



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA EVOLUCIÓN DE DEPÓSITOS  
ALUVIONALES EN LA CONFLUENCIA DE CANALIZACIONES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**PABLO ANDRÉS OYARZÚN HERNÁNDEZ**

PROFESOR GUÍA:  
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALEX GARCÉS CATLÁN  
SANTIAGO MONTSERRAT MICHELINI

SANTIAGO DE CHILE  
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL  
POR: PABLO ANDRÉS OYARZÚN HERNÁNDEZ  
FECHA: 2024  
PROF. GUÍA: ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA EVOLUCIÓN DE DEPÓSITOS ALUVIONALES EN LA CONFLUENCIA DE CANALIZACIONES**

En un contexto de creciente frecuencia y severidad de desastres naturales asociados al cambio climático, este estudio experimental investiga la interacción entre ríos y quebradas tributarias con el objetivo de comprender mejor los procesos que pueden llevar a bloqueos parciales o totales en los cauces de los ríos debido a flujos detríticos. Los aluviones, o flujos de detritos, presentan riesgos significativos para las comunidades y ecosistemas, y su estudio es crucial para la gestión de desastres.

Mediante ensayos en un canal experimental, el estudio analiza cómo diferentes condiciones y características del flujo detrítico afectan la capacidad del río para arrastrar y redistribuir sedimentos. La instalación experimental incluye un canal principal y un canal tributario, con controles del caudal y la mezcla de sedimentos. Los resultados muestran que la relación de caudales y momentum definidos por volumen total de sedimentos influyen significativamente en el bloqueo parcial del canal principal.

Aunque no se logró un bloqueo total en los experimentos, los bloqueos parciales proporcionaron información valiosa sobre la dinámica de los flujos detríticos. La metodología de análisis dimensional permitió identificar variables clave, como la relación entre caudales y momentum, que determinan el comportamiento de los flujos en la confluencia. Estos hallazgos, aunque limitados por la imposibilidad de alcanzar un bloqueo total, enriquecen la comprensión de los procesos de deposición y erosión en estos eventos, contribuyendo a futuras investigaciones y al desarrollo de estrategias de mitigación para áreas propensas a flujos detríticos.

*El agua nunca se detiene.  
Fluye incesante, adaptándose, venciendo  
con paciencia y perseverancia."*

***A mi familia***

# Agradecimientos

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que me acompañaron y apoyaron durante este camino.

En primer lugar, a mis padres por permitirme estudiar y ser mi pilar y fuente inagotable de amor, comprensión y fortaleza. Ustedes junto a mi hermano han sido fundamental para llegar hasta este punto. Sin ustedes no sería quien soy hoy en día. A mis amigos de toda la vida, que conocí en el liceo y que siempre han estado presentes, ofreciendo risas, consejos y momentos de distracción necesarios para mantener el equilibrio. Gracias por su amistad incondicional

A mis compañeros y amigos de la universidad de primer año, con quienes compartí horas de estudio, desafíos y logros.

A mis compañeros de civil, su compañía hizo de estos últimos años una experiencia única y llena de aprendizaje. Agradezco cada conversación, ayuda y apoyo a lo largo de estos años

Al profe Aldo, por su invaluable orientación, paciencia y conocimientos compartidos. Sus consejos y dedicación fueron esenciales para el desarrollo de esta tesis. Al Alex y Santiago, por su paciencia, observaciones y aportes en cada reunión. Al Jaime por tener la buena disposición de prestar la cámara Intel.

Al Giovanni por su ayuda y disposición en la construcción del experimento, facilitando el proceso experimental de esta investigación haciendo que fuese una experiencia disfrutable en todo momento. Su apoyo fue clave para superar este desafío.

A quien está leyendo esta Tesis, por hacer que tenga sentido todo este esfuerzo.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este capítulo de mi vida y por contribuir de manera significativa a este logro.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. General . . . . .	2
1.2.2. Específicos . . . . .	2
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Fluidos . . . . .	4
2.1.1. Fluidos newtonianos . . . . .	4
2.1.2. Fluidos no newtonianos . . . . .	4
2.2. Flujo detrítico . . . . .	5
2.2.1. Composición de los flujos detríticos . . . . .	6
2.2.2. Propiedades de los flujos detríticos . . . . .	9
2.2.3. Leyes de resistenica . . . . .	9
2.3. Escalamiento de los flujos detríticos . . . . .	13
2.4. Erosión en flujos detríticos . . . . .	15
2.5. Depositación en flujos detríticos . . . . .	15
2.6. Interacciones y dinámica entre un flujo detrítico proveniente de una quebrada tributaria y un río troncal . . . . .	16
2.6.1. Estado del arte . . . . .	17
2.6.1.1. Estudio Experimentales . . . . .	18
<b>3. Instalación y metodologías para el trabajo experimental</b>	<b>23</b>
3.1. Instalación experimental . . . . .	23
3.2. Metodología . . . . .	28
3.3. Condiciones experimentales . . . . .	28
3.4. Reología de la mezcla agua y caolinita . . . . .	29
3.5. Procesamiento de imágenes . . . . .	30
3.5.1. Análisis de las alturas del depósito . . . . .	30
3.5.2. Análisis de la velocidad del flujo detrítico . . . . .	30
3.6. Análisis dimensional . . . . .	30
<b>4. Resultados experimentales</b>	<b>34</b>
4.1. Resultados de los experimentos . . . . .	35
4.2. Resultados adimensionales . . . . .	37
4.2.1. Comparación de los parámetros adimensionales para casos de bloqueo parcial y no bloqueo . . . . .	37

4.2.2. Comparación de los parámetros adimensionales para casos de Erosión y No Erosión . . . . .	38
4.3. Resultados de la caracterización de los depósitos de los flujos detríticos ensayados	40
<b>5. Análisis de Resultados</b>	<b>45</b>
5.1. Bloqueo Parcial y No bloqueo . . . . .	45
5.2. Erosión y no erosión . . . . .	45
5.3. Comparación con referencias . . . . .	46
<b>6. Conclusiones</b>	<b>48</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>49</b>
<b>Anexos</b>	<b>52</b>
A. Fuentes y propagación de errores . . . . .	52
A.1. Antecedentes generales . . . . .	52
A.2. Error asociado al cálculo del volumen total de la mezcla . . . . .	52
A.2.1. Fuentes de error . . . . .	52
A.2.2. Propagación de error . . . . .	52
A.3. Error asociado al cálculo del caudal del canal principal . . . . .	53
A.3.1. Fuentes de error . . . . .	53
A.3.2. Propagación de error . . . . .	53
A.4. Error asociado al cálculo de velocidad del flujo detrítico . . . . .	54
A.4.1. Fuentes de error . . . . .	54
A.4.2. Propagación de error . . . . .	54
A.5. Error asociado al cálculo de concentración de fino y volumétrica . . . . .	54
A.5.1. Fuentes de error . . . . .	54
A.5.2. Propagación de error . . . . .	54
A.6. Error asociado al cálculo de los parámetros adimensionales . . . . .	55
A.6.1. Propagación de errores . . . . .	55
B. Tablas de resultados . . . . .	57
C. Resultados de los caudales aforados para la calibración del tablero venturi . . . . .	61
D. Resultados de la curva granulométrica . . . . .	62

# Índice de Tablas

2.1.	Valores típicos de las propiedades físicas básicas en flujos detríticos (Iverson,1997)	7
3.1.	Condiciones experimentales para los distintos ensayos . . . . .	29
3.2.	Proporciones de agua y caolinita utilizados . . . . .	30
4.1.	Resultados del ajuste del modelo reológico . . . . .	35
4.2.	Resultados de los distintos casos estudiados, para las distintas composiciones de mezcla . . . . .	36
4.3.	Caudal del río y velocidad del flujo detrítico para los distintos ensayos . . . . .	37
A.1.	Errores asociados al cálculo del volumen total de la mezcla agua, arena y caolinita	52
A.2.	Errores asociados al cálculo del caudal del canal principal . . . . .	53
A.3.	Errores asociados al cálculo de la velocidad del aluvión . . . . .	54
B.1.	Resultados adimensionales desde $\Pi_1$ a $\Pi_6$ . . . . .	58
B.2.	Resultados adimensionales desde $\Pi_7$ a $\Pi_{12}$ . . . . .	59
B.3.	Resultados de los errores de los adimensionales desde $\Pi_1$ a $\Pi_6$ . . . . .	60
B.4.	Resultados de los errores de los adimensionales desde $\Pi_7$ a $\Pi_{12}$ . . . . .	61

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Modelos reológicos. Extraído (Ibarrola, 2009) . . . . .	5
2.2.	Perfil flujo detrítico, extraído (Martinez, 2022) . . . . .	6
2.3.	Variedad granulométrica después de un flujo (Pierson, 1985) . . . . .	8
2.4.	Diagrama de fase con la clasificación de los flujos detríticos (Takahashi & Sato- fuka, 1999) . . . . .	12
2.5.	Flujos detríticos formando un bloqueo completo del cauce y bloqueo parcial con forma de abanico fluvial (Chen et al., 2019) . . . . .	17
2.6.	Esquema de la instalación experimental (Dang et al.,2009) . . . . .	19
2.7.	Instalación experimental (Stancanelli, 2015) . . . . .	20
2.8.	Esquema de la instalación experimental (Song et al., 2024) . . . . .	22
3.1.	Esquema instalación experimental vista lateral canal principal . . . . .	24
3.2.	Tablero con papel milimetrado para el cálculo del caudal en el canal principal .	24
3.3.	Instalación Experimental vista lateral canal tributario . . . . .	25
3.4.	Instalación experimental vista en planta . . . . .	26
3.5.	Esquema de compuertas del estanque que almacena la mezcla . . . . .	27
4.1.	Reología de la mezcla agua-caolinita para las distintas proporciones . . . . .	34
4.2.	Gráfico de adimensionales $\Pi_1$ vs $\Pi_5$ para casos bloqueo parcial y no bloqueo .	38
4.3.	Gráfico de adimensionales $\Pi_1$ vs $\Pi_7$ vs $\Pi_8$ para casos bloqueo parcial y no bloqueo	38
4.4.	Gráfico de adimensionales $\Pi_1$ vs $\Pi_7$ vs $\Pi_8$ para casos erosión y no erosión . . .	39
4.5.	Gráfico de adimensionales $\Pi_5$ vs $\Pi_{10}$ para casos erosión y no erosión . . . . .	39
4.6.	Gráfico de adimensionales $\Pi_1$ vs $\Pi_{11}$ para casos erosión y no erosión . . . . .	40
4.7.	Alturas del depósito del flujo detrítico de 10 %Fino y 40 %Arena para un volumen total de 3 Litros, caso de no bloqueo (Experimento numero 24) . . . . .	41
4.8.	Alturas del depósito del flujo detrítico de 15 %Fino y 35 %Arena para un volumen total de 3 Litro, caso de no bloqueo (Experimento numero 25) . . . . .	41
4.9.	Alturas del depósito del flujo detrítico de 20 %Fino y 25 %Arena para un volumen total de 3 Litros, caso de bloqueo parcial (Experimento numero 26) . . . . .	42
4.10.	Alturas del depósito del flujo detrítico de 20 %Fino y 30 %Arena para un volumen total de 3 Litros, caso de bloqueo parcial (Experimento numero 27) . . . . .	42
4.11.	Altura del depósito del flujo detrítico de 25 %Fino y 15 %Arena para un volumen total de 3 Litros, caso de no bloqueo (Experimento numero 20) . . . . .	43
4.12.	Alturas del depósito del flujo detrítico de 25 %Fino y 20 %Arena para un volumen total de 3 Litros, caso de no bloqueo (Experimento numero 22) . . . . .	43
4.13.	Alturas del depósito del flujo detrítico de 25 %Fino y 22 %Arena para un volumen total de 6.3 Litros, caso de bloqueo parcial (Experimento numero 28) . . . . .	44
4.14.	Alturas del depósito del flujo detrítico de 25 %Fino y 25 %Arena para un volumen total de 10 Litros, caso de bloqueo parcial . . . . .	44
5.1.	Relación Stancanelli et al. 2015 con datos obtenidos en el experimento . . . . .	46

5.2.	Umbral de obstrucción total-parcial del canal principal, identificada con datos de Stancanelli et al. (2015) y de Dang et al. (2009), extraído de Stancanelli et al. (2015) . . . . .	47
C.1.	Regresión de caudal y diferencia de presión . . . . .	62
D.1.	Curva granulométrica . . . . .	62

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

En los últimos años, se ha observado un aumento en la frecuencia y severidad de los desastres naturales, los cuales están relacionados en gran medida con el cambio climático (Cotroneo et al., 2018; Martínez, 2022). A nivel global, la temperatura promedio ha aumentado en  $0.76^{\circ}\text{C}$  en los últimos 150 años, con la mayoría de los años recientes ubicándose entre los más cálidos de los registros instrumentales (IPCC, 2023). El incremento de la temperatura, las sequías prolongadas y los eventos extremos de precipitación han contribuido a la generación de aluviones, lo que pone en riesgo tanto a las comunidades locales como a los ecosistemas naturales (Huggel et al., 2012).

