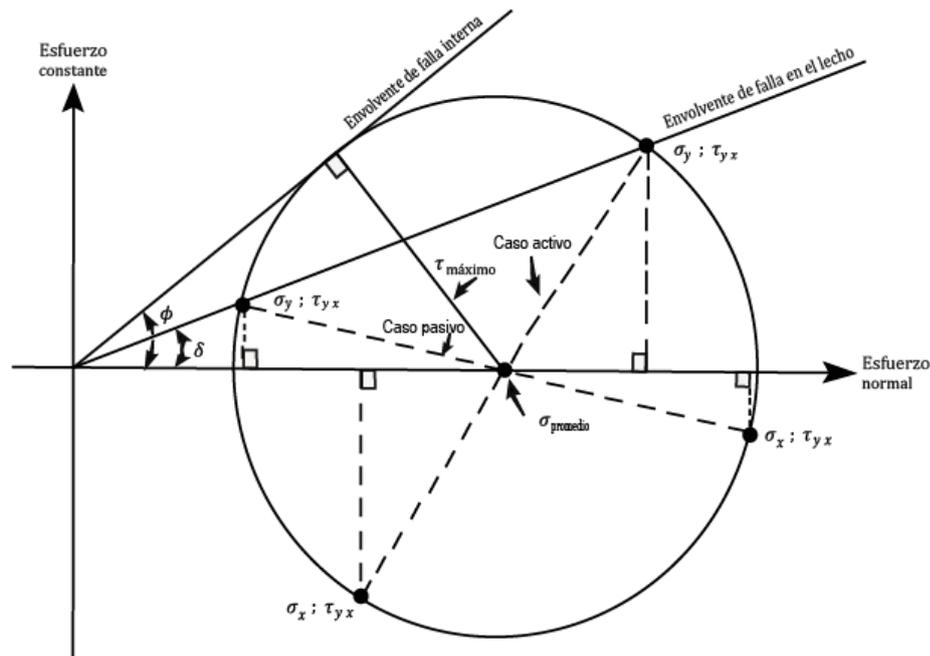


Figura 2.2 Círculo de Mohr indicando la falla interna y modificación del lecho. Adaptado de: Iverson (1997)

$$k_{a/p} = 2 \cdot \frac{1 \pm (1 - \cos^2(\phi) \cdot (1 + \tan^2(\delta)))^{1/2}}{\cos^2(\phi)} - 1 \quad (2.6)$$

En donde el valor  $k_{a/p}$  mostrado en la ecuación (2.3) es el coeficiente de presión de suelo, cuyo signo  $\pm$  varía según sea la velocidad del flujo, positivo para el caso activo, en el cual la dirección del flujo es igual a la de la dirección asumida; y negativo si el flujo va en contra de la dirección prevista (Savage & Hutter, 1989). Dicho valor se deduce de la Figura 2.2.

Las formas con las cuales un suelo puede fallar son diversas, estas usualmente están condicionadas a la geometría del terreno que condiciona el ángulo de estabilidad y agentes externos que rompan la cohesión aparente, como es usualmente el agua

(Ortigao & Sayao, 2004). Una ejemplificación de dichos mecanismos de falla se presenta en la Figura 2.3.

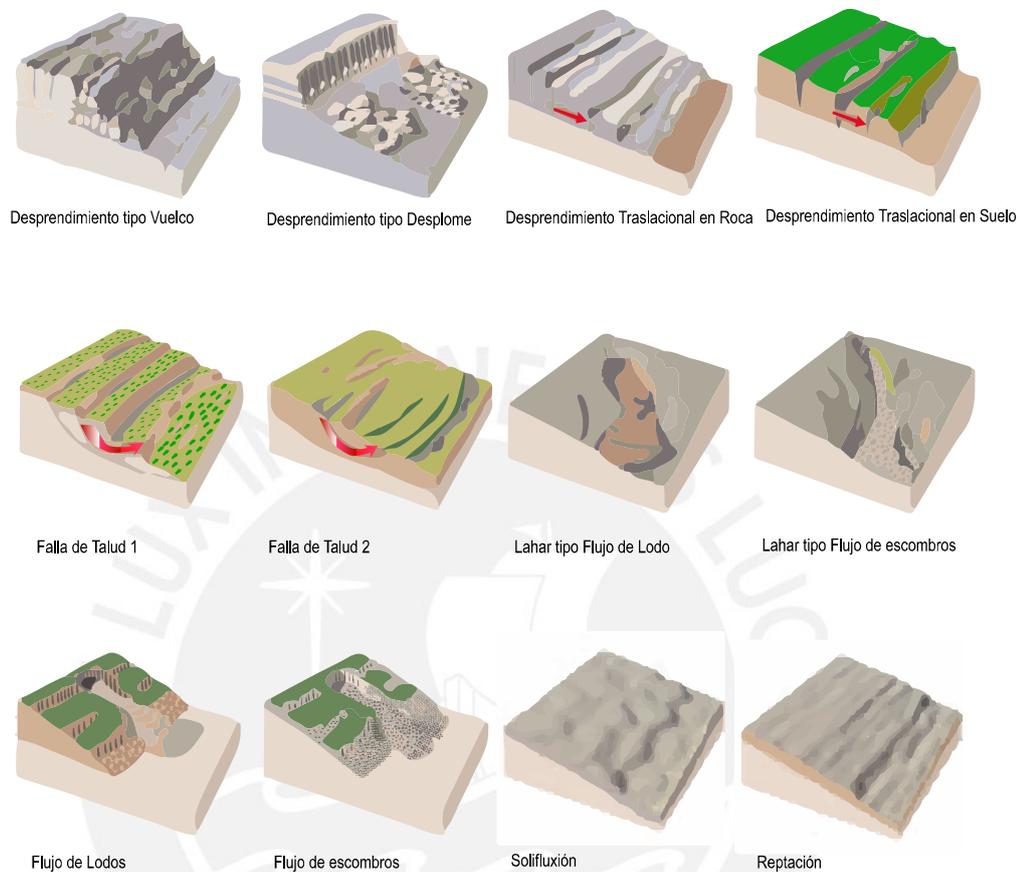


Figura 2.3 Diversos tipos de fallas masivas. Adaptado de: Geólogos del Mundo (2007)

En el presente trabajo, nos enfocaremos exclusivamente a las fallas de tipo flujo, y en particular, a aquellas cuyo origen se debe a fuertes presiones de poros, usualmente debido a precipitaciones extremas como es el caso de los flujos de escombros típicos en el Perú (Castillo et al., 2006). Para dicho tipo de flujos, la mayor fuente de sedimentos son los depósitos de coluviones y aluviones existentes, ya que éstos presentan una estructura no consolidada lo cual los hace susceptibles a fallas por flujo, especialmente si dichos depósitos se encuentran en el camino natural de las quebradas hacia su aforo (Kobiyama et al., 2010).

Los criterios mostrados anteriormente, solo ejemplifican la susceptibilidad de los suelos a convertirse en flujos de escombros, además de los parámetros que denotan sus propiedades físicas. Sin embargo para el desarrollo de los flujos de tierras en general, es necesario recurrir a otras disciplinas como es la mecánica de fluidos, la cual establece el régimen con el cual el material se moviliza.

## 2.2 Conceptos de la Mecánica de Fluidos Computacional

Los problemas típicos de la mecánica de fluidos suelen resolverse mediante la conservación de dos de sus características. La primera de dichas características es la conservación de masa, la cual permite el cálculo de la cantidad de materia en un volumen de control conocidos los ingresos, salidas y efectos dentro del mismo volumen (Batchelor, 2000), su forma diferencial es la mostrada en la ecuación (2.7).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u}) = 0 \quad (2.7)$$

Donde  $\rho$  es la densidad y  $u$  es la velocidad del flujo, expresada en un campo vectorial. La segunda característica que se conserva a lo largo del desarrollo de un fluido, es la conservación de momento. La mayoría de paquetes computacionales utiliza la ecuación de Navier-Stokes, debido a que ésta representa de forma óptima la conservación de momento y permite predecir en conjunto a la continuidad de masa, la velocidad y estado de presiones en un fluido (Currie, 2003). Dicha ecuación presenta la forma mostrada en la ecuación (2.8).

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla \vec{p} + \nabla \cdot \mathbb{T} + \rho \cdot \vec{a} \quad (2.8)$$

Donde  $p$  es la presión interna del fluido y  $a$  representa el vector de aceleraciones que experimenta el mismo. En el bloque de la derecha el primer término representa la aceleración propia del fluido, mientras que el segundo término es el término advectivo, el cual representa la fuerza en una partícula del fluido debido a las otras que lo rodean. En el bloque de la izquierda se encuentra primero la presión y luego el término de difusión controlado por un tensor de esfuerzos  $\mathbb{T}$ , aquí es donde usualmente se controlan los esfuerzos internos del flujo conocidas las leyes que gobiernan su estado de esfuerzos (Batchelor, 2000). Por último, está el efecto de las fuerzas externas sobre el fluido, donde usualmente solo se utiliza el efecto del peso propio del mismo.

Normalmente las ecuaciones descritas anteriormente no son suficientes para resolver un sistema dinámico, por lo que se suele recurrir a expresiones que permitan completar el sistema de ecuaciones. Algunas de estas son las relaciones de conservación de energía y modelos reológicos que den sentido al término difusivo (Gidaspow, 1994). Adicionalmente, es necesario conocer la geometría en la cual el fluido se desenvuelve, siendo esta la condición básica del uso de la ecuación de Navier-Stokes, ya que debido a la complejidad del cálculo de dicha expresión, es

necesario discretizarla según una topología establecida (Currie, 2003). El enfoque más común para discretizar dicho sistema de ecuaciones en un sistema numérico de ecuaciones diferenciales parciales es mediante el uso de mallas no estructuradas (Thompson et al., 1999). Existen diversos modelos topológicos y sistemas numéricos que permiten la solución de dichas ecuaciones. Si bien dichas consideraciones modificarán los resultados finales, las diferencias suelen no ser significativas, la diferencia fundamental entre un método u otro radica en la velocidad de procesamiento de información, no en la exactitud de los resultados (Jeong & Seong, 2014).

### 2.3 Conceptos de la Hidrología

El desarrollo de un flujo de escombros se da dentro de una quebrada, la cual es parte de un sistema hidrológico denominado cuenca hidrográfica. Por ello es necesario entender los procesos que se desarrollan dentro de dicho espacio al igual que los factores que desencadenen el evento, tales como las avenidas extremas. El cálculo de dichas avenidas se determina mediante un estudio hidrológico para diversos periodos de retorno (Chow et al., 1988)

Siguiendo la misma lógica aplicada en la ecuación de continuidad mostrada en (2.7), se puede decir que si la cuenca hidrográfica es un volumen de control, entonces el cambio del volumen de agua almacenado debe ser igual a la diferencia de egresos e ingresos. Entonces se obtendría el esquema mostrado en la Figura 2.4.

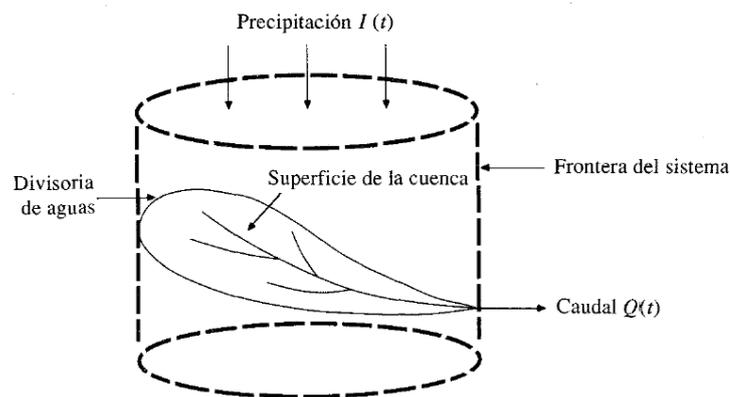


Figura 2.4 Esquema de una cuenca como sistema hidrológico. Adaptado de: Chow et al. (1988)

Entonces, en términos generales, tanto los ingresos como los egresos son una función del tiempo. El ingreso de agua al sistema es dado generalmente por la precipitación, y la salida es normalmente mediante el caudal del río  $Q$ , entonces se obtiene lo descrito en la ecuación (2.9)

$$\frac{dV}{dt} = Q_{\text{ingreso}} - Q_{\text{salida}} \quad (2.9)$$

Donde  $\frac{dV}{dt}$  define la tasa acumulación o pérdida de agua en el sistema. El término  $Q_{\text{ingreso}}$  engloba todos los ingresos de agua tales como la precipitación, el aporte por aguas freáticas y otros procesos no considerados. Del mismo modo,  $Q_{\text{salida}}$  considera el agua que sale del sistema, tales como la escorrentía, la infiltración y evaporación. La dificultad en la resolución de dicha expresión parte en cómo se definen los ingresos y egresos del sistema. El presente estudio se concentrará en las aguas de escorrentía superficial, las cuales son las que interactúan directamente con los flujos de escombros (Takahashi, 1991).

Uno de los métodos para el calcular la transformación de una precipitación en escorrentía e infiltración es el método propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) (Feldman, 2000), el cual parte de la siguiente formulación indicada en la ecuación (2.10).

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2.10)$$

En la ecuación (2.10) se busca hallar la precipitación en exceso  $P_e$ , partiendo de una lámina de precipitación  $P$ , ya que esta es la única que se considerará para el cálculo de los caudales. La precipitación  $P$  dependerá del potencial máximo de infiltración  $S$  y de las abstracciones iniciales  $I_a$ , que son consideradas precipitaciones acumuladas hasta el inicio de la escorrentía (Feldman, 2000). Estos dos últimos términos muestran la ecuación (2.11) según resultados experimentales en cuencas pequeñas.

$$I_a = 0.05S \quad (2.11)$$

El valor mostrado en la expresión (2.12) de 0.05 ha sido revisado en numerosas ocasiones frente a un clásico valor 0.2 de para validar que la escorrentía calculada sea la más certera posible en evento máximos (Lim et al., 2006). Adicionalmente, el término  $S$  puede ser estimado mediante el llamado número de curva  $CN$ , el cual depende del tipo de uso que posee el suelo además de su permeabilidad. Éste se obtiene de tablas que son posibles de encontrar en cualquier manual de hidrología (Chow et al., 1988). La expresión que relaciona estos términos es la mostrada en la ecuación (2.12).

$$I_a = 0.05 \left( \frac{25400}{CN} - 254 \right) \quad (2.12)$$

Es así que conocidas las precipitaciones en exceso y determinando correctamente el uso y tipo de suelo que existe dentro de la cuenca hidrográfica, se puede generar el hidrograma partiendo de la suma de múltiples hidrogramas unitarios adimensionales. Debido a que se está aplicando la metodología del SCS para calcular las precipitaciones en exceso, lo correcto es utilizar los hidrogramas unitarios mediante la metodología propuesta también por el SCS, sabiendo que su limitación es que solo puede ser aplicada a cuencas con una extensión máxima de  $500 \text{ km}^2$  (Maidment, 1993). Dicha metodología se aprecia gráficamente en la Figura 2.5.

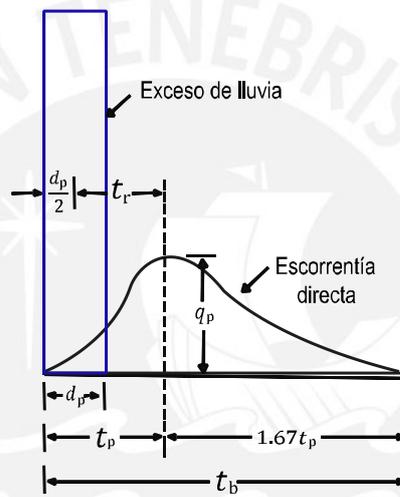


Figura 2.5 Hidrograma unitario según el SCS. Adaptado de:Chow et al. (1988)

Donde se cumplen las relaciones de (2.13) a (2.16) como sigue:

$$q_p = \frac{2.08A}{t_p} \quad (2.13)$$

$$t_p = \frac{d_p}{2} + t_r \quad (2.14)$$

$$t_b = 2.67t_p \quad (2.15)$$

$$t_r \approx 0.6t_c \quad (2.16)$$

Luego, para la Figura 2.5 y utilizando las ecuaciones de (2.13) a (2.16), el resultado final será el hidrograma unitario con un caudal pico unitario  $q_p$  con unidades  $\frac{\text{m}^3}{\text{s}\cdot\text{cm}^2}$ , para lo cual se ingresa con el área de la cuenca  $A$  en  $\text{km}^2$ , y el tiempo de ocurrencia

del pico  $t_p$  en  $hr$ . Dicho tiempo pico se calcula conociendo la duración de una lámina de precipitación  $d_p$  medido en  $hr$  y el tiempo de retraso  $t_r$  también en  $hr$  (Chow et al., 1988). Este último se obtiene conociendo el tiempo de concentración en una cuenca  $t_c$ , el cual se define como el tiempo que le toma a una gota de agua llegar desde el punto más alejado de la cuenca, hacia el punto de aforo. Existen múltiples metodologías para el cálculo del tiempo de concentración, cada una generada y calibrada para condiciones específicas. Una pequeña colección de dichas formulaciones se presenta en la Tabla 2.3, adaptada de Grimaldi et al. (2012) & McCuen (1998)

Tabla 2.3 Tiempo de concentración según múltiples autores

Autor	Ecuación
California Culverts Practice	$t_c = \frac{13}{40000} \cdot \left(\frac{L^3}{\Delta H}\right)^{0.385}$
Kirpich (Tennessee)	$t_c = \frac{649}{2000000} \cdot \frac{L^{0.77}}{S_o^{0.385}}$
Carter	$t_c = \frac{15173}{10000000} \cdot \frac{L^{0.6}}{S_o^{0.3}}$
Kerby & Hathaway	$t_c = \frac{24179}{10000000} \cdot \left(\frac{n \cdot L}{S_o^{0.5}}\right)^{0.47}$
Johnstone & Cross	$t_c = \frac{343}{200000} \cdot \left(\frac{L}{S_o}\right)^{0.5}$

Para cada formulación mostrada en la Tabla 2.3, el tiempo está expresado en  $hr$ ,  $L$  representa la longitud del cauce en  $m$ ,  $n$  es el coeficiente de Manning,  $S_o$  la pendiente media del cauce, y  $\Delta H$  la diferencia de alturas entre el punto más elevado del cauce y su desembocadura, también en  $m$ .

Para el cálculo de la pendiente media en una cuenca hidrográfica se recurrió al método de Taylor-Schwartz (Planning and Technical Services, 1980), debido a que esta ecuación presenta una mejor aproximación a cómo se comporta realmente un cauce de pendiente variable. La forma de calcularlo se muestra en la ecuación (2.17).

$$S_o = \left( \frac{\sum L_i}{\sum \frac{L_i}{S_{oi}^{0.5}}} \right)^2 \quad (2.17)$$

El cálculo de un hidrograma usualmente se realiza conociendo el hietograma de precipitaciones al cual este está ligado. Sin embargo, para realizar un análisis de peligros, se tiene que contar con un rango de trabajo para diversos periodos de retorno (Maidment, 1993), es decir, estimar cual es la máxima precipitación probable que se va a encontrar en un rango de tiempo. El periodo de retorno puede ser expresado en función de la probabilidad de excedencia según la ecuación (2.18)

$$p_{ex} = 1 - \frac{1}{T_r} \quad (2.18)$$

Es así que mientras el periodo de retorno depende de la cantidad de años que se evalúen, una forma sencilla aplicada para este tipo de análisis y utilizada ampliamente (Maidment, 1993) es la mostrada en la ecuación (2.19)

$$T_r = \frac{N_{\sum i}}{i} \quad (2.19)$$

Donde para un juego de datos ordenados de mayor a menor, con una cantidad de datos  $N_i$ , para cada dato de orden  $i$  corresponde un periodo de retorno  $T_r$  y una probabilidad de excedencia  $p_{ex}$ . En función a un registro de precipitaciones máximas en 24 horas se puede extrapolar esta información según diversas funciones de distribución de probabilidad para estimar de forma coherente cual sería la precipitación máxima probable para diversos periodos de retorno (Natrella et al., 2010). El detalle de dicho procesamiento se encuentra en el Anexo A.1.4.

Sin embargo, no se puede ingresar directamente al modelo del SCS con la precipitación máxima en 24 horas, debido a que dicha precipitación tiene una distribución temporal reflejada en un hietograma de diseño. Lo ideal es conocer dicho hietograma directamente, no obstante, existen curvas de distribución de precipitaciones típicas como las del Natural Resources Conservation Service (NRCS, 1997) mediante las cuales se puede distribuir una precipitación diaria en intervalos menores segmentando las curvas mostradas en la Figura 2.6.

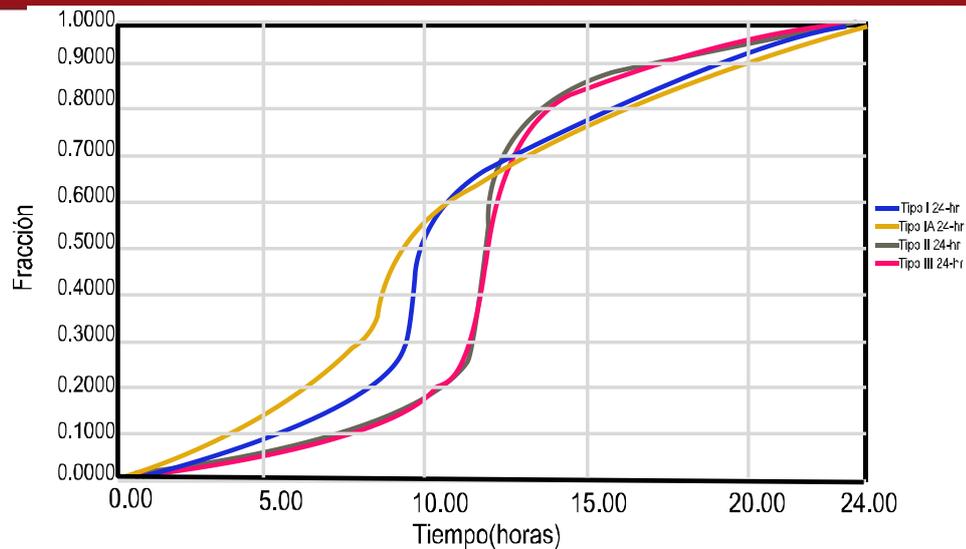


Figura 2.6 Tipos de distribución de precipitaciones según el NRCS. Adaptado de: Natural Resources Conservation Service (1997)

En el presente trabajo se utilizó la curva de tipo II convertida a una tormenta de 6 horas debido a que presenta una precipitación pico más elevada, lo que favorece la generación de los flujos de escombros (Takahashi, 1981), y a que las tormentas que usualmente generan estos fenómenos en Maranura no presentan una larga duración.

La metodología descrita y las ecuaciones mencionadas desde (2.9) a (2.16) son parte de múltiples paquetes computacionales, como es el HEC-HMS, el cual desarrolla el cálculo de hidrogramas a partir de variables climáticas como son la precipitación, la humedad y temperatura (Feldman, 2000). Para el presente estudio, se ingresó con precipitaciones máximas a 24 horas para generar un hidrograma de avenida extrema (Maidment, 1993), donde el cálculo es realizado mediante el juego de ecuaciones de (2.13) a (2.16) teniendo como variable de ingreso el área de la cuenca, los tiempos de concentración, el número de curva y las abstracciones iniciales.

## 2.4 Hidráulica de los Flujos de Escombros

Como se explicó anteriormente, un flujo de escombros es un fenómeno generado por la combinación de agua con una masa heterogénea de material tal como suelo, rocas, etc. Éste normalmente fluye a través de los cauces de los ríos en una quebrada o de una pendiente marcada (Prasad & Rajaratnam, 1991). Dicho flujo acumula material a su paso y deposita material constantemente, modificando su estado de presión de poros interna, lo cual le permite modificar su mecánica a lo largo de su curso (Iverson, 1997). Generalmente, se modelan los flujos de escombros basándose en las ecuaciones que describan un flujo no permanente gradualmente variado (Hung, 2000), teniendo en cuenta que la cantidad de momento depende de la viscosidad y

el modelo reológico que se aplique (Major & Iverson, 1999), y que su continuidad se verá influida por los procesos de erosión y deposición que el flujo presente (Takahashi, 2007).

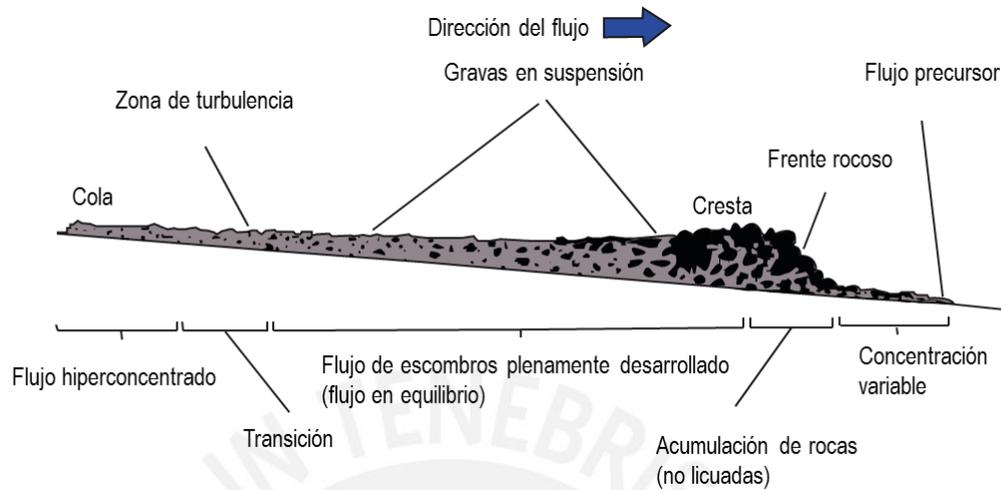


Figura 2.7 Diferentes regiones dentro de un flujo de escombros. Adaptado de: Pierson (1986)

En general, múltiples autores concuerdan en que la estructura de un flujo de escombros es fácilmente reconocible (Figura 2.7), en la cual se pueden identificar de forma sencilla tres regiones claramente definidas (Prasad & Rajaratnam, 1991). Asimismo, la concentración de los sólidos varía notablemente en función a la región que se evalúa, y por lo tanto, también su comportamiento.

Según la Figura 2.7, se puede dividir el flujo de escombros en la cresta, zona de lodos y la cola, cada uno con las siguientes particularidades.

- **Cresta:** Esta región muestra la punta del flujo de escombros y está constituida por una pared de rocas y escombros de gran tamaño los cuales parecen un muro de piedra en movimiento (Iverson, 2014). Normalmente presenta una gran altura y en consecuencia, su movimiento está gobernado por las fuerzas de inercia. En la experiencia, la longitud de dicha región se extiende como máximo 15 m (Takahashi, 2007).
- **Zona de lodos:** Esta región presenta un flujo completamente desarrollado. Debido a la turbulencia generada en esta zona y las fuerzas dispersivas, se pueden encontrar gravas en la parte superior del flujo como si éstas flotaran en el flujo (Iverson, 1997).
- **Cola:** El desarrollo del flujo en esta zona suele ser un flujo inmaduro, que tiende a convertirse en un flujo de lodos o un cauce en estado de

hiperconcentración. Esta suele depositar los sedimentos más finos acarreados por el paso de las regiones previamente descritas.

Como se puede observar, la principal característica de cada región es la concentración de material sólido que existe en cada una, al cual se le denomina  $C_d$ , el cual representa el porcentaje de volumen de sólidos con respecto al volumen total de una muestra. La cabeza presentará un valor  $C_d$  más elevado mientras que la cola tendrá un valor de  $C_d$  marcadamente menor.

#### 2.4.1 Clasificación y Características de los Flujos de Escombros

Un gran problema con el estudio de los flujos de escombros es estandarizar sus condiciones y propiedades, en primer lugar debido a que es difícil determinar cuándo un flujo de escombros es efectivamente un flujo de escombros y no un flujo de lodos o una avalancha (Jakob & Hungr, 2005), y en segundo lugar, porque dentro de los clasificados “flujos de escombros” no se presentan propiedades similares. La bibliografía y registro audiovisual muestran que los flujos de escombros pueden presentar comportamientos muy variados entre sí (Jakob & Hungr, 2005).

Una primera aproximación al problema de definir cuando un flujo de escombros puede ser considerado como tal la dieron Pierson y Costa en 1987, donde se intentó clasificar a los flujos formados por agua y sedimento en función a la concentración sólida  $C_d$  y a la velocidad media  $U$ , teniendo en cuenta que entre más elevados sean los valores de  $C_d$ , las fuerzas internas no estarían gobernadas por la viscosidad, sino por la inercia de las partículas más pesadas, lo cual ya implica considerar el flujo como no newtoniano. Se logró establecer que fenómenos similares a los flujos de escombros debían estar en un rango de velocidades entre  $0.1 \frac{m}{s}$  a  $30 \frac{m}{s}$ , sin embargo no se logra dar un alcance más preciso de cuáles son las concentraciones límite para cada tipo de movimiento (Pierson & Costa, 1987).

Una mejor aproximación por el lado de la concentración en el flujo, es la ofrecida por Coussot y Meunier, quienes realizaron una clasificación subdividiendo la concentración de sólidos en una fracción gruesa y una fracción fina. Dicha diferenciación se puede apreciar en la Figura 2.8.

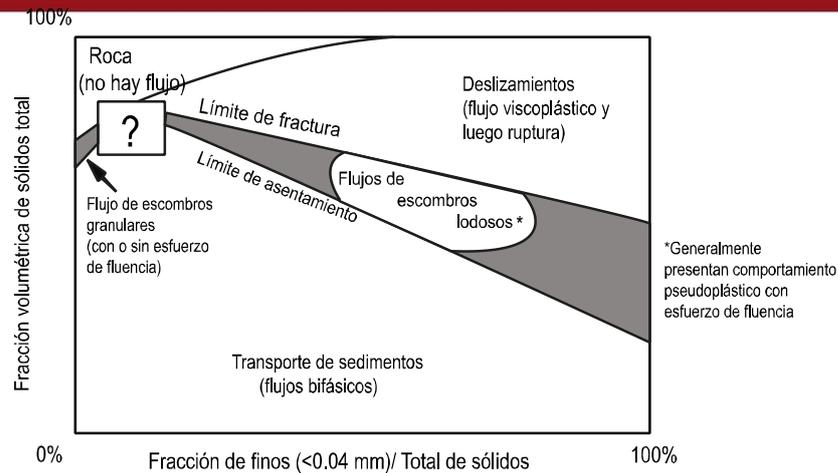


Figura 2.8 Clasificación de los movimientos masivos. Adaptado de: Coussot and Meunier (1996)

Si bien es más clara la diferenciación entre flujos conociendo la concentración de los mismos, aún persiste el problema de no poder clasificar adecuadamente un flujo de escombros predominantemente granular, o cuándo se puede considerar como notable el aporte de sedimentos en dicho flujo (Coussot & Meunier, 1996).

Otro enfoque menos subjetivo que engloba en mayor profundidad las características mecánicas del flujo de escombros, tales como densidad, viscosidad aparente, ángulo de fricción interna, etc., es dado por Iverson en 1997. Para ello se recurrió al uso de parámetros adimensionales y según lo mostrado en la Figura 2.9.

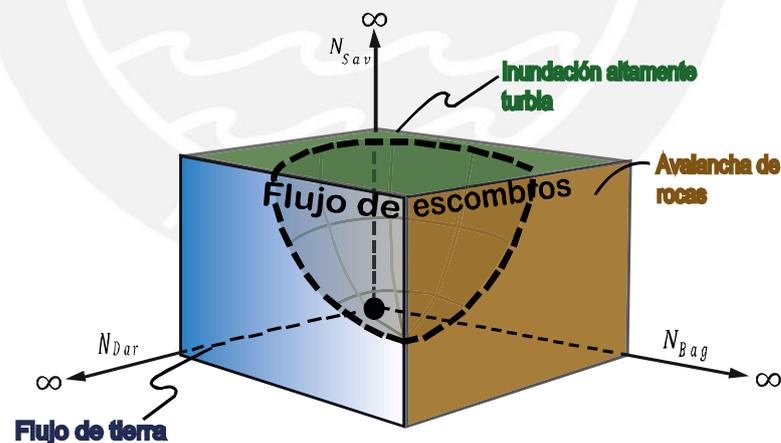


Figura 2.9 Clasificación de Iverson para los desastres naturales de origen terreste. Adaptado de: Iverson (1997)

Según la Figura 2.9, el fenómeno a evaluar tendrá tendencia a ser considerado un flujo de tierra mientras su número de Darcy  $N_{Dar}$  sea mayor, una avalancha si su número de Bagnold  $N_{Bag}$  es mayor, o una corriente de agua turbia si su número de Savage  $N_{Sav}$  es mayor. De mantenerse en un rango en el cual estos tres sean lo más semejantes posible, se considerará al fenómeno como un flujo de escombros. El

cálculo de dichos números adimensionales y otros mencionados por Iverson para el modelamiento a escala de flujos de escombros es el mostrado en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Parámetros de la clasificación de los flujos de escombros. Adaptado de Iverson and Vallance (2001)

Número	Ecuación	Significado
$N_{Dar}$	$\frac{\mu}{C_d \cdot \rho_s \cdot \dot{\gamma} \cdot k}$	Efecto de la presión de poros en amortiguar el movimiento
$N_{Bag}$	$\frac{\lambda^{1/2} \cdot \rho_s \cdot D^2 \cdot \dot{\gamma}}{\mu}$	Ratio entre esfuerzos por colisión granular y por viscosidad
$N_{Sav}$	$\frac{\dot{\gamma}^2 \cdot \rho_s \cdot D}{(\rho_s - \rho_f) \cdot g \cdot h}$	Efecto de la colisión entre partículas en los esfuerzos internos
$N_{Rey}$	$\frac{\rho_f \cdot \dot{\gamma} \cdot D^2}{\mu}$	Ratio entre fuerzas convectivas y fuerzas viscosas
$N_{Fro}$	$\left(\frac{Q^2 \cdot T}{g \cdot A^3}\right)^{0.5}$	Ratio entre fuerzas de inercia y fuerzas de gravedad
$N_{Mas}$	$\frac{\rho_s \cdot C_d}{\rho_f \cdot (1 - C_d)}$	Efecto del volumen sólido en el momento de inercia

En donde  $N_{Rey}$  es el número de Reynolds,  $N_{Fro}$  es el número de Froude,  $N_{Mas}$  es el número de Masa,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del flujo en  $Pa \cdot s$ ,  $C_d$  es la concentración volumétrica de sólidos,  $\rho_s$  y  $\rho_f$  representan las densidades de la fracción sólida y líquida respectivamente, medidos en  $\frac{kg}{m^3}$ ,  $\dot{\gamma}$  representa la tasa de deformación por corte en  $\frac{1}{s}$ , la cual también puede ser escrita como  $\frac{dv}{dz}$ ,  $k$  es la permeabilidad hidráulica en  $m^2$ ,  $D$  es el diámetro de las partículas en  $m$ ,  $Q$  es el caudal del flujo,  $A$  es el área de la sección transversal del flujo, y  $T$  es el ancho superficial del flujo.

El parámetro  $\lambda$  representa la concentración lineal de partículas en el flujo, y es una relación entre la concentración existente con la concentración máxima posible en la mezcla. Su cálculo se puede realizar mediante la concentración volumétrica de sedimentos  $C_d$  según la ecuación (2.20).

$$\lambda = \frac{1}{\left(\frac{C_*}{C_d}\right)^{1/3} - 1} \quad (2.20)$$

Donde  $C_*$  es la concentración estacionaria del terreno, la cual indica la concentración volumétrica existente de sólidos en el suelo, es decir, el cociente  $\frac{V_s}{V}$  de un suelo en

estado natural, y puede ser considerado como una propiedad índice similar a las mostradas en la Tabla 2.1 (Takahashi, 2007).

En base a la clasificación de Iverson, queda claro que un flujo de escombros, si bien debe presentar una fracción importante de sólidos, dicha fracción no puede limitar el movimiento de la misma, caso contrario, nos estaríamos enfrentando a un movimiento de tierras a mayor escala y no a un flujo propiamente dicho. Lo afirmado se puede apreciar al ver que para valores de  $N_{Sav}$  en los cuales la movilización es mínima (ver el término  $\dot{\gamma}$ ), los valores de  $N_{Dar}$  y  $N_{Bag}$  deber ser bajos también, o el movimiento sería un movimiento de tipo deslizamiento.