Los aluviones, también conocidos como flujos de detritos, son movimientos de mezclas de masas de sedimentos agitadas y saturadas por agua debido a la gravedad (Iverson, 1997), estos pueden llegar a tener grandes volúmenes y recorrer grandes distancia. La parte sólida de los flujos de detritos está compuesta principalmente por arena, grava y rocas, pero también puede arrastrar elementos como árboles, autos, edificios pequeños y otros objetos hechos por el ser humano (Iverson, 1997; Larsen et al., 2002), lo cual bajo un infortunio puede desencadenar tanto en pérdidas de vida humana y pérdidas económicas (Cotroneo et al., 2018).

Chile ha experimentado eventos de flujos detríticos significativos, como el ocurrido el 25 de marzo del 2015, conocido como el evento 25M al norte del país. Este suceso se ve originado por una tormenta extrema que golpeó el desierto de Atacama, resultando en flujos de detritos significativos, un ejemplo de la dinámica en la confluencia río-quebrada es el caso de quebrada Cruceita, donde los flujos de detritos generaron un bloque parcial que modificó las condiciones de escurrimiento del río (Garcés et al., 2022). Este evento destacó la vulnerabilidad de la región y subrayó la necesidad urgente de comprender mejor los procesos geomorfológicos que ocurren en la confluencia de ríos y quebradas (Aguilar et al., 2020)

El estudio de la interacción entre ríos y quebradas tributarias es fundamental para comprender y mitigar los riesgos asociados con fenómenos naturales como los flujos de detritos que en regiones montañosas, la dinámica de estas interacciones puede desencadenar eventos catastróficos.(Chen et al.,2019). Estos fenómenos naturales pueden resultar en la obstrucción de ríos principales por acumulaciones de material sólido transportado por los flujos de detritos provenientes de quebradas tributarias. Este tipo de obstrucción puede tener graves

consecuencias para las áreas aguas arriba, incluida la formación de presas de retención que, al romperse, pueden provocar ondas de inundación y flujos de escombros que amenazan vidas y propiedades en las regiones aguas abajo (Chen et al, 2019; Costa & Schuster, 1988)

Comprender la interacción entre ríos y quebradas tributarias es crucial para la prevención y gestión de desastres. La dinámica de los sedimentos y flujos de agua en estas áreas es compleja y puede variar significativamente en función de factores como el ángulo de convergencia, la velocidad de los flujos y las características físicas del material de los flujos de detritos (Cheng et al., 2007; Cui et al., 2015; Dang et al., 2009).

Este estudio experimental se centra en analizar la evolución de los depósitos de flujos detríticos en la confluencia río-quebrada mediante ensayos en un canal experimental, por medio de un análisis dimensional. Al tener las condiciones de flujo en un entorno controlado, se planea encontrar escenarios en los que el canal principal sea capaz de arrastrar todos los sedimentos transportados por la quebrada tributaria, así como situaciones en las que se produzca un semibloqueo y, en algunos casos, un bloqueo completo del canal. Se espera que los resultados obtenidos de este trabajo enriquezcan el estudio del problema y contribuyan a mejorar su predicción con el tiempo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. General**

El objetivo principal de este estudio experimental es identificar y analizar las condiciones hidráulicas que conducen a un bloqueo parcial o total del cauce principal del río, así como a la capacidad del río para arrastrar y redistribuir los sedimentos aportados por la quebrada tributaria. Este estudio también se centra en caracterizar la geometría del depósito final resultante de los flujos de detritos, considerando la influencia de variables clave tales como el caudal del río, el volumen total de sedimentos y la proporción de sedimentos en el agua. A través de estas investigaciones, se busca contribuir a la comprensión de los procesos y variables involucradas en la interacción entre el río y la quebrada tributaria, y cómo estos procesos afectan la dinámica del flujo y la formación de depósitos.

### **1.2.2. Específicos**

1. Identificar condiciones para el bloqueo completo y parcial del río:

Se buscará analizar e identificar las condiciones que conducen a bloqueos completos, parciales o la ausencia de bloqueo en el cauce principal del río. Para ello, se crearán parámetros adimensionales basados en variables que intervienen en la dinámica del flujo de sedimentos, tales como el caudal del río, el volumen y la granulometría de los sedimentos, y la geometría de la confluencia. Estos adimensionales permitirán diferenciar y clasificar los casos observados en el experimento.

2. Establecer criterios para el arrastre de los sedimentos:

Se analizarán e identificarán las condiciones bajo las cuales el río es capaz de arrastrar y redistribuir los sedimentos aportados por la quebrada tributaria. Se desarrollarán parámetros adimensionales basados en variables que afectan la dinámica del arrastre y la erosión, permitiendo establecer criterios para distinguir entre casos de transporte de

sedimentos y situaciones en las que el depósito de detritos se mantiene.

3. Caracterizar la geometría del depósito final:

Analizar y describir la geometría del depósito de sedimentos en la confluencia entre el río y la quebrada, identificando y comparando las características entre los diferentes casos estudiados.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

El estudio de los flujos detríticos y su interacción con los cauces fluviales es fundamental para comprender los procesos geomorfológicos y los riesgos asociados en regiones propensas a eventos de transporte de sedimentos. (Aguilar et al., 2020; Garcés et al., 2022). Los flujos detríticos, que consisten en una mezcla compleja de agua, sedimentos y fragmentos sólidos, pueden alterar drásticamente la dinámica de los ríos y quebradas (Costa & Schuster, 1988). La capacidad de estos flujos para transportar y depositar sedimentos depende de una variedad de factores, incluyendo la velocidad del flujo, la viscosidad de la mezcla, y la topografía del terreno (Benda et al., 2005; Dang et al., 2009). Además, el análisis de los mecanismos de depositación y la influencia de la pendiente del cauce en la formación de represas naturales y obstrucciones es crucial para la gestión de riesgos y la predicción de eventos de desbordamiento (Major & Iverson, 1999; Song et al., 2023).

### 2.1. Fluidos

Un fluido es una sustancia, ya sea líquida o gaseosa, que puede ser alterada por fuerzas cortantes y que puede mostrar distintos grados de resistencia cuando se les aplican fuerzas (Martinez, 2022), según la resistencia que presenten a estos esfuerzos se dividen en:

#### 2.1.1. Fluidos newtonianos

Son los fluidos donde la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación es lineal (Perez-Trejo et al., 2010). En el campo de la hidráulica fluvial, este fluido se clasifica como “agua limpia”.

#### 2.1.2. Fluidos no newtonianos

Son los fluidos que no se comportan siguiendo la ley de Newton de la viscosidad, es decir, su relación entre el esfuerzo de corte y velocidad de deformación no es proporcional (Ibarrola, 2009). Son mezclas con comportamiento muy complejo que ofrecen mayor o menor resistencia a la deformación (Martinez et al., 2020). En la figura 2.1 se muestra la clasificación que tienen estos según la relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación.

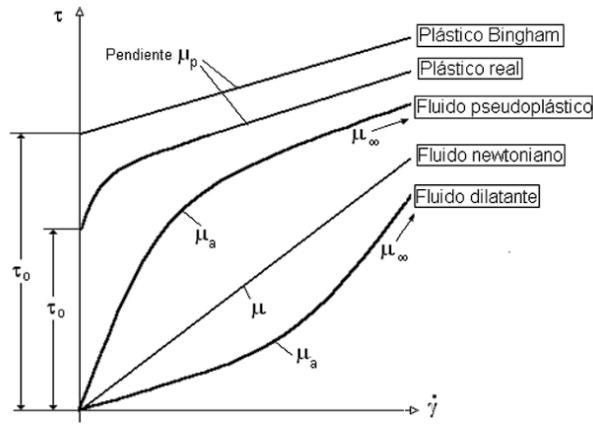


Figura 2.1: Modelos reológicos. Extraído (Ibarrola, 2009)

## 2.2. Flujo detrítico

Los flujos detríticos consisten en el movimiento de mezclas de masas de sedimento agitadas y saturadas con agua sobre una pendiente por acción de la gravedad (Iverson, 1997). Se caracterizan por ser una mezcla de sólido-líquido, los que transportan material compuesto principalmente por sedimentos y otras partículas de diversos tamaños, los cuales pueden ser desde limos y arcillas hasta arena y grava. (Iverson, 1997; Takahashi, 2007a)

La presencia de material fino en suspensión provoca que se forme un fluido equivalente altamente viscoso e incluso no-newtoniano (Pérez & Garcell, 2016). Un ejemplo de flujo detrítico en la naturaleza, que será el foco de estudio en este trabajo, son los aluviones. Estos se forman en las quebradas y, a medida que descienden, acumulan sedimentos y depositan material continuamente, lo que altera la mecánica de su movimiento a lo largo de su recorrido. (Martinez, 2022). En la figura 2.2 se presenta las distintas partes de su composición las que corresponden a frente, cuerpo y cola.

- **Frente:** Esta área muestra la punta del flujo de escombros, formada por una masa de rocas y escombros de gran tamaño que se asemejan a un muro de piedra en movimiento (Iverson, 1997; Takahashi, 2007a). Suele tener una gran altura, lo que hace que su desplazamiento esté dominado por fuerzas de inercia.
- **Cuerpo:** En esta región, el flujo está completamente desarrollado. A causa de la turbulencia generada en esta zona y las fuerzas dispersivas, se pueden observar gravas en la parte superior del flujo, como si estuvieran flotando en él (Iverson, 1997)
- **Cola:** En esta zona, el flujo suele ser inmaduro, tendiendo a convertirse en un flujo de lodos o también llamado flujo pedregoso. Aquí es donde normalmente se depositan los sedimentos más finos arrastrados desde las regiones anteriores. (Takahashi, 2007b)



Figura 2.2: Perfil flujo detrítico, extraído (Martinez, 2022)

### 2.2.1. Composición de los flujos detríticos

Las características de los flujos de detritos dependen del movimiento de los sedimentos. La distribución del tamaño de los granos (Iverson, 1997) es crucial para entender la dinámica de estos flujos. Dado que los flujos detríticos pueden contener partículas de todos los tamaños, es necesario diferenciar entre la fracción fluida y la fracción sólida.

La fracción fluida transporta el líquido junto con las partículas sólidas más finas, mientras que la fracción sólida incluye material más grueso, que puede variar desde arena fina hasta grandes rocas o bolones (Iverson, 1997; Pierson, 1985; Takahashi, 2007a)

Las propiedades físicas más relevantes que caracterizan los flujos detríticos, se presentan en la tabla 2.1

Tabla 2.1: Valores típicos de las propiedades físicas básicas en flujos detríticos (Iverson,1997)

Propiedad y Unidades	Símbolo	Valores Típicos
Propiedades de los Granos Sólidos		
Densidad, Kg/m <sup>3</sup>	$\rho_s$	2500-3000
Diámetro característico, m	d	10 <sup>-5</sup> -10
Ángulo de fricción, grados (°)	$\phi_g$	25-45
Coefficiente de restitución	e	0.1-0.5
Propiedades del Fluido Intersticial		
Densidad, Kg/m <sup>3</sup>	$\rho_f$	1000-1200
Viscosidad dinámica, Pa s	$\mu_f$	0.001-0.1
Propiedades de la Mezcla		
Concentración volumétrica	$C_v$	0.4-0.8
Fracción fluida	$(1 - C_v)$	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>
Modulo de compresibilidad, Pa	E	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>5</sup>
Angulo de fricción, grados(°)	$\phi$	25-45

La granulometría dentro de la fracción sólida de un flujo detrítico puede variar ampliamente, desde arcillas hasta grandes rocas (Fig 2.3) ( Iverson, 1997; Pierson, 1985; Takahashi, 2007a). Sin embargo, muchos modelos de flujos de detritos simplifican este parámetro al considerar un solo tamaño de sedimento ( $\delta$ ). A pesar de ello, la granulometría, especialmente el contenido de partículas finas como las arcillas, es crucial para el comportamiento del flujo. Estas partículas pueden modificar la fase líquida, afectando su densidad y viscosidad, lo que depende de las características cohesivas del material fino. (Montserrat, 2005).

Y aunque la granulometría es la propiedad que más comúnmente se mide en los flujos detríticos, por sí sola aporta poca información para comprender el fenómeno. Es necesario complementar esta medición con otras propiedades, un ejemplo de esto es el exceso de presión de poros que si bien depende del tamaño del sedimento, la granulometría no es suficiente para poder modelar este.



Figura 2.3: Variedad granulométrica después de un flujo (Pierson, 1985)

Es importante comprender cómo influye la gama de tamaños de partículas en el comportamiento del flujo, ya que las partículas más pequeñas pueden alterar las propiedades de la fase fluida, mientras que las más grandes juegan un papel importante en el intercambio de momento a través de colisiones inelásticas. (González, 2021)

Iverson (1997) describe un método para diferenciar entre la fracción líquida y la fracción sólida en los flujos detríticos, basándose en escalas de longitud y tiempo. De acuerdo con su enfoque, si el tiempo que un flujo detrítico permanece activo, denominado  $\tau_d$ , es superior al tiempo que un grano de un tamaño específico ( $\delta$ ) necesita para sedimentarse en agua limpia y tranquila (con densidad  $\mu_w$ ), entonces ese grano se considera parte de la fracción sólida del flujo. Para que un grano permanezca en suspensión, necesita interactuar con otros granos o estar en un fluido turbulento. En cambio, si un grano se mantiene suspendido por más tiempo que  $\tau_d$  solo debido a la resistencia viscosa del agua, se considera que forma parte de la fracción líquida del flujo detrítico.

Cuando se añade material fino a un fluido, esto cambia la densidad del fluido equivalente (Iverson, 1997). La relación para calcular esta densidad es:

$$\rho_f = \rho_s \cdot v_{fines} + \rho_w(1 - v_{fines}) \quad (2.1)$$

Dónde:

- $v_{fines}$  es la fracción de fluido ocupado por finos,
- $\rho_w$  es la densidad de agua pura,
- $\rho_s$  es la densidad de los granos de fino,
- $\rho_f$  es la densidad del fluido equivalente.

Además, la presencia de finos en el fluido también afecta su viscosidad efectiva. Se han hecho muchos estudios sobre cómo la viscosidad efectiva ( $\mu_f$ ) cambia cuando se agregan partículas sólidas. Einstein en 1906, propuso como calcular la viscosidad efectiva en suspensiones

diluidas, cuando la fracción de finos es baja y el número de Reynolds pequeño, específicamente para mezclas diluidas de esferas químicamente inertes ( $v_{finos} < 0,1$ ) y bajos números de Reynolds de las partículas ( $Re \ll 1$ )

$$\frac{\mu}{\mu_w} = 1 + 2.5 \cdot v_{fines} \quad (2.2)$$

Re definido como:

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu} \quad (2.3)$$

Donde:

$\rho$  es la densidad del fluido,  $U$  es la velocidad relativa de la partícula respecto al fluido,  $d$  es el diámetro característico de la partícula, y  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido.

### 2.2.2. Propiedades de los flujos detríticos

Reconocer que las partículas finas en un flujo detrítico alteran las propiedades de la fase fluida es un buen punto de partida, pero no basta para describir completamente su dinámica. Esto se debe a que el fluido intersticial también interviene en los procesos de fricción y colisión entre los granos, permitiendo la transferencia de una gran cantidad de momentum, al mismo tiempo que ocurren los esfuerzos viscosos en el fluido. (González, 2021)

La agitación del flujo tiene una gran importancia ya que no solo influye en la transformación de energía potencial a energía cinética sino que también la densidad de la mezcla, un importante parámetro en los flujos detríticos y flujos granulares corresponde a la temperatura granular, la cual es una medida del grado de agitación de las partículas (Montserrat, 2005). Se define como:

$$T_g = \langle v_s'^2 \rangle = \langle (v_s - \bar{v}_s)^2 \rangle \quad (2.4)$$

Dónde:

- $\langle \cdot \rangle$  es un promedio adecuado realizado sobre  $v'^2$ ,
- $v_s$  es la velocidad instantánea de una partícula,
- $\bar{v}_s$  es el promedio temporal de la velocidad de la partícula,
- $v'^2 = (v_s - \bar{v}_s)^2$  es la variación cuadrática de la velocidad.

De manera experimental, al igual que la temperatura granular, en los flujos detríticos también se demostró la existencia de presión de poros, la cual se basa en la diferencia de presión del fluido intersticial y la presión hidrostática. El rol que cumple es de reducir la rigidez de la mezcla y con eso facilitar el flujo. Este concepto se puede entender con el criterio de Coulomb, donde el aumento en la presión de poros disminuye el esfuerzo normal efectivo. La presión de poros es crucial en la detención de flujos detríticos. Se ha comprobado que el frente y los bordes del flujo tienen menor presión de poros que el interior, lo que aumenta la fricción en esas áreas (Iverson, 1997).

### 2.2.3. Leyes de resistencia

Para un enfoque analítico se necesita considerar los esfuerzos que se generan en la fracción líquida, específicamente la interacción líquido – sólido e interacción de las partículas sólidas

entre sí.

Bagnold (1954) propuso que en los flujos que combinan sólidos y líquidos, las colisiones entre las partículas y el lecho generan un esfuerzo normal en la dirección del flujo, lo que incrementa el esfuerzo de corte en comparación con un flujo solo de líquido. A partir de esto, sugirió que el esfuerzo total tiene dos componentes: uno asociado al líquido ( $\tau_L$ ) y otro a los sólidos ( $\tau_B$ ).

$$\tau = \tau_L + \tau_B \quad (2.5)$$

La relación entre el esfuerzo de corte,  $\tau_B$  y el esfuerzo normal  $N$ , tiene como relación

$$\tau_B = N \tan(\alpha) \quad (2.6)$$

corresponde  $\alpha$  un ángulo de fricción interna del conjunto de partículas sometidas a esfuerzo de corte y es función del esfuerzo adimensional  $G^2$  definido como

$$G^2 = \frac{\tau_B \rho_s d^2}{\lambda \mu^2} \quad (2.7)$$

$\tan(\alpha)$  varía entre 0.75 ( $G^2 < 30$ ) y 0.32 ( $G^2 > 3200$ ). (Huent et al., 2002)

Bagnold establece una clasificación de los comportamientos de los flujos detríticos en tres regímenes dependiendo de los esfuerzos viscosos con la interacción que tienen las partículas. El número de Bagnold se define como

$$Ba = \frac{\rho_s \dot{\gamma} d^2 \lambda^{1/2}}{\mu_f} \quad (2.8)$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad de las partículas sólidas,  $d$  es el tamaño de las partículas,  $\mu_f$  es la viscosidad dinámica del fluido intersticial,  $\dot{\gamma}$  es la tasa de deformación angular de la mezcla y  $\lambda$  es la concentración lineal, esta última se define como

$$\lambda = \left[ \left( \frac{C_v}{C_{vmax}} \right)^{1/3} - 1 \right]^{-1} \quad (2.9)$$

Donde  $C_v$  es la concentración volumétrica de los sólidos de la mezcla y  $C_{vmax}$  Es la máxima concentración posible de los sólidos. (Huent et al., 2002)

Con estas definiciones clasificó el comportamiento del flujo detrítico para valores  $Ba < 5$  las partículas sólidas tiene un comportamiento cuasi estático, para valores  $Ba < 40$  el comportamiento de la mezcla de líquido-sólido es como la de un fluido equivalente de gran viscosidad y a este régimen se le denomina macro viscoso, para valores entre el rango  $40 < Ba < 450$  se encuentra el régimen de transición y para valores  $Ba > 450$  dominan las colisiones de partículas sólidas. (Takahashi, 2007a)

Takahashi en su trabajo dividió los regímenes del flujo en dos grupos: macro viscoso e inercial. Este último se subdivide en flujo de barro, híbrido, inmaduro y pedregoso (Takahashi, 2007a).

El esfuerzo de corte  $\tau$  actuando en un elemento de mezcla puede dividirse en los siguientes

componentes (Takahashi & Satofuka, 1999):

$$\tau = \tau_y + \tau_\mu + \tau_C + \tau_k + \tau_S + \tau_m \quad (2.10)$$

Dónde:

- $\tau_y$  es el esfuerzo de fluencia de la mezcla de agua más los finos que constituyen el fluido equivalente intersticial,
- $\tau_\mu$  es el esfuerzo debido al roce viscoso del fluido intersticial,
- $\tau_C$  es el esfuerzo de corte asociado a las colisiones inelásticas,
- $\tau_k$  es el esfuerzo de corte cinético originado por el paso de partículas sólidas de un nivel a otro de la mezcla,
- $\tau_S$  es el esfuerzo de corte debido a la fricción o roce entre partículas,
- $\tau_m$  es el esfuerzo de corte debido a la turbulencia.

Del mismo modo, la presión puede escribirse como:

$$\mathcal{P} = \mathcal{P}_C + \mathcal{P}_S \quad (2.11)$$

Dónde:

- $\mathcal{P}_C$  es la presión debido a las colisiones entre partículas,
- $\mathcal{P}_{C,\text{estática}}$  es la presión estática que se transmite entre partículas,
- $C_s$  es la concentración límite, denominada concentración de empaquetamiento suelto, por encima de la cual se producen los efectos mencionados.