No obstante, el problema principal que enfrenta esta clasificación es que no presenta límites claros al igual que la clasificación de Pierson y Costa, lo que deja aún la incógnita de qué ocurre con los flujos de altas concentraciones.

Para solventar en menor medida dicha duda, Iverson propone los siguientes rangos de propiedades de los flujos de escombros típicos en función a la evidencia de campo y a experimentos a escala (Iverson, 1997), los cuales se puede apreciar en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Valores típicos de un flujo de escombros. Adaptado de: Iverson (1997)

Propiedad	Unidades	Símbolo	Rango de Valores	
Propiedades del Sólido				
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_s$	2500	3000
Diámetro medio de partícula	m	$D$	10 <sup>-5</sup>	10
Ángulo de fricción interna	°	$\phi$	25	45
Coefficiente de restitución		$e_r$	0.1	0.5
Propiedades del Fluido				
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_f$	1000	1200
Viscosidad dinámica	Pa·s	$\mu$	0.001	0.1
Propiedades de la Mezcla				
Concentración sólida		$C_d$	0.4	0.8
Concentración líquida		$C_f$	0.2	0.6
Permeabilidad hidráulica	m <sup>2</sup>	$k$	10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-9</sup>
Conductividad hidráulica	m/s	$K$	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-2</sup>
Coefficiente de compresión	Pa	$E$	10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>

Nótese que si bien existe relativa estabilidad en algunos parámetros tales como las densidades y las concentraciones, existe también una variabilidad bastante amplia en parámetros tales como el diámetro medio de las partículas existentes en un flujo de escombros y la viscosidad dinámica aparente que éste presenta. Estos parámetros son además ampliamente utilizados en la mayoría de modelos reológicos de flujos de escombros (Jakob & Hungr, 2005). Para mitigar el problema de la variabilidad en los resultados de las simulaciones de flujos de escombros, es preferible controlar de forma más significativa los parámetros  $D$  y  $\mu$ , los cuales presentan mayor dispersión (Iverson, 2003).

En contraste a las clasificaciones ya mencionadas, Takahashi propone otra clasificación para los que ya son considerados flujos de escombros, utilizando ahora los valores de  $N_{Rey}$ ,  $N_{Bag}$  y el cociente  $\frac{h}{D}$  donde  $h$  representa la altura del flujo de escombros en  $m$ , pero ahora comparándola con el valor de concentración  $C_d$  que presenta el flujo, según se plantea en la Figura 2.10.

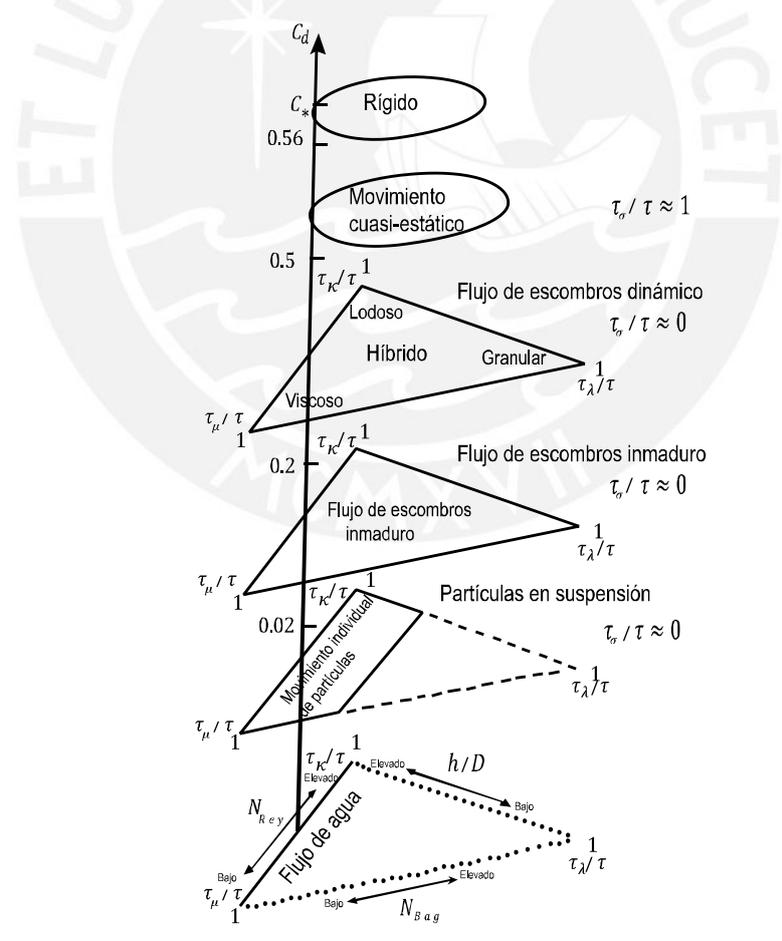


Figura 2.10 Clasificación de Takahashi para los flujos de escombros. Adaptado de: Takahashi (2007)

Dicha clasificación trabaja en dos espacios. La dinámica del flujo de escombros estará determinada por los valores de  $C_d$ . Para valores muy bajos de éste, el flujo dejará de ser un flujo de escombros y tendrá tendencia a convertirse en un flujo de agua o una avenida, mientras que los valores más elevados, el fenómeno dejará de ser un flujo y se comportará de forma rígida, tal como una avalancha seca o una falla de talud. La experiencia muestra que los valores de  $C_d > 0.56$  pertenecen al comportamiento de un desprendimiento o incluso del suelo en su estado natural (Takahashi, 1981). Si este es el caso, se le denomina a ésta concentración estacionaria del terreno  $C_*$ .

Según Takahashi, durante el desarrollo del flujo de escombros, la concentración volumétrica de sólidos suele desarrollarse entre 0.2 y 0.5 y se les llama flujos de escombros dinámicos, los cuales son flujos completamente desarrollados y son la base de las teorías que se expondrán a continuación. Dentro de este rango, se puede clasificar a los flujos en flujos de gravas, de lodos y viscosos según los números adimensionales presentados anteriormente además del aporte de los esfuerzos desarrollados en el flujo al esfuerzo cortante basal según lo descrito en la ecuación (2.21) (Takahashi, 2007).

$$\tau = \tau_{\kappa} + \tau_{\lambda} + \tau_{\mu} + \tau_{\sigma} \quad (2.21)$$

Donde  $\tau_{\kappa}$  representa el aporte al esfuerzo basal por la mezcla macro-turbulenta en el flujo de escombros,  $\tau_{\lambda}$  es el aporte por colisión entre partículas,  $\tau_{\mu}$  es el aporte por la deformación del fluido en la mezcla, y  $\tau_{\sigma}$  es el aporte cuasi-estático, derivado de una condición estática descrita en la expresión (2.4). En los flujos de grava al presentarse un comportamiento netamente inercial, la componente  $\tau_{\lambda}$  tendrá mayor importancia en el desarrollo del flujo, mientras que en flujos con mayor contenido de finos, la el grado de turbulencia indicará si el régimen reológico se aproxima más al de un fluido newtoniano o es necesario considerar un cambio en la reología lo cual se refleje en el aporte por la mezcla  $\tau_{\kappa}$  (Iverson, 1997).

Un grave problema con la clasificación de Takahashi y en general con los planteamientos de dicho autor, es que el parámetro  $D$  es muy sensible, y éste se obtiene normalmente del valor de  $D_{50}$  obtenido mediante ensayos de granulometría. No solamente es impreciso, sino que además es una asunción relativamente gruesa al tamaño de los sólidos que se encuentran dentro de un flujo, lo cual puede presentar diferencias significativas entre los resultados con valores de  $D_{50}$  ligeramente diferentes, por lo que resulta recomendable monitorear dicho parámetro (Hussain,

2007). Debido a esto la clasificación de los flujos de escombros sigue presentando cierto grado de subjetividad, pese a que es posible estimar el rango en el cual se está trabajando en función al comportamiento de los parámetros ya descritos y a la evidencia de campo (Hungar et al., 1984).

#### **2.4.2 Factores que Desencadenan los Flujos de Escombros**

Según la literatura y registros filmográficos realizados (Costa & Williams, 1984), los flujos de escombros muestran cierta tendencia de formarse en ciertas regiones, tales como:

- Regiones semiáridas
- Regiones de cordillera
- Regiones volcánicas

Esta distinción fue hecha en 1991 por Prasad y Rajaratnam (1991) y contempla los fenómenos propios de cada región al igual que la razón por la cual los flujos de escombros existen en dichas regiones. Por ejemplo, en el caso de las regiones semiáridas, en caso de ocurrir una tormenta extraordinaria, las lluvias aumentan la humedad de la zona, al igual que la presión de poros en los suelos y rocas, lo que ayuda a generar las fallas en la zona al igual que lavar los suelos no consolidados como los depósitos de coluviones. Éste es un fenómeno muy común en el Perú y en general en Latinoamérica (Jakob & Hungar, 2005). Un ejemplo de este tipo de flujos en nuestro país es el evaluado en Matucana, Chosica (Castillo et al., 2006).

En el caso de las regiones de cordillera, los flujos de escombros son causados por el deshielo de los glaciares y el derretimiento de las nieves con el cambio de las estaciones. Los mecanismos de falla son similares a los descritos en las regiones semiáridas, con la distinción de que la estimación y el cálculo del flujo de escombros no estará ligada a un hidrograma de tormentas, sino a un volumen desplazado. Un caso similar en el Perú es posiblemente la falla en la quebrada Runtumayo en el año 2005, ya que el flujo de escombros se dio por el cambio de estación y el deshielo del nevado Verónica (Cárdenas et al., 2006).

Finalmente, existen los flujos de escombros debido a actividad volcánica. Generalmente se dan debido a una erupción o a un flujo de piroclastos. Usualmente implican también el deshielo de nevados, pero debido a la existencia de material piroclástico y a las altas temperaturas a las que el flujo está expuesto, son movimientos lentos y que pueden ser modelados con modelos de base geológica. Cuando el evento volcánico viene acompañado con un deshielo de este tipo, se le

llama lahar (Costa, 1984), y un caso de estudio de este tipo de flujos de escombros en el Perú es el evaluado en el Misti, Arequipa (Stinton, Delaite, et al., 2004).

Nótese que los problemas ocasionados en las regiones de cordillera y a las regiones volcánicas tienen algo en común: no están sujetas a un hidrograma de avenida. El origen del flujo está dado por una falla súbita de material que posee la capacidad de fluir. A este tipo desencadenamiento de flujos de escombros se le conoce como bloque suelto (Jakob & Hungr, 2005).

Por otro lado, los flujos de escombros en las regiones semiáridas dependen directamente de las precipitaciones, por lo que el origen del flujo de escombros se da en un hidrograma de avenida el cual se transforma en un hidrograma de flujo de escombros. Dicha forma de desencadenamiento es llamada dinámica continua (Takahashi, 2007).

Los modelos basados en un origen dinámico continuo presentan mayor facilidad en el ámbito predictivo, debido a que es posible estimar una avenida en función a parámetros estadísticos (Maidment, 1993), mientras que en caso de los flujos originados por bloque suelto, es necesario conocer el volumen que se genera en la falla, lo cual no permite mayor predictibilidad. Sin embargo, es posible convertir un volumen de falla en hidrograma y viceversa siempre y cuando se tenga una idea del tiempo de duración de un evento típico (Christen et al., 2010). Cabe resaltar que existe acumulación de error al realizar lo descrito anteriormente debido a que en un hidrograma se conoce a priori la distribución de los caudales a lo largo de un tiempo, mientras que en una falla de bloque suelto, todo el momento de inercia es liberado repentinamente en el inicio del evento, por lo que se debe tener cuidado al realizar la conversión (Deubelbeiss & Graf, 2013).

El presente estudio, se enfocará en los flujos de escombros propios de las regiones semiáridas. Maranura, pese a estar ubicada en la ceja de selva del Perú y a presentar un clima tropical monzónico (McKnight & Hess, 2000), presenta los mismos patrones descritos anteriormente para estas regiones. Ello debido a que los flujos de escombros en la zona se deben exclusivamente a una tormenta excepcional como se puede apreciar en registro periodístico y en testimonio de los pobladores (Hurtado, 2013; Torres, 2013; Zora, 2013), además que el terreno existente posee una estructura débil que lo hace susceptible a su erosión (Marocco, 1978).

Los flujos de escombros de origen dinámico continuo son los más probables según lo expuesto previamente, y dichos flujos tienen su inicio en el lavado de sedimentos existentes en la pendiente del terreno. Según investigaciones, en lechos con cama

erosionable, un flujo de avenidas puede infiltrar y ejercer presión de poros suficiente para causar su desprendimiento, sumado el hecho de que un flujo de escombros trae consigo partículas con tamaño suficiente para generar deformación en el terreno sin problema alguno (Takahashi, 2009). Esta situación es común en los lechos que presenten depósitos de origen por coluvión y sigue el esquema mostrado en la Figura 2.11.

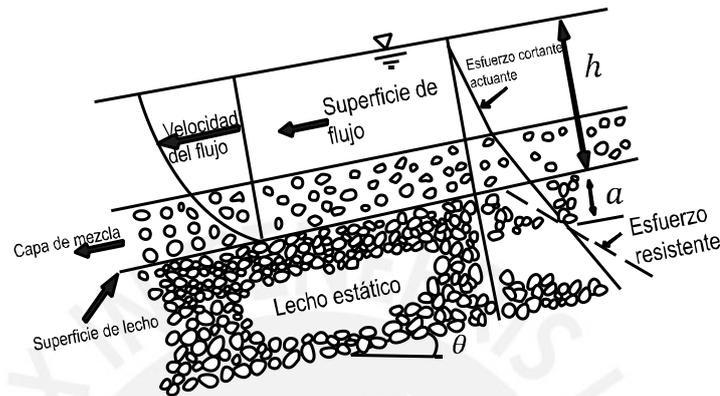


Figura 2.11 Esquema de un flujo sobre una cama erosionable. Adaptado de: Takahashi (2009)

El valor de  $h$  representa la altura del flujo y  $a$  es la profundidad efectiva a la cual el flujo puede infiltrar generando lavado de partículas. A este ancho se le conoce también como altura de la cama erosionable activada. La pendiente del terreno será  $\theta$ , y conocidas las características del suelo se puede establecer lo descrito en la ecuación (2.22).

$$\tan(\theta) = \frac{C_*(\rho_s - \rho_f)}{C_*(\rho_s - \rho_f) + \rho_f \left(1 + \frac{h}{a}\right)} \tan(\phi) \quad (2.22)$$

La pendiente que satisfaga la expresión mostrada previamente, será la que de origen a un flujo de escombros. Lo anterior se cumple debido a que al existir infiltración, las fuerzas de arrastre pueden calar dentro del material móvil y aumentar así la concentración del flujo y así ganar la concentración utilizando el material del terreno. A este fenómeno se le conoce como gradiente acuoso. En caso de no existir un depósito de un coluvión, el valor de  $a$  simplemente toma el valor de  $D_{50}$  del terreno rígido, y la ecuación sería simplemente una derivación de la ecuación de fuerza tractiva para un revestimiento dado (Takahashi, 1981).

Entonces, una vez generado el flujo de escombros, se usa la pendiente del lecho para determinar las concentraciones en el flujo utilizando la misma lógica para determinar la pendiente de iniciación del mismo, obteniendo así lo expuesto en la ecuación (2.23) (Takahashi, 2007).

$$C_d = \frac{\rho_f \cdot \tan(\theta)}{(\rho_s - \rho_f)(\tan(\phi) - \tan(\theta))} \quad (2.23)$$

La ecuación (2.23) es la que gobierna el cambio de concentración en el flujo de escombros para diversas pendientes de terreno. Nótese además que una condición importante es que la pendiente del terreno no puede ser mayor al ángulo de falla del material en la cama rígida, es decir  $\phi > \theta$ , de lo contrario, la falla no sería por flujo de escombros, sino por una falla de talud o deslizamiento.

Otra consideración importante, es que la ecuación (2.23) funciona para cambios de pendientes, sin embargo si se asume una pendiente infinita, el valor de concentración obtenido no sería un dato puntual, sino que representará también la concentración para dicho flujo en el equilibrio  $C_\infty$  (Takahashi et al., 1987). Entonces, haciendo una analogía a la realidad, en el instante en el cual aún no se forma el flujo de escombros, es decir  $t = 0$ , para valores próximos a la pendiente  $\theta$  que lo genera, se puede asumir que  $C_d = C_\infty$ , luego analizando la altura del flujo y la velocidad se puede llegar al esquema presentado en la Figura 2.12.

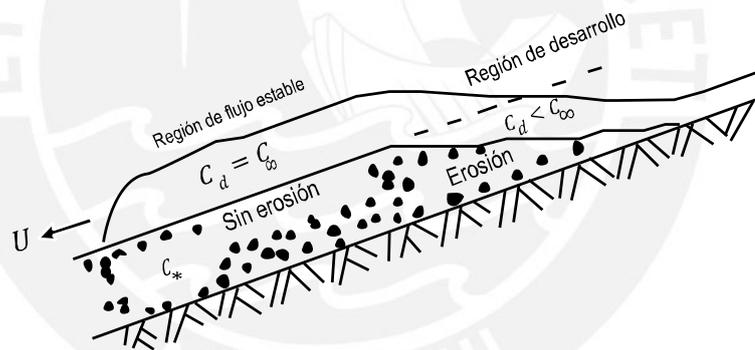


Figura 2.12 Perfil longitudinal de un flujo de escombros y sus concentraciones. Adaptado de: Takahashi (2007)

Debe recordarse que el flujo anterior a la generación del flujo de escombros, puede provenir de un flujo gradualmente variado no permanente, el cual está ligado a un caudal específico variable en función al tiempo  $q(t)$ . En el instante de la generación del flujo de escombros ( $t = 0$ ), se puede establecer la ecuación (2.24) como sigue.

$$q_d = \frac{C_*}{C_* - C_\infty} q \quad (2.24)$$

La demostración de la expresión (2.24) parte de la ecuación (2.22), y se puede encontrar en la literatura previamente descrita. El valor de  $q_d$  representa el caudal

específico para el flujo de escombros, sin embargo éste varía según el modelo aplicado y a la evolución del canal y el estado del flujo.

Respecto a los modelos de bloque suelto, si bien éstos traen consigo una importante fracción de agua la cual permite la movilización de lo sólidos en una quebrada, su origen no es tan directo como el de los flujos dinámicos continuos. El volumen que da origen a un flujo de escombros, parte de una falla de talud o de un derrumbe que posea suficiente concentración volumétrica líquida  $C_f$  que permita su fluidez.

En general, dichos derrumbes deben ser producidos por un exceso de presión de poros generado por las lluvias que infiltran en el material. Esta agua infiltrada al caer con la masa desprendida, forma una masa en estado de licuefacción, la cual viaja por las laderas de la quebrada hasta llegar al cauce y se junta con el flujo existente (Takahashi, 2009). El esquema de este fenómeno es el mostrado en la Figura 2.13.

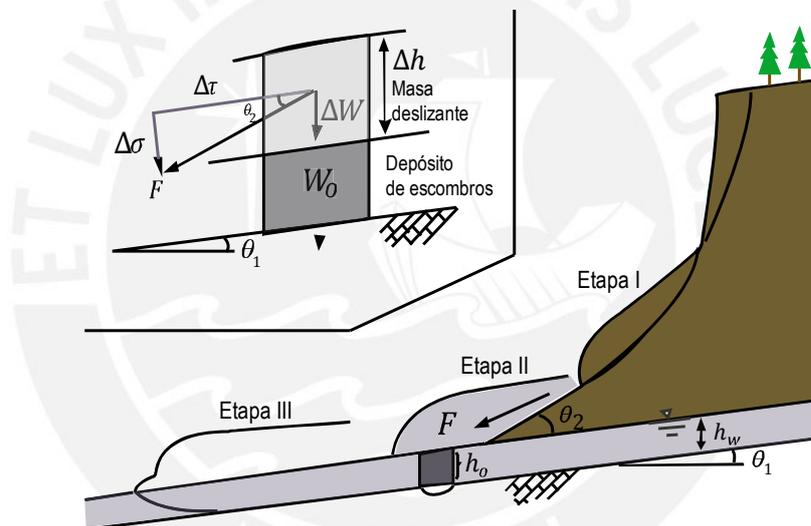


Figura 2.13 Transformación de un derrumbe en un flujo de escombros. Adaptado de: Jakob and Hungr (2005)

Al llegar la masa al cauce, se repite el efecto mostrado en la Figura 2.12, con la diferencia que el flujo de escombros no fue generado para una pendiente crítica, por lo tanto el valor de  $C_\infty$  no estaría ligado a la formación del flujo por arrastre, sino por una cuestión de ubicación. Las ecuaciones de (2.22) a (2.24) son aún válidas con la excepción de los parámetros iniciales, es decir, no se puede considerar ni  $C_\infty$  ni  $q_d$  directamente como condiciones de borde para un  $t = 0$  (Deubelbeiss & Graf, 2013).

### 2.4.3 Mecánica de los Flujos de Escombros

Según Iverson, el entendimiento de un flujo de escombros no es tan sencillo como el de otro sistema de tipo fluido, ya que el flujo de escombros es en esencia un fluido heterogéneo el cual no define un régimen claro ni como sólido ni como fluido. El

comportamiento del mismo varía según las concentraciones que presente y la interacción con la presión de poros existente dentro del flujo. Debido a esta complejidad en su resolución, una primera aproximación al desarrollo del problema, puede ser resuelto mediante un proceso termodinámico de transferencia de energía que obedece el diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.14 (Iverson, 1997).

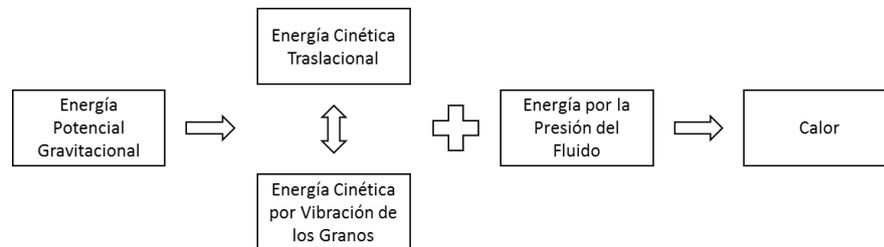


Figura 2.14 Transferencia de energía de un flujo de escombros

En la Figura 2.14, las flechas en una sola dirección representan procesos irreversibles, mientras que las flechas en ambos sentidos indican una constante interacción entre estos sistemas. Otro detalle importante a tener en cuenta, es que la transferencia de calor del flujo de escombros al ambiente es mínima. La experiencia demuestra que normalmente un flujo de escombros varía su temperatura solo unos  $0.005^{\circ}\text{C}$  (Iverson, 1997), por lo que se puede asumir que todo el desarrollo del flujo de escombros es un proceso isotérmico. Esta situación permite desarrollar una estimación sencilla de cómo es la mecánica de un flujo de escombros mediante las ecuaciones de energía potencial y cinética (Heim, 1932). Es así que se obtiene el esquema de la Figura 2.15.

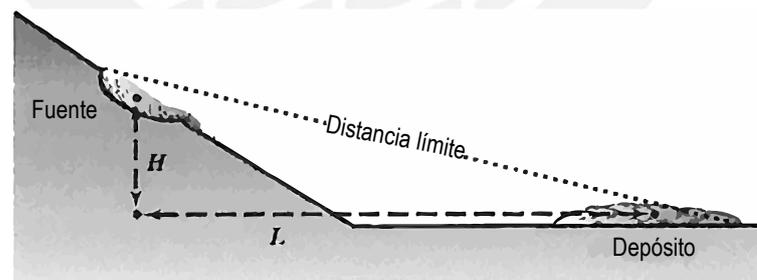


Figura 2.15 Desarrollo de un flujo de escombros hasta su deposición. Adaptado de: Iverson (1997)

Debido a que el flujo tiende a depositarse en el terreno, se sabe que existe un coeficiente de fricción al cual simplemente se le llamará  $R$ . El valor de  $H$  representa la altura desde el nivel de referencia hasta el centroide de la masa del flujo y el valor de  $L$  representará en este caso la distancia horizontal máxima de su recorrido. Luego, resolviendo por energía, se obtiene la ecuación (2.25)

$$\frac{1}{R} = \frac{L}{H} \quad (2.25)$$

Es así que, de acuerdo a la ecuación (2.25), se puede relacionar la altura del origen de la falla y la distancia del recorrido del flujo conociendo el coeficiente de resistencia  $R$  en la zona. Si bien lo mencionado anteriormente es analíticamente correcto, la expresión (2.25) simplifica de una forma gruesa el significado de  $R$ , ya que este coeficiente no es constante para el desarrollo del flujo y tampoco puede ser comparado a coeficientes de fricción en el terreno tales como el coeficiente de Manning  $n$ .

Para obtener un esquema más completo del desarrollo de un flujo de escombros, debe recordarse que el modelo no es un material uniforme, sino la mezcla de múltiples materiales tanto sólidos como líquidos interactuando entre sí. Por este motivo, una aproximación para solucionar dicha situación es mediante el empleo de modelos de flujo de múltiples fases (Gidaspow, 1994), mediante lo cual se obtienen las siguientes las ecuaciones (2.26) y (2.27)

$$\frac{\partial \rho_i \cdot C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \cdot C_i \cdot \vec{u}_i) = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial \rho_i \cdot C_i \cdot \vec{u}_i}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_i \cdot C_i \cdot \vec{u}_i \cdot \nabla \vec{u}_i = -\nabla p_i + \nabla \cdot \mathbb{T}_i + \rho_i \cdot C_i \cdot \vec{a}_i \quad (2.27)$$

La ecuación (2.26) representa la conservación de masa de un flujo de varias fases, mientras que la ecuación (2.27) representa la conservación de momento. Si se observa detalladamente, ambas expresiones son similares a las mostradas en las ecuaciones (2.7) y (2.8), con la introducción del término  $C_i$  el cual representa la concentración volumétrica de cada fase  $i$  con respecto al flujo total, recordando que  $\sum C_i = 1$ . El principal problema de dicho planteamiento es que la resolución de cada fase está ligada a otra mediante los términos  $p$ ,  $\mathbb{T}$  y  $a$ . Además que los valores de  $C_i$  no son ni permanentes ni uniformes.

Una resolución de las ecuaciones (2.26) y (2.27) la desarrolló Iverson (1997), tomando en cuenta que las fases dentro del flujo de escombros interactuaban de forma tan directa, de modo que se podía asumir que solo se tenía una fase dentro del flujo, pero con la condición que ésta se ve afectada por los procesos de erosión y deposición que desarrolla el mismo (Jakob & Hungr, 2005). Mediante una integración más profunda se obtiene el efecto que ejerce el flujo de escombros en el

límite con la cama erosionable, siguiendo el esquema de la Figura 2.13 y las cumpliendo con las ecuaciones (2.28) y (2.29)

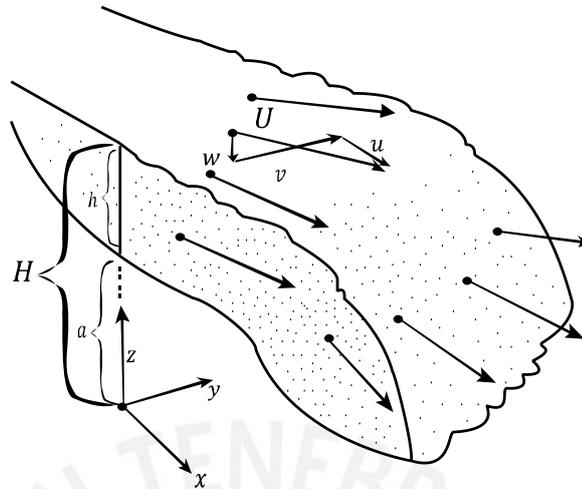


Figura 2.16 Sección del flujo de escombros en el plano cartesiano. Adaptado de: Jakob and Hungr (2005)

$$w_{(H)} = \frac{\partial H}{\partial t} + u_{(H)} \frac{\partial H}{\partial x} + v_{(H)} \frac{\partial H}{\partial y} + A_{(x,y;t)} \quad (2.28)$$

$$w_{(a)} = \frac{\partial a}{\partial t} + u_{(a)} \frac{\partial a}{\partial x} + v_{(a)} \frac{\partial a}{\partial y} + B_{(x,y;t)} \quad (2.29)$$

Nótese que el nivel de referencia tomado es la cama rígida del flujo, mientras que el valor de  $a$  representa la elevación de la cama erosionable efectiva,  $h$  el tirante del flujo de escombros y la altura total desde la profundidad hasta la cual el flujo logra afectar a la cama erosionable hasta el tope del flujo será  $H$ . El parámetro  $A$  es una función que determina el cambio de aceleración vertical, lo cual permite el reflujos y la deposición de las partículas, mientras que el parámetro  $B$  indica el cambio de altura de la cama erosionable  $a$ , donde se cumple que si  $B > 0$  se desarrolla un proceso de deposición, mientras que si  $B < 0$  entonces se genera sedimentación (Jakob & Hungr, 2005).

El problema en el desarrollo de estas ecuaciones radica en conocer las relaciones constitutivas del flujo con sus esfuerzos, ya que éstas afectan directamente la ecuación de continuidad de momento, al igual que intervenir en la función  $B$  debido a que los esfuerzos en las capas inferiores serán los que definan el arrastre o la deposición de los sólidos. Del mismo modo, el parámetro  $A$  mostrado en (2.28) es a veces indeterminado y es quien afecta la mecánica de las zonas superiores y el viaje de las partículas a través del flujo. La función  $A$  es particularmente importante si se

busca ver la mecánica de la cresta del flujo de escombros, ya que ahí existe una concentración mayor de sólidos que en las otras regiones (Jakob & Hungr, 2005).

No obstante, observando las relaciones descritas por Iverson en (2.28) y (2.29), es posible generar expresiones que conecten directamente la mecánica del flujo de escombros con un efecto dinámico en la cama erosionable. Una aproximación similar a este problema es la propuesta por Exner para el balance de masa de sedimentos en lechos fluviales (Paola & Voller, 2005), la cual está descrita en la ecuación (2.30)

$$(1 - \eta) \frac{\partial a}{\partial t} = \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (2.30)$$

Donde  $\eta$  es la porosidad de la cama erosionable y  $q_s$  es el caudal de sólidos que presenta el flujo. En la ecuación de Exner, se puede apreciar cómo la elevación varía conforme las propiedades índice del material hallado en la cama erosionable. Comparándola con la ecuación (2.29) hay una fuerte correlación por el término  $\frac{\partial a}{\partial t}$ , además que  $q_s$  es una componente de  $q_d$ . De este modo, es posible combinar expresiones similares a las de Exner a la continuidad de masa de un flujo de escombros.

#### 2.4.4 Reología de los Flujos de Escombros

La reología es la ciencia que busca estudiar y relacionar el comportamiento de las deformaciones y la fluidez de la materia con los esfuerzos de la misma. Se observó anteriormente, que determinar el estado de esfuerzos  $\mathbb{T}$  y relacionarlo con las condiciones del desarrollo del material existente dentro del flujo de escombros es fundamental para dar una solución a la mecánica del flujo mismo.

Escoger un modelo reológico correcto determinará el comportamiento y las velocidades de los flujos de escombros, tal como se apreció en las formulaciones anteriores. La reología del flujo de escombros y la formulación de la misma puede acarrear graves errores si no se controlan adecuadamente los parámetros que la rigen (Hussain, 2007). La elección de dicho modelo no es algo sencillo, ya que un flujo de escombros no se comportará necesariamente como un fluido newtoniano, debido a la interacción de las partículas dentro del mismo y a la generación de barro (Iverson, 1997).

La base reológica de todos los modelos existentes, es la interacción entre la tasa de deformación por corte  $\dot{\gamma}$ , y el esfuerzo cortante del fluido  $\tau$ . Un breve resumen de los distintos modelos reológicos se muestra en la Figura 2.17.

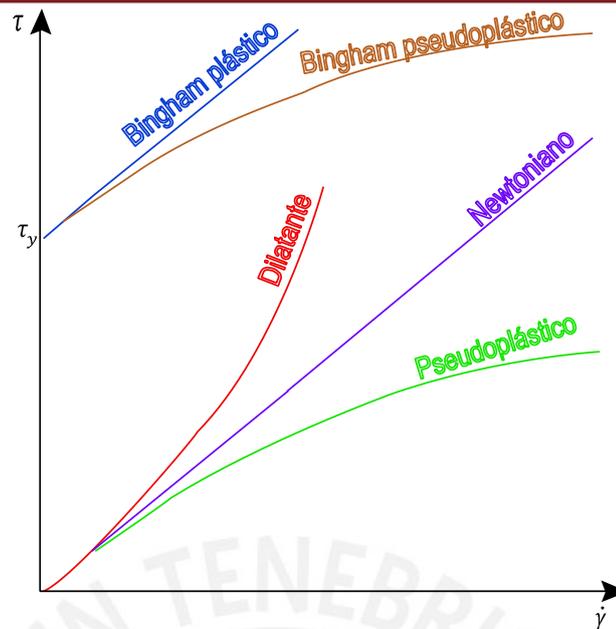


Figura 2.17 Curvas constitutivas para diferentes fluidos no newtonianos.

El valor de  $\tau_y$  es el esfuerzo cortante de fluencia y será aplicado únicamente para los fluidos de tipo Bingham y sus derivados.

Se puede apreciar en la Figura 2.17 el comportamiento de cada fluido con respecto a su tasa de deformación. Por ejemplo, los fluidos dilatantes oponen mayor resistencia a medida que se deforman. A este fenómeno se le conoce como dilatación y ocurre debido a que a medida que el medio se deforma, las partículas se entrecruzan de tal forma que generan fuerzas de dispersión las cuales aumentan la resistencia del medio (Takahashi, 2007). Caso opuesto a los fluidos del tipo pseudoplástico, los cuales no presentan un ordenamiento de partículas, por el contrario, la dispersión desacomoda el medio permitiendo mayor facilidad a la movilización del conjunto.

Por otro lado, los fluidos de tipo Bingham presentan una clara resistencia a la deformación comportándose como sólidos, hasta el punto en que alcanzan el esfuerzo  $\tau_y$  donde recién se origina el movimiento. Y es igual al fenómeno de licuefacción en los suelos, ya que con el debido estado de esfuerzos, el conjunto empieza a presentar un comportamiento fluido (Das, 2010).

Sin embargo, el problema es que todos los fenómenos descritos anteriormente, se desarrollan en un flujo de escombros de forma simultánea o incluso por etapas, pudiendo esta situación ser apreciada en registro audiovisual (Costa & Williams, 1984), donde se ve que en la mayoría de casos, la cresta del flujo de escombros presenta un comportamiento dilatante, ya que el arreglo de las gravas muestra un

ordenamiento claro y fuerzas dispersivas que permiten que éstas se acomoden y fluyan dentro de la misma zona. Por otro lado, la zona de lodos y la cola, presentan flujos más caóticos, donde las fuerzas dispersivas sobre las partículas no generan un arreglo, más bien desacomodan la matriz haciendo que las partículas se depositen o pasen a la cresta.

Debido a que el daño, la velocidad del flujo y la altura que el flujo de escombros posee se ven afectadas por la cresta del mismo, la mayoría de autores trabajan considerando modelos del tipo dilatante o modelos derivados de Bingham (Hussain, 2007). Incluso algunos autores optan por utilizar un régimen enteramente friccional derivado de las ecuaciones Mohr-Coulomb, partiendo del principio que las relaciones constitutivas que existen en un suelo se mantienen constantes en la medida en que no se desarrolle licuefacción por completo (Pitman et al., 2003).

Una de las primeras aproximaciones del comportamiento reológico de los fluidos dilatantes, es el modelo de Bagnold, el cual considera que las fuerzas causadas por la dispersión de las partículas y las colisiones generadas, son las que generan el aumento de las presiones internas y las presiones de poros, afectando considerablemente al estado del tensor de esfuerzos (Sánchez, 2009). Sin embargo, el modelo de Bagnold hace también la diferenciación de cómo ha de funcionar según el régimen que presenta, dependiendo del número de Bagnold  $N_{Bag}$  indicado previamente en la Tabla 2.4.

Tabla 2.6 Tipos de regímenes de flujos de escombros según Bagnold

Régimen	Intervalo
Macro-Viscoso	$N_{Bag} < 40$
Transición	$40 \geq N_{Bag} \geq 450$
Granular-Inercial	$N_{Bag} > 450$

De acuerdo a la Tabla 2.6, acorde Bagnold, en los flujos que presenten un régimen granular-inercial se desarrollarán grandes velocidades de deformación y por lo tanto su estado de esfuerzos dependerá de éstas. En el caso de los regímenes macro-viscosos, las velocidades de deformación serán menores y primará la interacción con la viscosidad. Los regímenes de transición pueden ser expresados utilizando las funciones del régimen granular-inercial. Se obtiene así las relaciones mostradas en la Tabla 2.7 (Sánchez, 2009).

Tabla 2.7 Cálculo de los esfuerzos según Bagnold

Régimen	Esfuerzo Cortante $\tau$	Esfuerzo Normal $\sigma$
Macro-Viscoso	$\psi \cdot \lambda^{3/2} \cdot \mu \cdot \dot{\gamma} \cdot \sin(\alpha_i)$	$\psi \cdot \lambda^{3/2} \cdot \mu \cdot \dot{\gamma} \cdot \cos(\alpha_i)$
Granular-Inercial	$\psi \cdot \rho_s \cdot \lambda^2 \cdot D^2 \cdot \dot{\gamma}^2 \cdot \sin(\alpha_i)$	$\psi \cdot \rho_s \cdot \lambda^2 \cdot D^2 \cdot \dot{\gamma}^2 \cdot \cos(\alpha_i)$

Donde el valor de  $\alpha_i$  representa el ángulo de fricción dinámico del material, y  $\psi$  es un operador adimensional obtenido experimentalmente. Los valores de los dos parámetros mencionados anteriormente, fueron determinados según experimentación y son los mostrados en la Tabla 2.8, según el régimen que presente el flujo y el valor de  $\lambda$ .

Tabla 2.8 Tabla de parámetros experimentales según Bagnold. Adaptado de: Hunt et al. (2002)

Régimen	Parámetro	Valores Esperados
Macro-Viscoso	$\psi$	3.75
	$\alpha_i$	37°
Granular-Inercial $\lambda \leq 14$	$\psi$	0.042
	$\alpha_i$	17°
Granular-Inercial $14 < \lambda < 17$	$\psi$	0.24
	$\alpha_i$	17°

Siguiendo la línea de pensamiento de Bagnold, Takahashi y los modelos de origen japonés, utilizan este modelo como base reológica pero con la idea que los valores de  $\alpha_i$  dependen de la concentración existente en el flujo. El uso que se le da al planteamiento de Bagnold, está en el rango granular-inercial, debido a que se asume que la matriz fundamental de un flujo de escombros son las gravas y no los barros, entonces el estado de esfuerzos estará determinado por las ecuaciones (2.31) y (2.32) (Takahashi, 2007).

$$\tau = \psi \cdot \rho_s \cdot \lambda^2 \cdot D^2 \cdot \dot{\gamma}^2 \cdot \sin(\alpha_i) \quad (2.31)$$

$$\sigma = \psi \cdot \rho_s \cdot \lambda^2 \cdot D^2 \cdot \dot{\gamma}^2 \cdot \cos(\alpha_i) \quad (2.32)$$

Al igual que en el planteamiento de Bagnold y en las revisiones de Hunt, los valores de  $\alpha_i$  y  $\psi$  son empíricos (Sánchez, 2009), sin embargo el planteamiento y las regresiones se realizaron verificando data experimental (Savage & Sayed, 1984) obteniendo así las expresiones (2.33) y (2.34).

$$0.35 \leq \psi \leq 0.5 \quad (2.33)$$

$$\tan(\alpha_i) = \left(\frac{C_d}{C_*}\right)^{1/3} \tan(\phi) \quad (2.34)$$

La restricción a el planteamiento de la reología de Takahashi, es que debe existir una matriz granular marcada en el flujo de escombros, además que el valor de  $C_d$  debe ser al menos de 0.15, caso contrario el flujo se considera un flujo inmaduro y por lo tanto el estado de esfuerzos presenta una menor influencia de la concentración de volumétrica de sólidos (Takahashi, 1991).

Por otro lado, uno de los modelos reológicos más aceptados globalmente es uno derivado de los fluidos tipo Bingham, el modelo reológico cuadrático. Este modelo considera un esfuerzo de fluencia  $\tau_y$  el cual debe romperse para dar origen al movimiento del flujo (O'Brien et al., 1993). El planteamiento general es el mostrado en la ecuación (2.35).

$$\tau = \tau_y + \mu \cdot \dot{\gamma} + \xi \cdot \dot{\gamma}^2 \quad (2.35)$$

En donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica y  $\xi$  es el coeficiente de esfuerzo cortante inercial. Dicho coeficiente se puede resolver mediante la ecuación (2.36).

$$\xi = \rho \cdot l_m^2 + \psi \cdot \rho \cdot \lambda^2 \cdot D^2 \quad (2.36)$$

En donde el valor de  $\rho$  toma el valor de la densidad del flujo de escombros,  $\psi$  es un operador adimensional diferente al mostrado en las expresiones (2.31), (2.32) y (2.33), y el valor  $l_m$  es la máxima longitud de la mezcla según Prandtl (Doshi & Gill, 1970), la cual se puede escribir según la ecuación (2.37).

$$l_m = \kappa \cdot h \quad (2.37)$$

El valor de  $h$  equivale a la profundidad del flujo de escombros, y el parámetro  $\kappa$  representa la constante de Von Karman, y para las condiciones en las cuales se desarrolla un flujo de escombros, el valor de  $\kappa$  puede asumirse  $\kappa = 0.4$  (Högström, 1985). Adicionalmente, el valor de  $\psi$  puede ser asumido como 0.01, ya que la obtención de la fórmula (2.37) fue probada experimentalmente por los autores de la misma en laboratorio (O'Brien & Julien, 1988).

Cabe resaltar que el modelo reológico cuadrático, es uno de los modelos más completos que existen, el cual considera todos los fenómenos mostrados en la Figura

2.17, analizando la expresión (2.35) se puede ver que el primer término corresponde a los fluidos tipo Bingham, el segundo término a un fluido newtoniano y el último a un fluido dilatante, lo cual quiere decir que si el flujo no presenta un valor significativo de esfuerzo de fluencia  $\tau_y$  y la viscosidad del mismo es casi despreciable, se obtendrá un dilatante. Sin embargo, debido a la poca confiabilidad que se tiene la constante  $\psi$  mostrada, Egashira et al. (1989) proponen la fórmula (2.38) para calcular el valor del coeficiente de esfuerzo cortante inercial  $\xi$ .

$$\xi = \rho \cdot l_m^2 + \frac{\pi}{12} \left(\frac{6}{\pi}\right)^{1/3} \sin^2(\alpha_i) \rho_s (1 - e_r^2) C_d^{1/3} \cdot D^2 \quad (2.38)$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad de los sólidos y  $e_r$  es el coeficiente de restitución entre las partículas.

Otro enfoque en cuanto a la reología de los flujos de escombros, es el modelo friccional de Coulomb, el cual utiliza el principio del círculo de Mohr para describir la interacción de esfuerzos en el flujo y más aún, para relacionarlo con su movimiento. La expresión del modelo de Coulomb considerando las propiedades del flujo, será la mostrada en la ecuación (2.39) (Sánchez, 2009)

$$\tau = (\rho - \rho_w) g \cdot h \cdot \cos(\theta) \tan(\phi) \quad (2.39)$$

Nótese que el modelo Coulomb utiliza la densidad del agua  $\rho_w$ , más no la densidad de la fracción líquida del flujo  $\rho_f$ , debido a que en este modelo se considera como efectiva la densidad de toda la materia sólida, por más que ésta esté en estado de licuefacción. Se determinó además mediante ensayos en laboratorio, que el ángulo de fricción interna es independiente de la tasa de deformación, por lo que no es necesario utilizar el valor de un ángulo de fricción dinámico en el cálculo de los esfuerzos internos del flujo (Hung & Morgenstern, 1984).

Si bien ya se comentó anteriormente que el modelo reológico más aceptado a nivel mundial es el modelo reológico cuadrático (Hussain, 2007), cabe señalar que en el caso del modelo de O'Brien, la viscosidad dinámica es asumida como una constante a lo largo del desarrollo del flujo, mientras que el esfuerzo cortante de fluencia será también una constante, por lo que el peso de estas dos variables en la ecuación (2.35), no varía conforme cambien las condiciones del flujo, mientras que el término inercial  $\xi$  depende directamente de la concentración lineal  $\lambda$  que a su vez depende de la concentración de sólidos en el flujo. Cabe recordar que es del término  $\lambda$  de

quien dependen las fuerzas dispersivas, y su papel en los flujos de escombros es claro debido a la evidencia en campo.

Uno de los grandes problemas con la identificación del modelo reológico adecuado, es la correlación que tienen estos modelos con el movimiento del flujo, su velocidad y la fuerza que genera. Quizás el fenómeno más extraño, que a su vez es determinante en definir la reología de los flujos de escombros, es el caso del transporte de rocas de gran tamaño (Ej.  $D > h$ ), y ello sucede con mucha frecuencia. Los testigos presenciales de un flujo de escombros aseguran que ven rocas de gran tamaño flotando encima de los flujos, y en el lugar de depósito del flujo, se puede apreciar también la existencia de estos bloques de gran tamaño (Egashira & Itoh, 2004). El esquema típico de este fenómeno se muestra en la Figura (2.18).

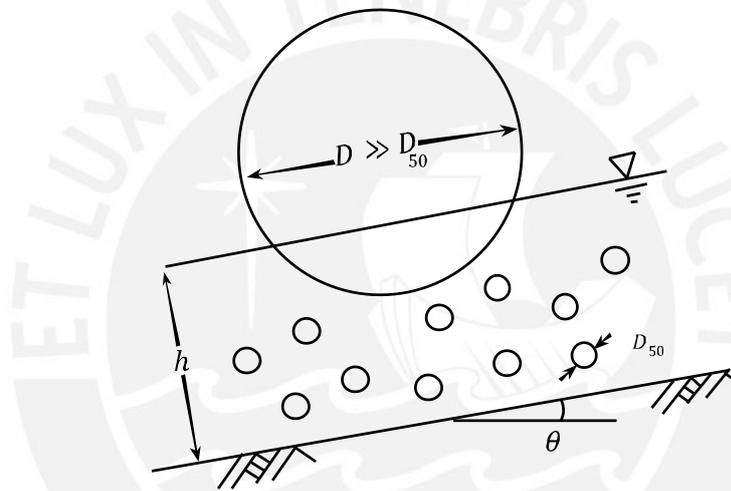


Figura 2.18 Roca de gran tamaño en un flujo de escombros. Adaptado de: Takahashi (1991)

La explicación del fenómeno mostrado en la Figura 2.18 radica en el concepto de las fuerzas dispersivas, estudiadas al momento de ver los modelos reológicos de tipo dilatantes. Según el modelo de Bagnold, y las expresiones vistas en la Tabla 2.7, en particular las de los regímenes granulares-inerciales, a mayor concentración de partículas y a mayor diámetro de las mismas, las fuerzas cortantes y en consecuencia las fuerzas normales se incrementarán de forma drástica. Este concepto funciona también en el modelo de Takahashi y en el modelo de O'Brien, sin embargo demuestra que el efecto de las fuerzas dispersivas es clave en el desarrollo de un flujo de escombros, muy por encima de la contribución de la viscosidad al sistema. Debido a esta situación, en la práctica se pueden encontrar flujos con un valor de  $C_d$  que permitan que rocas con un diámetro igual al doble de la altura del flujo floten en él (Takahashi, 2007).

Sin embargo, hay que recordar que si bien los modelos de tipo dilatante son importantes para el desarrollo de un flujo de escombros, la situación reológica de los flujos de escombros no es constante dentro de un mismo flujo, por lo que resulta necesario generar modelos que permitan la movilidad de las consideraciones reológicas al igual que el uso de diversas curvas como las mostradas en la Figura 2.17 para diferenciar apropiadamente el estado de esfuerzos internos en el flujo y si estos son de carácter dispersivos o viscosos (Iverson, 2003). Si bien el modelo reológico cuadrático es una buena aproximación, sus parámetros respecto a la viscosidad tienden a ser estáticos convirtiéndolo en un derivado de los modelos dilatantes.

## **2.5 Modelos Numéricos de Simulación**

Como se mostró en acápite anteriores, la resolución de la mecánica de los flujos de escombros puede resultar altamente compleja, llegando incluso a no tener una solución analítica, por lo cual es necesario llegar al uso de modelos numéricos computacionales que permitan la resolución de los parámetros más relevantes tales como determinar la altura del flujo, las velocidades máximas y la cantidad de material depositado en una zona.

En el presente documento, se explica el funcionamiento y el fundamento de los modelos aplicados para la presente tesis, tanto como la forma en la cual lo desarrolla el programa computacional que lo representa. En este caso se evaluará el desempeño de un modelo con origen de flujo dinámico continuo con un modelo reológico del tipo dilatante como es el modelo Kanako 2D (Nakatani et al., 2011) versus un modelo con origen de bloque suelto que aplica un modelo reológico derivado del modelo friccional de Coulomb como es el modelo Titan2D (Pitman et al., 2003).

### **2.5.1 Modelo Kanako 2D**

El modelo de simulación numérica implementado en el software Kanako es el producto de la investigación de los flujos de escombros en Japón, principalmente los estudios de Takahashi, de quien deriva la formulación y las ecuaciones de conservación de masa, momento y modelo reológico (Nakatani et al., 2008). En dicho modelo se le da particular importancia a los procesos que modifican el lecho erosionable existente (Takahashi, 1981). Cabe resaltar que dicho modelo solo puede ser aplicado en flujos que sean predominantemente granulares y que se originen de forma dinámica continua (Takahashi, 1991).

Al igual que la mayoría de modelos existentes, éste parte de una formulación derivada de las expresiones (2.26) y (2.27), simplificando dicho modelo a un flujo pseudo-bifásico, en el cual el comportamiento del flujo y el comportamiento del material granular tienen consideraciones propias. La ecuación de continuidad de masa es la mostrada en la ecuación (2.40) (Wada et al., 2008).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u \cdot h}{\partial x} + \frac{\partial v \cdot h}{\partial y} = i_{E/D} \quad (2.40)$$

Nótese que en la expresión (2.40) aparece el término  $i_{E/D}$ , que es ratio de erosión o deposición, e indica la tasa de modificación de la cama erosionable. Se le considera dentro de la ecuación de continuidad de masa debido a que mediante este término el flujo de escombros se conecta con el lecho. Valores positivos de  $i_{E/D}$  significan que el flujo le ha ganado terreno al lecho y se está produciendo erosión, mientras que valores negativos de dicho valor indican que el flujo pierde concentración de sólidos, los cuales decantan en el lecho.

Del mismo modo, la continuidad de masa para las partículas sólidas dentro del flujo está descrita en la ecuación (2.41) (Wada et al., 2008).

$$\frac{\partial C_d \cdot h}{\partial t} + \frac{\partial C_d \cdot h \cdot u}{\partial x} + \frac{\partial C_d \cdot h \cdot v}{\partial y} = i_{E/D} \cdot C_* \quad (2.41)$$

La expresión (2.41) funciona de la misma forma que la ecuación (2.40), con la diferencia que la ecuación (2.41) relaciona la concentración existente de sólidos en el flujo con la concentración máxima posible, la cual es la concentración estacionaria del terreno.

Adicionalmente, siguiendo los principios de transporte expuestos por Exner tal como se muestra en la ecuación (2.30), la continuidad en el lecho erosionable estará expresada por la ecuación (2.42) (Nakatani et al., 2011).

$$\frac{\partial a}{\partial t} + i_{E/D} = 0 \quad (2.42)$$

Donde el término  $i_{E/D}$  incluye el efecto del caudal según sea la concentración de sólidos en el sistema, el cual a su vez es variable según lo expuesto en la ecuación (2.43)

$$i_{E/D} = \begin{cases} \delta_D \cdot \frac{C_\infty - C_d}{C_*} \cdot \frac{q_d}{h} \leftrightarrow C_\infty < C_d \\ \delta_E \cdot \frac{C_\infty - C_d}{C_* - C_\infty} \cdot \frac{q_d}{D} \leftrightarrow C_\infty \geq C_d \end{cases} \quad (2.43)$$

Donde  $q$  es el caudal específico del flujo y los valores de  $\delta_D$  y  $\delta_E$  son los coeficientes de deposición y erosión respectivamente. Dichos coeficientes son adimensionales y dependen del tipo de material que se posee. En general, Takahashi recomienda el uso de  $\delta_D = 0.5$  y  $\delta_E = 0.0001$  (Takahashi & Nakagawa, 1991), mientras que Nakatani recomienda los valores de  $\delta_D = 0.05$  y  $\delta_E = 0.0007$  (Nakatani et al., 2011).

El término  $C_\infty$  es la concentración de equilibrio de la mezcla, la cual se calcula de forma similar a lo mostrado en la ecuación (2.23) con las siguientes consideraciones en función a la pendiente que presenta el flujo según lo mostrado en la ecuación (2.44).

$$C_\infty = \begin{cases} 0.9 \cdot C_* \leftrightarrow \tan(\theta_w) \geq \tan(\phi) \\ \frac{\rho_f \cdot \tan(\theta_w)}{(\rho_s - \rho_f)(\tan(\phi) - \tan(\theta_w))} \leftrightarrow \tan(\phi) > \tan(\theta_w) > 0.138 \\ 6.7 \left( \frac{\rho_f \cdot \tan(\theta_w)}{(\rho_s - \rho_f)(\tan(\phi) - \tan(\theta_w))} \right)^2 \leftrightarrow 0.138 \geq \tan(\theta_w) > 0.03 \\ \frac{(1 + 5 \cdot \tan(\theta_w)) \cdot \tan(\theta_w)}{\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1} \cdot \left(1 - \alpha_c^2 \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \cdot \left(1 - \alpha_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \leftrightarrow 0.03 \geq \tan(\theta_w) \end{cases} \quad (2.44)$$

Donde  $\theta_w$  es la pendiente de la superficie del flujo. Los límites mostrados fueron determinados según registros históricos, en donde en orden descendente representan un flujo de escombros rápidamente variado, un flujo de escombros completamente desarrollado, un flujo de escombros inmaduro y un flujo turbulento con transporte de gravas (Takahashi, 1991). En el último escenario en el cual el flujo ya no es gobernado por los sedimentos, sino por agua turbia, entran a tallar los parámetros  $\alpha_c$  el cuál representa el coeficiente de esfuerzo crítico,  $\tau_*$  y  $\tau_{*c}$  que son el esfuerzo cortante basal unitario, y el esfuerzo unitario crítico respectivamente. El valor de  $\alpha_c$  se calcula conforme se muestra en la ecuación (2.45).

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \left(0.425 - \frac{\rho_s \cdot \tan(\theta_w)}{\rho_s - \rho_f}\right)}{1 - \frac{\rho_s \cdot \tan(\theta_w)}{\rho_s - \rho_f}}} \quad (2.45)$$

La razón de la existencia de estos valores  $\alpha_c$ ,  $\tau_*$  y  $\tau_{*c}$  es debido a que para condiciones de pendiente suave, los flujos de escombros tienden a perder rápidamente su carga sólida, y por ello es que la concentración de equilibrio decrece a razón del esfuerzo cortante efectivo y del esfuerzo cortante crítico (Takahashi, 2007). El cálculo del esfuerzo cortante unitario crítico está expresado según la ecuación (2.46) (Wada et al., 2008).

$$\tau_{*c} = 0.04 \cdot 10^{1.72 \cdot \tan(\theta_w)} \quad (2.46)$$

Usualmente, para estas condiciones, el esfuerzo cortante efectivo no es suficiente para superar el esfuerzo cortante crítico, entonces, de cumplirse  $\tau_* \leq \tau_{*c}$ , el cálculo del esfuerzo cortante basal unitario será conforme se muestra en la ecuación (2.47).

$$\tau_* = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \cdot \frac{h \cdot \tan(\theta_w)}{D} \quad (2.47)$$

De modo similar, las ecuaciones de conservación de momento planteadas para el flujo de escombros en dos dimensiones son las mostradas en las ecuaciones (2.48) y (2.49).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = g \cdot \sin(\theta_w) - \frac{\tau_{xz}}{\rho_f \cdot h} \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = g \cdot \sin(\theta_w) - \frac{\tau_{yz}}{\rho_f \cdot h} \quad (2.49)$$

Donde  $\tau_{xz}$  y  $\tau_{yz}$  representan los esfuerzos cortantes basales en la dirección  $x$  e  $y$  respectivamente.

El modelo reológico a emplear también presenta variabilidad de forma similar a la concentración de equilibrio del flujo, y cambiará en función a la concentración del flujo de escombros y a la concentración estacionaria del terreno tal como se muestra en la ecuación (2.50).

$$\frac{\tau_{xz}}{\rho_f \cdot h} = \begin{cases} \frac{u \cdot \sqrt{u^2 + v^2} \cdot D^2}{8 \cdot h^3 \cdot \left( C_d + (1 - C_d) \cdot \frac{\rho_f}{\rho_s} \right) + 1 + \left( \left( \frac{C_*}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right)^2} \leftrightarrow 0.4 \cdot C_* \leq C_d \\ \frac{1}{0.49} \cdot \frac{u \cdot \sqrt{u^2 + v^2} \cdot D^2}{h^3} \leftrightarrow 0.01 < C_d < 0.4 \cdot C_* \\ \frac{g \cdot n^2 \cdot u \cdot \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \leftrightarrow C_d \leq 0.01 \end{cases} \quad (2.50)$$

Donde  $n$  es el coeficiente de Manning. Si se quiere obtener los esfuerzos basales en función de  $\tau_{yz}$  simplemente se debe reemplazar los términos  $u$  por  $v$  y viceversa. El significado de los rangos mostrados en la ecuación (2.50), en orden descendente son similares a los establecidos en la ecuación (2.44), el primero engloba los flujos de escombros plenamente desarrollados, el segundo los flujos de escombros inmaduros y el último los flujos de agua turbia con gravas (Wada et al., 2008).

Nótese además que las expresiones mostradas en las ecuaciones de (2.50) tienen similitud con las mostradas en la tabla 2.7, solo que aquí se usa un modelo dilatante con un valor de  $\gamma$  elevado al cuadrado. Además que para los flujos marcadamente granulares, el parámetro que da mayor peso es el de la concentración volumétrica.

El modelo Kanako 2D y su complemento Kanako 1D han sido utilizados con relativo éxito en Japón (Nakatani et al., 2011), Indonesia (Sumaryono et al., 2009) y Malasia (Kasim et al., 2013). Además, modelos derivados de las formulaciones de Takahashi han sido aplicados incluso en Venezuela (Egashira & Itoh, 2004). Algo que tienen en común los casos de estudios mencionados, es que todos presentan las condiciones descritas en el capítulo 2.4.2, al ser regiones con climatología similar a la de las regiones semiáridas y presentar un origen dinámico continuo. Nótese además que las imágenes mostradas en dichos artículos no son muy diferentes a la región de Maranura, por lo que se puede mostrar cierta correlación entre la geotecnia y topografía de la zona.

No obstante, un detalle importante al utilizar este modelo es la particular sensibilidad que presenta el diámetro de partícula  $D$  elegido y la topografía del terreno la cual se afectará directamente al cambio de  $\theta_w$ , lo cual trae consigo dos problemas graves al momento de realizar las simulaciones: [1] la granulometría de las partículas dentro de un flujo de escombros es realmente variada (Iverson, 1997) y no resulta preciso simplificarlo a un único tamaño, especialmente cuando dicho modelo depende altamente del valor de  $D$ , tal como se observa en la formulación descrita previamente

(Hussain, 2007). [2] debido a motivos de eficiencia computacional, Kanako 2D solo puede procesar una grilla de  $100 \times 100$  elementos como máximo. Ello significa que si se trabaja en áreas muy amplias, se debe sacrificar la resolución del terreno, lo cual puede acarrear errores serios en el cálculo.

### 2.5.2 Modelo Titan2D

El modelo presentado en el software Titan2D es un modelo que, si bien presenta el uso de ecuaciones fundamentales para la resolución de flujos poco profundos, hace mayor énfasis en el modelo friccional de Coulomb. Dicho modelo fue desarrollado en la Universidad de Buffalo por el Geophysical Mass Flow Group (GMFG) (Patra et al., 2005), y es una aplicación del modelo matemático descrito por Denlinger e Iverson.

Las ecuaciones de conservación de masa y momento provienen del planteamiento de un flujo de una única fase similar a los mostrados en las ecuaciones (2.7) y (2.8). La interacción del fluido con la cama erosionable será mediante un modelo constitutivo, es decir, mediante el modelo reológico. Debido a ello, se utilizará la expresión (2.7) como base del planteamiento de la continuidad de masa de los flujos de escombros. En cuanto a la continuidad de momento, se parte del supuesto que los esfuerzos considerados en el tensor  $\mathbb{T}$  están relacionados mediante una envolvente de falla, se obtiene entonces la ecuación (2.51).

$$\sigma_z = (h - z) \cdot \rho \cdot g' \quad (2.51)$$

La expresión (2.51) muestra el esfuerzo “hidrostático” para cualquier valor de elevación  $z$  con respecto a una altura de flujo  $h$ , utilizada debido a que los flujos de escombros poseen un comportamiento típico de flujos de aguas poco profundas (Hutter et al., 1996). La diferencia con respecto a una distribución hidrostática común es la aparición de la componente  $g'$ , la cual representa la aceleración efectiva en la dirección  $z$  (Denlinger & Iverson, 2004), calculada según la ecuación (2.52).

$$g' = g + \frac{dw}{dt} \quad (2.52)$$

La ecuación (2.52) considera la contribución del ratio de velocidad vertical  $w$ . La razón de incorporar el término  $g'$  es porque el modelo Titan2D al usar un modelo de bloque suelto, permite en sus condiciones de borde incorporar velocidades iniciales que puedan dar mayor impulso al sistema. De no existir fuerzas externas que generen dicho impulsos,  $g'$  es considerado directamente como  $g$ . Conocidos los esfuerzos verticales y sabiendo que la interacción entre partículas dentro del flujo corresponde

a un círculo de Mohr-Coulomb mostrado en la Figura 2.2, se tiene la ecuación (2.53) (Patra et al., 2005)

$$\sigma_x = \sigma_y = k_{a/p} \cdot \sigma_z \quad (2.53)$$

El valor y la generación de  $k_{a/p}$  se pueden apreciar en la ecuación (2.6). Del mismo modo, valiéndose del coeficiente de presión de suelo  $k_{a/p}$ , se pueden relacionar los esfuerzos cortantes completando el círculo de Mohr, según se muestra en la ecuación (2.54).

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = -\frac{\left|\frac{\partial u}{\partial y}\right|}{\frac{\partial u}{\partial y}} \cdot k_{a/p} \cdot \frac{\rho \cdot g' \cdot h}{2} \cdot \sin(\phi) \quad (2.54)$$

Finalmente, el modelo para completar el tensor de esfuerzos, las componentes  $\tau_{zx}$  y  $\tau_{zy}$  se calculan a partir de las ecuaciones (2.55) y (2.56) respectivamente.

$$\tau_{zx} = -\frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \cdot \left( \rho \cdot g' \cdot h \cdot \left( 1 + \frac{u}{r_{ax} \cdot g'} \right) \right) \cdot \tan(\delta) \quad (2.55)$$

$$\tau_{zy} = -\frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \cdot \left( \rho \cdot g' \cdot h \cdot \left( 1 + \frac{v}{r_{ay} \cdot g'} \right) \right) \cdot \tan(\delta) \quad (2.56)$$

Donde  $\delta$  es el ángulo de deslizamiento basal, y  $r_a$  es el radio de curvatura del lecho erosionable local. Es así que mediante estos dos parámetros, el flujo interactúa con la cama erosionable, ya que las velocidades y esfuerzos del flujo dependerán de la geometría y resistencia que aporte el lecho a producir una falla a la par que se desarrolla el flujo (Denlinger & Iverson, 2004).

Cabe recordar que al igual que en Kanako 2D, la interacción entre el lecho erosionable con el flujo tiene mayor influencia en el régimen del flujo debido a que en los flujos de escombros granulares, las mayores deformaciones y esfuerzos se sitúan en la base del flujo en la interacción con la cama erosionable (Savage & Hutter, 1989).

Compilando las relaciones constitutivas mostradas desde (2.51) hasta (2.56) junto con las ecuaciones (2.7) y (2.8), y asumiendo que todo el flujo está regido netamente por una masa cuasi-sólida (Patra et al., 2005), se obtiene la ecuación (2.57).

$$\frac{\partial \mathbb{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbb{F}_{(U)}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbb{G}_{(U)}}{\partial y} = \mathbb{S}_{(U)} \quad (2.57)$$

Donde el término  $\mathbb{U}$  representa el vector de conservación de flujo, y se expresa conforme a la ecuación (2.58) (Patra et al., 2006).

$$\mathbb{U} = \begin{bmatrix} h \\ h \cdot u \\ h \cdot v \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Asimismo, los términos  $\mathbb{F}_{(U)}$  y  $\mathbb{G}_{(U)}$  son los vectores de masa y momento para las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente. Según se muestra en las expresiones (2.59) y (2.60).

$$\mathbb{F}_{(U)} = \begin{bmatrix} h \cdot u \\ h \cdot u^2 + \frac{1}{2} k_{a/p} \cdot g' \cdot h^2 \\ h \cdot u \cdot v \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

$$\mathbb{G}_{(U)} = \begin{bmatrix} h \cdot v \\ h \cdot u \cdot v \\ h \cdot v^2 + \frac{1}{2} k_{a/p} \cdot g' \cdot h^2 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Finalmente, se define  $\mathbb{S}_{(U)}$  como el vector de conducción y de fuentes disipativas, el cual comprende las fuerzas inerciales que dan movimiento al flujo de escombros con los esfuerzos internos y los esfuerzos tractivos en la basal (Patra et al., 2006), según se muestra en la ecuación (2.61).

$$\mathbb{S}_{(U)} = \begin{bmatrix} 0 \\ a_x \cdot h - h \cdot k_{a/p} \cdot \frac{\left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|}{\frac{\partial u}{\partial y}} \cdot \frac{\partial g' \cdot h}{\partial y} \cdot \sin(\phi) - \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \cdot \left( g' \cdot h \cdot \left( 1 + \frac{u}{r_{a_x} \cdot g'} \right) \right) \cdot \tan(\delta) \\ a_y \cdot h - h \cdot k_{a/p} \cdot \frac{\left| \frac{\partial v}{\partial x} \right|}{\frac{\partial v}{\partial x}} \cdot \frac{\partial g' \cdot h}{\partial x} \cdot \sin(\phi) - \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \cdot \left( g' \cdot h \cdot \left( 1 + \frac{v}{r_{a_y} \cdot g'} \right) \right) \cdot \tan(\delta) \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

Donde los valores de  $a_x$  y  $a_y$  indican la aceleración del flujo en las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente. Si se aprecia la expresión (2.61) con cuidado, se pueden diferenciar tres componentes. El significado de dichas componentes de izquierda a derecha es el siguiente: La primera indica el aporte de la gravedad en el sentido evaluado, la segunda indica la disipación de fuerzas internas de inercia debido a la fricción entre partículas, y la tercera indica la disipación de fuerza por esfuerzo tractivo en la base del lecho (Denlinger & Iverson, 2004).

Nótese que no se hace mención alguna a la concentración de sólidos en el flujo de escombros ni al intercambio de partículas entre el flujo y el lecho. La explicación es que el modelo Titan2D asume el flujo como una masa mixta pero con propiedades similares que comparten un mismo círculo de falla de Mohr (Iverson, 1997). Es por ello que la ganancia de material a lo largo del flujo será reflejada en la medida que el material existente presenta una falla de estabilidad y comience a fluir también. Del mismo modo, la deposición se dará si un grupo de partículas deja de fluir por efectos del tercer término en  $S_{(U)}$ . Es por ello que el modelo Titan2D es particularmente sensible a  $\delta$  por los efectos de borde que presenta en el desarrollo del flujo (Stinton, Sheridan, et al., 2004).

### 3 Metodología y Datos

En el presente trabajo, la metodología para la recolección de datos fue adoptada en función a numerosos estudios realizados a nivel internacional para cuantificar las características de los flujos de escombros y calibrar los modelos reológicos asumidos (Hungt et al., 1984) utilizando básicamente los rubros clave descritos previamente, que son la topografía, la pluviometría y la geotecnia como datos de ingreso para las simulaciones y respectivas predicciones del caso (Takahashi & Nakagawa, 1991). Cabe resaltar que lo descrito en este documento, puede ser ampliamente mejorado en la medida que se tenga un registro detallado de parámetros de los flujos de escombros ocurridos, tales como puntos de control donde se conozca la elevación alcanzada y la estimación de los volúmenes de descarga de sedimentos antes de limpiar el área.

Para el tratamiento y compilación de resultados, fue utilizado un esquema derivado de un esquema Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) (Beven & Binley, 1992), mediante el cual al enfrentarnos a la escases de datos y a la dificultad de reproducir de forma determinística un evento de flujo de escombros, se decide trabajar con un rango de valores y compilar la información para generar un rango de probabilidad donde se da un flujo de escombros (Beven, 2006). Esta metodología podría ser aplicada cuando existen múltiples limitantes en la obtención de información, como es el caso de estudio de Maranura.

El esquema del plan de trabajo que fue llevado a cabo se encuentra resumido en la Figura 3.1.

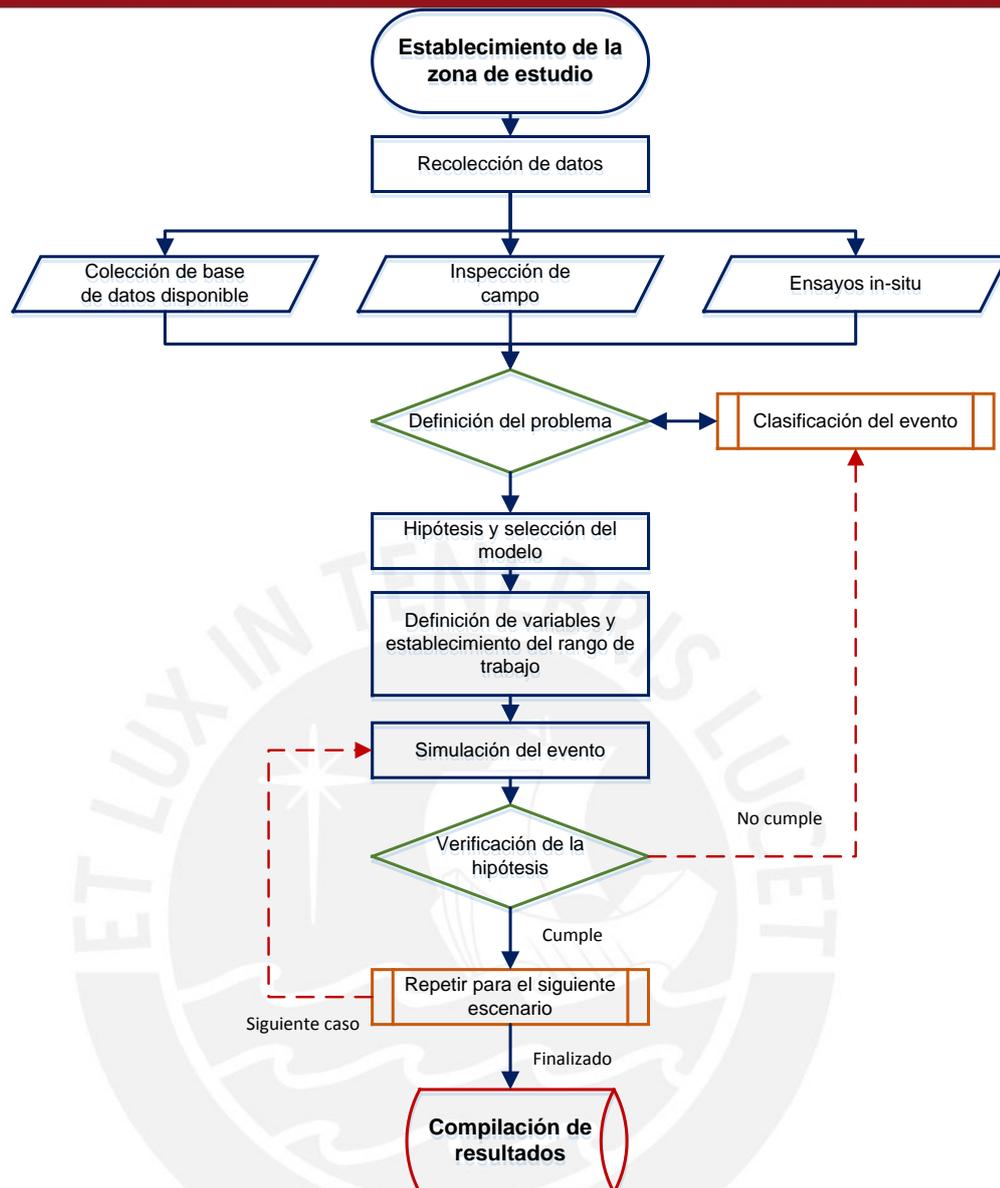


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología aplicada

Según el esquema mostrado en la Figura 3.1, es necesario en primer lugar conocer los antecedentes de la zona de estudio. Tal como se expuso en el capítulo 2.4.1, los flujos de escombros son fenómenos de difícil clasificación y caracterización, cuyo comportamiento depende de múltiples factores tanto para su generación como para su desarrollo (Takahashi, 2007). Una buena fuente de información son los reportes periodísticos que muestran imágenes y videos de los flujos de escombros, en los cuales se les puede comparar con casos ya registrados (Costa & Williams, 1984).