Los esfuerzos de corte pueden agruparse de la siguiente manera:  $\tau_v = \tau_y + \tau_\mu$  : esfuerzo de corte asociado a la viscoplasticidad de la mezcla.  $\tau_g = \tau_C + \tau_S$ : esfuerzo asociado al contacto entre partículas sólidas.  $\tau_t = \tau_k + \tau_m$  : esfuerzo asociado a la turbulencia y a la migración de las partículas sólidas. La tríada  $\frac{\tau_v}{\tau}$ ,  $\frac{\tau_g}{\tau}$ ,  $\frac{\tau_t}{\tau}$  permite elaborar un diagrama fase como el indicado en la Fig.2.4 (Takahashi & Satofuka, 1999)

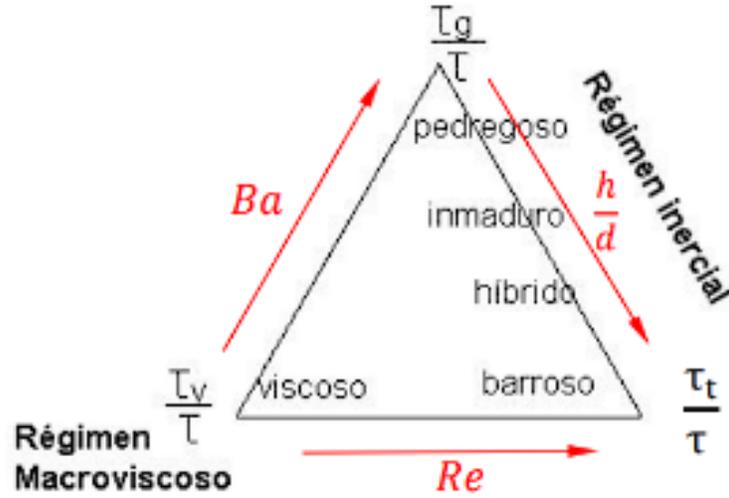


Figura 2.4: Diagrama de fase con la clasificación de los flujos detríticos (Takahashi & Satofuka, 1999)

De acuerdo al diagrama anterior en el régimen macroviscoso los esfuerzos dominantes están relacionados con la reología de la mezcla de agua con partículas finas. Esta mezcla se puede considerar un fluido equivalente que actúa como fluido newtoniano de alta viscosidad, donde su reología está definida por:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.12)$$

También puede tener esfuerzo de fluencia, modelándose como un fluido Bingham (plástico de Bingham o plástico ideal)

$$\tau = \tau_y + k \frac{du}{dy} \quad (2.13)$$

e incluso, como un plástico real, modelado como un fluido de Herschell-Bulkley

$$\tau = \tau_y + \eta \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (2.14)$$

En la fig 2.4, en el otro extremo del régimen macroviscoso, se encuentra el régimen inercial. En estos flujos detríticos se aprecia una zona o región inferior donde predominan las colisiones entre partículas, y una capa o región superior donde domina la suspensión debido a la turbulencia, como se esquematiza en la fig 2.2.

El grosor de estas regiones va a depender del tamaño del sedimento y de su concentración. Si las partículas son grandes y la región de colisiones comprende toda la profundidad del flujo, se define flujo pedregoso.

Si no hay muchas partículas suspendidas en la zona superior se denomina flujo detrítico inmaduro. Si la capa superior tiene una cantidad significativa de partículas suspendidas y

una región inferior definida por colisiones se denomina híbrido.

Finalmente, si el flujo consiste parcialmente en una suspensión turbulenta de partículas en el que dominan las interacciones friccionales o colisiones insignificantes, se denomina flujo detrítico barroso o flujo de barro.

## 2.3. Escalamiento de los flujos detríticos

Para entender y cuantificar las fuerzas predominantes en las interacciones o el comportamiento reológico de las mezclas en flujos detríticos es necesario determinar parámetros adimensionales que resalten los efectos más relevantes en el comportamiento del flujo. Estos parámetros también son esenciales para escalar adecuadamente los resultados experimentales y comprender los aspectos clave de la mecánica de los flujos detríticos. (Iverson, 1997; Monserrat, 2005)

El análisis dimensional introduce una serie de parámetros adimensionales que pueden utilizarse para clasificar flujos detríticos e identificar diferentes patrones de comportamiento. Según Iverson (1997), la presencia de un gran número de estos parámetros revela la complejidad de escalar estos flujos a tamaños de laboratorio.

Todos los esfuerzos que acompañan el transporte de momentum en la mezcla se representan en forma conjunta por  $\Sigma$ , la que depende de 13 variables

$$\Sigma = F(\dot{\gamma}, d, \rho_s, \rho_f, g, \mu_f, k, T, E, c, c_v, c_w, \phi, e) \quad (2.15)$$

donde:

- $\dot{\gamma}$  representa la tasa de deformación.
- $\rho_s$  y  $\rho_f$  corresponden a la densidad de los sólidos y del fluido, respectivamente,
- $g$  es la aceleración de gravedad,
- $\mu_f$  es la viscosidad dinámica del fluido (considerando la fracción fina de los sólidos),
- $k$  corresponde a la permeabilidad hidráulica de la mezcla,
- $T$  es la temperatura granular,
- $E$  es el módulo de compresibilidad de la mezcla sólido-líquido,
- $c_v$  corresponde a la concentración volumétrica de sólidos,
- $c_w = 1 - c_v$  es el porcentaje de fluido presente en la mezcla,
- $\phi$  es el ángulo de reposo de los sólidos,
- $e$  es el coeficiente de restitución de las partículas sólidas.

Mediante la adecuada combinación de parámetros de los adimensionales mencionados es posible formular otros enfocándolos en una visión física, y así capturen diferentes aspectos de

la dinámica del flujo. Entre los más relevantes se encuentran el número de Savage, el número de Bagnold, el número de masa, el número de Darcy,.

Numero de Savage (Sa), se define como la razón entre los esfuerzos de corte inerciales y los esfuerzos de corte cuasiestáticos. Es fundamental para caracterizar el comportamiento de los flujos detríticos cuando las colisiones entre partículas juegan un papel significativo en la dinámica del flujo. Su fórmula es (Iverson, 1997):

$$Sa = \frac{\dot{\gamma}^2 \rho_s \delta}{N(\rho_s - \rho_f)g \tan \phi} \quad (2.16)$$

donde:

- $\dot{\gamma}$  es la tasa de deformación.
- $\rho_s$  es la densidad de los sólidos.
- $g$  es la aceleración debida a la gravedad.
- $\rho_f$  es la densidad del fluido,
- $d$  es el diámetro de las partículas.
- $N$  es el número de granos por encima e incluyendo la capa de interés.

Número de Bagnold (Ba), describe la relación entre los esfuerzos inerciales y los esfuerzos viscosos. Se define como (Iverson, 1997):

$$Ba = \frac{\dot{\gamma} \rho_s \delta^2}{\mu_f} \lambda^{1/2}, \lambda = \left[ \left( \frac{C_v}{C_{vmax}} \right)^{1/3} - 1 \right]^{-1} \quad (2.17)$$

Número de masa (Nmass), proporciona una medida de la proporción entre los esfuerzos inerciales en la fracción sólida y la líquida. Se define como (Iverson, 1997):

$$N_{mass} = \frac{C_v \rho_s}{1 - C_v \rho_f} \quad (2.18)$$

El número de Darcy (NDar) se utiliza para describir cómo el aumento de la presión de poros afecta la interacción sólido-fluido. Se expresa como (Iverson, 1997):

$$N_{Dar} = \frac{\mu}{C_v \rho_s \dot{\gamma} k} \quad (2.19)$$

donde:

- $k$  es la permeabilidad del medio,

En modelos de laboratorio, el escalamiento es complicado ya que los efectos de viscosidad y presión de poros se comportan de manera diferente en flujos de menor escala. Los experimentos en miniatura no pueden replicar todos los efectos observados en flujos grandes, y los modelos de laboratorio a menudo deben ajustarse para representar adecuadamente las condiciones reales. (Iverson,1997)

## 2.4. Erosión en flujos detríticos

Investigaciones como las realizadas por Iverson et al. (2011) han demostrado que el contenido de agua en el sedimento tiene una influencia directa en la erosión. En sus experimentos, que se llevaron a cabo en un canal del USGS con un fondo erosionable, variaron el contenido volumétrico de agua en el sedimento entre 0.15 y 0.28. Los resultados mostraron que a medida que aumentaba la humedad del sedimento, también lo hacían la velocidad y el grado de agitación del flujo. En contraste, los flujos sobre lechos más secos disminuyeron su velocidad y capacidad de agitación. Además, los flujos en lechos húmedos incorporaron más material y recorrieron distancias mayores.

Este comportamiento se puede atribuir a la disminución de la fricción en flujos más húmedos debido a las altas presiones de poros generadas por el material húmedo. Esta reducción en la fricción permite que el flujo mantenga más momentum, lo que incrementa tanto la erosión del lecho como la velocidad del flujo.

Takahashi (2007a) desarrolló modelos que abordan la erosión en flujos no saturados y saturados. En los flujos no saturados, la erosión ocurre cuando la concentración de sedimentos en el flujo es menor que una concentración de equilibrio ( $C_\infty$ ), que se calcula a partir de las propiedades del sedimento y el flujo. La tasa de erosión se ajusta en función de la pendiente del canal, la concentración de sedimentos y el diámetro de las partículas. (Takahashi, 2007a)

Para flujos saturados, la tasa de erosión se determina usando una ecuación que considera la concentración volumétrica de sedimentos en el lecho y la velocidad del flujo.

## 2.5. Depositación en flujos detríticos

El término "depositación" puede referirse a dos procesos distintos: la incorporación de material desde el flujo hacia el lecho, medido y observado en campo, y la detención del flujo en áreas de pendiente baja o gran sección transversal.

La depositación final del flujo ocurre cuando la energía cinética se degrada debido a choques internos y la interacción con el lecho, causando que el flujo se desacelere y forme un depósito sólido que disminuye en espesor a lo largo de la dirección del flujo. (Iverson, 1997; Takahashi, 2007a)

Acorde a Major & Iverson (1999), el proceso de depositación está fuertemente relacionado a la distribución de presiones de poros en la mezcla, ya que mientras en su interior se tienen altas presiones, las que se pueden mantener durante la desaceleración y depositación del flujo, en los bordes del flujo, donde las presiones son bajas o inexistentes, se incrementa la fricción debido al contacto entre los granos y la superficie. (González, 2021)

Las mezclas con sedimentos más pequeños tienen una menor permeabilidad, lo que resulta en presiones de poros más altas en los bordes de estas mezclas, y estas presiones se mantienen por más tiempo. Esto disminuye la fricción y permite que el flujo se extienda sobre un área más amplia. Como resultado, los flujos detríticos con sedimentos finos tienden a formar depósitos más delgados pero que cubren una superficie mayor. Mientras que con las partículas de mayor tamaño, al tener una alta permeabilidad, no son capaces de preservar la presión de

poros, en este caso el flujo es detenido por su parte delantera.

Según VanDine (1996) algunas de las condiciones para que exista depositación de un flujo detrítico son:

- Disminución de la pendiente del cauce
- Pérdida de confinamiento del flujo
- Cualquier impedimento para el flujo, natural o artificial

Estas condiciones pueden actuar de forma separada o conjunta, variando su importancia en cada cauce y para cada flujo (VanDine, 1996).