El testimonio de los pobladores también es importante, ya que éstos son los que conocen de primera mano, cómo y dónde pasan los flujos de escombros frecuentemente. Mediante esta tarea, se determinan dos aspectos fundamentales del estudio: [1] establecer puntos de control en los que se tiene algún conocimiento de

los flujos de escombros, [2] determinar con qué tipo de régimen llegan los flujos de escombros a la zona de interés, es decir, si su matriz es netamente granular o presenta mayor presencia de lodos y coloides (Coussot, 1997).

Luego, es necesario realizar la caracterización geotécnica del terreno a estudiar, tanto en los valles de inundación de los ríos como en las partes profundas de las quebradas, donde es probable el desencadenamiento de fallas geológicas como fallas de talud o deslizamientos que podrían alimentar a los flujos de escombros (Ortigao & Sayao, 2004). En dicha caracterización geotécnica, los parámetros más importantes a obtener son el tipo de suelo presente en la zona, la granulometría de la misma, su cohesión, ángulo de fricción interna y la concentración volumétrica sólida del mismo mediante su diagrama de fases.

Posterior a la caracterización geotécnica, es necesario realizar la caracterización topográfica del terreno de estudio y la caracterización hidrológica para establecer las láminas de precipitación, infiltración y caudales para diversos periodos de retorno. La caracterización topográfica resulta importante debido a que establece las condiciones en las cual se desenvuelven los flujos de escombros (Pitman et al., 2003), al igual que permite identificar las laderas que presenten mayor probabilidad de falla en conjunto con la caracterización geotécnica (Abramson et al., 2002). Mediante la caracterización hidrológica se establece cuan susceptible es el terreno a precipitaciones fuertes, y si éstas son las generadoras de los flujos de escombros (Hirano, 1997). En nuestro país, ambas tareas pueden ser realizadas mediante la información existente en organismos tales como el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) respectivamente. Evidentemente, al depender de estas instituciones para realizar ambas caracterizaciones, se está confiando en la calidad y precisión de sus registros.

Realizados los trabajos previamente mencionados, se procede a la definición del problema, donde se evalúa si el evento con el cual se trabaja es efectivamente un flujo de escombros, además de determinar su reología. Es posible establecer las condiciones en las cuales se desarrollan los flujos de escombros basándose en la colección de diversos tipos de flujos de escombros según la geotecnia (Prasad & Rajaratnam, 1991), y realizando la clasificación correspondiente para determinar el tipo de flujo de escombros probable según lo descrito en la Figura 2.10.

Posteriormente, se procede a seleccionar un modelo de simulación basado en la tarea previa, y partiendo por asumir como verdaderas las hipótesis que el uso de

dicho modelo implica. En el presente estudio, la evidencia que arrojan las tareas mencionadas anteriormente, indica que los flujos de escombros tienen su origen con las precipitaciones existentes en la región, y el material predominante es principalmente granular. Por tal motivo, se trabajó con modelos que asumen flujos de escombros netamente granulares, como son los modelos descritos en el capítulo 2.5: Kanako 2D (Nakatani et al., 2008) y Titan 2D (Pitman et al., 2003). Para ambos modelos se utilizó el mismo ingreso de datos a fin de determinar cuál replica de forma más adecuada los fenómenos existentes en Maranura.

Al elegir dichos modelos de simulación, se establece que la variabilidad de ambos parte en dos frentes: [1] la hidrología de la zona, [2] la heterogeneidad de la granulometría de los sólidos transportados en el flujo. Es por esta razón que se definen múltiples escenarios mediante los criterios de un GLUE (Blasone et al., 2008). Para el presente estudio se utilizaron diámetros característicos de 10 *cm* y 50 *cm*, además de generar hidrogramas líquidos para periodos de retorno de 2, 10, 50, 100, 500 y 1000 años.

Efectuadas las simulaciones, se verifican los resultados obtenidos según el testimonio de los pobladores y el registro periodístico existente (Hurtado, 2013; Torres, 2013; Zora, 2013). Adicionalmente, debido a que se trabajó bajo el principio de que los flujos de escombros tienen un carácter granular inercial, se revisan los números de Reynolds y Bagnold (Sánchez, 2009) conforme a la clasificación mostrada en la Figura 2.10 y a los valores mostrados en la Tabla 2.6.

Finalmente, luego de realizar las simulaciones para diversos escenarios mediante ambos modelos, se compila la información de salida en un Sistema de Información Geográfica (GIS) (Keith, 1997), para visualizar los efectos del flujo de escombros en el terreno. Bajo dicha interfaz, se obtienen los parámetros relevantes que permitan comparar el desempeño de cada modelo y además generar los mapas de peligros correspondientes, los cuales se realizarán mediante el mismo criterio con el cual se generan los mapas de peligro por inundación (Allende et al., 2007). Además, se genera una base de datos para cada escenario aceptado con su registro tiempo-historia para obtener el rango de valores a los cuales se está enfrentando.

### 3.1 Limitaciones del Estudio

Los principales problemas en este tipo de investigación, radican en dos grandes frentes: [1] la dificultad de reproducir adecuadamente las características de la zona de estudio en los modelos numéricos, [2] la dificultad de validar y calibrar los modelos ante la inexistencia de registros históricos de flujos de escombros.

Respecto al primer ítem, depende demasiado de la información otorgada por las entidades públicas, debido a que realizar levantamientos topográficos con una resolución mayor a la existente en las cartas nacionales significa una fuerte inversión, y la información pluviométrica en nuestro país es limitada. Por otro lado, siempre va a ser necesario asumir que las características geotécnicas son uniformes para un sector amplio, lo cual no siempre es correcto.

Respecto al segundo ítem, los estudios relacionados a este tema en nuestro país son escasos. En la medida que no se amplíe la investigación de este rubro, este problema persistirá. Es verdad que es complicado cuantificar adecuadamente un flujo de escombros cuando éste se produce, principalmente porque es complicado determinar cuándo se producirá y más aún cómo estimar parámetros tales como la altura y la velocidad del flujo. Sin embargo, existe instrumentación para el monitoreo de los flujos de escombros, la cual puede ser también implementada para la mejora de la gestión de riesgos (LaHusen, 2005).

En general, los problemas descritos pueden ser levantados mediante una mejor gestión de la información existente y un mejor monitoreo de dichos fenómenos. De momento, la solución parcial que se le da a esta problemática es la siguiente:

- Asumir uniformidad en la geotecnia del terreno (Terzaghi et al., 1996).
- Interpolar la información topográfica a un modelo de elevación digital de mayor resolución (Childs, 2004).
- Asumir que la precipitación obedece una distribución probabilística (Maidment, 1993).

El empleo de dicha solución parcial no invalida la investigación realizada, pero puede limitar la eficiencia del modelo, inducidas por las etapas de pre procesamiento de información y más aún, en los resultados obtenidos en el post procesamiento de los modelos numéricos.

Adicionalmente, se parte para el cálculo de los flujos de escombros, de un modelo reológico el cual se asume como certero y constante en todo el desarrollo. Existen investigaciones que muestran que la reología de los flujos de escombros no obedece necesariamente a estos lineamientos y que puede presentar múltiples regímenes en su desarrollo (Iverson, 2003). Por ello, los trabajos de este tipo no se deben limitar a una única evaluación, sino a una constante retroalimentación de estos fenómenos a fin de confirmar o descartar la hipótesis propuesta en el modelo reológico empleado.

Cabe recordar que no está dentro de los alcances del presente estudio evaluar la vulnerabilidad de las edificaciones existentes, más de presentar los peligros posibles que se presentan en las zonas aledañas a los centros poblados. La información generada puede ser potencialmente usada para el refuerzo de la infraestructura, pero no será evaluada en el desarrollo de la subsecuente tesis.

### 3.2 Descripción de la Zona de Estudio

El distrito de Maranura es parte de la provincia de La Convención, ubicada en el departamento de Cusco, Perú, entre las coordenadas  $73^{\circ}0'0''\text{W}$ - $12^{\circ}30'0''\text{S}$  y  $72^{\circ}30'0''\text{W}$ - $13^{\circ}0'0''\text{S}$ . Tanto Maranura como las quebradas anexas al distrito son parte de la cuenca del Urubamba (SENAMHI, 2011), el cual existe un clima tropical monzónico donde la precipitación anual promedio es de  $108\text{ mm}$ , y la temperatura oscila entre los  $22^{\circ}\text{C}$  y  $26^{\circ}\text{C}$  en promedio (McKnight & Hess, 2000).

Para el presente estudio se evaluarán las quebradas Chaupimayo, Ayunay, Yuracmayo y Chinche, las cuales conforman el distrito de Maranura y sus anexos.

### 3.3 Caracterización Topográfica

Maranura y sus anexos se ubican en la ceja de selva del Perú, por este motivo, la morfología del terreno es accidentada y presenta numerosas quebradas, siendo las principales las mostradas en la Figura 3.2.

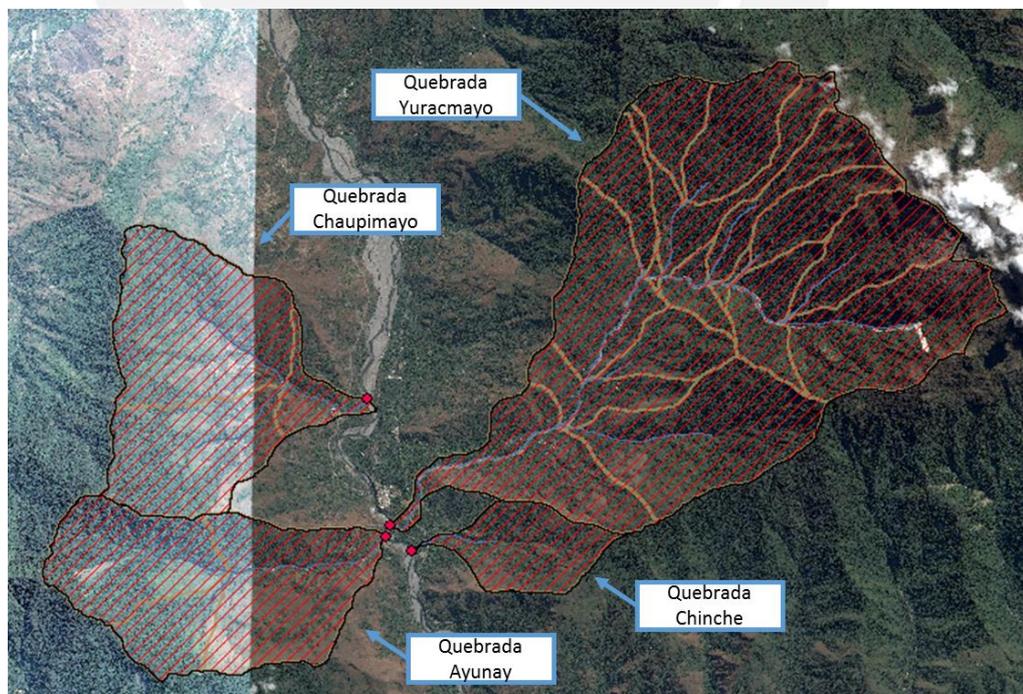


Figura 3.2 Quebradas existentes en Maranura

El detalle de las quebradas puede ser visto en el Plano P.2 y el Anexo A.1.7, donde se indican las propiedades fisiográficas de cada una ellas y sus subdivisiones. La delimitación de las mismas se realizó mediante un software procesador de modelos de elevación digital (DEM) como es el ArcGis 12 (Keith, 1997). La información base para dicho procesamiento como son las curvas de nivel fueron suministradas por el INGEMMET.

Morfológicamente, las quebradas mostradas presentan diferencias fuertes. Yuracmayo por ejemplo tiene una extensión superior frente a las demás, mientras que Chinche posee una dimensión significativamente menor lo que la haría menos susceptible a avenidas fuertes. En resumen, se obtiene la información mostrada en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resumen de dimensiones de las quebradas

Quebrada	Área total <i>km<sup>2</sup></i>	Área de captación <i>km<sup>2</sup></i>	Diferencia de alturas máxima <i>m</i>
Chaupimayo	15.99	14.63	2112.92
Ayunay	14.57	7.65	2334.52
Yuracmayo	51.06	45.49	3197.39
Chinche	3.75	2.83	1456.79

El área de captación mostrada en la tabla 3.1 refiere al punto a partir del cual se tomarán los hidrogramas de avenida para eventos extremos. Estos puntos se ubican en la confluencia de las sub-divisoria de la quebrada para maximizar el caudal que será ingresado al modelo para el cálculo de los flujos de escombros.

Luego, generado el flujo de escombros en función al hidrograma de la confluencia, éste deberá movilizarse hasta la zona de estudio donde se asume que se generará el depósito del flujo de escombros. Dentro de cada zona de estudio se eligieron puntos de control para evaluar parámetros de los flujos de escombros a lo largo del evento. Los puntos seleccionados se muestran desde la Figura 3.3 a la Figura 3.6.

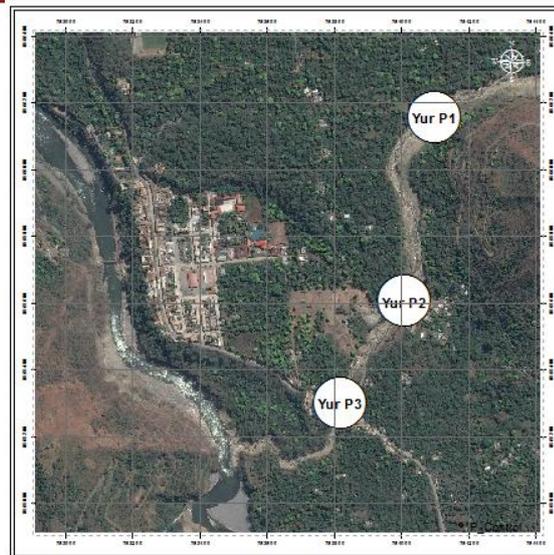


Figura 3.3 Zona de estudio en la quebrada Yuracmayo y sus puntos de control

La razón por la cual se toman los puntos mostrados en la Figura 3.3 para la quebrada Yuracmayo es la siguiente. En Yur P2 como en Yur P3 se tiene relativo conocimiento de cómo son los flujos de escombros típicos de la zona. Los pobladores aseguran que dichos flujos alcanzaban un nivel aproximado de 1.5 m.

En las simulaciones correspondientes se evaluará si los flujos de escombros son capaces de llegar a tales niveles para periodos de retorno bajos.

El punto Yur P1 es el límite entre la zona de estudio con el aforo del flujo de escombros que viaja por la quebrada. Su ubicación nace dado que el modelo Kanako 2D tiene limitaciones computacionales ya mencionadas en el acápite 2.5.1., razón por la cual para una grilla de  $100 \times 100$  elementos, se tiene como límite superior el punto mostrado y como límite inferior el río Vilcanota.

Se usará a la quebrada Yuracmayo para evaluar la validez del modelo en reproducir los flujos de escombros debido a que es uno de los pocos puntos en los cuales se posee cierto nivel de conocimiento sobre los eventos típicos de flujos de escombros. Además, los puntos Yur P2 y Yur P3 para este escenario corresponden a infraestructura que da directamente con los límites del riachuelo, la cual es más susceptible a eventos de este tipo.

Espacialmente, el punto Yur P2 con el punto Yur P3 no deberían presentar grandes diferencias debido a que ambos puntos son parte de un mismo tramo recto en el cauce. El punto Yur P1 por el contrario está ubicado antes de la presencia de una curva, por lo que se espera que corresponda a una zona de deposición de sedimentos importante.

Del mismo modo, se toman puntos de control en las demás quebradas a evaluar, teniendo como criterio para la elección, qué puntos potencialmente son más vulnerables debido a la existencia de viviendas o infraestructura.

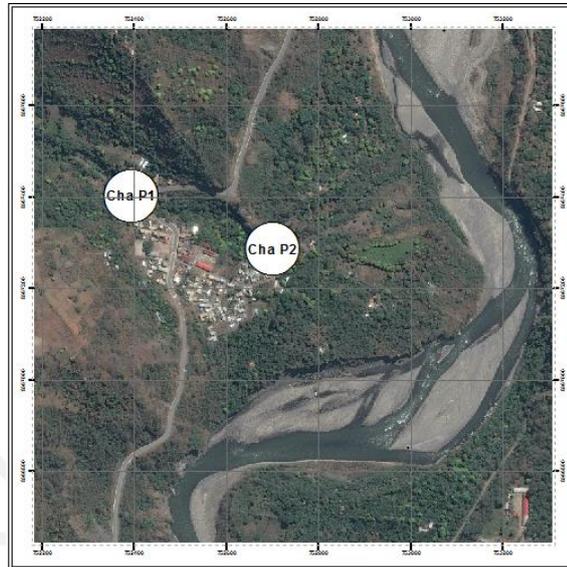


Figura 3.4 Zona de estudio en la quebrada Chaupimayo y sus puntos de control

Para el caso de Chaupimayo, y según se observa en la Figura 3.4, entre los puntos Cha P1 y Cha P2 hay una gran pendiente, lo cual favorecería a las velocidades encontradas en Cha P1, mientras que el punto Cha P2 es cercano a una curva cerrada con límite en la ladera de una formación montañosa, por lo cual debería darse también una situación de depósitos.

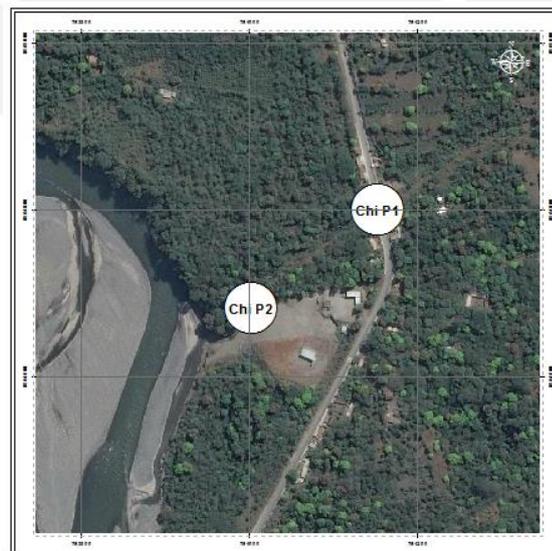


Figura 3.5 Zona de estudio en la quebrada Chinche y sus puntos de control

Por otro lado, según la Figura 3.5, la quebrada Chinche no presenta una topografía accidentada como la quebrada Chaupimayo, y en ella se tiene un tramo canalizado

perfectamente recto antes de llegar a una curva en el punto Chi P2 en donde hay una caída de tipo acantilado que desemboca directamente en el río Vilcanota. Pese a ello y debido a su topografía recta, tanto el punto Chi P1 como Chi P2 deberían tener características similares.

Finalmente, en la quebrada Ayunay se definen de forma semi-arbitraria los puntos a controlar, debido a que en dicha quebrada existen no poblaciones que estén en riesgo inminente, sin embargo, esta presenta una topografía que es beneficiosa a la generación de flujos de escombros. Los puntos a definir mostrados en la Figura 3.5 son Ayu P1 y Ayu P2 situados en depresiones que presenta la quebrada.

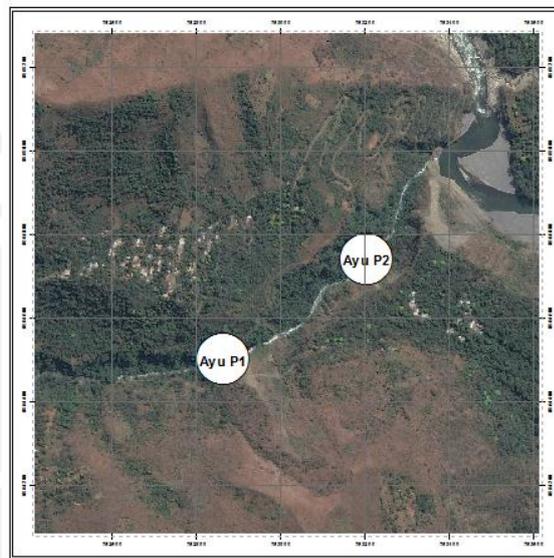


Figura 3.6 Zona de estudio en la quebrada Ayunay y sus puntos de control

En cada uno de los puntos ya mencionados, se realizó un análisis puntual mediante el modelo Kanako 2D para comparar los registros tiempo-historia, al igual que la evaluación por números adimensionales para concluir si el fenómeno en cuestión es un flujo de escombros.

### 3.4 Caracterización Geotécnica

Maranura pertenece a la formación rocosa Sandía (Marocco, 1978), y en ella existen principalmente pizarras y lutitas, las cuales son rocas de baja resistencia y fácilmente degradables en presencia de agua, debido a que su formación se origina a partir de la metamorfosis de la arcilla. Además, los depósitos hallados tanto en los valles de inundación de los ríos como en las laderas de las montañas, son depósitos aluviales y coluviales, los cuales dan evidencia de la susceptibilidad de la zona ante los flujos de escombros o fenómenos de este tipo.

Los ensayos realizados para la presente tesis, fueron la determinación de granulometría, límites de plasticidad, gravedad específica de las partículas y ensayo triaxial. El detalle de cada uno de estos se puede apreciar en el Anexo A.2. En resumen, lo encontrado en los depósitos corresponde a una grava limosa la cual tiene las propiedades mostradas en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Parámetros de los suelos en Maranura

Parámetro	Valor	Unidades
$IP$	7	%
$\rho_s$	2680	$kg/m^3$
$\phi$	31	°
$\delta$	12	°

A ello se le agrega el hecho que el suelo existente presenta una humedad cercana al 11% en condiciones de humedad normales, y una densidad natural cercana a  $2000 kg/m^3$ . Conocidos estos valores y la gravedad específica del suelo, se opta por tomar un valor de  $C_* = 0.7$ .

Respecto al índice de plasticidad indicado en la Tabla 3.2, el valor obtenido es similar al esperado, ya que se discutió anteriormente en la sección 2.1 que los flujos de escombros se desarrollaban usualmente en suelos cuyo índice de plasticidad no supera el 6% (Jakob & Hungr, 2005). El ángulo de fricción basal  $\delta$  fue asumido como el valor del ángulo de fricción residual  $\phi_r$  mostrado en el Anexo A.2.3 junto con el valor de  $\phi$ .

Otro detalle importante es que si bien la granulometría del terreno en estado natural arroja un valor fijo, este valor no tiene por qué ser igual al del diámetro característico de las partículas del flujo de escombros. En los depósitos de flujos de escombros antiguos al igual que en múltiples fallas de talud, se encontraron rocas que oscilaban entre  $D \in [0.1m; 0.5m]$ . Debido a que modelos como Kanako 2D son particularmente susceptibles a variaciones de este valor (Hussain, 2007), se trabajará con ambos para evaluar también cual es la sensibilidad de dicho parámetro frente a las quebradas estudiadas, según lo expuesto en el inicio del capítulo 3.

Finalmente, al realizar las excavaciones para retirar el material para su posterior análisis, se determinó que en promedio los depósitos aluviales no presentan una profundidad significativa. Las formaciones rocosas se hacen presentes a partir de

1.5 m de profundidad, por lo cual se tomará este valor como límite para la socavación de material, debido a que sobrepasando este umbral, el material no es erosionable.

### 3.5 Caracterización Hidrológica

Previamente se hizo mención a la climatología de Maranura, donde son relativamente frecuentes tormentas fuertes de poca duración, además el clima pertenece al típico tropical monzónico (McKnight & Hess, 2000). Lamentablemente, no existe un registro muy extenso en la misma zona de Maranura que permita medirlo correctamente.

La única estación existente en Maranura está situada en las coordenadas 72°40'W, 12°57' a una altura de 1063 *msnm*. Esta estación solo posee registros desde 1971 hasta 1977 cuando fue desactivada. La única estación cercana con un registro confiable es la Estación Quillabamba, situada en 72°41'W, 12°51' a 990 *msnm*. La cercanía tanto en cotas topográficas como en distancia favorecería al uso directo de dicha estación para la realización del estudio en cuestión. Para validar dicha hipótesis, se enfrentaron los registros disponibles en ambas estaciones y se evaluaron parámetros que demuestren la correlación entre ambas. En líneas generales, la temperatura da un promedio de 85% de correlación, mientras que la precipitación solo un 57%. Para el presente análisis, estos valores son aceptables debido a que se está trabajando con un rango de valores, mas no con un escenario particular y controlado. El detalle de la validación de la correlación entre ambas estaciones se encuentra en el Anexo A.1.3.

En base al registro de la estación en Quillabamba se procedió a extrapolar la ocurrencia de eventos máximos mediante el uso de distribuciones probabilísticas (Natrella et al., 2010). En base a las pruebas de bondad realizadas, se decidió utilizar la distribución de tipo Gumbel Máximo. El procesamiento y las pruebas de bondad realizadas se pueden encontrar en los Anexos A.1.4 y A.1.5.

Para el presente estudio se trabajó con los periodos de retorno comprendidos entre 2 años a 1000 años. Es así que conociendo las precipitaciones máximas en 24 horas para diversos periodos de retorno y utilizando la distribución Gumbel Máximo, es posible utilizar también los hietogramas de diseño del NRCS (Natural Resources Conservation Service, 1997). Se utilizó en particular, la curva tipo II para un evento de solo 6 horas debido a que esta curva refleja la intensidad de lluvia típica de Maranura donde los eventos máximos no se mantienen por largas duraciones, sino que presentan un pico máximo. En resumen de los hietogramas a utilizar en el modelo hidrológico son los mostrados en la Figura 3.7.

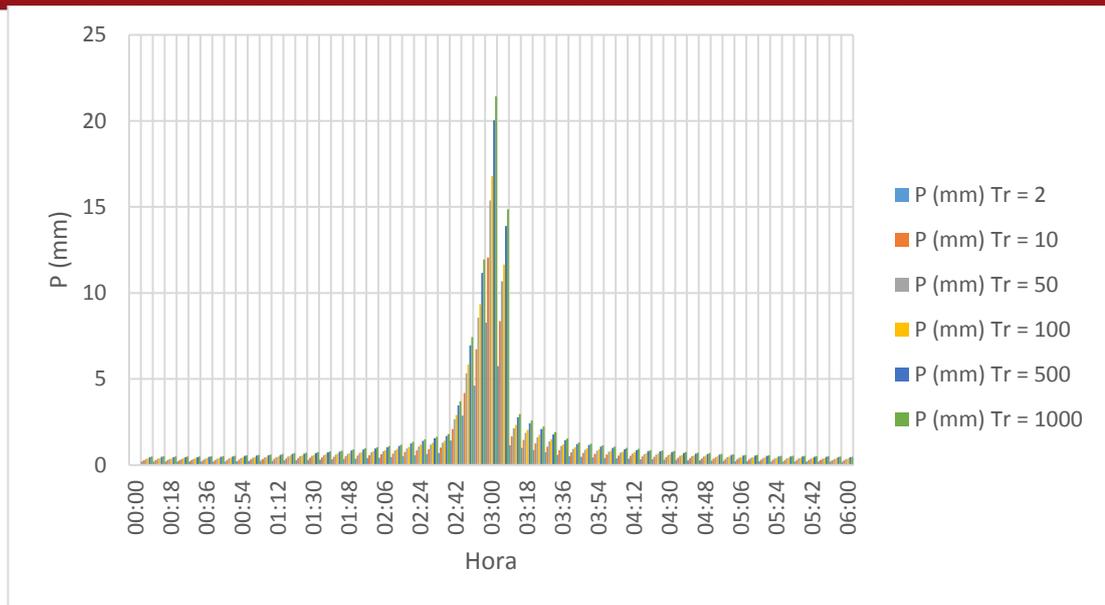


Figura 3.7 Hietogramas de diseño para múltiples periodos de retorno

El hietograma presentado en la Figura 3.6 se encuentra segmentado y detallado por periodo de retorno, en el anexo A.1.6.

Es así que conocida la pluviometría a aplicar y las características de cada subdivisión de las quebradas a evaluar según lo mostrado en A.1.7.2, es posible realizar el cálculo de los hidrogramas de avenida para cada periodo de retorno mediante el modelo hidrológico del SCS contenido en el modelo hidrológico HEC-HMS (Feldman, 2000).

Luego de obtener los hidrogramas, ya es posible entrar al modelo de simulación de flujos de escombros. El detalle de los hidrogramas obtenidos en cada caso y su discusión subsecuente será realizado en el capítulo 4, evaluando también los hidrogramas por flujo de escombros generados.

## 4 Resultados y Discusión

Con la información anteriormente obtenida, ya es posible ingresar a los modelos de simulación de flujos de escombros Kanako 2D y Titan2D. Solamente quedaría definir la densidad del fluido y los coeficientes de erosión y deposición.

En el caso de la densidad del fluido que interactúa con las partículas granulares se trabajará con  $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$ , debido a que si bien hay una concentración importante de limos y sedimentos finos, éstos no aportan significativamente con la densidad del sistema. Respecto a los coeficientes  $\delta_D$  y  $\delta_E$ , se trabajará usando las recomendaciones de Nakatani (Nakatani et al., 2011), es decir, con  $\delta_D = 0.05$  y  $\delta_E =$

0.0007 (ver ítem 2.5.1). La razón es que no hay suficientes parámetros para calibrar ambos valores, además las condiciones geotécnicas y climatológicas en los cuales estos valores fueron utilizados son similares a las de Maranura (Sumaryono et al., 2009), sumado al hecho que este par de parámetros no son tan sensibles a comparación de otros parámetros (Takahashi, 2007).

Las variables a evaluar son el tirante del flujo de escombros, la velocidad media del mismo y el cambio que genera al lecho erosionable. El rango de trabajo será el obtenido para periodos de retorno de 2, 10, 50, 100, 500 y 1000 años, además de dos diámetros de partícula: 0.1 m y 0.5 m.

En cada escenario existe una longitud de tramo entre la confluencia donde se genera el hidrograma de avenida y donde el flujo de escombros entra en la zona de estudio bidimensional. En este tramo, el hidrograma de avenida se transforma en flujo de escombros mediante las expresiones ya evaluadas en el capítulo 2.

Del mismo modo, se realizan simulaciones con Titan2D empleando una transformación de hidrograma a volumen aplicando los lineamientos de la teoría de bloque suelto (Deubelbeiss & Graf, 2013) asumiendo que el tiempo de duración del flujo de escombros como tal corresponde al pico del hidrograma.

Las variables a considerar en Titan2D son menores en cantidad, al requerir únicamente los ángulos de fricción interna y basal, pero requiere un mayor refinamiento del modelo de elevación digital y un conocimiento espacial de donde se generan y desarrollan exactamente los flujos de escombros, lo que lo hace menos certero para las evaluaciones que se presentan en este proyecto.

Los resultados mostrados a continuación corresponden mayormente al modelo Kanako 2D, el modelo Titan2D no permite efectuar análisis puntuales ni dar parámetros de velocidad o cambio en el lecho erosionable para la versión existente. Al final de cada quebrada se realizará el comparativo entre elevaciones y envergadura de la mancha de flujo de escombros para ambos modelos.

#### **4.1 Quebrada Chaupimayo**

A continuación se exponen los resultados más relevantes para el análisis realizado en la quebrada Chaupimayo. El detalle completo de las simulaciones realizadas se encuentra en los Anexos A.3.1 y A.4.1.

Evaluando los hidrogramas de avenida junto con los generados mediante el modelo Kanako 2D para flujos de escombros con los diámetros diferentes considerados

(0.1 m y 0.5 m) se obtienen los hidrogramas mostrados en la Figura 4.1 para diversos periodos de retorno.

Se observa que para los escenarios evaluados, el hidrograma generado para el flujo de escombros  $Q_d$  es solamente un poco mayor a la mitad del hidrograma suministrado  $Q$ . Este comportamiento no varía conforme cambie el periodo de retorno. El rango de trabajo obtenido para la cuenca Chaupimayo es de  $Q \in [10 \text{ m}^3/\text{s}; 95 \text{ m}^3/\text{s}]$  y de  $Q_d \in [6 \text{ m}^3/\text{s}; 60 \text{ m}^3/\text{s}]$ . No se observan diferencias significativas entre los flujos de escombros obtenidos para un diámetro de 10 cm con respecto al diámetro de 50 cm, y más bien, en los periodos de retorno bajos, existe un leve desfase temporal entre el de mayor diámetro con el de menor diámetro. Esta tendencia desaparece para los periodos de retorno superiores a 50 años.

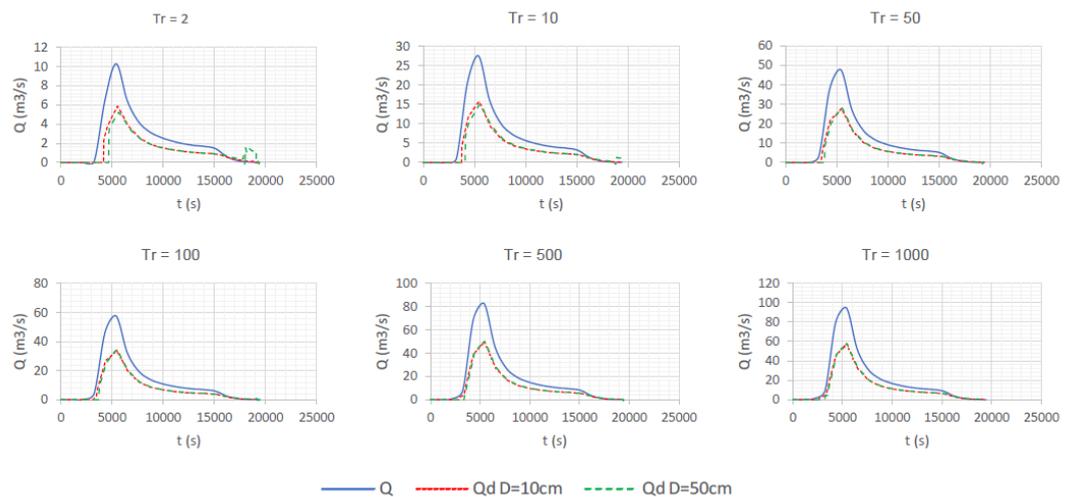


Figura 4.1 Hidrogramas líquido y de flujo de escombros en Chaupimayo

Asimismo, en la Figura 4.2 se muestran las variaciones de las alturas, velocidades y erosión o socavación en el lecho en Cha P1 para los periodos de retorno considerados en el presente trabajo.

De acuerdo a la Figura 4.2, ya se empiezan a hacer notorias las diferencias entre un diámetro u otro. Para el caso del diámetro de 10 cm, la variación de la altura con respecto al tiempo mantiene una forma muy parecida a la del hidrograma, guardando cierta proporcionalidad. Una tendencia similar se observa al aumentar el diámetro, sin embargo en periodos de retorno bajo, sea  $T_r \in [2; 10]$ , llega un punto en el cual se sufren cambios abruptos. Se nota claramente que la simulación con mayor diámetro presenta mayor dispersión que la de menor diámetro.

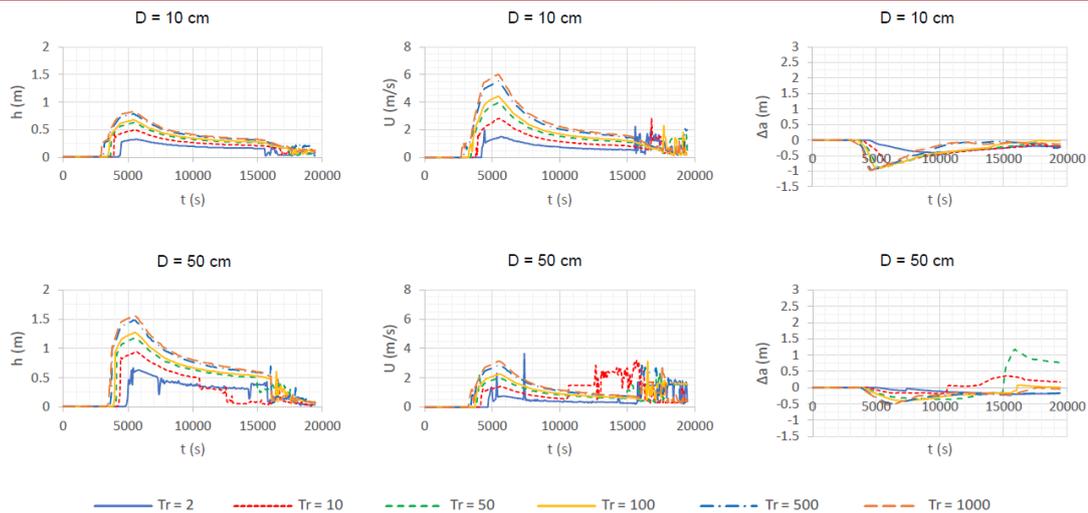


Figura 4.2 Compendio de parámetros en Cha P1, Chaupimayo

Además, el rango de valores para la altura de los flujos de escombros  $h$  es completamente diferente entre un caso y otro. El rango de trabajo para  $D = 10 \text{ cm}$  es de  $h \in [0.2 \text{ m}; 0.8 \text{ m}]$ , mientras que con  $D = 50 \text{ cm}$  es de  $h \in [0.3 \text{ m}; 1.6 \text{ m}]$ , duplicando en amplitud al registro de menor diámetro.

Por otro lado, el registro de velocidades obtenido para el punto Cha P1 presenta un comportamiento diferente para los diámetros mayores. En el caso de  $D = 10 \text{ cm}$ , la progresión de velocidades a lo largo del tiempo es muy similar a la progresión observada por el registro de alturas. Sin embargo, para  $D = 50 \text{ cm}$ , alrededor de los 10000 s, el registro experimenta una cantidad considerable de dispersión al mostrar valores súbitamente elevados. Observando detenidamente, dicha elevación en la velocidad corresponde a un descenso brusco en los tirantes, por lo que no podría descartarse la posibilidad que simplemente sea un cambio de régimen brusco en el desarrollo del flujo. Dicha hipótesis se prueba mediante la evaluación de los números adimensionales en el flujo de escombros.

Al evaluar la erosión y deposición en el punto de control 1, se ve que para el diámetro  $D = 10 \text{ cm}$  la tendencia es clara. Dicho punto experimentará erosión para todos los escenarios simulados con un máximo de 1 m de potencial erosivo máximo. Nótese además que para este punto en particular, el mismo flujo de escombros tiende a volver a depositar cierta cantidad de sedimentos dejando un agujero en el lecho fluvial de solo 0.2 m al final del evento para casi todos los escenarios simulados.

Para el caso de  $D = 50 \text{ cm}$  la situación no es tan clara, ya que este punto no presenta un comportamiento claro para diferentes caudales de avenida. Por ejemplo, dicho punto muestra erosión hasta cierto intervalo de tiempo en todos los escenarios, sin

embargo para los periodos de retorno  $T_r = 10$  y  $T_r = 50$ , el punto llega a presentar una fuerte deposición de sedimentos en el lecho, llegando a una acumulación de material de  $0.8\text{ m}$  al final del evento, efecto no reflejado en los demás periodos de retorno evaluados. Nótese además que el tiempo en el cual se origina la deposición de sedimentos corresponde a la caída de tirante mostrado y al aumento súbito de velocidad en  $4.5\text{ m/s}$ .

Finalmente, con los valores obtenidos de los registros tiempo-historia mostrados en la Figura 4.2, se calculan los números de Reynolds y Bagnold según las expresiones de la Tabla 2.4. Así se obtienen los valores mostrados en las Figuras 4.3 y 4.4.

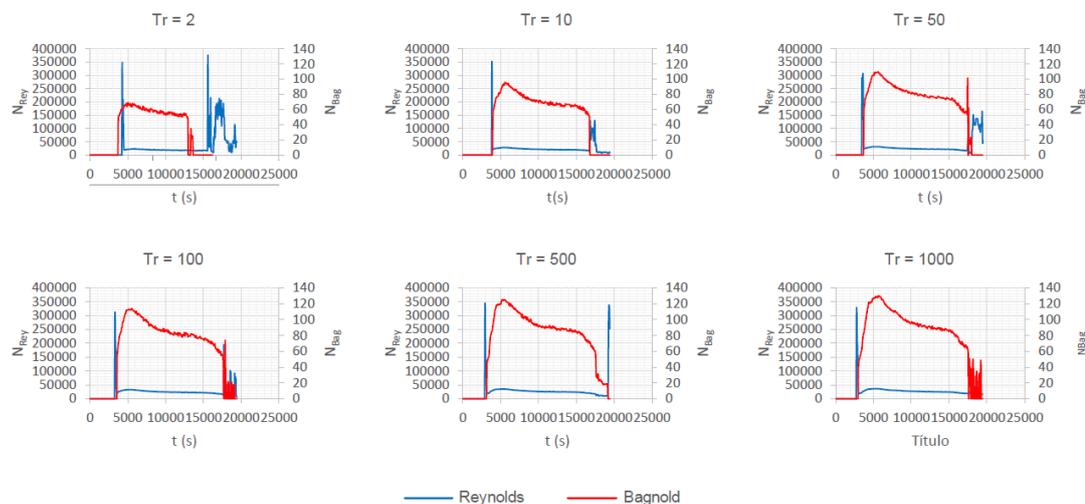


Figura 4.3 Números de Reynolds y Bagnold para Cha P1 con  $D = 10\text{ cm}$

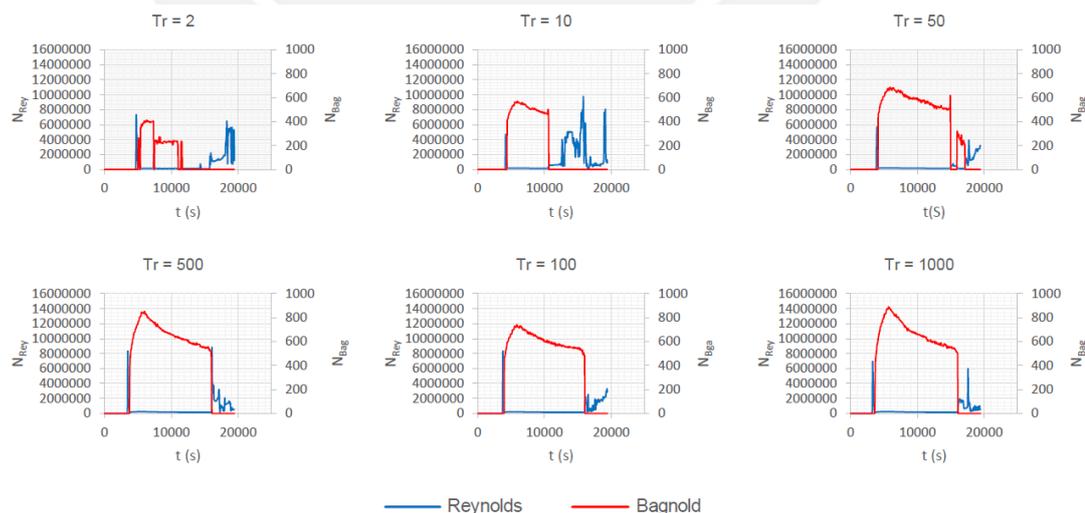


Figura 4.4 Números de Reynolds y Bagnold para Cha P1 con  $D = 50\text{ cm}$

Tanto en la Figura 4.3 como en 4.4 se aprecia que cuando el número de Bagnold crece, el número de Reynolds disminuye, esto cobra sentido teniendo en cuenta el funcionamiento de la Figura 2.10. Además se puede apreciar que en ambas gráficas,

para todo instante de tiempo se tiene un número de Bagnold considerable. Sin embargo, para el escenario de  $D = 10 \text{ cm}$  los valores de  $N_{Bag}$  oscilan entre 60 y 120, mientras que para  $D = 50 \text{ cm}$ , el rango de valores está entre 200 a 1000. Esto se debe a que para el cálculo de  $N_{Bag}$  tanto  $D$  como  $C_d$  son valores particularmente sensibles. En este punto de evaluación todos las simulaciones realizadas muestran que efectivamente se desarrolla un flujo de escombros, sin embargo para los casos de  $D = 10 \text{ cm}$  no hay mucha holgura, debido a que 40 es el límite para considerarse un flujo de tipo macro-viscoso y no granular-inercial (Sánchez, 2009).

Del mismo modo, se muestran en la Figura 4.5 los registros tiempo-historia para el punto de control Cha P2. Aquí se pueden apreciar más claramente los contrastes entre flujos de escombros con dos diámetros de partícula característicos.

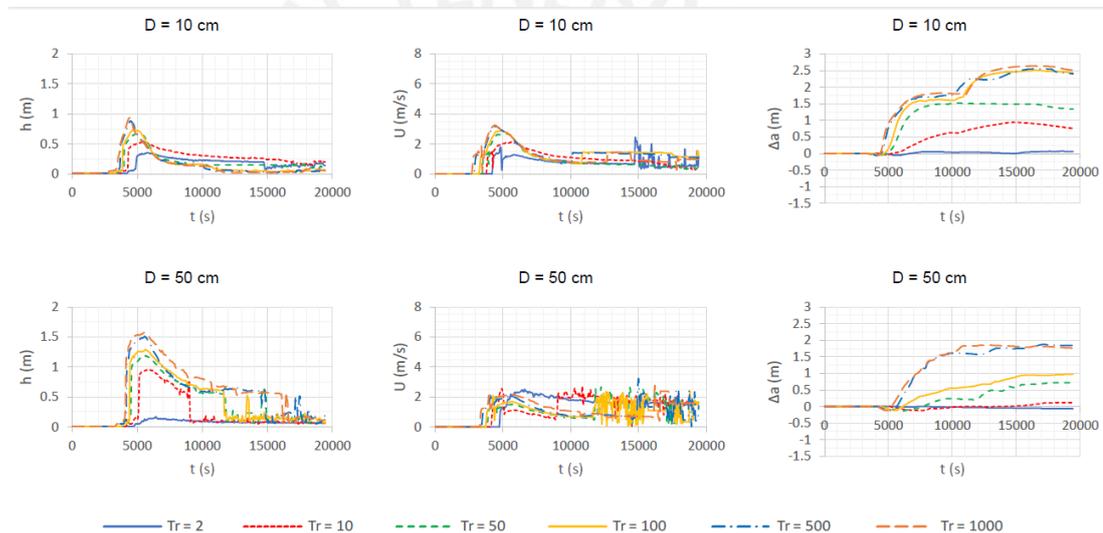


Figura 4.5 Compendio de parámetros en Cha P2, Chaupimayo

Los resultados generados con un diámetro mayor, muestran también mayores elevaciones de flujo y mantienen una velocidad mayor en promedio, mientras que tienen una menor tendencia a la deposición la cual se genera por los flujos de escombros de menor diámetro. Adicionalmente, si bien ambos tipos de flujo de escombros presentan dispersión, los valores generados para  $D = 10 \text{ cm}$  mantienen una misma tendencia conforme al registro de elevaciones, mientras que para  $D = 50 \text{ cm}$  persiste el problema de registrar velocidades anormalmente elevadas luego de la caída del nivel de altura del flujo de escombros. Respecto a la velocidad, en ambos diámetros no se muestra mayor diferencia de velocidades independientemente del periodo de retorno al cual corresponden.

Se realiza también el análisis por número de Reynolds y por Número de Bagnold, generando así las Figuras 4.6 y 4.7.

En este punto de evaluación ya se hace notar una diferencia clave. Según la Figura 2.7, para un periodo de retorno de  $T_r = 2$  no podría considerarse que se genera un flujo de escombros en el caso de  $D = 50\text{ cm}$ , porque no hay concentración de material suficiente para generar valores de  $N_{Bag}$ . En los demás casos no debería existir problema alguno, simplemente notar que la caída de  $N_{Bag}$  genera la caída del tirante  $h$  y el incremento errático de  $U$  tal como se aprecia en la Figura 4.5.

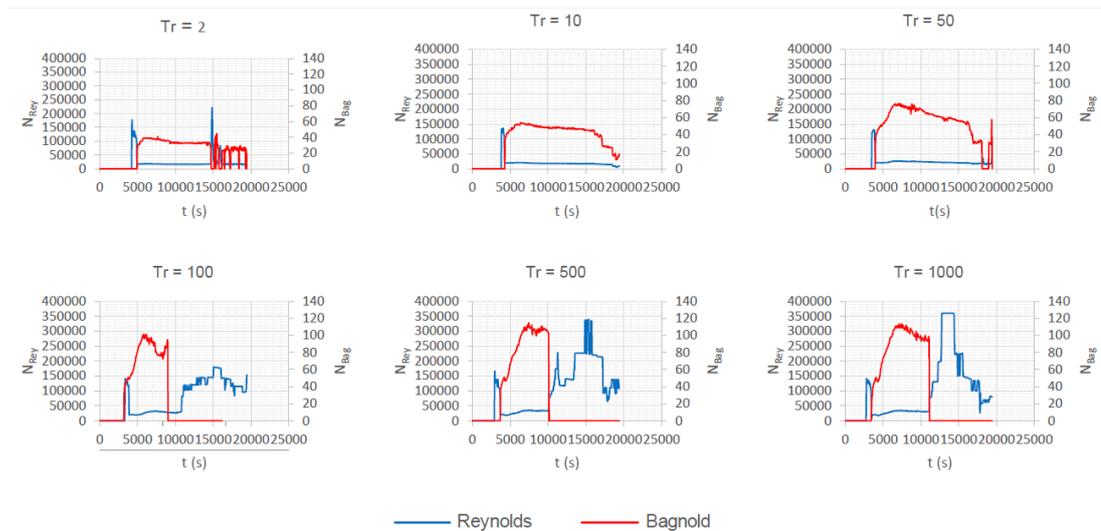


Figura 4.6 Números de Reynolds y Bagnold para Cha P2 con  $D = 10\text{ cm}$

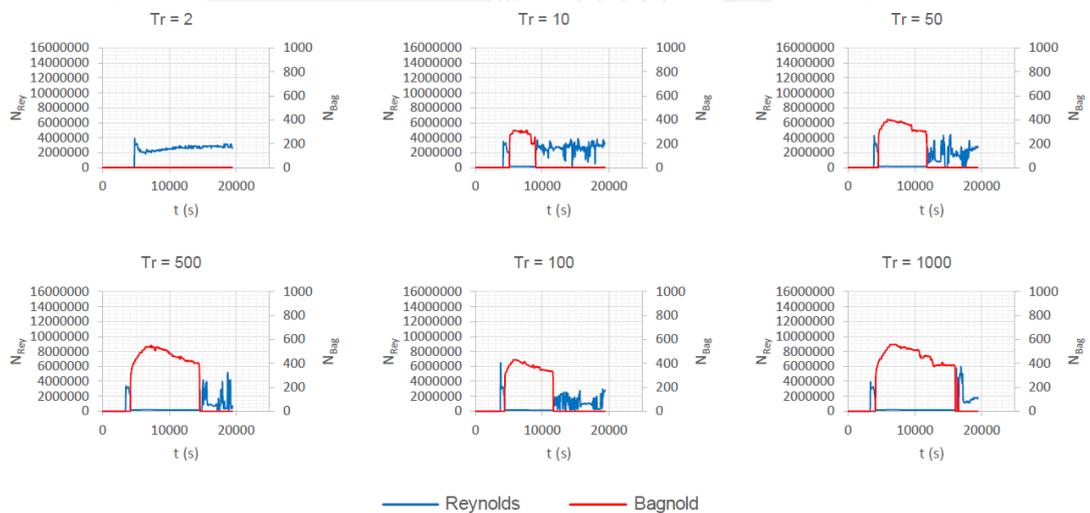


Figura 4.7 Números de Reynolds y Bagnold para Cha P2 con  $D = 50\text{ cm}$

Descartando los valores que no generan valor alguno de  $N_{Bag}$ , se generan los valores máximos y se obtienen gráficas comparativas como la Figura 4.8 donde se muestran los valores máximos de elevación de flujos de escombros en Chaupimayo.

En la Figura 4.8, la imagen (a) representa la mancha para un diámetro de  $D = 10\text{ cm}$  y  $T_r = 2$ , (b) representa  $D = 10\text{ cm}$  y  $T_r = 1000$ , (c) representa  $D = 50\text{ cm}$  y  $T_r = 2$ ,

por último, (d) representa  $D = 50 \text{ cm}$  y  $T_r = 1000$ . Lo más resaltante entre las gráficas mostradas en la Figura 4.8, es que para los casos de  $D = 10 \text{ cm}$  la envergadura del flujo de escombros es mayor solo para los periodos de retorno bajos, mientras que en todos los periodos de retorno,  $D = 10 \text{ cm}$  presenta tirantes de flujo de escombros menores que  $D = 50 \text{ cm}$ . Para los casos evaluados, el valor tope de elevación de flujo de escombros no excede  $1.80 \text{ m}$ .

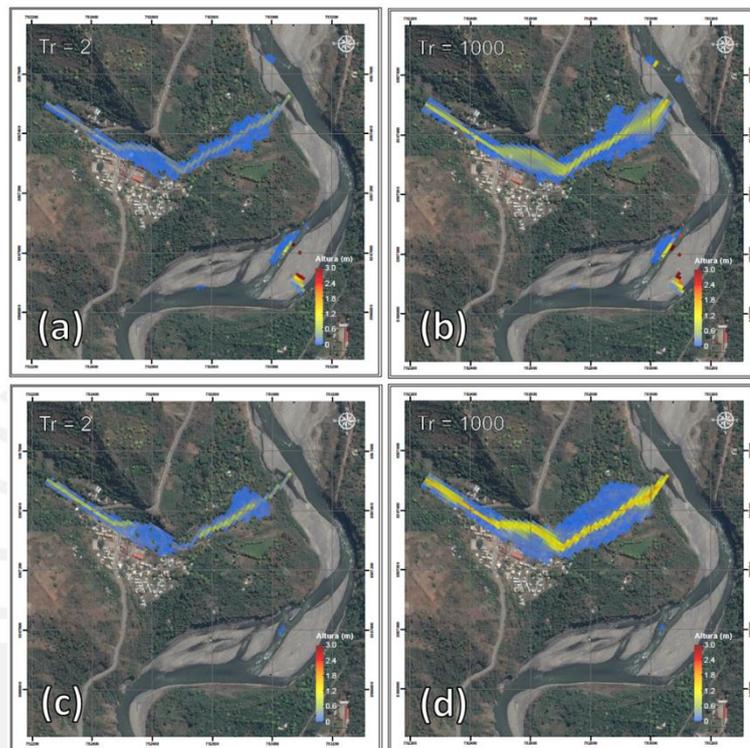


Figura 4.8 Mancha de elevaciones máximas de flujo de escombros, Chaupimayo

En la Figura 4.9 tenemos un esquema similar al presentado anteriormente, pero ahora mostrando cual es la deposición máxima de sedimentos que deja el flujo de escombros. La distribución de imágenes es la misma que la mostrada para la Figura 4.8.

Las diferencias entre las simulaciones con diámetros de  $D = 10 \text{ cm}$  y  $D = 50 \text{ cm}$  no son del todo evidentes en este caso. Para  $D = 10 \text{ cm}$  se pueden apreciar que se alcanzan los valores máximos en más celdas evaluadas que en  $D = 50 \text{ cm}$ . Sin embargo,  $D = 50 \text{ cm}$  obtiene ligeramente mayor envergadura que  $D = 10 \text{ cm}$ .

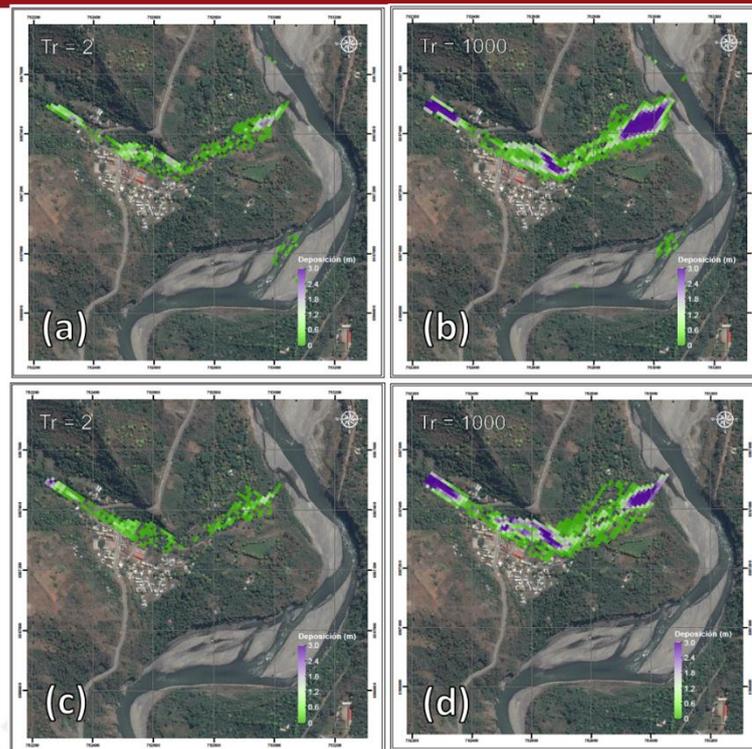


Figura 4.9 Mancha de deposición máxima de flujo de escombros, Chaupimayo

Del mismo modo, en la Figura 4.10 se muestran, con la misma distribución de imágenes utilizada en las Figuras 4.8 y 4.9, las manchas de erosión máxima obtenida para un evento de flujo de escombros.

Similarmente a la Figura 4.9, en la Figura 4.10 las diferencias entre los distintos diámetros no son del todo notorias. Además con respecto a la Figura 4.9, el esquema es bastante similar en lo que a efecto del flujo de escombros sobre el terreno se refiere, es decir, la mayor cantidad de celdas que obtienen los valores máximos de erosión se encuentran en los escenarios simulados con  $D = 10 \text{ cm}$ , mientras que una mayor envergadura de erosión la presentan los casos con  $D = 50 \text{ cm}$

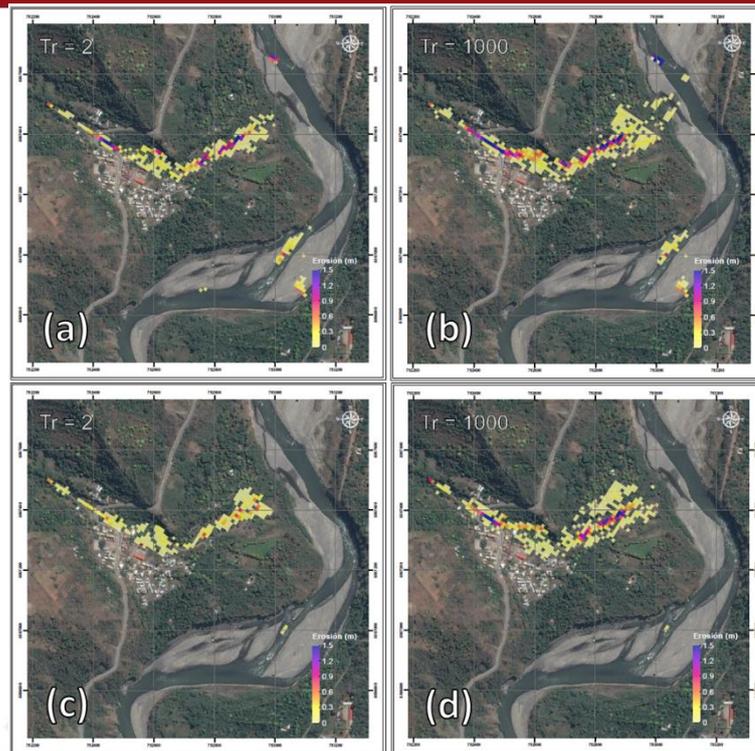


Figura 4.10 Mancha de erosión máxima de flujo de escombros, Chaupimayo

Finalmente, queda comparar los resultados presentados con los de otro modelo de simulación. En la Figura 4.11 se muestran las comparación de manchas de flujo de escombros obtenidas mediante Titan2D frente a las obtenidas con Kanako 2D y  $D = 50 \text{ cm}$ . La distribución de imágenes es la siguiente, (a) representa la simulación de Titan2D para un  $T_r = 2$ , (b) es la simulación de Titan2D para  $T_r = 1000$ , (c) es la simulación para Kanako 2D para  $T_r = 2$ , y (d) es la simulación de Kanako 2D para  $T_r = 1000$ .

Las diferencias entre ambos modelos son notorias. Para todos los escenarios presentados, Titan2D tiende a sobreestimar la mancha de flujos de escombros, pero subestima la elevación máxima obtenida. No resultan muy confiables los resultados generados por Titan2D mostrados en la Figura 4.11 teniendo en cuenta que acorde a los pobladores, nunca se ha generado un flujo de escombros que entierre a la población entera o que alcance una envergadura como la mostrada.

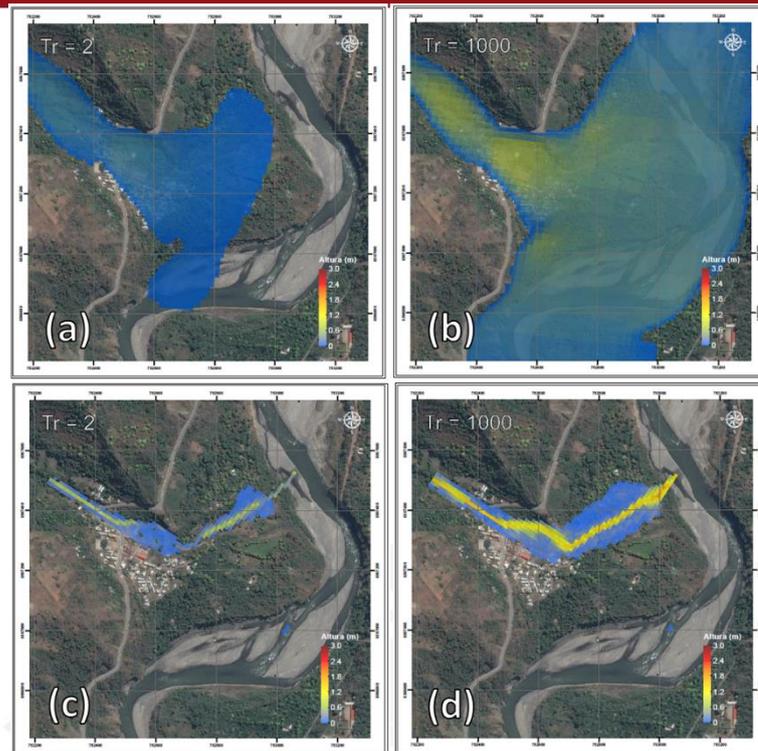


Figura 4.11 Comparación de manchas entre Titan2D y Kanako 2D, Chaupimayo

## 4.2 Quebrada Ayunay

La quebrada Ayunay presenta una fisiografía similar a la quebrada Chaupimayo, por lo cual la generación de flujos de escombros debería ser favorable en dicha quebrada. En la Figura 4.12 se observan los hidrogramas de avenida y de flujo de escombros para la quebrada Ayunay en diferentes periodos de retorno.

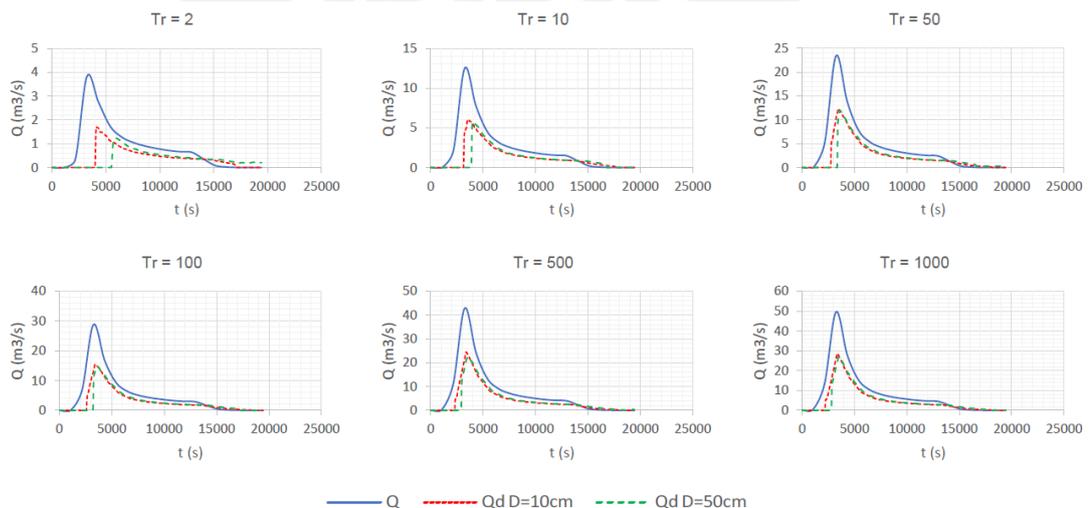


Figura 4.12 Hidrogramas líquido y de flujo de escombros en Ayunay

De forma similar lo visto en la Figura 4.1 para la quebrada Chaupimayo, en la quebrada Ayunay el hidrograma generado para el flujo de escombros  $Q_d$  es

solamente un poco mayor a la mitad del hidrograma suministrado  $Q$ . Para la quebrada Ayunay, el rango de trabajo es de  $Q \in [4 m^3/s; 50 m^3/s]$  y de  $Q_d \in [1.5 m^3/s; 30 m^3/s]$ , lo cual resulta ser considerablemente menor al observado en la quebrada Chaupimayo, sobre todo debido a que el área de captación en la quebrada Ayunay es considerablemente menor.

Tampoco se observan diferencias significativas entre los flujos de escombros obtenidos para un diametro de 10 cm con respecto al diámetro de 50 cm, pero persiste el desfase temporal entre las simulaciones realizadas con un mayor diámetro con respecto a las simulaciones de menor diámetro. En la quebrada Ayunay, esto se notorio aun para periodo de retornos elevados.

En la Figura 4.13 se observa el registro tiempo-historia para el punto de control Ayu P1.

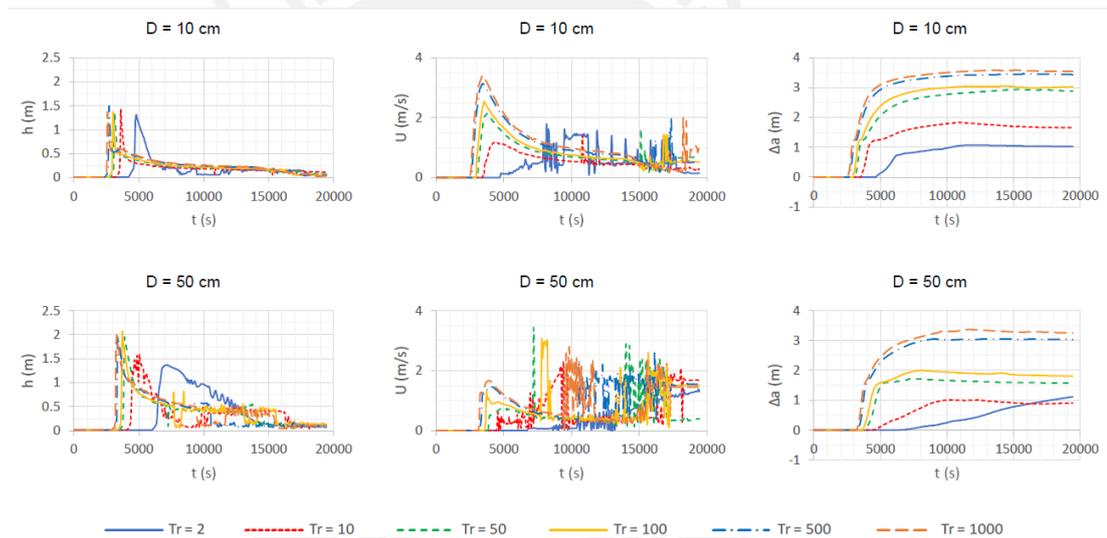


Figura 4.13 Compendio de parámetros en Ayu P1, Ayunay

Cabe recordar que tanto el punto de control Ayu P1 como Ayu P2 fueron seleccionados en la salida de acantilados, por lo cual tiene sentido observar que según la Figura 4.13, los valores de deposición son muy elevados. Con respecto a las elevaciones  $h$ , la diferencia entre los valores generados para  $D = 10 cm$  y  $D = 50 cm$  es de solo medio metro. Sin embargo, con respecto a las velocidades, para  $D = 50 cm$  no existe un patrón definido en el registro tiempo-historia ni en su cambio conforme aumenta el periodo de retorno.

El resumen del análisis puntual por números adimensionales se encuentra en las Figuras 4.14 y 4.15.

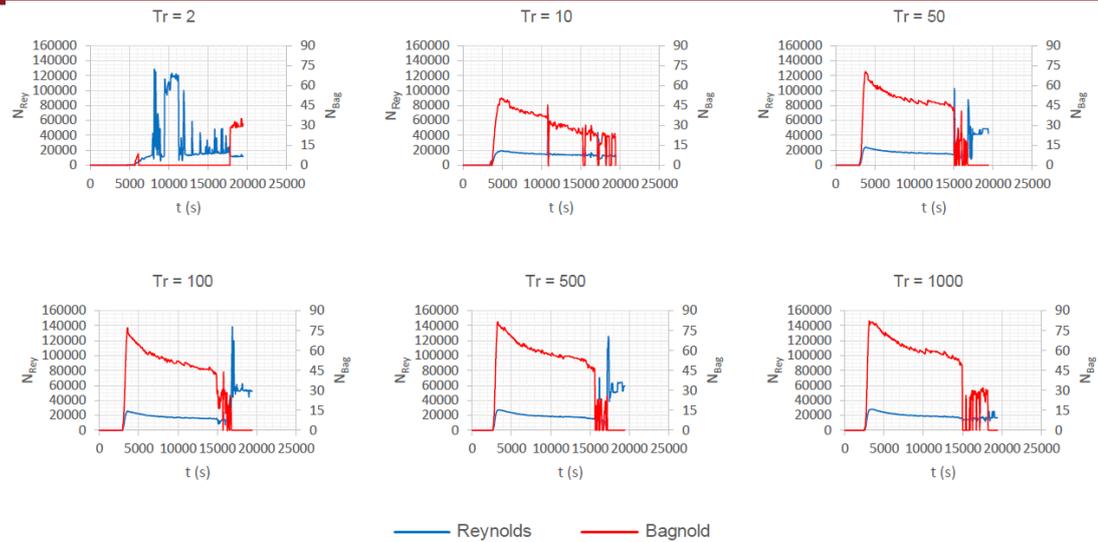


Figura 4.14 Números de Reynolds y Bagnold para Ayu P1 con  $D = 10\text{ cm}$

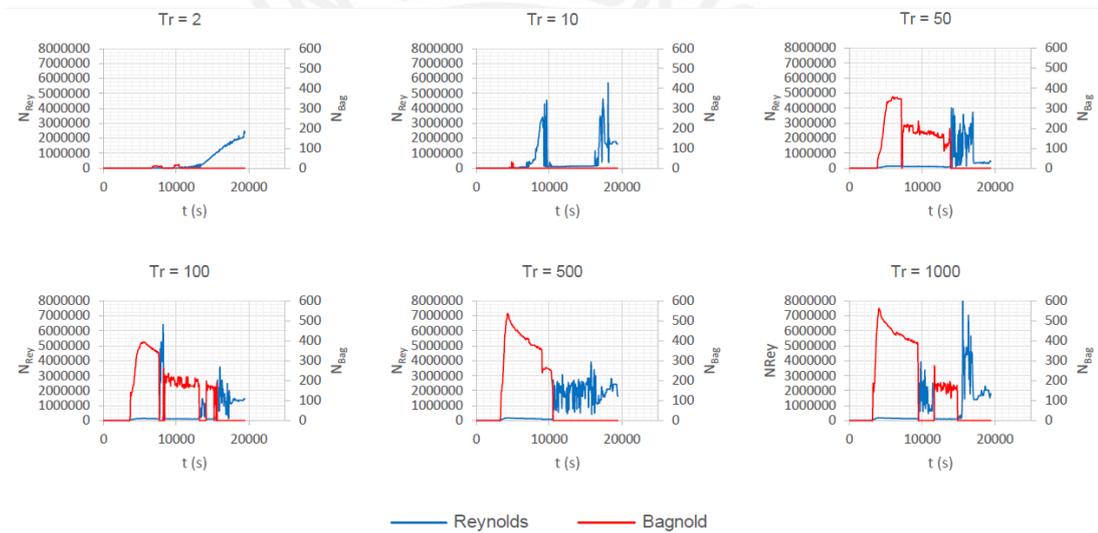


Figura 4.15 Números de Reynolds y Bagnold para Ayu P1 con  $D = 50\text{ cm}$

Según las Figuras 4.14 y 4.15, en un periodo de retorno de  $T_r = 2$  no se produciría un flujo de escombros en el punto Ayu P1 para ninguno de los diámetros mostrados, debido a que los valores de  $N_{Bag}$  son muy bajos para dichos registros. En  $D = 50\text{ cm}$  este problema persiste para  $T_r = 10$ , pero de este periodo de retorno en adelante, ya existe normalidad en los valores hallados.