Dando un principal enfoque al primer punto la disminución de la pendiente del cauce, Hass et al. (2015) tras una serie de experimentos evidenció la geometría de los depósitos, junto la distancia recorrida por flujos detríticos. Estos están estrechamente relacionados con la composición del flujo y la pendiente del lecho ya que probaron distintas configuraciones de pendiente y ancho del canal. Se evidenciaron diferentes efectos en la geometría del depósito pues mientras que un mayor contenido de agua reduce el espesor de estos, el incremento del resto de las variables tiene un efecto despreciable, salvo por el área inundada, en la forma del material depositado (González, 2021; Haas et al., 2015)

Takahashi (2007a) también estudió la depositación de flujos detríticos por el cambio brusco de pendiente sin expansión del cauce. Consideraron una diferencia de momentum de la cabeza del flujo agua abajo, obteniendo:

$$\tan \theta_d \leq \frac{(\rho_s - \rho_f)C_v}{(\rho_s - \rho_f)C_v + \rho_f} \tan \phi \quad (2.20)$$

Dónde:

- $\theta_d$  corresponde a la pendiente de depositación de una masa de detritos de concentración uniforme,
- $\rho_s$  es la densidad de los sólidos,
- $\rho_w$  corresponde a la densidad de la fracción fluida de la mezcla (agua y finos),
- $C_v$  es la concentración de sólidos en volumen (sin finos),
- $\phi$  es el ángulo de fricción interna de las partículas (para material granular bien graduado,  $\phi \approx 30^\circ$ ).

## 2.6. Interacciones y dinámica entre un flujo detrítico proveniente de una quebrada tributaria y un río troncal

Las interacciones en un río principal y una quebrada tributaria, específicamente en el contexto de flujos detríticos, ha sido estudiado ampliamente debido a su complejidad, debido

a involucrar múltiples variables que interactúan entre sí de manera dinámica y cambiante durante cada evento, complicando así sus comprensión y análisis (Benda et al., 2005)

La dinámica de esta interacción está influenciada por muchos factores que interactúan entre sí, algunos de estos son la velocidad del flujo, la pendiente del terreno, ángulo de confluencia, ancho del cauce y el volumen total de detritos.(Benda & Cundy, 1990; Dang et al., 2009). Según las condiciones de las variables mencionadas pueden dar lugar a que el sedimento sea completamente arrastrado por el flujo, que se genere un bloqueo total del cauce formando una presa, que ocurra un semibloqueo del cauce, o que el sedimento se deposite en forma de abanico fluvial, entre otras posibles situaciones. (Song et al., 2023)

La formación de estas presas depende de un repentino flujo de detritos en los cauces principales, sumado a condiciones geomorfológicas e hidrológicas favorables (Dang et al., 2009), los flujos detríticos tienden a acumularse en terrenos llanos, donde forman abanicos que aumentan la fricción en el cauce, tal como se ilustra en la figura 2.5

Según Dang et al. (2009), los factores críticos para la formación de estas presas incluyen la cantidad de sedimentos transportados, la altura de la cresta de la presa formada y la fuerza del flujo de sedimentos en relación con la presión del agua sobre la presa formada. Estas presas pueden desencadenar inundaciones significativas si se desbordan.(Costa & Schuster, 1988; Dang et al., 2009)



Figura 2.5: Flujos detríticos formando un bloqueo completo del cauce y bloqueo parcial con forma de abanico fluvial (Chen et al., 2019)

### 2.6.1. Estado del arte

Se han llevado a cabo diversos estudios, tanto numéricos como experimentales, para simular el movimiento de flujos detríticos y analizar cómo estos pueden obstruir un río principal. Además, se han realizado investigaciones de campo, donde se observa directamente el terreno después de que se origina un flujo de detritos, un fenómeno extremadamente difícil de predecir. La complejidad de los factores involucrados hace que desarrollar modelos matemáticos precisos sea todo un desafío.

### 2.6.1.1. Estudio Experimentales

Se han impulsado numerosos estudios experimentales para identificar los factores más influyentes y, de esta manera, reducir la carga computacional necesaria para modelar todas las variables involucradas (Chen et al., 2022).

Dang et al. (2009) realizaron un experimento que consistió en estudiar cómo se forman represas naturales por acción de flujos de detritos, se llevó a cabo en un laboratorio utilizando dos canales rectangulares: uno principal, que simulaba el río, y otro más pequeño que representaba la quebrada tributaria. El canal principal medía 5 metros de largo, 0,5 metros de alto y 0,4 metros de ancho, mientras que el canal tributario era de 2 metros de largo, 0,3 metros de alto y 0,2 metros de ancho. Las pruebas variaron en términos de la cantidad de agua y la densidad de los detritos, así como en el ángulo de confluencia.

Los resultados mostraron que la formación de represas depende de varios factores, como la proporción de caudales, la velocidad del flujo, y la mezcla de tamaños de grano en los detritos. Identificaron tres tipos de obstrucciones: parciales, totales, y aquellas que forman grandes represas.

Estos bloqueos ocurren principalmente cuando el flujo atraviesa el valle de un lado al otro. Este patrón implica alta velocidad y gran volumen del flujo. Además, se observó que las represas formadas por detritos tienden a fallar rápidamente, principalmente por desbordamiento, y que la duración y estabilidad de estas represas dependen del tamaño, la forma y los materiales involucrados.

Los experimentos mostraron que el índice crítico para la formación de presas puede ser descrito por cinco parámetros adimensionales:

1. Relación de caudal ( $RQ$ ): Es la relación entre el caudal de la quebrada (flujo de detritos) y el caudal del río principal.

$$RQ = \frac{Q_{\text{quebrada}}}{Q_{\text{río}}} \quad (2.21)$$

Donde:

- $Q_{\text{quebrada}}$  es el caudal de la quebrada (tributario),
- $Q_{\text{río}}$  es el caudal del río principal.

2. Relación de velocidad ( $RV$ ): Es la relación entre la velocidad del flujo en la quebrada (flujo de detritos) y la velocidad del flujo en el río principal.

$$RV = \frac{V_{\text{quebrada}}}{V_{\text{río}}} \quad (2.22)$$

Donde:

- $V_{\text{quebrada}}$  es la velocidad del flujo en la quebrada (tributario),
- $V_{\text{río}}$  es la velocidad del flujo en el río principal.

3. Relación de densidad ( $RC$ ): Es la relación entre la densidad del flujo de detritos y la densidad del agua del río principal.

$$RC = \frac{\rho_{\text{detritos}}}{\rho_{\text{agua}}} \quad (2.23)$$

Donde:

- $\rho_{\text{detritos}}$  es la densidad del flujo de detritos,
- $\rho_{\text{agua}}$  es la densidad del agua (usualmente  $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

4. Coeficiente de clasificación de granos ( $SC$ ): Es una medida de la desigualdad en los tamaños de grano en el flujo de detritos. Se define como la raíz cuadrada de la relación entre el tamaño del grano que corresponde al 75% de la distribución de peso acumulada y el tamaño del grano que corresponde al 25%.

$$SC = \sqrt{\frac{D_{75}}{D_{25}}} \quad (2.24)$$

Donde:

- $D_{75}$  es el tamaño del grano para el cual el 75% de la muestra es más fina,
- $D_{25}$  es el tamaño del grano para el cual el 25% de la muestra es más fina.

5. Seno del ángulo  $\theta$  ( $\sin(\theta)$ ): Es el seno del ángulo  $\theta$ , que representa la pendiente de la quebrada o del flujo.

Con estos parámetros adimensionales creó un factor  $C$  defino como  $C = R_Q R_V R_\gamma S_c \sin(\theta)$ . La formación de presas completas ocurre cuando el índice crítico es mayor a un valor umbral ( $C > 83.4$ ). Los semi-bloqueos de tipo 1 corresponden a bloqueos pequeños en comparación al ancho, donde el flujo de detritos no alcanza a cruzar completamente de un lado al otro del canal principal, y no se forma un bloqueo completo o una presa. Los semibloqueos de tipo 2 se forman cuando los depósitos cruzan todo el ancho, pero el aumento de la altura del deposito no es suficiente para impedir el paso del flujo de agua en el frente del depósito, por lo que el agua sobrepasa al depósito casi inmediatamente. Estos se producen cuando el índice crítico está en los rangos de  $C \leq 53.4$  y  $57.0$  a  $71.5$ , respectivamente.

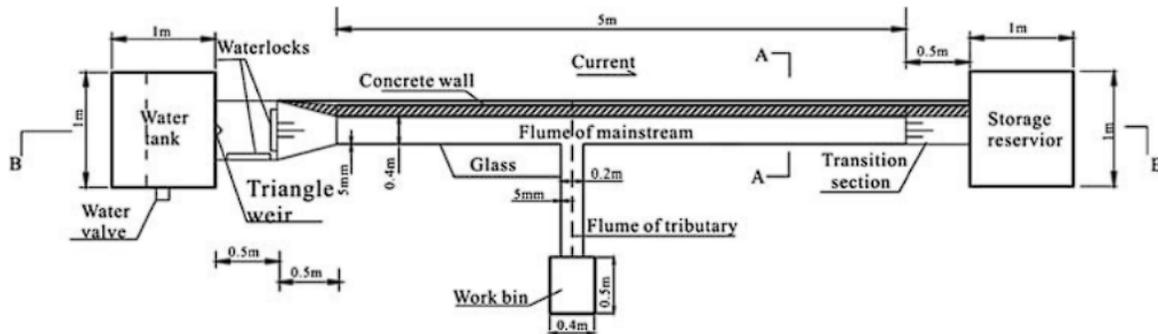


Figura 2.6: Esquema de la instalación experimental (Dang et al.,2009)

Stancanelli et al. (2015) a diferencia de otros estudios utilizó un flujo superficial sobre un lecho de sedimentos sueltos en lugar de una liberación repentina de una mezcla ya realizada de agua y sedimentos. Esto permitió que la concentración de la mezcla final sea determinada por la pendiente del canal tributario.

Su instalación experimental le permitía variar tanto la pendiente como el ángulo de la confluencia por lo que en su estudio realizó distintas combinaciones, la pendiente varió entre  $15^\circ$  y  $17^\circ$ , y para los ángulos en la confluencia fueron de  $50^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ . Dentro de los resultados obtenidos se encuentran que la geometría del depósito de sedimentos se caracterizó considerando la pendiente del tributario, y el ángulo de la confluencia.

El volumen de los depósitos tendió a aumentar con la pendiente del afluente y el ángulo de confluencia. Las pendientes más altas y los ángulos mayores generaron depósitos más grandes y con mayor obstrucción del canal principal. Y el centro de masa de los depósitos se ubicó siempre aguas abajo del eje de simetría de las confluencias, debido al transporte de sedimentos causado por el flujo principal. Los depósitos exhibieron una mayor obstrucción con una activación simultánea de las olas de detritos y para ángulos de confluencia más grandes.