Del mismo modo, la Figura 4.16 muestra el compendio de parámetros hallados para el punto de control Ayu P2.

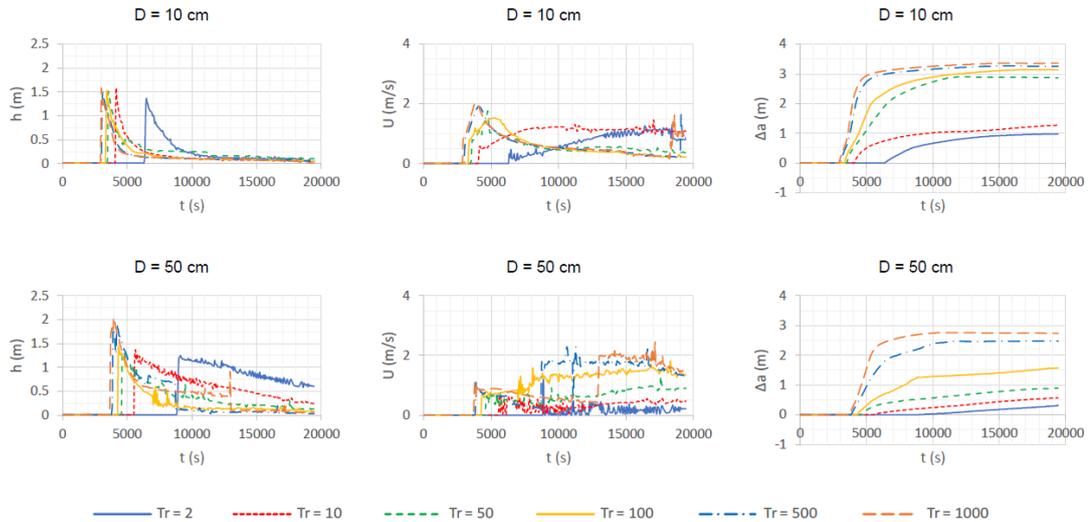


Figura 4.16 Compendio de parámetros en Ayu P2, Ayunay

En la Figura 4.16 se aprecia un registro con características similares a las encontradas en el punto Ayu P1, es decir, diferencia máxima de alturas de medio metro, dispersión en las velocidades y elevada acumulación de sedimentos.

Al generar el análisis de números adimensionales para el punto Ayu P2, obtenemos las figuras 4.17 y 4.18.

En las Figuras 4.17 y 4.18 se aprecia un efecto curioso en todos los periodos de retorno bajos, es decir  $T_r \in [2; 10]$ , si bien el  $N_{Bag}$  es nulo,  $N_{Rey}$  presenta también valores anormalmente bajos, cuando es común que si uno decrece el otro se incremente. La razón detrás de esto es que como se han analizados puntos con fuertes depresiones topográficas, el flujo que circula por el punto Ayu P2 es mínimo, causando que  $N_{Rey}$  muestre una dispersión baja.

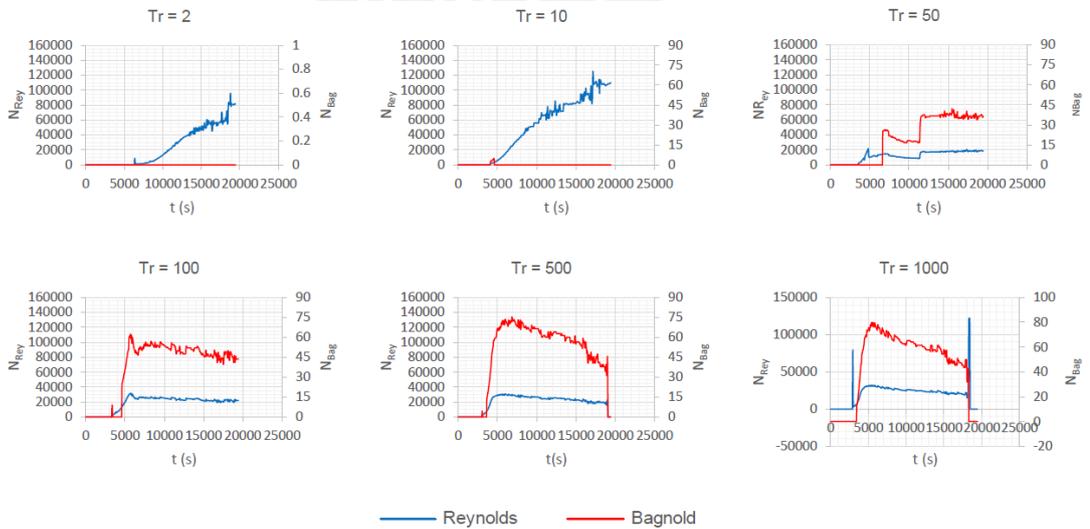


Figura 4.17 Números de Reynolds y Bagnold para Ayu P2 con D = 10 cm

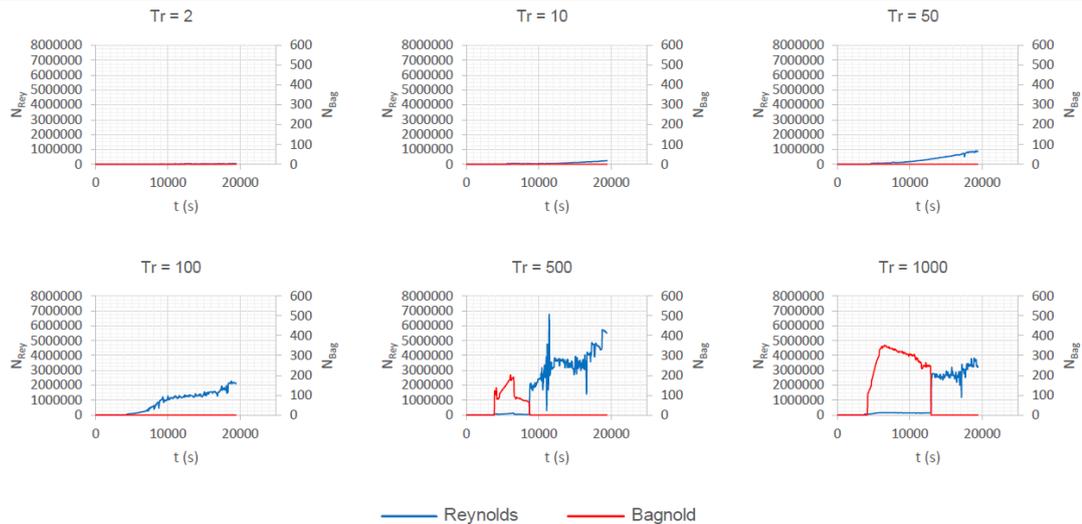


Figura 4.18 Números de Reynolds y Bagnold para Ayu P2 con  $D = 50 \text{ cm}$

En la Figura 4.19 se muestran las manchas de flujo de escombro para la quebrada Ayunay, el orden de las imágenes es el siguiente, (a) representa  $D = 10 \text{ cm}$  y  $T_r = 2$ , (b) representa  $D = 10 \text{ cm}$  y  $T_r = 1000$ , (c) representa  $D = 50 \text{ cm}$  y  $T_r = 2$ , y (d) representa  $D = 50 \text{ cm}$  y  $T_r = 1000$ .

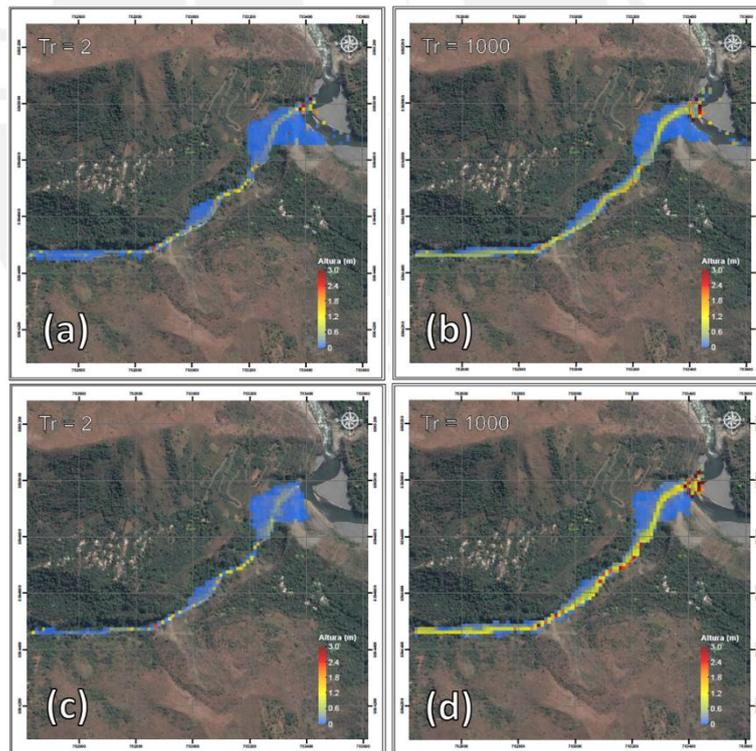


Figura 4.19 Mancha de elevaciones máximas de flujo de escombros, Ayunay

Se puede observar que debido a la fisiografía del terreno, no hay mayor libertad de movimiento para los flujos de escombros en esta quebrada, por lo que la diferencia principal entre los escenarios que utilizan  $D = 10 \text{ cm}$  y lo escenarios que usan  $D =$

50 cm son los valores máximos alcanzados. Para el caso de  $D = 50$  cm, los valores que se observan en la Figura 4.19 son considerablemente mayores a su contraparte de  $D = 10$  cm, especialmente en periodos de retorno elevados.

En la Figura 4.20 se tiene la mancha de deposición máxima por flujo de escombros, el orden de las imágenes es el mismo que el utilizado en la Figura 4.21.

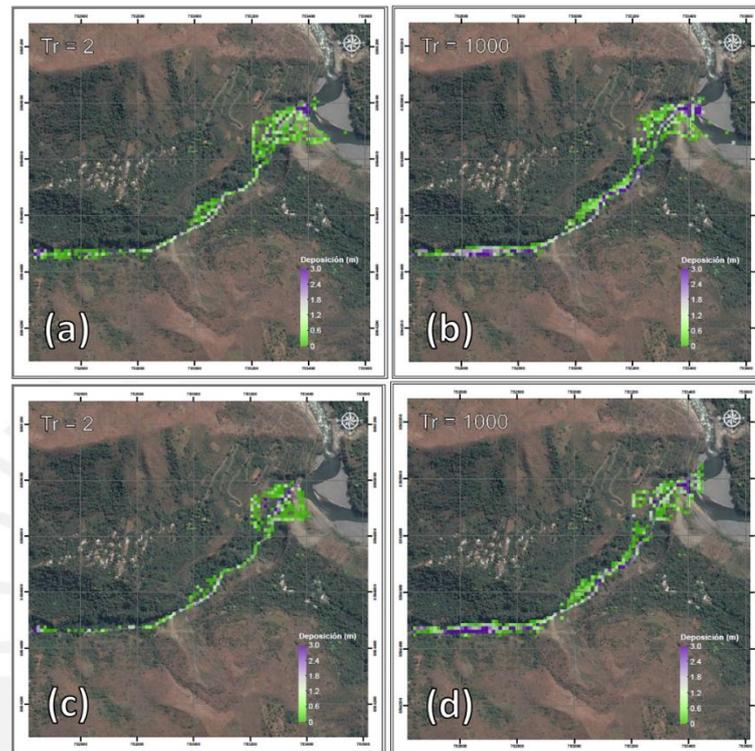


Figura 4.20 Mancha de deposición máxima de flujo de escombros, Ayunay

Para lo observado en la Figura 4.20, existe relativa uniformidad tanto entre diámetros de partícula como entre periodos de retorno. Posiblemente este efecto se da debido a la topografía de la quebrada y a la existencia de múltiples depresiones como las presentes en los puntos de control evaluados.

En la Figura 4.21 se observan las manchas de erosión máxima obtenidas por flujo de escombros. El ordenamiento de las imágenes es idéntico al utilizado en la Figura 4.20.

Para la Figura 4.21 si existe variación con respecto a periodos de retorno. Sin embargo, la variación entre ambos diámetros de partícula sigue sin ser significativa. Nótese además que el efecto de socavación en esta quebrada es considerablemente mayor al efecto de deposición.

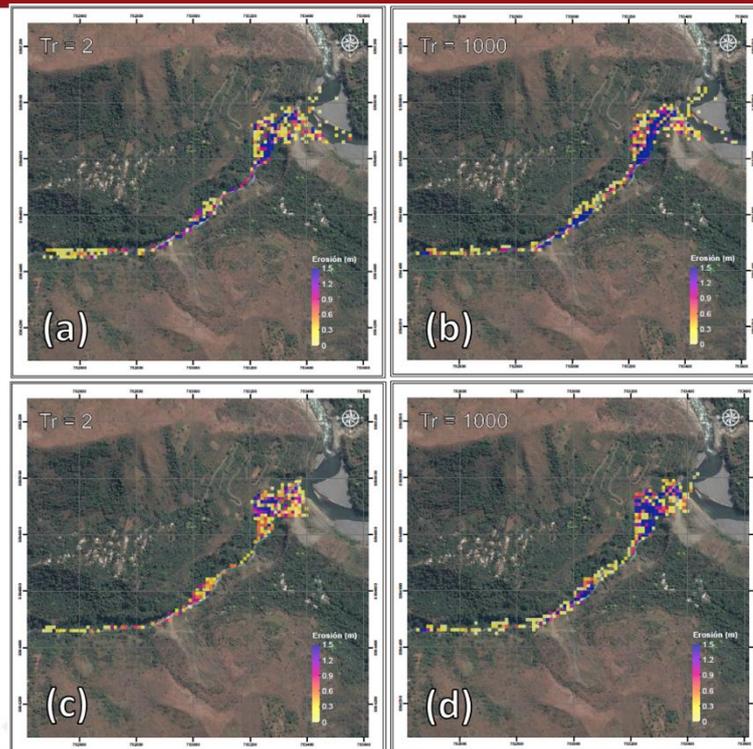


Figura 4.21 Mancha de erosión máxima de flujo de escombros, Ayunay

Finalmente, en la Figura 4.22 se tiene el comparativo entre los resultados generados por Titan2D con los resultados de Kanako 2D para un diámetro de  $D = 50 \text{ cm}$ . El ordenamiento de las imágenes es el siguiente, (a) representa los resultados para Titan2D con  $T_r = 2$ , (b) representa los resultados para Titan2D con  $T_r = 1000$ , (c) representa los resultados para Kanako 2D con  $T_r = 2$ , y (d) representa los resultados para Kanako 2D con  $T_r = 1000$ .

En el periodo de retorno de  $T_r = 1000$ , según la Figura 4.22, Titan2D sobreestima el área de influencia del flujo de escombros por encima de lo razonable. Para las elevaciones que Titan2D muestra que alcanzan solo los  $1.2 \text{ m}$  de altura, el flujo de debería llegar a ciertas regiones en las laderas. Del mismo modo, para  $T_r = 2$  el flujo de escombros se estanca en las regiones elevadas lo cual no tendría mucho sentido considerando lo ocurrido para  $T_r = 1000$ .

La razón por la cual Titan2D muestra estos errores de sobreestimación, es probablemente debido a la modificación en la malla de cálculo que realiza, que al tenerse para este proyecto un modelo de elevación digital de baja resolución, el modelo intenta forzar el enmallado generando una mala interpolación causando los resultados mostrados.

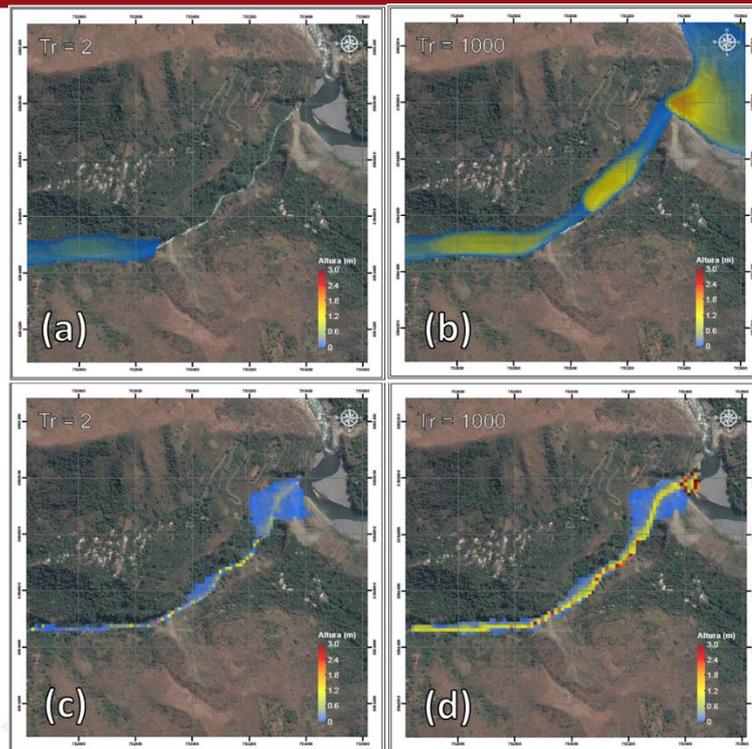


Figura 4.22 Comparación de manchas entre Titan2D y Kanako 2D, Ayunay

### 4.3 Quebrada Yuracmayo

La quebrada Yuracmayo es la que presenta la mayor envergadura en dimensión y área de captación, tal como se aprecia en la Tabla 3.1 y en el Anexo A.1.7.2, Según las simulaciones realizadas, en la Figura 4.23 se muestran los hidrogramas de avenida y de flujo de escombros para diversos flujos de escombros para diversos periodos de retorno, antes de llegar a la zona de estudio.

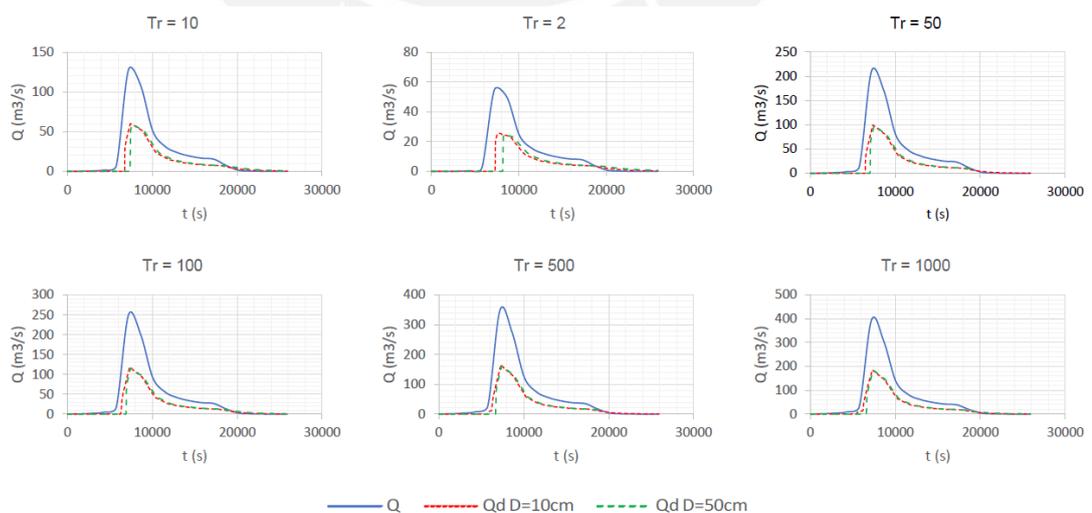


Figura 4.23 Hidrogramas líquido y de flujo de escombros en Yuracmayo

De modo similar a lo expuesto en quebradas anteriores, en Yuracmayo persiste también un leve desfase temporal entre los flujos de diferentes diámetros característico, sin embargo esta tendencia desaparece por completo para  $T_r = 500$ .

Asimismo, y en contraste a las demás quebradas, los caudales de avenida calculados son considerablemente mayores al tener un rango de caudales pico de  $Q \in [55 \text{ m}^3/\text{s}; 400 \text{ m}^3/\text{s}]$  mientras que los caudales por flujo de escombros oscilan entre  $Q_d \in [25 \text{ m}^3/\text{s}; 175 \text{ m}^3/\text{s}]$ .

En la Figura 4.24 se tiene el resumen de los parámetros calculados para diferentes periodos de retorno en el punto de evaluación Yur P1.

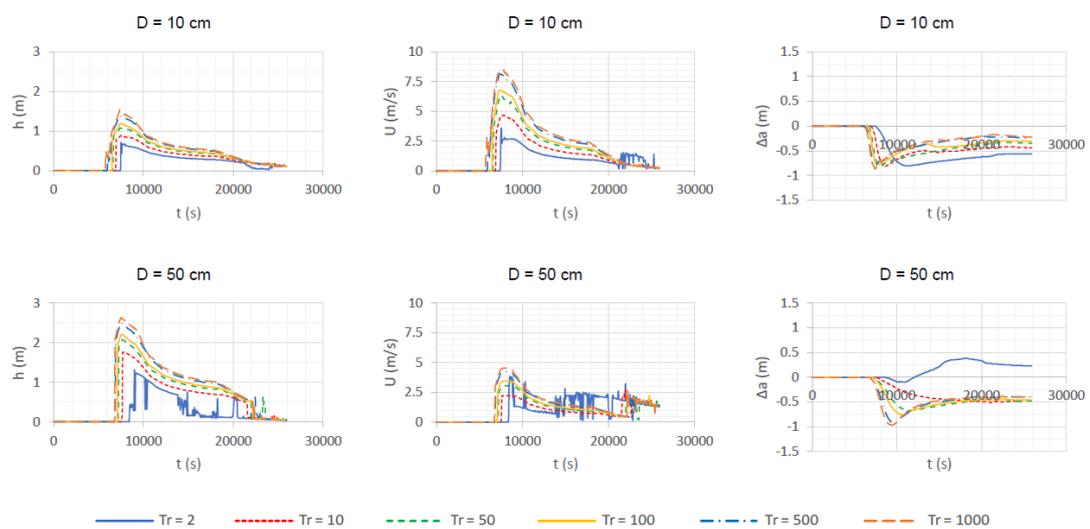


Figura 4.24 Compendio de parámetros en Yur P1, Yuracmayo

La diferencia entre un tipo de diámetro y el otro es más notoria para este caso, existe una diferencia de hasta 1 m entre elevaciones de ambos flujos favoreciendo al escenario de  $D = 50 \text{ cm}$ , mientras que las velocidades para  $D = 10 \text{ cm}$  llegan a ser el doble de las observadas en el de mayor diámetro. Para el caso de la erosión y deposición, todos los flujos parecen estabilizarse al final de cada evento dejando una socavación final de aproximadamente 0.5 m, con un máximo potencial de erosión de 1 m. La única simulación que no obedece esta tendencia es la de  $T_r = 2$  con  $D = 50 \text{ cm}$ , nótese además que la simulación en cuestión presenta mucho más ruido que las demás. En función al análisis por medio de números adimensionales, se obtienen las gráficas mostradas en la Figura 4.25 y 4.26.

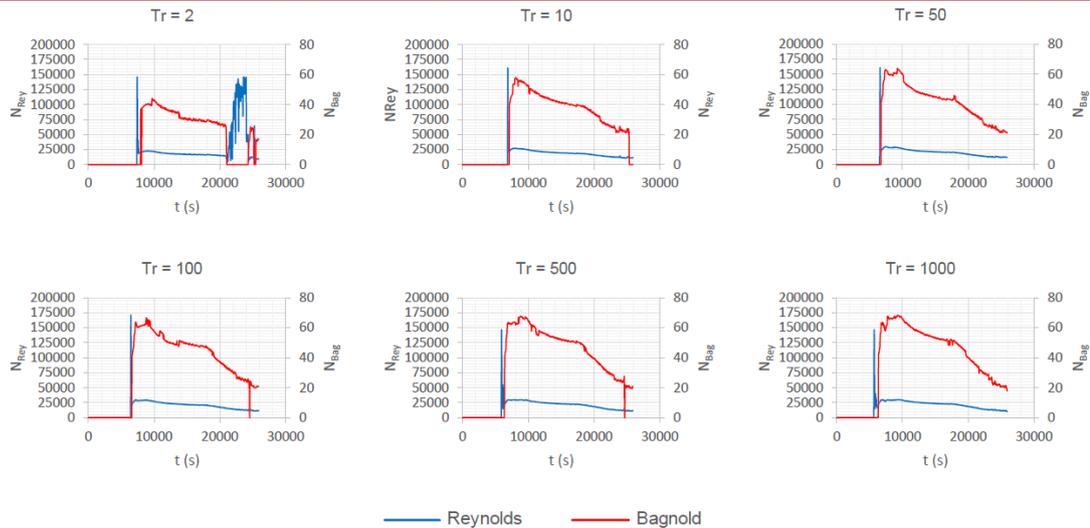


Figura 4.25 Números de Reynolds y Bagnold para Yur P1 con  $D = 10\text{ cm}$

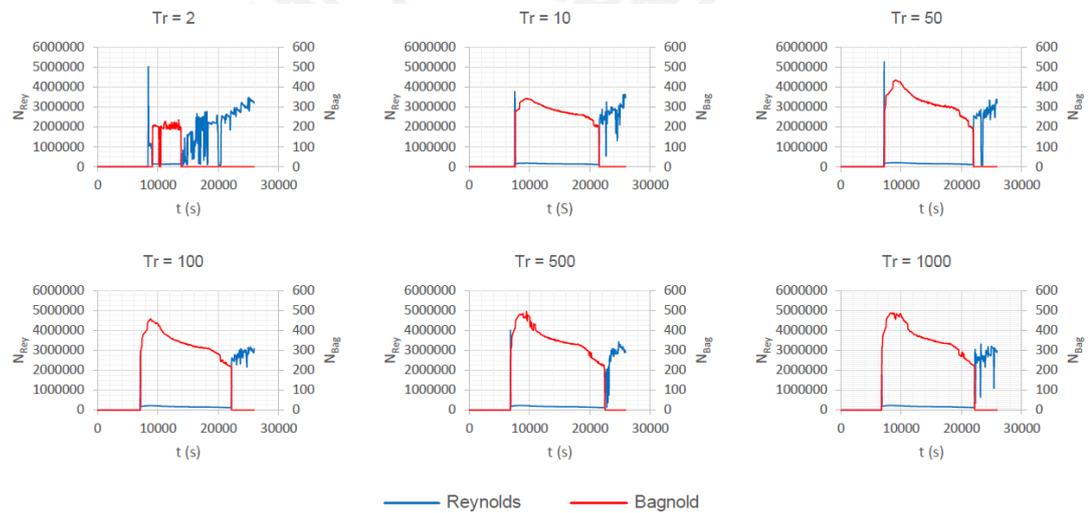


Figura 4.26 Números de Reynolds y Bagnold para Yur P1 con  $D = 50\text{ cm}$

Nótese en la Figura 4.26 que para  $T_r = 1000$  con  $D = 50\text{ cm}$  el número de Bagnold desaparece casi al mismo tiempo al que aparece la dispersión en la Figura 4.24 para  $D = 50\text{ cm}$ , confirmando así que la presencia de la dispersión se debe al decrecimiento de concentración de sólidos, lo que hace que el flujo de escombros deje de comportarse como tal a partir de dicho instante.

En la Figura 2.47 tenemos los registros tiempo-historia para el punto Yur P2.

Según la Figura 4.27, en el punto Yur P2, la diferencia de alturas persiste pero en menor medida, siendo la diferencia máxima entre ambos flujos un máximo de  $0.5\text{ m}$ . La diferencia con respecto a Yur P1 radica en el hecho de que las alturas máximas no se mantienen en un rango elevado como en otras simulaciones, sino que después de  $5000\text{ s}$  de haber ocurrido el pico del evento, se disipan considerablemente.

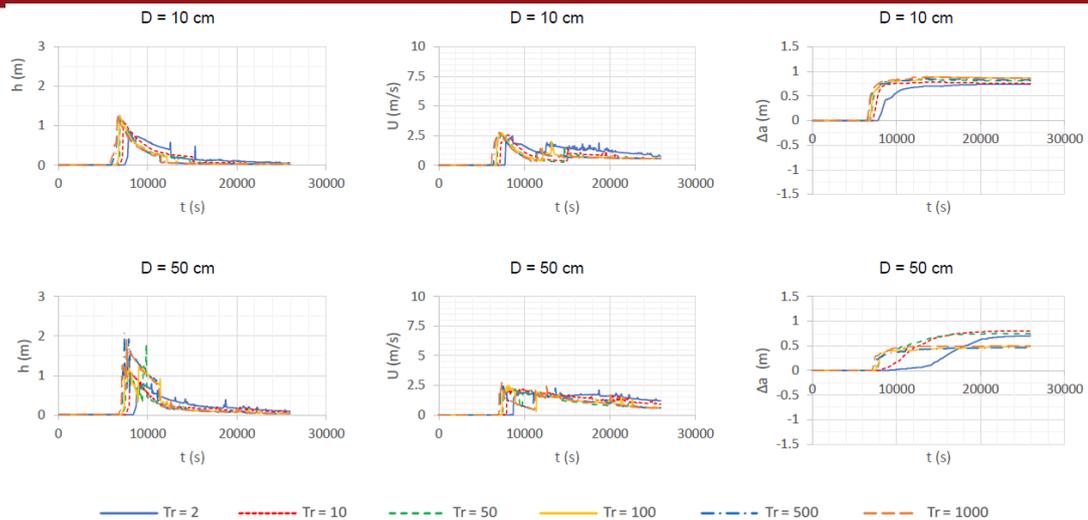


Figura 4.27 Compendio de parámetros en Yur P2, Yuracmayo

Respecto a la velocidad, no cambia significativamente entre periodos de retorno ni entre diámetro. Respecto a la deposición de sólidos en el terreno, para cualquier periodo de retorno y diámetro, la tendencia indica que la deposición esperada será de aproximadamente un cúmulo de  $0.8\text{ m}$  de espesor. Nótese también que la velocidad de deposición en los flujos con mayor diámetro es menor a la de los flujos con diámetro más pequeño.

En el punto Yur P2, la población asegura que los flujos de escombros típicos pueden alcanzar  $1.5\text{ m}$  de elevación, lo cual es factible si se observa el registro de elevaciones para  $D = 50\text{ cm}$ , donde en los periodos de retorno bajos los flujos tienen un tope de  $1\text{ m}$ , mientras que el potencial máximo de elevación de  $2\text{ m}$ . Considerando el depósito de sedimentos esperado de  $0.8\text{ m}$  resulta factible confirmar que el modelo es aceptable para flujos de escombros con diámetro  $D = 50\text{ cm}$ .

En base al análisis de números adimensionales, se generan las Figuras 4.28 y 4.29.

Según las Figuras 4.28 y 4.29, para el punto Yur P2, la duración del evento de flujo de escombros como tal tiene una duración corta con respecto al evento en total. Incluso, según la Figura 4.29, no se podría considerar que se genera un flujo de escombros en dicho punto para periodos de retorno menores a  $T_r = 50$ .

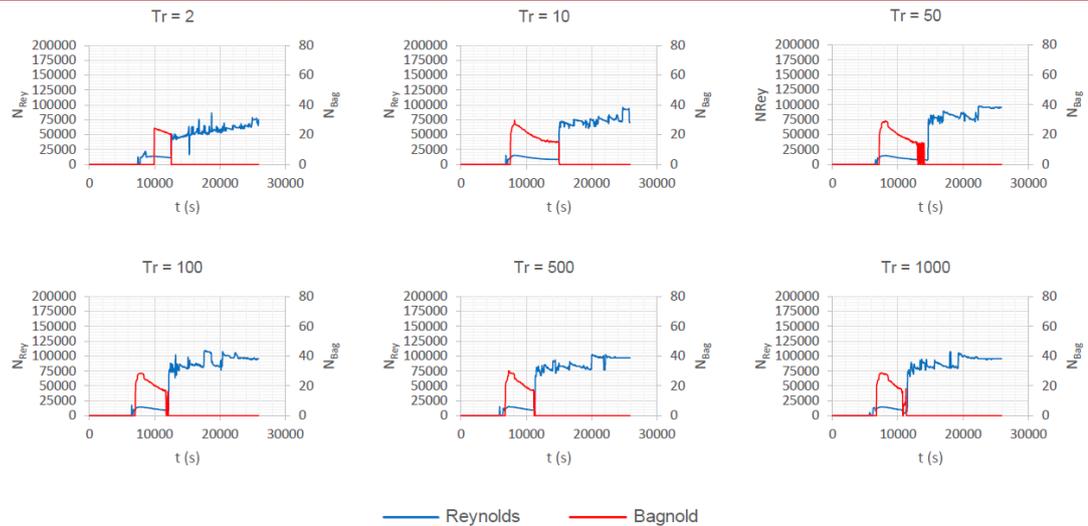


Figura 4.28 Números de Reynolds y Bagnold para Yur P2 con  $D = 10\text{ cm}$

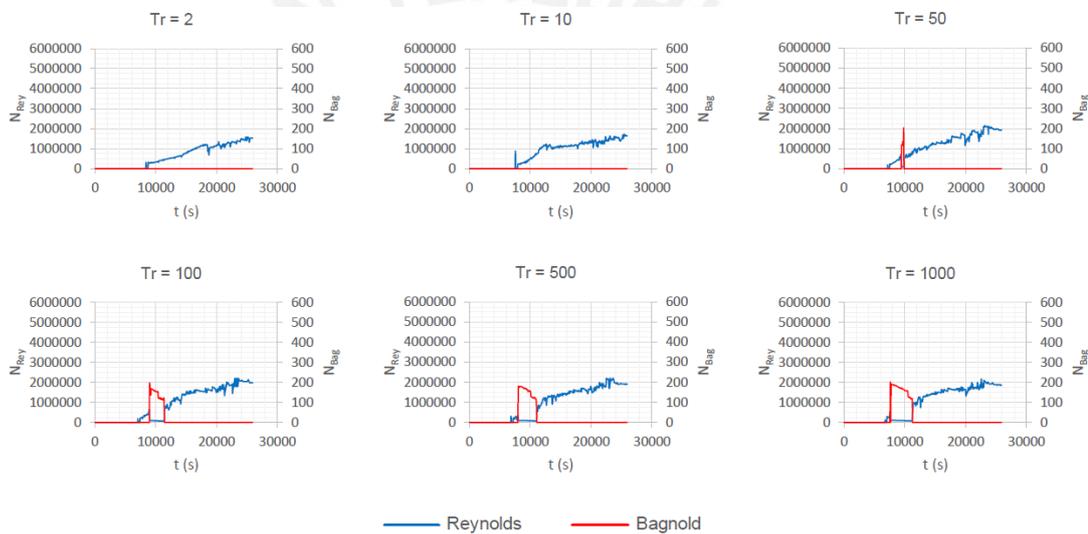


Figura 4.29 Números de Reynolds y Bagnold para Yur P2 con  $D = 50\text{ cm}$

Además, según la Figura 4.28, los valores de  $N_{Bag}$  no sobrepasan 40, por lo que en realidad se encontrarían en un régimen macro-viscoso y no en un régimen granular. En síntesis, los flujos de escombros que alcanzan este punto deben presentar una granulometría superior a  $D = 10\text{ cm}$ .

En la Figura 4.30 se tiene el resumen de resultados en el último punto a evaluar en la quebrada Yuracmayo, el punto Yur P3.

Según la Figura 4.30, para el punto de control Yur P3, el estado de las elevaciones aumenta levemente en ambos casos, manteniendo una misma diferencia entre flujos de diferente diámetro. Las velocidades registradas tampoco muestran mayor varianza entre sí.

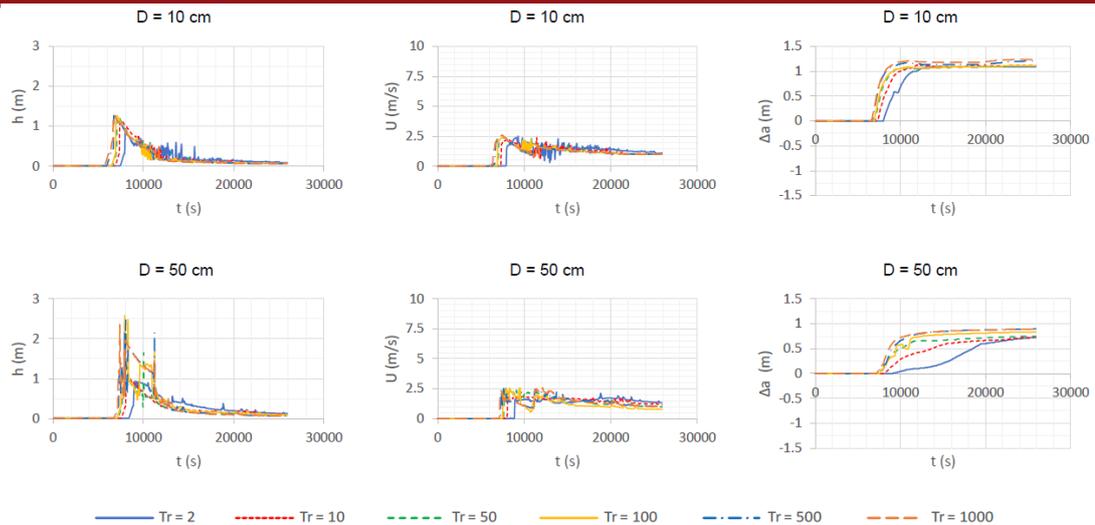


Figura 4.30 Compendio de parámetros en Yur P3, Yuracmayo

La mayor diferencia se da con el nivel de los depósitos esperados, para un diámetro de  $D = 10 \text{ cm}$  se esperan sedimentación de  $1 \text{ m}$  de espesor, mientras que para  $D = 50 \text{ cm}$ , el depósito máximo alcanzado sería de  $0.8 \text{ m}$  y con una velocidad de deposición menor a la presentada en  $D = 10 \text{ cm}$ . Considerando el registro de elevaciones para  $D = 10 \text{ cm}$ , en este punto, llegar a un nivel de flujo de  $1.5 \text{ m}$  tomando como referencia el nivel original del terreno, si sería posible para flujos de bajo periodo de retorno, verificando nuevamente que el modelo opera en un rango adecuado de valores.

En las Figuras 4.31 y 4.32 se muestra el resumen del análisis por números adimensionales para el punto Yur P3.

Según las Figuras 4.31 y 4.32, la llegada de un flujo de escombros a este punto resulta complicada. Incluso, para  $D = 10 \text{ cm}$  bajo las condiciones simuladas el flujo no puede ser catalogado como granular, debido a que los valores de  $N_{Bag}$  caen debajo de 40. Para  $D = 50 \text{ cm}$ , los flujos de escombros se desarrollan en este punto a partir de un periodo de retorno de  $T_r = 100$

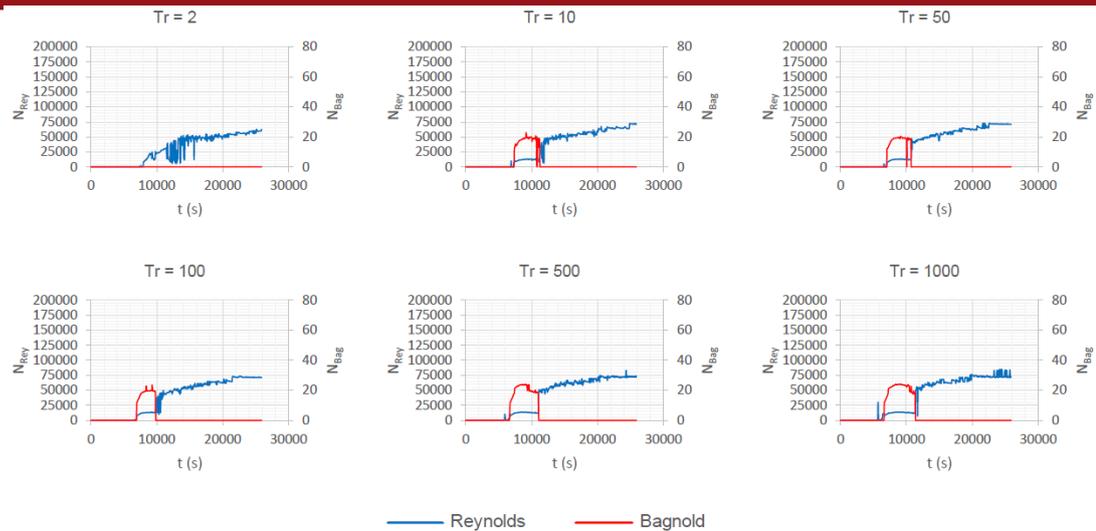


Figura 4.31 Números de Reynolds y Bagnold para Yur P3 con  $D = 10\text{ cm}$

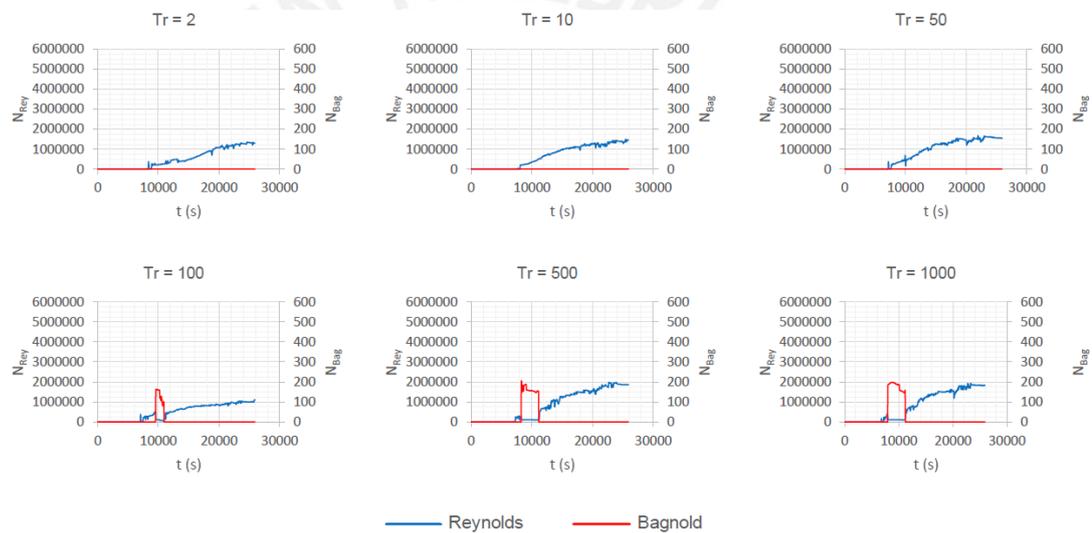


Figura 4.32 Números de Reynolds y Bagnold para Yur P3 con  $D = 50\text{ cm}$

Seguidamente, en la Figura 4.33 se aprecian las manchas de elevación por flujo de escombros, donde (a) representa el escenario donde  $D = 10\text{ cm}$  y  $T_r = 2$ , (b) representa  $D = 10\text{ cm}$  y  $T_r = 1000$ , (c) representa  $D = 50\text{ cm}$  y  $T_r = 2$ , y (d) representa  $D = 50\text{ cm}$  y  $T_r = 1000$ .

En la figura 4.33 es posible notar que existe una diferencia significativa entre todas las imágenes mostradas. Para  $D = 50\text{ cm}$ , los valores máximos alcanzados son significativamente mayores a los alcanzados por  $D = 10\text{ cm}$ . Con respecto a la envergadura del flujo de escombros, el área alcanzada por  $D = 10\text{ cm}$  es mayor a la generada por  $D = 50\text{ cm}$ , aunque no es una diferencia muy marcada.

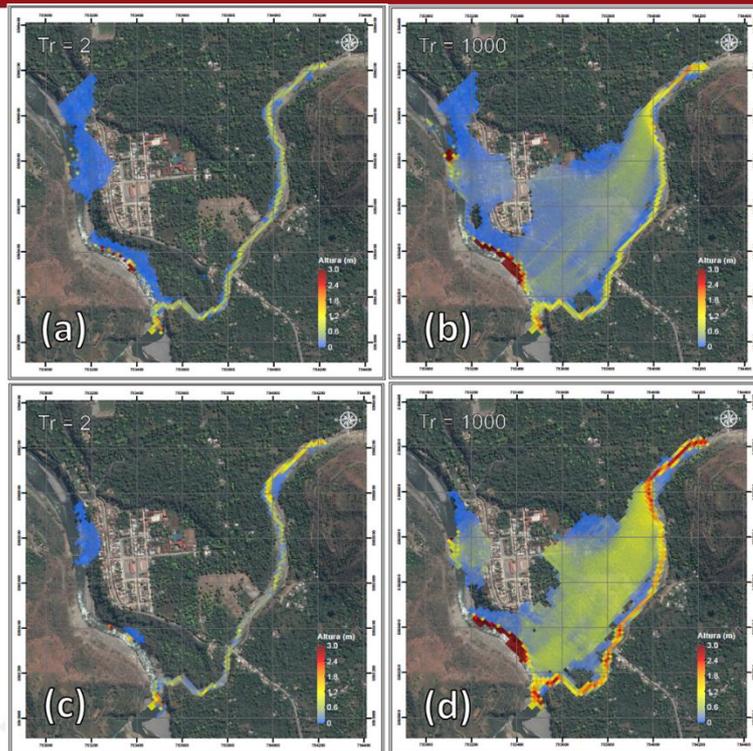


Figura 4.33 Mancha de elevaciones máximas de flujo de escombros, Yuracmayo

Del mismo modo, en la Figura 4.34 se tiene la mancha de deposición máxima con el mismo ordenamiento de imágenes que en la Figura 4.33.

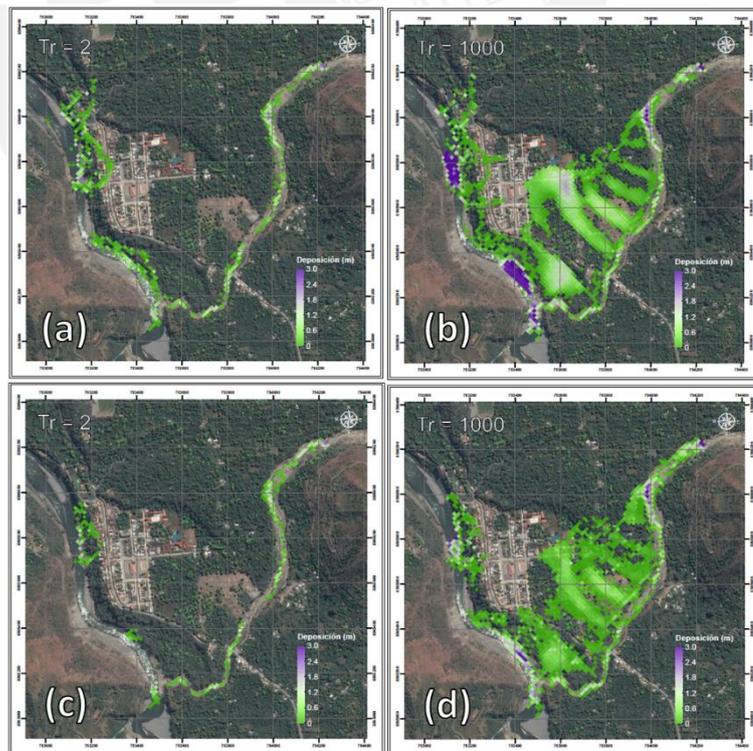


Figura 4.34 Mancha de deposición máxima de flujo de escombros, Yuracmayo

En contraste con la Figura 4.33, las diferencias son más notorias. La envergadura de los depósitos generados en  $D = 10\text{ cm}$  es mayor a la presente en  $D = 50\text{ cm}$ , al igual que los valores máximos alcanzados.

Tenemos también en la Figura 4.35 la mancha de erosión máxima de flujo de escombros para los escenarios simulados en Yuracmayo, siguiendo el mismo orden de imagen que las Figuras 4.34, y 4.33.

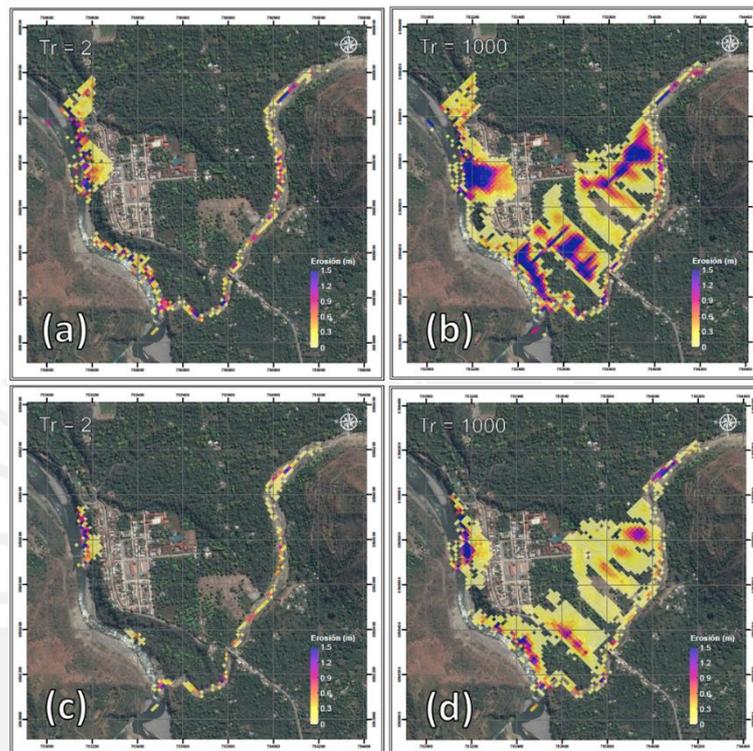


Figura 4.35 Mancha de erosión máxima de flujo de escombros, Yuracmayo

En la Figura 4.35 se mantiene también el esquema mostrado en la Figura 4.34. Los casos que utilizan  $D = 10\text{ cm}$  presentan mayores valores y una mayor envergadura, solo que para el caso de erosión, esta es más marcada con respecto a la Figura 4.34.

Se debe tener cierto cuidado con los resultados para la erosión máxima, debido a que si regresa a la Figura 4.24 donde se realizó el análisis puntual para Yur P1, la erosión máxima alcanzada no es la erosión total al final del evento. El mismo flujo de escombros puede generar depósitos en el terreno ya socavado. Se puede afirmar también, que la modificación del terreno será mayor a medida que el diámetro de las partículas contenidas en los flujos de escombros sea menor.

Finalmente, en la Figura 4.36 se muestra en comparativo entre Titan2D y Kanako 2D utilizando  $D = 50\text{ cm}$  para la quebrada Yuracmayo. Donde (a) representa los resultados para Titan2D con  $T_r = 2$ , (b) representa los resultados para Titan2D con

$T_r = 1000$ , (c) representa los resultados para Kanako 2D con  $T_r = 2$ , y (d) representa los resultados para Kanako 2D con  $T_r = 1000$ .

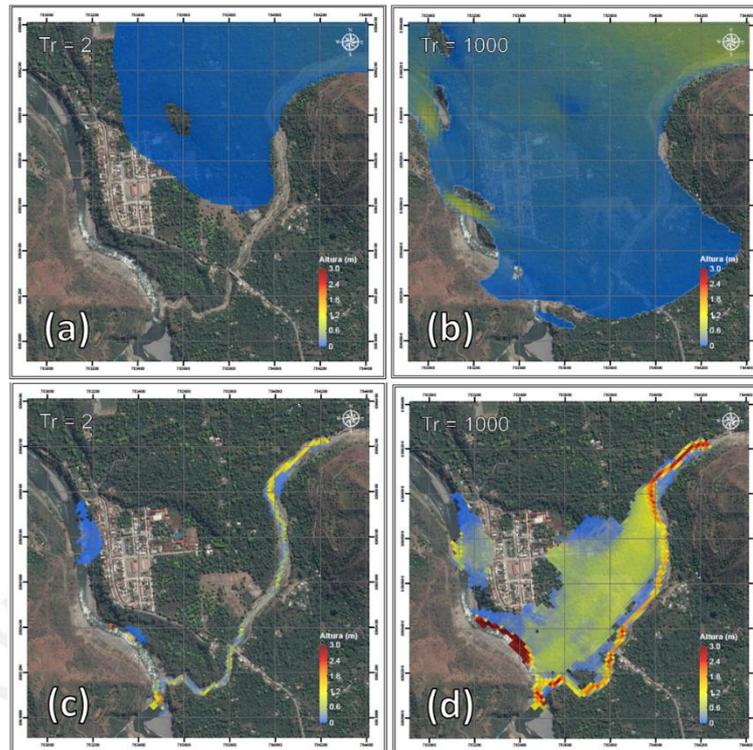


Figura 4.36 Comparación de manchas entre Titan2D y Kanako 2D, Yuracmayo

A diferencia de las Figuras 4.11 y 4.22, no existe semejanza en la distribución de los flujos de escombros. La razón de tal disparidad radica en que Titan2D utiliza un enmallado variable que requiere como dato de ingreso un modelo de elevación digital con alta resolución. Debido a la baja resolución de los modelos digitales obtenidos para el caso de estudio, Titan2D es incapaz de reconocer el lecho del río o de diferenciar los bordes entre el área de inundación del río mismo con las laderas cercanas a la ciudad. Es por ello que según Titan2D un flujo de escombros es capaz de moverse libremente en el final de la quebrada, al creer que no hay obstáculos de por medio.

#### 4.4 Quebrada Chinche

Se mencionó previamente que la quebrada Chinche es la que presenta una menor extensión, lo cual influye en la magnitud de los hidrogramas de avenida generados para dicha quebrada. Esto se puede apreciar claramente en la Figura 4.37.

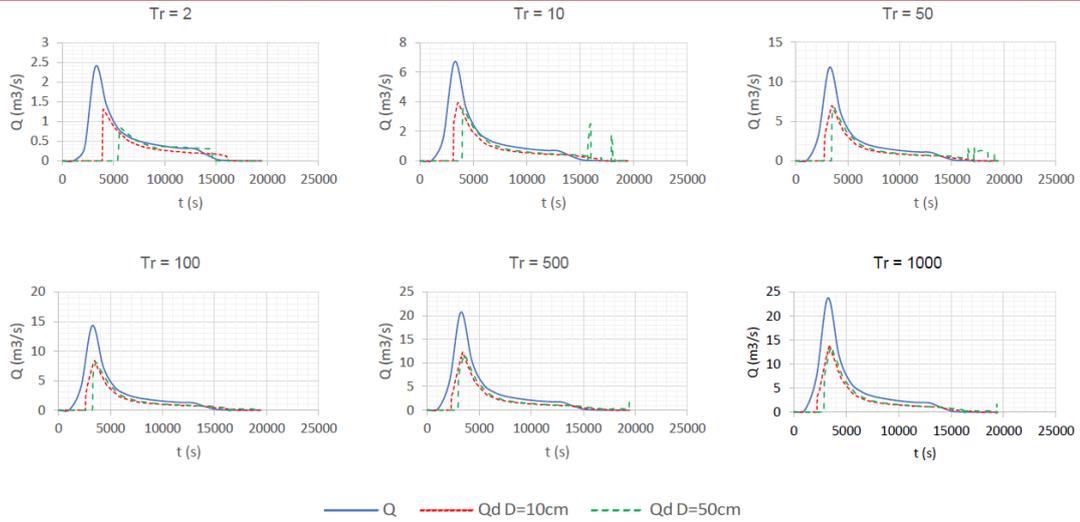


Figura 4.37 Hidrogramas líquido y de flujo de escombros en Chinche

Según la Figura 4.37, el rango de caudales pico es de  $Q \in [2.5 \text{ m}^3/\text{s}; 22.5 \text{ m}^3/\text{s}]$  y para flujos de escombros, de  $Q_d \in [1.75 \text{ m}^3/\text{s}; 14 \text{ m}^3/\text{s}]$ , donde al igual que en Chaupimayo y Ayunay, el caudal para los flujos de escombros resulta cercano a la mitad que el caudal de avenida. Nótese que para los periodos de retorno bajos, el problema del desfase temporal entre diferentes diámetros de partícula persiste. Sin embargo, ahora también se refleja este problema en periodos de retorno elevados, aunque en menor medida, lo cual junto con los resultados para Ayunay en la Figura 4.12 demuestran que dicho desfase persiste para caudales bajos, es decir, menores a  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  de  $Q$ .

En la Figura 4.38 se muestran los resultados obtenidos para el punto de control Chi P1.

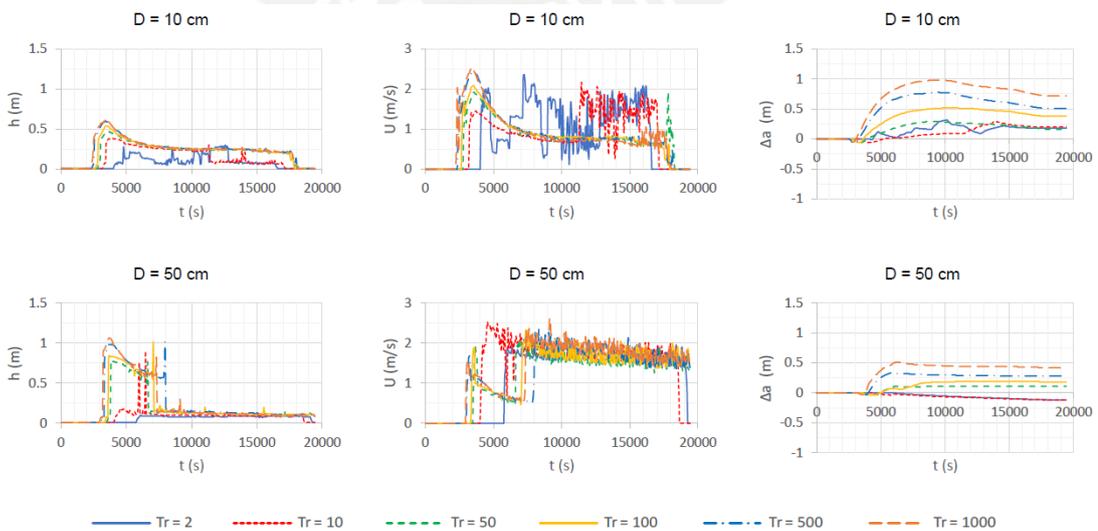


Figura 4.38 Compendio de parámetros en Chi P1, Chinche

Según la Figura 4.38, para las simulaciones realizadas en Chinche si hay múltiples observaciones que deben hacerse, en primer lugar la gran existencia de gran dispersión tanto en los parámetros de velocidad como en los parámetros de elevación del flujo. Si bien, se discutió que en escenarios anteriores, una gran caída de tirante conllevan a una elevación abrupta de la velocidad, este escenario no es diferente en este sentido, pero la irregularidad de los registros perdura por intervalos de tiempo más largos, a diferencia de casos anteriores donde las perturbaciones se daban exclusivamente en el término del evento.

Por ejemplo, en ambos escenarios con diámetros de partículas diferentes, para el primer punto de control no se puede dar mucha credibilidad a los valores registrados para  $T_r = 2$ , debido a que no presenta estabilidad en ninguno de los registros mostrados, ni dibuja un patrón similar a la forma de los hidrogramas de ingreso tal como registros anteriores lo hacían. En el caso de  $D = 10\text{ cm}$ , el modelo tiende a presentar problemas únicamente con dicho periodo de retorno, mientras que para  $D = 50\text{ cm}$  la incertidumbre es amplia para  $T_r \in [2; 10]$ , mientras que en los demás periodos de retorno se puede asociar la presencia de ruido en la velocidad con una caída abrupta del tirante al igual que en casos anteriores.

El resumen del análisis de números adimensionales se puede apreciar en las Figuras 4.39 y 4.40.

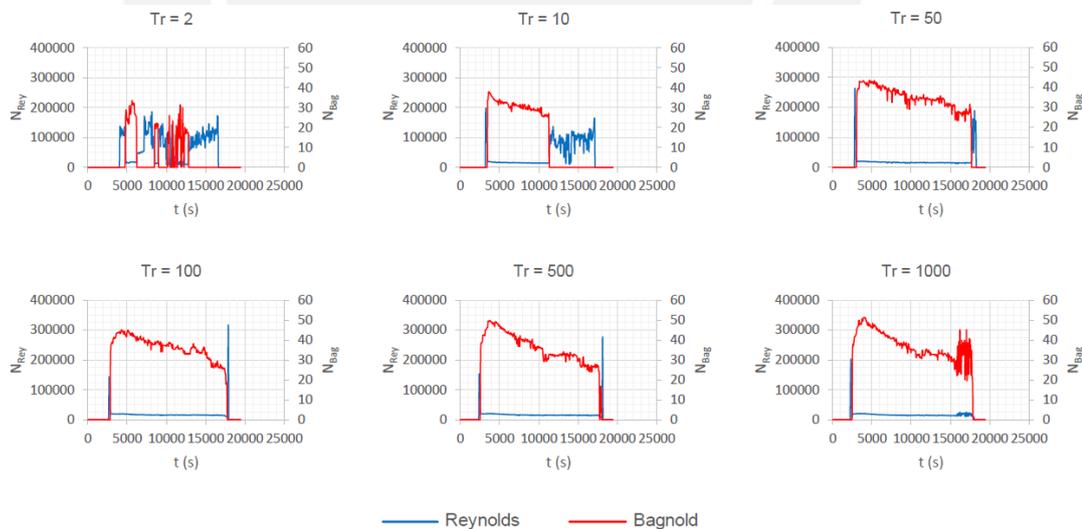


Figura 4.39 Números de Reynolds y Bagnold para Chi P1 con  $D = 10\text{ cm}$

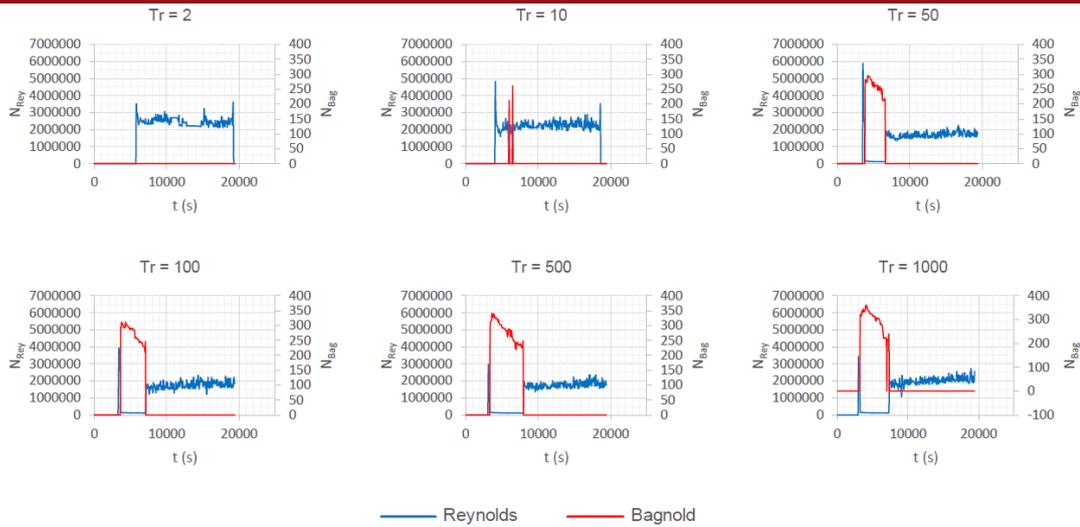


Figura 4.40 Números de Reynolds y Bagnold para Chi P1 con  $D = 50 \text{ cm}$

En la Figura 4.39 se observa la razón de la dispersión en  $D = 10 \text{ cm}$  con  $T_r = 2$ . El modelo Kanako 2D reconoce al flujo como flujo de escombros en tiempos intermitentes, es decir, para este punto en particular hay múltiples inicios de flujo de escombros, no sucede de forma continua.

Respecto a la Figura 4.40, se observa que existen problemas para los periodos de retorno bajos, ya que hasta  $T_r = 50$  no se reconoce flujo de escombros alguno, salvo un par de pico en  $T_r = 10$ . Además, en la Figura 4.39, los valores de  $N_{Bag}$  caen también por debajo de 40, por lo que no cumplen totalmente con el supuesto de que los flujos de escombros presentan un carácter granular para  $D = 10 \text{ cm}$ .

En la Figura 4.41 se tiene el registro tiempo-historia del punto Chi P2

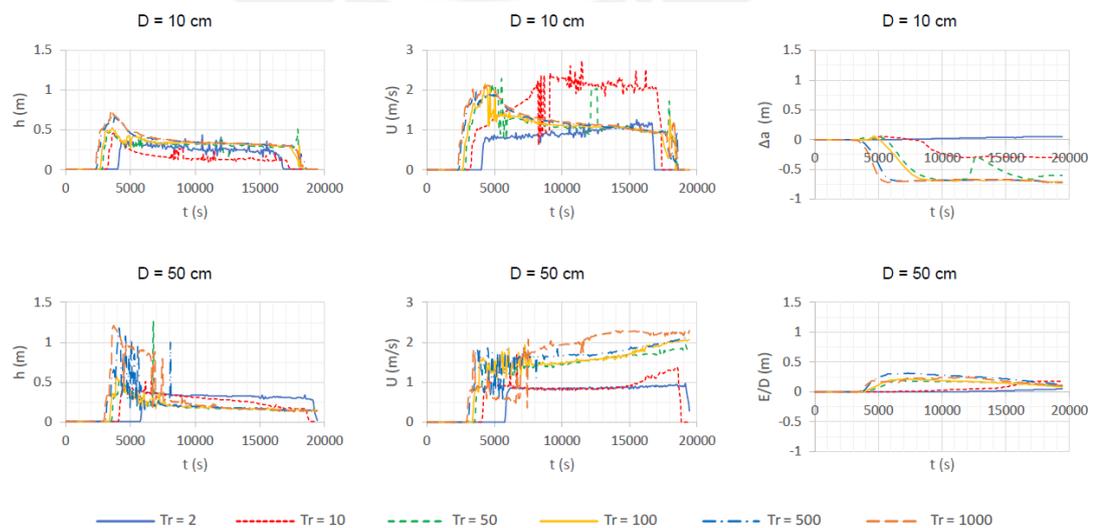


Figura 4.41 Compendio de parámetros en Chi P2, Chinche

Acorde a la Figura 4.41, el punto Chi P2 no presenta un comportamiento muy diferente al mostrado en Chi P1, salvo que el nivel de ruido es menor. Para ambos diámetros elegidos, en  $T_r = 2$  se describe algo muy similar a un flujo uniforme, debido a que tanto como el tirante como la velocidad no muestran gran variación durante el evento simulado.

Además, en ambos casos para cualquier periodo de retorno, el flujo de escombros tiende a estabilizarse en valores entre  $0.2\text{ m}$  y  $0.4\text{ m}$ . No hay variaciones significativas en la velocidad salvo su anormal crecimiento en el caso de  $D = 50\text{ cm}$ . Algo que hay que destacar en este punto, es que según sea el tamaño de partícula, el lecho puede erosionar o presentar depósitos. La magnitud de los depósitos no es tan significativa, sin embargo  $0.7\text{ m}$  de erosión pueden ser críticos para ciertos elementos en la zona.

En las Figuras 4.42 y 4.43 se muestran los resultados para los números de Bagnold y Reynolds en el punto Chi P2

Según las Figuras 4.42 y 4.43, para  $D = 10\text{ cm}$  no se detecta para  $T_r \in [2; 10]$  flujo de escombros alguno. Del mismo modo, para  $D = 50\text{ cm}$  el flujo de escombros se genera a partir de  $T_r = 500$  en adelante. Es por estos resultados que existe una dispersión tan marcada en estos puntos. El fenómeno que predomina en la quebrada Chinche será de inundación o flujos hiperconcentrados, no de flujo de escombros según el análisis realizado.

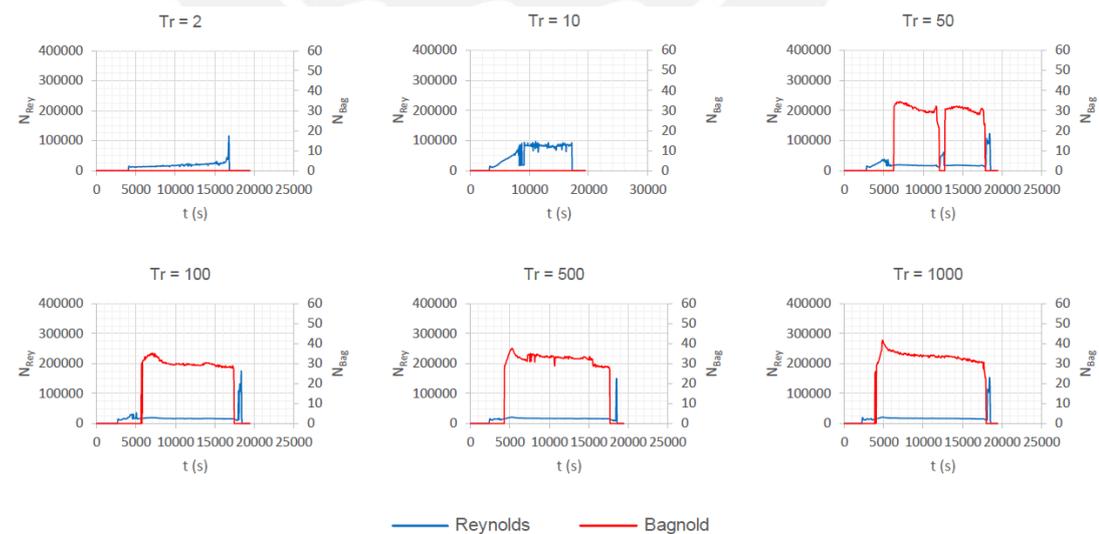


Figura 4.42 Números de Reynolds y Bagnold para Chi P2 con  $D = 10\text{ cm}$

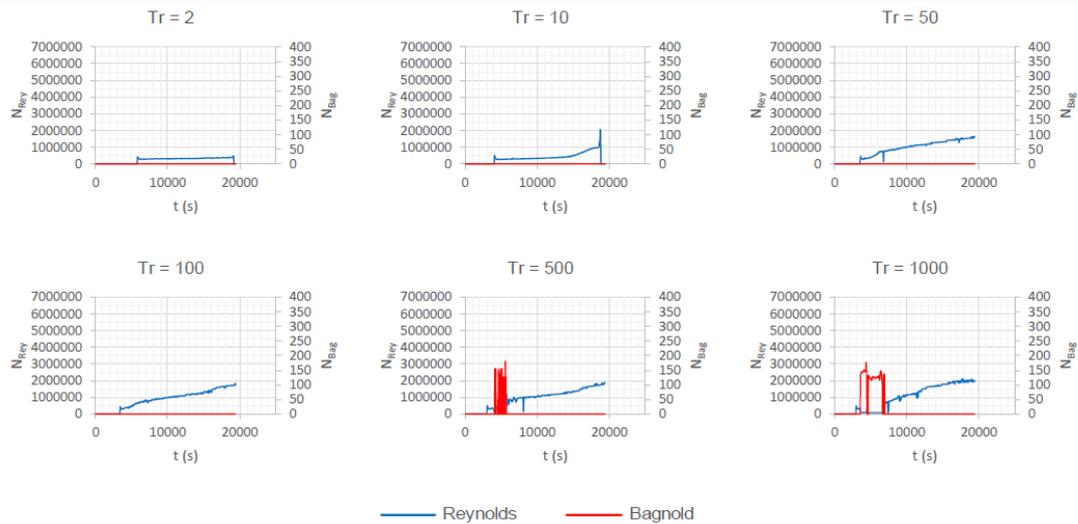


Figura 4.43 Números de Reynolds y Bagnold para Chi P2 con  $D = 50 \text{ cm}$

En la Figura 4.44 se muestran las manchas de elevación de flujo de escombros para la quebrada Chinche. El ordenamiento de las imágenes es el siguiente. (a) representa  $D = 10 \text{ cm}$  y  $T_r = 2$ , (b) representa  $D = 10 \text{ cm}$  y  $T_r = 1000$ , (c) representa  $D = 50 \text{ cm}$  y  $T_r = 2$ , y (d) representa  $D = 50 \text{ cm}$  y  $T_r = 1000$ .