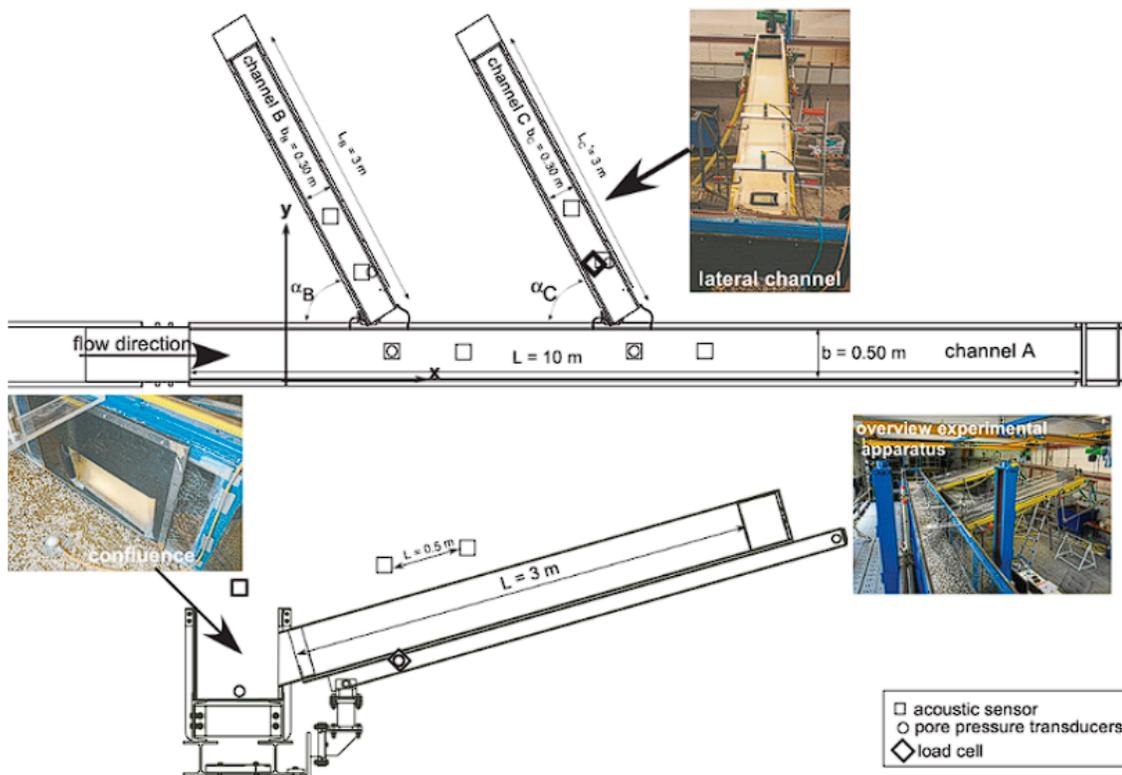


Figura 2.7: Instalación experimental (Stancanelli, 2015)

Stancanelli & Musumeci (2018) usando la misma instalación anterior con la excepción de que en este caso solo usó un canal tributario, buscó analizar cómo se forman y estabilizan los depósitos de sedimentos en la confluencia entre río y quebrada tributaria, buscando desarrollar un índice de estabilidad para predecir el riesgo de obstrucción del río. El análisis

se centró en cómo diferentes parámetros afectan la forma y la distribución de los depósitos sedimentarios.

Realizaron 10 experimentos con diferentes configuraciones de caudal de flujos detríticos, ángulos de confluencia y ratios de caudal, luego se caracterizaron 3 tipos de bloqueos: 1) Sin bloqueo, el depósito es menor que el 65 % del ancho del canal. 2) Bloqueo Parcial, el depósito cubre entre el 65 % y el 100 % del ancho del canal. 3) Bloqueo completo, el depósito cubre todo el ancho del canal.

De los resultados obtenidos se destaca que en los experimentos realizados con un ángulo de confluencia de  $90^\circ$ , se observó que el caudal de agua en el canal principal influye significativamente en la configuración del depósito. Con el adimensional de  $Q_{DF}/Q_w$  observaron que si el cociente es 4.5 el canal principal quedó completamente obstruido, con la formación de un embalse aguas arriba del depósito, si es 3.0 se produce un bloqueo parcial del canal principal debido a la erosión parcial del depósito cerca de la orilla opuesta al ángulo de confluencia y si es 2.0 no se observó un bloqueo significativo en el canal principal.

También observaron que para un ángulo de  $90^\circ$  el depósito se distribuyó casi de manera simétrica a ambos lados de la confluencia, provocando una mayor obstrucción del canal

Song et al. (2024) hicieron experimento con modelos físicos con el fin de estudiar como los flujos detríticos pueden bloquear un río. La instalación experimental consistió en un modelo a escala real situado en el campo, específicamente en el río Dadu, en el suroeste de China. Identificaron tres escenarios distintos, el primero corresponde a un bloqueo instantáneo. En este modo, los flujos detríticos con alta densidad tienden a bloquear el río de manera más efectiva. La densidad más alta aumenta la capacidad del flujo para llenar el canal principal y formar un dique sólido. La correlación positiva entre la densidad del flujo y la altura sugiere que a mayor densidad, mayor es la elevación del agua represada. Esto ocurre porque el flujo más denso tiene una mayor capacidad de acumulación y compactación en el canal principal.

El segundo escenario corresponde a bloqueo por mezcla, en este caso la densidad del flujo también juega un papel importante, pero el efecto es más complejo. Flujos con densidades intermedias permiten una mezcla más eficaz con el flujo del río principal, creando un bloqueo menos inmediato pero más extendido. La densidad afecta la cantidad de material que se mezcla y la intensidad del flujo sedimentario.

Y el último escenario bloqueo progresivo, en este caso, los flujos detríticos tienen densidades más bajas y son menos propensos a bloquear el río de manera inmediata. La baja densidad facilita que el flujo se desplace y se disperse en lugar de acumularse y formar un dique.

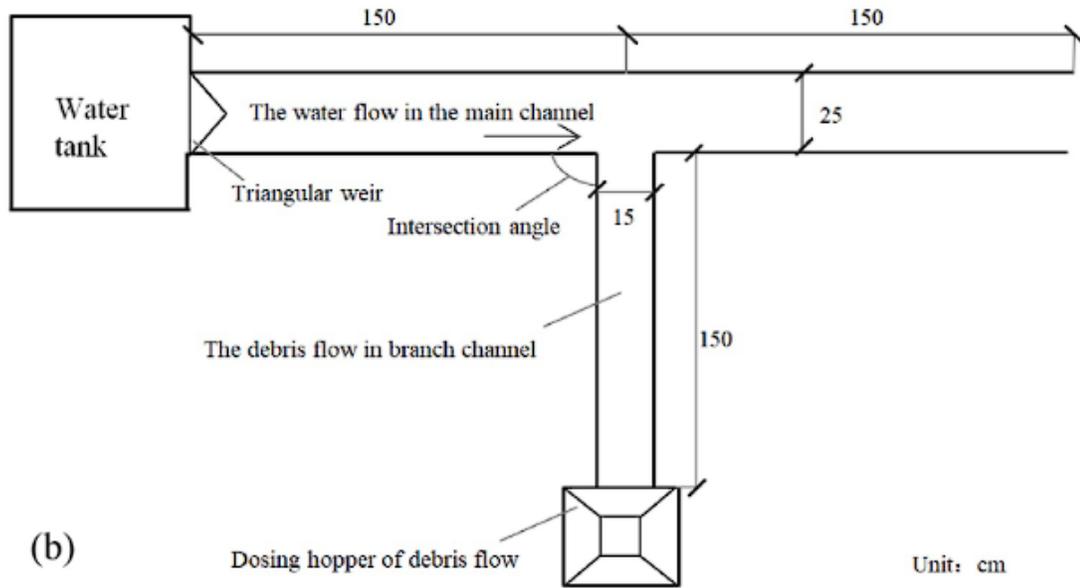
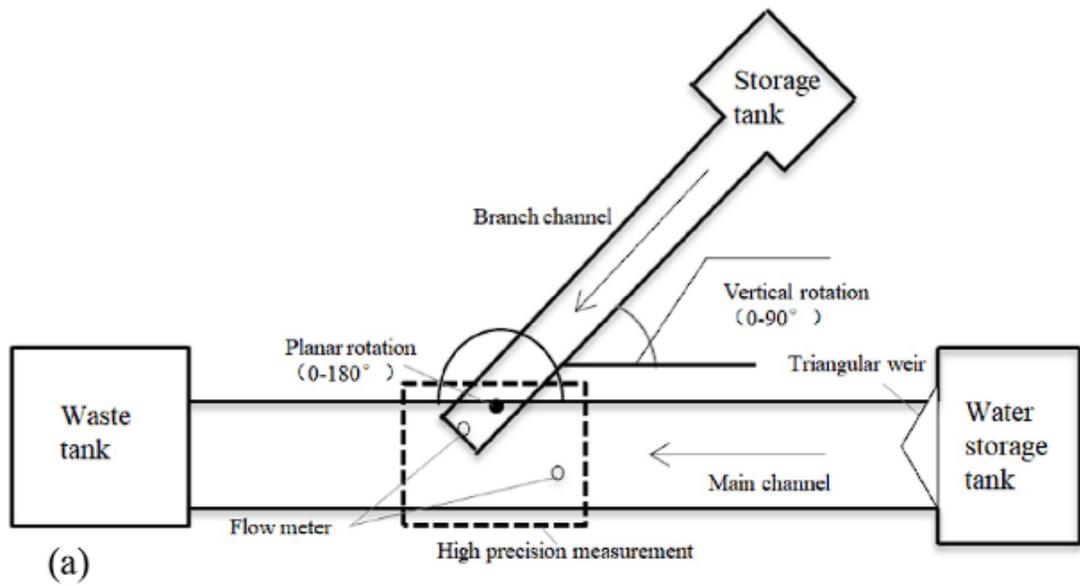


Figura 2.8: Esquema de la instalación experimental (Song et al., 2024)

# Capítulo 3

## Instalación y metodologías para el trabajo experimental

### 3.1. Instalación experimental

La instalación experimental fue diseñada para simular y estudiar la interacción entre un canal principal y un canal tributario en condiciones controladas. Esta consta de un canal principal que tiene 4 metros de largo y 0,2 metros de ancho, este no tiene pendiente debido a que la interacción en la confluencia entre el río y la quebrada se considera un fenómeno predominantemente local. La dinámica entre ambos flujos ocurre principalmente en la zona mencionada, donde se generan los procesos clave de deposición, bloqueo y transporte de sedimentos. Por lo tanto, se estimó que la influencia de la pendiente del canal principal sobre estos fenómenos sería mínima.

El circuito hidráulico para los experimentos realizados consistió en la extracción de agua desde una piscina mediante el uso de una bomba hidráulica, esta sube por un tubería y cae sobre el canal principal. Para eliminar la formación de olas y burbujas con el fin de facilitar las distintas grabaciones se incorporó un aquietador al principio del canal principal. Como se menciona anteriormente el canal tributario se encuentra perpendicular al canal principal y por este circula el flujo detrítico que llega a la confluencia, para que así luego ambos flujos lleguen a un contenedor ubicado al final del canal principal. Tal como se muestra en la figura 3.1.