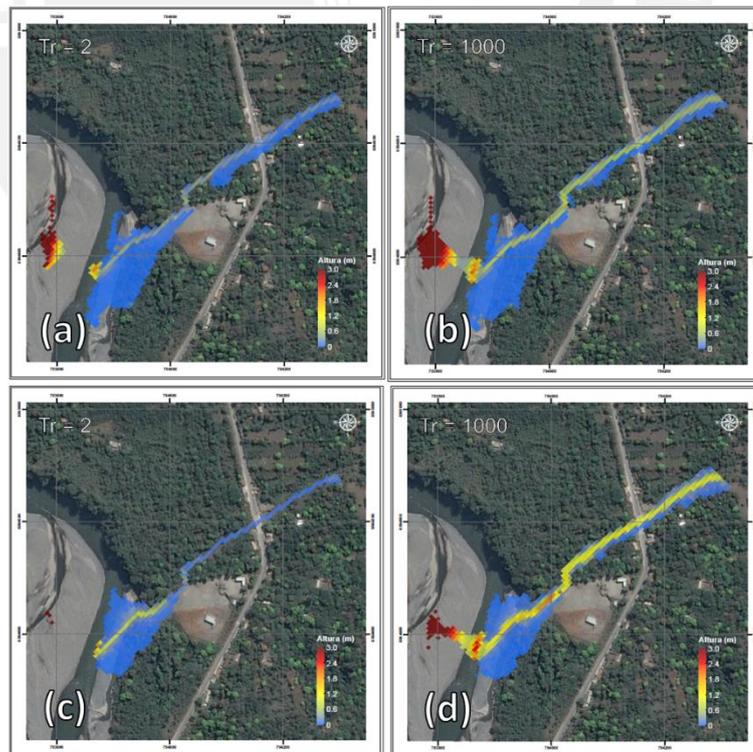


Figura 4.44 Mancha de elevaciones máximas de flujo de escombros, Chinche

Según la Figura 4.44, se observa que para los periodos de retorno de  $T_r = 2$ , la mancha por flujo de escombros es mínima, en especial para  $D = 50 \text{ cm}$ . Con los

valores generados para  $T_r = 1000$  ya se puede apreciar una mancha más marcada, donde nuevamente, los valores para  $D = 50 \text{ cm}$  serán considerablemente mayores a los de  $D = 10 \text{ cm}$ . Sin embargo,  $D = 10 \text{ cm}$  presenta una notable mayor envergadura para todos los periodos de retorno.

En la Figura 4.45 se muestran los resultados para las manchas de deposición máxima alcanzada por los flujos de escombros. El ordenamiento de las imágenes es el mismo que el explicado para la Figura 4.44.

Para los resultados de la Figura 4.45, los valores correspondientes a  $D = 50 \text{ cm}$  son menores tanto en magnitud como en amplitud con respecto a  $D = 10 \text{ cm}$ . Además, similar a la quebrada Ayunay, la envergadura de los depósitos y la magnitud de los mismos nos varía significativamente a medida que cambia el periodo de retorno.

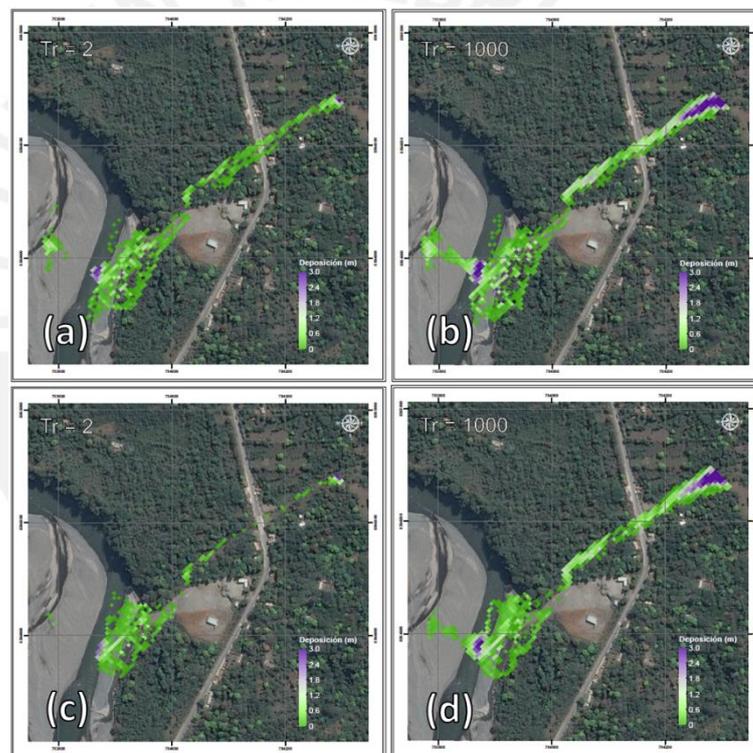


Figura 4.45 Mancha de deposición máxima de flujo de escombros, Chinche

Tenemos además, en la Figura 4.46 las manchas de erosión máxima por flujo de escombros, el ordenamiento de las imágenes es el mismo que el presentado para la Figura 4.45.

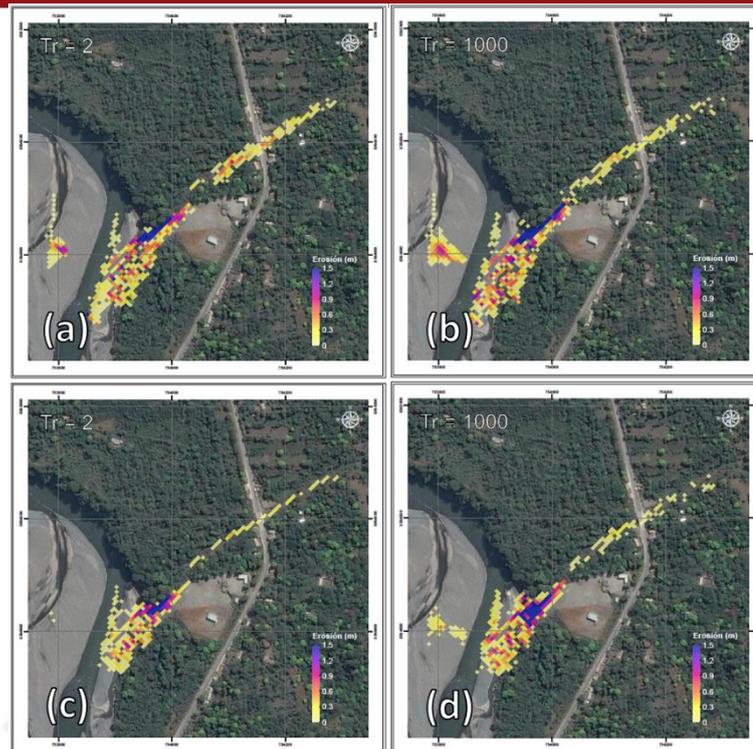


Figura 4.46 Mancha de erosión máxima de flujo de escombros, Chinche

En la Figura 4.46 se observa un comportamiento constante entre periodos de retorno, pero relativamente disperso entre ambos diámetros evaluados. Para la quebrada Chinche,  $D = 10 \text{ cm}$  vuelve a alcanzar la mayor socavación y la mayor envergadura posible frente a  $D = 50 \text{ cm}$ .

Finalmente, comparando el desempeño de Titan2D contra Kanako 2D, se obtiene lo mostrado en la Figura 4.47, en donde (a) representa los resultados para Titan2D con  $T_r = 2$ , (b) representa los resultados para Titan 2D con  $T_r = 1000$ , (c) representa los valores de Kanako 2D con  $T_r = 2$  y  $D = 50 \text{ cm}$ , y finalmente, (d) representa los valores de Kanako 2D con  $T_r = 1000$  y  $D = 50 \text{ cm}$ .

En la Figura 4.47 se aprecia el mismo problema detectado para la Figura 4.36. Titan2D es incapaz de reconocer para estas condiciones la canalización del río existente en la quebrada Chinche, por lo cual el flujo de escombros se extiende por toda el área de estudio para periodos de retornos altos, mientras que para periodos de retorno bajos, el flujo se estanca al no poseer tanta movilidad.

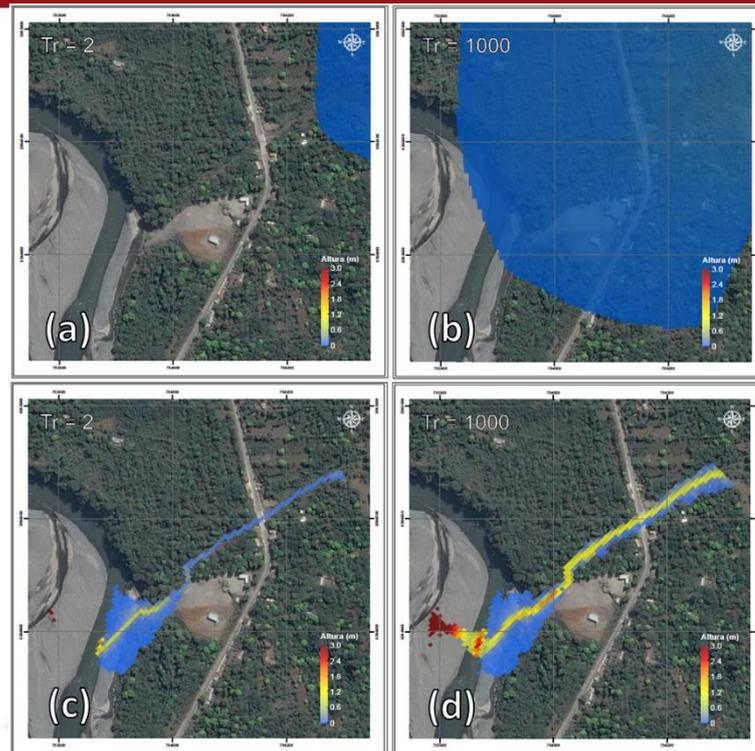


Figura 4.47 Comparación de manchas entre Titan2D y Kanako 2D, Chinche

#### 4.5 Generación de Mapas de Peligro

La generación de los mapas de peligro fue hecha a partir de un criterio similar a los mapas de peligros por inundación (Allende et al., 2007), donde se evalúa el alcance de la misma para diversos periodos de retorno y se asigna el peligro según qué tan probable es que un evento así ocurra en la zona, sin importar la magnitud de los parámetros tales como altura, velocidad o erosión/deposición.

Por simplicidad, se compiló la información de ambos diámetros característicos utilizados a lo largo sumando las celdas en las cuales existen flujos de escombros. Al poseer dos diámetros y seis periodos de retorno, el máximo valor que se puede obtener al sumar las capas de donde existió flujo de escombros es de doce, a estas celdas se les considera las de mayor riesgo, mientras que a medida que el valor disminuye, el peligro por flujo de escombros también.

Un ejemplo de mapa de peligros por flujo de escombros es el presentado en la Figura 4.48 para la quebrada Yuracmayo, los mapas de peligros para todas las quebradas se encuentran en los Planos P.9.

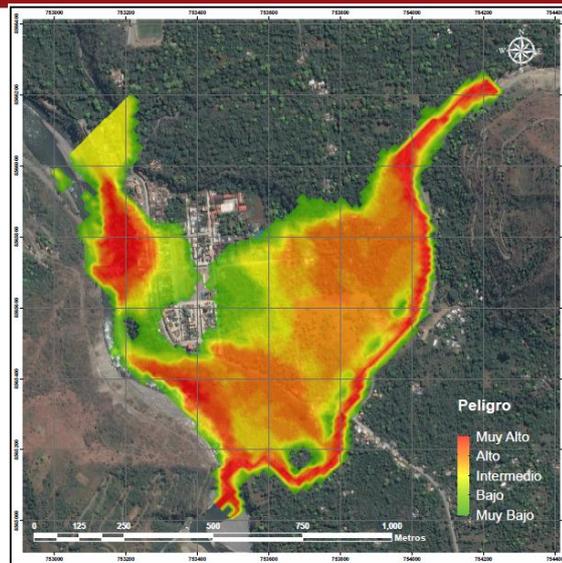


Figura 4.48 Mapa de peligros por flujo de escombros, Yuracmayo

Del mismo modo, se generan mapas de peligro por acumulación de sedimento o por erosión del lecho, ello se logra en función a los valores generados en los planos para deposición y erosión siguiendo el mismo lineamiento descrito al inicio de este ítem. Un ejemplo de estos son los planos generados en la Figura 4.49 para Yuracmayo, donde (a) es el plano de peligro por deposición o acumulación de sedimentos, y (b) es el plano de peligro por erosión del lecho en Yuracmayo.

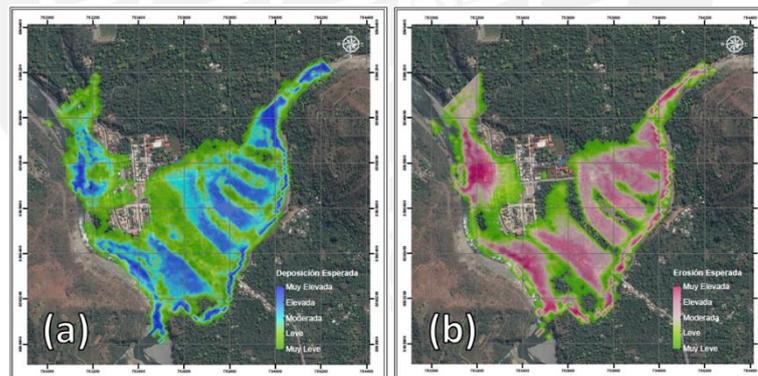


Figura 4.49 Mapas de peligros por deposición y erosión de sedimentos, Yuracmayo

Resulta importante la generación de estos planos para zonificar adecuadamente el distrito y tener un indicio de donde es seguro ejecutar obras civiles o destinar terrenos a zona agrícola. Los planos descritos de la forma de la Figura 4.48 simplemente indican si es probable la existencia de flujo de escombros en tal área, mientras que los planos con el carácter de la Figura 4.49 indican el tipo de amenaza presente en la zona.

## 5 Conclusiones

Se concluye que, en base a los resultados generados y a la evaluación de múltiples puntos de control, que el modelo Kanako 2D puede representar de manera adecuada los flujos de escombros según las condiciones descritas, por lo cual es una herramienta válida en lo que respecta a la gestión de riesgo y que permitiría realizar estimaciones de peligro basadas en parámetros medibles a diferencia de las estimaciones de peligro realizadas utilizando únicamente el criterio y esperando que ocurra un fenómeno de este tipo para medir su alcance.

Del mismo modo, no es viable utilizar herramientas como Titan2D, las cuales pese a ser muy sofisticadas, en un contexto donde la información básica es limitada, modelos de este tipo presentarán los problemas descritos a lo largo del presente proyecto. Dicha situación puede desencadenar en sobreestimar las condiciones de riesgo de una zona por lo que es preferible evaluar detalladamente el desempeño de cada modelo junto con la resolución de la información disponible.

En síntesis, el presente trabajo y la presente metodología ofrecen resultados dentro de lo esperado y ofrecen además múltiples aplicaciones dentro a lo que a gestión de riesgo refiere, por lo cual es recomendable aplicar metodologías no determinísticas como las derivadas de la GLUE. Evidentemente, es mejor la aplicación de este modelo para la evaluación de vulnerabilidad conociendo las condiciones de la infraestructura y elementos existentes al igual que para dar los lineamientos de diseño, debido a que los mapas de peligro generados no implican la inminente destrucción de las zonas con alto índice de peligro, lo cual puede llevar a una mala interpretación de los resultados.

Cabe resaltar, que pese a que Kanako 2D presenta una herramienta versátil que permite cuantificar la erosión o deposición de sedimentos, resulta complicado validar dichos resultados debido a que se parte de la hipótesis de que todo el terreno en estudio presenta una geotecnia homogénea. Razón por la cual se recomienda utilizar lineamientos de evaluación no determinísticos.

Respecto a los resultados particulares, se concluye que los caudales de flujo de escombros generados no son sensibles en magnitud a las variables geotécnicas. Estos presentan la misma variabilidad que los hidrogramas líquidos, por lo que los errores en la definición del problema van de la mano con los errores en la hidrología asumida, lo cual hace a la hidrología una variable vital para el tratamiento de los flujos de escombros con las condiciones descritas en este trabajo.

Resulta también concluyente que es necesario acoplar el fenómeno de flujo de escombros a otros fenómenos como deslizamiento de taludes e inundaciones, ya que en función a los datos obtenidos, para un evento de tormenta extrema, el flujo de escombros puede generarse solo en una fracción del desarrollo de la avenida misma. Además, efectos como los deslizamientos de talud significan un cambio repentino en  $C_d$  lo cual alteraría los escenarios descritos previamente.

## 6 Observaciones

Nótese que no se realizó una calibración adecuada para los parámetros del modelo reológico aplicado, como son los valores de  $\delta_D$  y  $\delta_E$ . La razón por la cual no se realizó dicho trabajo es porque no se conoce exactamente parámetros de un flujo de escombros en la zona de estudio tales como altura o volumen total de sedimentos. No existen registros en Maranura que den luz de dichos valores, además, los registros pluviométricos no son los adecuados, sumados al hecho de que la topografía disponible presenta una resolución insuficiente para acceder al uso de modelos más sofisticados como es el modelo Titan2D. Todo lo mencionado se traduce en incertidumbre en los resultados. Es por este motivo que se optó por trabajar con un rango de valores en vez de generar una simulación única. Si bien ello genera mayor incertidumbre en los valores finales, se aprecia que existe un rango de valores en el cual los flujos de escombros se van a desarrollar.

No se contempla tampoco una falla de talud y su eventual conversión a flujo de escombros, por lo que los resultados están condicionados indirectamente al tamaño de la quebrada en estudio. Por ejemplo, es posible encontrar flujos de escombros en quebradas pequeñas como Chinche, los cuales superen ampliamente los valores previstos en el presente estudio. El motivo de lo dicho anteriormente es que asumió como desencadenante directo el hidrograma de avenida, utilizando un modelo con origen dinámico continuo.

Finalmente, debido a la diferencia de efectos causados por diámetros de partícula diferentes, y a la existencia de ambos tamaños en un flujo de escombros real, sería pertinente revisar el modelo aplicado y segmentar la concentración  $C_d$  para cada tamaño, integrando el efecto de esparcimiento de los diámetros menores en un modelo que transporte gravas de gran tamaño y que presente valores de elevación de flujo elevados.

## 7 Referencias Bibliográficas

- Abramson, L., Lee, T., Sharma, S., & Boyce, G. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods* (2<sup>nd</sup> ed.). Nueva York, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide Hazard Assessment: Summary Review and New Perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1), pp. 21-44.
- Allende, T., Zedano, J. C., Gutierrez, R., Carranza, J., & Ayala, M. (2007). *Estudio de Mapa de Peligros de la Ciudad de Barranca*. (Proyecto PNUD PER/02/051 00014426). Lima, Perú: Sistema Nacional de Defensa Civil.
- Armanini, A., & Michiue, M. (1997). *Recent Developments on Debris Flows*. Berlín, Alemania: Springer Berlin Heidelberg.
- ASTM International. (2007). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. (D422-63). Pennsylvania, Estados Unidos.
- ASTM International. (2010). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. (D4318-10). Pennsylvania, Estados Unidos.
- ASTM International. (2011a). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. (D2487-11). Pennsylvania, Estados Unidos.
- ASTM International. (2011b). *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*. (D4767-11). Pennsylvania, Estados Unidos.
- ASTM International. (2013). *Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*. (E11-13). Pennsylvania, Estados Unidos.
- Batchelor, G. K. (2000). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridgeshire, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Bateman, A., Medina, V., & Velazco, D. (2006). *Estudio Experimental Sobre Flujos Granulares Hiperconcentrados*. Artículo presentado en XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Guayana, Venezuela.
- Beven, K. (2006). A Manifesto for the Equifinality Thesis. *Journal of Hydrology*, 320(1), 18-36.

- Beven, K., & Binley, A. (1992). The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), 279-298.
- Blasone, R. S., Vrugt, J., Madsen, H., Rosbjerg, D., Robinson, B., & Zyvoloski, G. (2008). Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) Using Adaptive Markov Chain Monte Carlo Sampling. *Advances in Water Resources*, 34(4), 630-648.
- Cárdenas, J., Carlotto, V., Valderrama, P., Fidel, L., & Tintaya, D. (2006). *Geología y Geodinámica en la Quebrada Runtumayo-Nevado Verónica (Cusco): Alud y Flujo de Detritos del 12 de Octubre del 2005*. Artículo presentado en XIII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú.
- Castillo, L., Fidel, L., & Jackson, L. (2006). *Modelado de Flujos de Lodo usando Flo-2D en la Quebrada Paihua: Impacto en la Ciudad de Matucana, Lima*. Artículo presentado en XIII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú.
- Cesca, M., & D'Angostino, V. (2008). Comparison Between FLO-2D and RAMMS in Debris-Flow Modelling: A Case Study in the Dolomites. *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows II*, 60, pp. 197-204.
- Costa, J. (1984). Physical Geomorphology of Debris Flow. *Developments and Applications of Geomorphology*, pp. 268-317.
- Costa, J., & Williams, G. (Guión). (1984). Debris-Flow Dynamics [Película], Open File Report 84/606: U.S. Geological Survey.
- Coussot, P. (1997). *Mudflow Rheology and Dynamics* (3<sup>rd</sup> ed.). Nueva York, Estados Unidos: IAHR Monographs, CRC Press.
- Coussot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, Classification and Mechanical Description of Debris Flows. *Earth-Science Reviews*, 40, pp. 209-227.
- Currie, I. (2003). *Fundamental Mechanics of Fluids* (3<sup>rd</sup> ed.). Nueva York, Estados Unidos: Marcel Dekker, Inc.
- Childs, C. (2004). Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. *ArcUser - ESRI Education Services*, 3235, pp. 32-35.
- Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. Singapur, Singapur: McGraw-Hill.

- Christen, M., Kowalski, J., & Bartelt, P. (2010). RAMMS: Numerical Simulation of Dense Snow Avalanches in Three-Dimensional Terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 63(1-2), pp. 1-14.
- Das, B. (2010). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (2<sup>nd</sup> ed.). México D.F., México: Thompson Learning.
- Denlinger, R., & Iverson, R. (2004). Granular Avalanches Across Irregular Three-Dimensional Terrain. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 109(F1).
- Deubelbeiss, Y., & Graf, C. (2013). Two Different Starting Conditions in Numerical Debris-Flow Models – Case Study at Dorfbach, Randa (Valais, Switzerland). *Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft*, pp. 125-138.
- Doshi, M., & Gill, W. (1970). A Note on the Mixing Length Theory of Turbulent Flow. *AIChE Journal*, 16(5), pp. 885-888.
- Egashira, S., Ashida, K., Yajima, H., & Takahama, J.-I. (1989). Constitutive Equation of Debris Flow. *Annals Disaster Prevention Research Institute*, pp. 487-501.
- Egashira, S., & Itoh, T. (2004). Numerical Simulation of Debris Flow. *数值流体力学部 研 究 報 告 集* - *Journal of Japan Society of Computational Fluid Dynamics*, 12(2), pp. 33-43.
- Ellen, S., & Fleming, R. (1987). Mobilization of Debris Flows from Soil Slips, San Francisco Bay Region, California. *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation*, 7, pp. 31-40.
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., . . . Pombosa, R. (2009). Spatio-Temporal Rainfall Variability in the Amazon Basin Countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29(11), pp. 1574-1594.
- Feldman, A. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*. Washington, Estados Unidos: US Army Corps of Engineers.
- Fidel, L., Zegarra, J., Vílchez, M., Castillo, L., & Jackson, L. (2006). *Evolution of Landslide Activity, and the Origin of Debris Flows in the El Niño Affected Payhua Creek Basin, Matucana Area, Huarochiri, Peru*. Artículo presentado en 10<sup>th</sup> IAEG International Congress, Nottingham, Reino Unido.

- Geólogos del Mundo. (2007) Desastres de Origen Natural y Cooperación al Desarrollo. *Pobres X Desastres*. Cataluña, España: Agència Catalana de Cooperació al Desenvolupament.
- Gidaspow, D. (1994). *Multiphase Flow and Fluidization*. California, Estados Unidos: Academic Press, Inc.
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Tauro, F., & Porfiri, M. (2012). Time of Concentration: A Paradox in Modern Hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), pp. 217-228.
- Heim, A. (1932). Bergsturz und Menschenleben. *Der Schweizer Geograph*, 8, pp. 126-128.
- Hirano, M. (1997). Prediction of Debris Flow for Warning and Evacuation *Recent Developments on Debris Flows* (Vol. 64, pp. 7-26). Berlín, Alemania: Springer Berlin Heidelberg.
- Hoek, E., Kaiser, P., & Bawden, W. (2000). *Support of Underground Excavations in Hard Rock* (4<sup>th</sup> ed.). Rotterdam, Países Bajos: A.A. Balkema Publishers.
- Högström, U. (1985). Von Karman's Constant in Atmospheric Boundary Layer Flow: Reevaluated. *Journal of the Atmospheric Sciences*, pp. 263-270.
- Hungr, O. (2000). Analysis of Debris Flow Surges Using the Theory of Uniformly Progressive Flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, pp. 483-495.
- Hungr, O., Morgan, G., & Kellerhals, R. (1984). Quantitative Analysis of Debris Torrent Hazards for Design of Remedial Measures. 21(4), pp. 663-677.
- Hungr, O., & Morgenstern, N. (1984). Experiments in High Velocity Open Channel Flow of Granular Materials. *Géotechnique*, 34, pp. 405-413.
- Hunt, M., Zenit, R., Campbell, C., & Brennen, C. (2002). Revisiting the 1954 Suspension Experiments of R. A. Bagnold. *Journal of Fluid Mechanics*, 452, pp. 1-24.
- Hurtado, P. (14 de Febrero, 2013). "Tres desaparecidos por huaico en distrito cusqueño de Maranura". *Andina*. Obtenido de <http://www.andina.com.pe/agencia/noticia-tres-desaparecidos-huaico-districto-cusqueno-maranura-447386.aspx>
- Hussain, H. (2007). *Analysis of Different Models to Predict the Mean Flow Velocity in Hyperconcentrations, Mudflows and Debris Flows*. Artículo presentado en

- Pakistan Engineering Congress, 70<sup>th</sup> Annual Session Proceedings, Punjab, Pakistán.
- Hutter, K., Svendsen, B., & Rickenmann, D. (1996). Debris Flow Modeling: A Review. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 8, pp. 1-35.
- ISO. (2002). *Geotechnical Investigation and Testing - Identification and Classification of Soil - Part 1: Identification and Description*. (14688-1). Ginebra, Suiza.
- Iverson, R. (1997). The Physics of Debris Flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), pp. 245-296.
- Iverson, R. (2003). The Debris-Flow Rheology Myth. *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, pp. 303-314.
- Iverson, R. (2014). Debris flows: Behaviour and Hazard Assessment. *Geology Today*, 30(1), pp. 15-20.
- Iverson, R., & Vallance, J. (2001). New Views of Granular Mass Flows. *Geology Today*, 29(2), pp. 115-118.
- Jakob, M., & Hungr, O. (2005). *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Chichester, Reino Unido: Praxis Publishing.
- Jeong, W., & Seong, J. (2014). Comparison of Effects on Technical Variances of Computational Fluid Dynamics (CFD) Software Based on Finite Element and Finite Volume Methods. *International Journal of Mechanical Sciences*, 78, pp. 19-26.
- Julien, P. (2010). *Erosion and Sedimentation* (2<sup>nd</sup> ed.). Nueva York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- Kasim, N., Abu Taib, K., & Mukhlisin, M. (2013). *Comparison of Debris Flow Simulation Model with Field Event in Kuala Kabu Baru, Malaysia*. Artículo presentado en 9<sup>th</sup> International Conference of Geotechnical & Transportation Engineering (GEOTROPIKA), Johor, Malasia.
- Keith, C. (1997). *Getting Started with Geographic Information Systems* (Vol. III). Nueva Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall, Inc.
- Kobiyama, M., Goerl, R., Corrêa, G., & Michel, G. (2010). Debris Flow Occurrences in Rio dos Cedros, Southern Brazil: Meteorological and Geomorphic Aspects. *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows III*, 67, pp. 77-88.

- LaHusen, R. (2005). Debris-Flow Instrumentation *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 291-304). Chichester, Reino Unido: Praxis Publishing.
- Lim, K. J., Engel, B., Muthukrishnan, S., & Harbor, J. (2006). Effects of Initial Abstraction and Urbanization on Estimated Runoff Using CN Technology. *Journal of the American Water Resources Association*, pp. 629-643.
- Maidment, D. (1993). *Handbook of Hydrology* (1<sup>st</sup> ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Major, J., & Iverson, R. (1999). Debris-Flow Deposition: Effects of Pore-Fluid Pressure and Friction. *Geological Society of America Bulletin*, 111(10), pp. 1424-1434.
- Marocco, R. (1978) Estudio Geológico de la Cordillera de Vilcabamba. *Boletín No.4*. Lima, Perú: Insituto de Geología y Minería, Sector Energía y Minas.
- McCuen, R. (1998). *Hydrologic Analysis and Desing* (2<sup>nd</sup> ed.). Nueva Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall, Inc.
- McKnight, T., & Hess, D. (2000). Climate Zones and Types: the Köppen System. *Physical Geography: A Landscape Appreciation*, pp. 235-240.
- Mizuyama, T. (2008). Structural Countermeasures for Debris Flow Disasters. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 1(2), pp. 38-43.
- Nakatani, K., Wada, T., Matsumoto, N., Satofuka, Y., & Mizuyama, T. (2011). Development and Application of GUI Equipped 1-D and 2-D Debris Flow Simulator, Applied to Mixed-Size Grains. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, pp. 735-744.
- Nakatani, K., Wada, T., Satofuka, Y., & Mizuyama, T. (2008). Development of "Kanakano", a Wide use 1-D and 2-D Debris Flow Simulator Equipped with GUI. *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows II*, 60, pp. 49-58.
- Natrella, M., Croarkin, C., & Guthrie, W. (2010). *e-Handbook of Statistical Methods*. Nueva York, Estados Unidos: NIST/SEMATECH.
- Natural Resources Conservation Service. (1997). *National Engineering Handbook - Part 630 Hydrology*. Washington, Estados Unidos: US Department of Agriculture.
- O'Brien, J., & Julien, P. (1988). Laboratory Analysis of Mudflow Properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8), pp. 877-887.

- O'Brien, J., Julien, P., & Fullerton, W. (1993). Two-Dimensional Water Flood and Mudflow Simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(2), pp. 244-261.
- Ortigao, J. A., & Sayao, A. (2004). *Handbook of Slope Stabilisation*. Nueva York, Estados Unidos: Springer-Verlag.
- Paola, C., & Voller, V. (2005). A Generalized Exner Equation for Sediment Mass Balance. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(F4).
- Parrilla, G., & Zamorano, J. J. (1996). Análisis de un Flujo de Depósitos (Debris Flow) en la Ladera Norte del Pico de Orizaba (México). *Cuadernos do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, 21, pp. 337-347.
- Patra, A., Bauer, A., Nichita, C., Pitman, E. B., Sheridan, M., Bursik, M., . . . Renschler, C. (2005). Parallel Adaptive Numerical Simulation of Dry Avalanches over Natural Terrain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*(139), pp. 1-21.
- Patra, A., Nichita, C., Bauer, A., Pitman, E. B., Bursik, M., & Sheridan, M. (2006). Parallel Adaptive Discontinuous Galerkin Approximation for Thin Layer Avalanche Modeling. *Computers & Geosciences*, 32(7), pp. 912-926.
- Pierson, T. (1986). Flow Behaviour of Channelized Debris Flows. *Hillslope Processes*, pp. 269-296.
- Pierson, T., & Costa, J. (1987). A Rheologic Classification of Subaerial Sediment-Water Flows. *Reviews in Engineering Geology*, VII, pp. 1-12.
- Pitman, E. B., Nichita, C., Patra, A., Bauer, A., Sheridan, M., & Bursik, M. (2003). Computing Granular Avalanches and Landslides. *Physics of Fluids*, 15(12), pp. 3638-3646.
- Planning and Technical Services. (1980) A Method for Estimating Design Peak Discharge. Wellington, Nueva Zelanda: Ministry of Works and Development, Water and Soil Division.
- Prasad, A., & Rajaratnam, N. (1991) Hydraulics of Debris Flow. *Water Resources Engineering Report (WRE 91-2)*. Alberta, Canadá: University of Alberta, Department of Civil Engineering.
- Rickenmann, D. (2005). Runout Prediction Methods *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 305-324). Chichester, Reino Unido: Praxis Publishing.

- Sánchez, M. (2009). *Modelación de Flujos de Derrubios Empleando el Método SPH, Aplicación a Casos Reales*. (Tesis Doctoral), Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Disponible en Archivo Digital UPM (ID 2014)
- Savage, S., & Hutter, K. (1989). The Motion of a Finite Mass of Granular Material down a Rough Incline. *Journal of Fluid Mechanics*, 199, pp. 177-215.
- Savage, S., & Sayed, M. (1984). Stresses Developed by Dry Cohesionless Granular Materials Sheared in an Annular Shear Cell. *Journal of Fluid Mechanics*, 142, pp. 391-430.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI. (2011). *Atlas Climático de Precipitación y Temperatura del Aire en la Cuenca del Río Urubamba*. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente – MINAM.
- Stinton, A., Delaite, G., Burkett, B., Sheridan, M., Thouret, J. C., & Patra, A. (2004). Titan2D Simulated Debris Flow Hazards: Arequipa, Peru. *The International Environmental Modelling & Software Society*.
- Stinton, A., Sheridan, M., Patra, A., Dalbey, K., & Namikawa, L. (2004). Incorporation of Variable Bed Friction into Titan2D Mass-Flow Model: Application to Little Tahoma Peak Avalanche (Washington). *Acta Vulcanologica*, 16(1-2), pp. 153-166.
- Sumaryono, A., Nakatani, K., Satofuka, Y., & Mizuyama, T. (2009). One-Dimensional Numerical Simulation for Sabo Dam Planning Using Kanako (Ver. 1.40): A Case Study at Cipanas, Guntur Volcanoes, West Java, Indonesia. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 2(1), pp. 22-32.
- Takahashi, T. (1981). Estimation of Potencial Debris Flows and Their Hazardous Zones: Soft Countermeasures for a Disaster. *Journal of Natural Disaster Science*, 3(1), pp. 57-89.
- Takahashi, T. (1991). *Debris Flow*. Nueva York, Estados Unidos: IAHR Monographs, CRC Press.
- Takahashi, T. (2007). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Oxfordshire, Reino Unido: Taylor & Francis Group.
- Takahashi, T. (2009). A Review of Japanese Debris Flow Research. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 2(1), pp. 1-14.

- Takahashi, T., & Nakagawa, H. (1991). Prediction of Stony Debris Flow Induced by Severe Rainfall. *砂防学会誌 - Japan Society of Erosion Control Engineering*, 44(3), pp. 12-19.
- Takahashi, T., Nakagawa, H., & Huang, S. F. (1987). *Estimation of Debris Flow Hydrograph on Varied Slope Bed*. Artículo presentado en International Symposium on Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, Oregon, Estados Unidos.
- Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3<sup>rd</sup> ed.). Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- Thompson, J., Soni, B., & Weatherill, N. (1999). *Handbook of Grid Generation*. Nueva York, Estados Unidos: CRC Press.
- Torres, W. (14 de Febrero, 2013). "Cuatro personas desaparecidas deja huayco". *La República*. Obtenido de <http://archivo.larepublica.pe/14-02-2013/cuatro-personas-desaparecidas-deja-huayco-en-cusco>
- Wada, T., Satofuka, Y., & Mizuyama, T. (2008). Integration of 1- and 2- Dimensional Models for Debris Flow Simulation. *砂防学会誌 - Japan Society of Erosion Control Engineering*, 61(2), pp. 36-40.
- Zora, G. (18 de Enero, 2013). "Dos desaparecidos luego que huaico arrastrara auto en La Convención". *Canal N*. Obtenido de <http://laprensa.peru.com/actualidad/noticia-video-rio-vilcabamba-arrastra-auto-dejando-tres-heridos-y-dos-desaparecidos-1483>