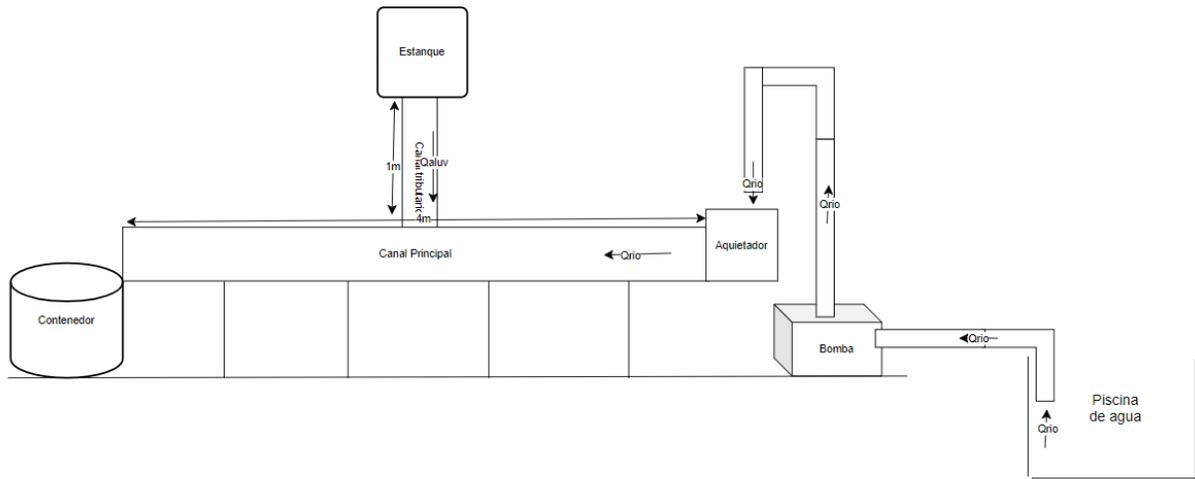


Figura 3.1: Esquema instalación experimental vista lateral canal principal

Por el canal principal circulaba un caudal constante adaptable según que valores en la variables se desea estudiar. Está construido de acrílico transparente de 12 mm de espesor, con el fin de permitir visualizar los experimentos.

Para poder controlar el caudal de la bomba se usó un tablero con papel milimetrado de fondo y tubos rellenos de mercurio tal como se muestra en la figura 3.2. Es posible conocer el caudal siguiendo el principio de Venturi, se afora por cada diferencia de presión y posteriormente con una regresión de los puntos se obtiene una relación entre diferencia de presión y caudal. De esta forma es posible conseguir el caudal deseado.



Figura 3.2: Tablero con papel milimetrado para el cálculo del caudal en el canal principal

El canal tributario, que tiene 1 metro de largo y 0,1 metros de ancho, con una pendiente de 15 grados. El fondo del canal tributario se recubrió con una capa de arena, buscando simular la rugosidad natural, proporcionando un entorno más realista. Este canal también está construido por acrílico de 12 mm de espesor. Un esquema de la instalación se presenta

en la figura 3.3

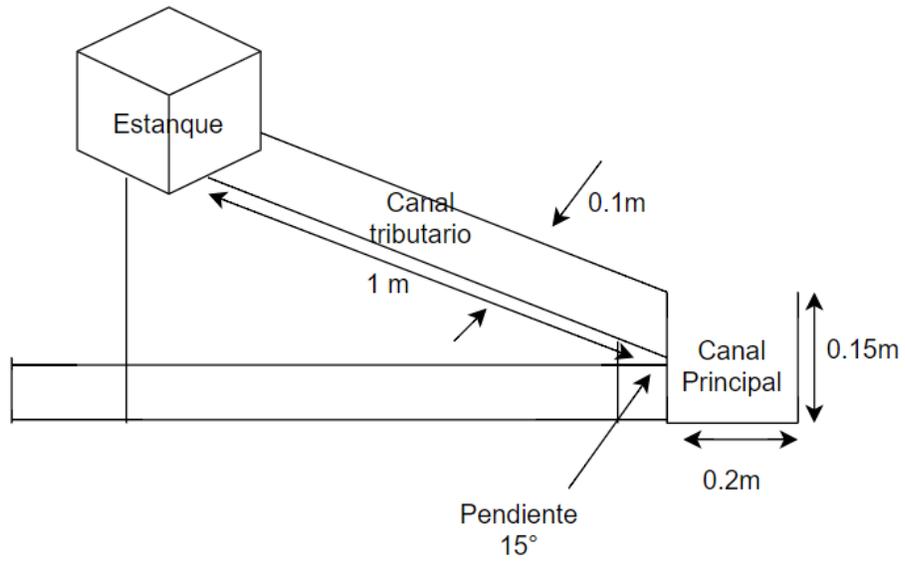


Figura 3.3: Instalación Experimental vista lateral canal tributario

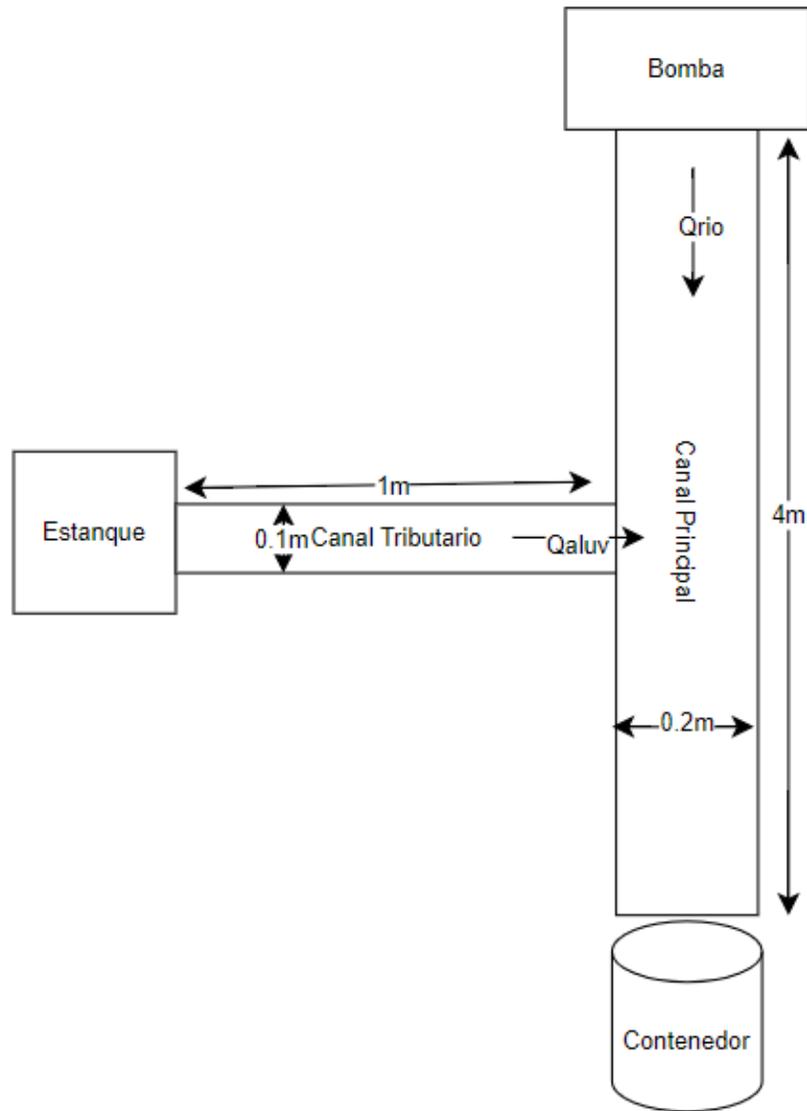


Figura 3.4: Instalación experimental vista en planta

En la parte superior del canal tributario, se ubica un estanque que almacena la mezcla del aluvión antes de su liberación. Este estanque está equipado con dos compuertas que permiten un control del flujo de sedimentos. La primera compuerta puede ser fijada con un tornillo con una apertura que se estime conveniente, esta asegura una descarga constante y controlada de sedimentos. La segunda compuerta es ajustable y puede abrirse completamente, permitiendo la liberación rápida del flujo detrítico. Tal como se muestra en la figura 3.5

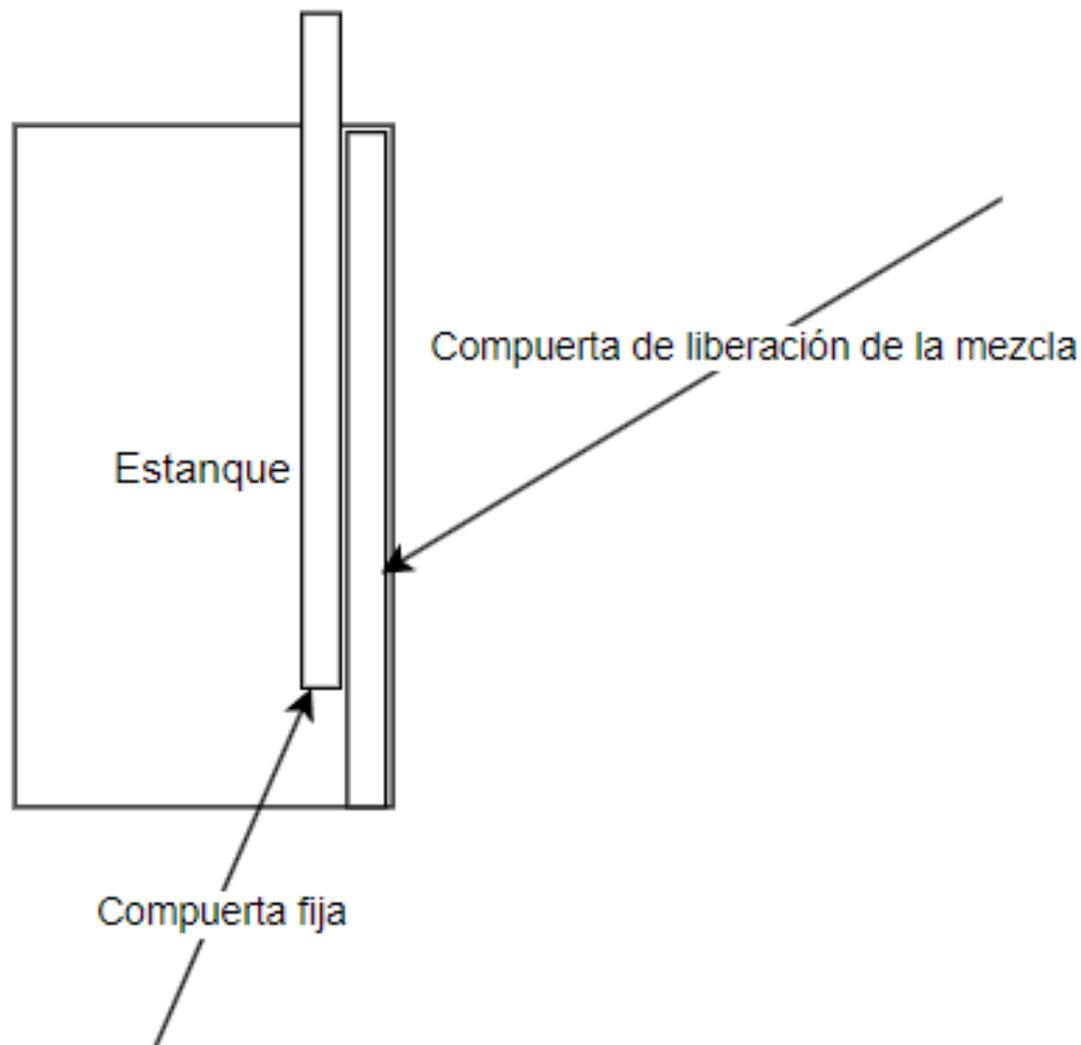


Figura 3.5: Esquema de compuertas del estanque que almacena la mezcla

Para la grabación y toma de datos, se emplean tres cámaras Nikon: una D5300 y dos D5000. La Nikon D5300 está ubicada sobre la confluencia de los canales para capturar la interacción entre el flujo del canal principal y el tributario desde una vista superior. Las otras dos cámaras están posicionadas en paralelo a los canales principal y tributario. Estas tres cámaras registran los cambios y movimientos del flujo desde diferentes ángulos. Una cuarta cámara Intel RealSense fue posicionada de manera similar a la Nikon D5300, es decir, justo sobre la confluencia de los canales. La ventaja principal de la Intel RealSense radica en su capacidad para medir distancias, lo que la hace ideal para ubicarla directamente sobre la confluencia, permitiendo un análisis de los depósitos formados en la zona crítica.

## 3.2. Metodología

La preparación experimental consta de una serie de pasos para asegurar que la mezcla utilizada simule adecuadamente las condiciones de un flujo detrítico y que el experimento se realice de manera controlada. Los materiales utilizados en esta investigación incluyen arena como material grueso y caolinita como material fino. A continuación se detallan estos pasos:

1. Preparación de la mezcla: La mezcla se prepara en un recipiente siguiendo un proceso específico para asegurar la homogeneidad y evitar la formación de grumos del material fino. Primero, se vierte el agua en el recipiente; luego, se añade gradualmente la caolinita mientras se mezcla continuamente. Finalmente, también de forma gradual mientras se mezcla se incorpora la arena hasta obtener una mezcla homogénea.
2. Ajuste del flujo en el canal principal: Una vez que la mezcla está lista, se establece en flujo constante en el canal principal. Se enciende la bomba y mediante una válvula se regula la diferencia de presiones que aparece en el tablero descrito anteriormente (figura 3.2).
3. Carga del estanque del canal tributario: Se ajusta la primera compuerta con la apertura deseada y la segunda compuerta se cierra por completo. A continuación se carga el estanque con la mezcla previamente realizada.
4. Activación de las cámaras: Antes de liberar la mezcla de sedimentos, se encienden las tres cámaras Nikon y la cámara Intel RealSense.
5. Liberación de la mezcla: Se abre completamente la compuerta de liberación de la mezcla (Figura 3.5) de la forma más rápida posible. Después se graba la evolución del depósito de sedimentos, el tiempo de grabación acaba una vez que el depósito no presente cambios significantes.
6. Finalización de la grabación: Se detiene la grabación de las cámaras y, simultáneamente, se apaga la bomba de agua.
7. Captura final del depósito: Una vez que el agua ha dejado de circular por el canal principal, se activa nuevamente la cámara Intel durante unos segundos para capturar el estado final del depósito, dando así por concluido el experimento.

## 3.3. Condiciones experimentales

El volumen total de la mezcla ensayado se varió en los experimentos, teniendo valores desde 1 a 6 litros, mientras que la apertura de la compuerta fue de 2 ó 4 cm dependiendo del experimento realizado.

La arena utilizada se caracterizó por un diámetro medio ( $d_{50}$ ) igual a 1.14mm. para determinar este tamaño se usaron tamices con una apertura de diámetro de 2.36[mm], 1.40[mm], 0.59[mm], 0.41[mm] y 0.21[mm] (Figura D.1. )La mezcla fue diseñada para replicar la composición y comportamiento de un flujo detrítico, con una concentración volumétrica de sólidos ( $C_v$ ) desde el 40-50 %, donde el volumen de caolinita varía entre el 10 % y el 25 %.y la arena

varía entre el 10 % y el 40 %. Para poder estimar la concentración volumétrica se consideró un valor de densidad de caolinita de  $2.6 \text{ gr/cm}^3$ .

Con el fin de estudiar el comportamiento del depósito del flujo detrítico una vez este llegase al canal principal, distintos caudales de agua en el canal principal fueron ensayados, siendo estos  $0.71[\text{L/s}]$ ,  $2.88[\text{L/s}]$ ,  $7.53[\text{L/s}]$  y  $12.3[\text{L/s}]$

A continuación se presenta una tabla de todas las condiciones específicas al momento de cada ensayo experimental.

Tabla 3.1: Condiciones experimentales para los distintos ensayos

Experimento	Fino [gr]	Arena [gr]	Agua [L]	Caudal canal principal [m3/seg]	Apertura compuerta
1	1000	3000	2.2	0.003	0.02
2	750	2250	1.65	0.003	0.02
3	500	750	0.75	0.003	0.02
4	625	625	0.75	0.003	0.02
5	1250	1250	1.5	0.003	0.02
6	1000	1500	1.5	0.003	0.02
7	500	800	0.8	0.008	0.02
8	530	530	0.6	0.008	0.02
9	400	1000	0.8	0.012	0.02
10	550	950	0.9	0.012	0.02
11	500	900	0.8	0.012	0.02
12	1000	1600	1.5	0.012	0.02
13	450	800	0.7	0.012	0.02
14	650	325	0.87	0.001	0.02
15	1980	0	1.74	0.001	0.02
16	650	650	0.75	0.001	0.02
17	790	0	0.95	0.001	0.02
18	900	0	0.9	0.001	0.02
19	1950	1150	1.8	0.001	0.02
20	2000	1200	1.8	0.001	0.04
21	1950	1600	1.65	0.001	0.04
22	2860	2300	2.5	0.001	0.04
23	2000	800	1.9	0.001	0.04
24	800	3100	1.5	0.001	0.04
25	1200	2700	1.5	0.001	0.04
26	1550	1950	1.65	0.001	0.04
27	1550	2300	1.5	0.001	0.04
28	4200	3570	3.36	0.001	0.04

### 3.4. Reología de la mezcla agua y caolinita

Para tener un primer acercamiento al comportamiento del flujo detrítico, se determinó la reología del fluido intersticial. Con uno de los reómetros del laboratorio de reología del Laboratorio F. J. Domínguez, se estudiaron las siguientes proporciones de agua y caolinita que aparecen en la tabla 3.2

Tabla 3.2: Proporciones de agua y caolinita utilizados

Peso agua [gr]	Peso caolinita [gr]	Peso Total [gr]	Cp [%]	Cv [%]
81	9	90	10 %	4.1 %
96	24	120	20 %	8.8 %
84	36	120	30 %	14.2 %
72	48	120	40 %	20.4 %
60	60	120	50 %	27.8 %

## 3.5. Procesamiento de imágenes

### 3.5.1. Análisis de las alturas del depósito

Para el análisis de las mediciones obtenidos por la cámara Intel RealSense, se desarrollo un código para procesar los archivos DEPTH en formato csv generados por ella. Este código se centra en la elaboración de una máscara que permite identificar y visualizar las distintas alturas en el depósito final.

La creación de la máscara se realiza a través de la resta de imágenes, comparando dos condiciones específicas: la condición inicial, en la cual el flujo detrítico aún no ha sido lanzado el flujo detrítico, y la condición final donde se ha alcanzado un depósito estable en el canal principal.

Para garantizar la precisión de los datos en esta fase final, se procede a detener la bomba que genera el flujo de agua, ya que el movimiento del agua introduce errores en las mediciones capturadas por la cámara intel en los archivos DEPTH. Este procedimiento permite obtener una representación del estado final.

### 3.5.2. Análisis de la velocidad del flujo detrítico

Para el cálculo de la velocidad del aluvión se programó un código donde se trabajaba con el vídeo obtenido de la cámara ubicada de forma que esta vea perpendicularmente el canal tributario. Este consistía en capturar el cuadro inicial, es decir, el cuadro donde se da inicio al flujo detrítico y también el cuadro final, el cual corresponde cuando el flujo detrítico ingresa al canal principal. Luego con la siguiente fórmula se obtiene la velocidad del flujo detrítico

$$v_{Aluvion} = \frac{L_{Tributario}}{(F_{Final} - F_{Inicial})} \cdot T \quad (3.1)$$

Donde  $L_{Tributario}$  es el largo del canal tributario,  $v_{Aluvion}$  es la velocidad del flujo detrítico en m/s,  $F_{Final}$  y  $F_{Inicial}$  son los cuadros final e inicial respectivamente y T es la tasa de cuadros por segundo en que la cámara grabó el vídeo.

## 3.6. Análisis dimensional

En la presente investigación, se han definido y utilizado parámetros adimensionales para analizar y comparar los resultados experimentales. Estos parámetros adimensionales per-

miten evaluar el comportamiento del sistema en función de diversas variables y facilitar la comparación de resultados bajo diferentes condiciones experimentales.

El caso estudiado corresponde a un flujo de una mezcla la cual contiene un material fino y granular no cohesivo, este último tiene tamaño uniforme. La mezcla desciende por un canal de sección rectangular hasta llegar al canal principal también rectangular por el cual pasa un caudal de agua, las principales variables involucradas son:

- $Cv$ : concentración volumétrica
- $d_{50}$ : diámetro de sólidos
- $\rho_s$ : densidad de sólidos
- $H_{Aluvión}$ : altura flujo detrítico, medida aguas arriba de la confluencia
- $H_{Rio}$ : altura del flujo en el canal principal, medida aguas arriba de la confluencia
- $a$ : apertura compuerta
- $H_{Mezcla}$ : altura de mezcla en el estanque de carga en el canal tributario
- $H_{DesdeCanal}$ : altura desde el canal principal hasta la apertura del estanque
- $\forall_{mezcla}$ : volumen de la mezcla
- $B_{tributario}$ : ancho de la compuerta y del canal tributario
- $B_{Rio}$ : ancho del canal principal
- $Q_{Rio}$ : caudal del canal principal
- $L_{Tributario}$ : largo canal tributario
- $S_t$ : pendiente canal tributario
- $v_{Aluvion}$ : velocidad del flujo detrítico
- $g$ : aceleración de gravedad
- $Re_{CanalPrincipal}$ : número de reynolds del canal principal.
- $Re_{aluvion}$ : número de reynolds del flujo detrítico.
- $Fr_{CanalPrincipal}$ : número de froude del canal principal.
- $Fr_{aluvion}$ : número de froude del flujo detrítico.

Los parámetros adimensionales generados para el análisis del evento son los siguientes:

$$\begin{aligned}
\Pi_1 &= \frac{gV_{mezcla}^{5/3}}{Q_{CanalPrincipal}} & \Pi_2 &= \frac{gV_{mezcla}^{1/3}}{v_{Aluvion}} \\
\Pi_3 &= \frac{V_{mezcla}}{aH_m b_{Trib}} & \Pi_4 &= \frac{V_{mezcla}}{a(H_{Mezcla} + H_{DesdeCanal})b_{Trib}} \\
\Pi_5 &= \frac{H_{Mezcla}}{a} & \Pi_6 &= \frac{(H_{Mezcla} + H_{DesdeCanal})}{a} \\
\Pi_7 &= \frac{\rho_{Mezcla}}{\rho_w} & \Pi_8 &= \frac{\rho_{Mezcla}}{\rho_w} \frac{v_{aluvion}}{v_{CanalPrincipal}} \\
\Pi_9 &= \Pi_1 \frac{\rho_{Mezcla}}{\rho_w} & \Pi_{10} &= \Pi_9 \frac{v_{aluvion}}{v_{CanalPrincipal}} \\
\Pi_{11} &= \frac{Fr_{aluvion}}{Fr_{CanalPrincipal}} & \Pi_{12} &= \frac{Re_{aluvion}}{Re_{CanalPrincipal}}
\end{aligned}$$

Cada uno de estos adimensionales, busca relacionar las variables que interactúan en la confluencia entre río y la quebrada. Estos al momento de ser creados se dio más importancia a las variables que mostraron una mayor variación en los depósitos sensibilidad en la experimentación bajo la experiencia adquirida

$\Pi_1$ , busca relacionar la influencia de la gravedad  $g$  con el volumen de la  $V_{mezcla}$  y el caudal del río  $Q_{Rio}$ , debido a que no se tiene una medida certera del caudal en el tributario, se buscó una vía alternativa de generar un adimensional análogo a la razón de caudales. Su propósito es evaluar cómo un volumen específico de mezcla interactúa con el caudal del río durante un determinado intervalo de tiempo. La inclusión de  $g$  en el parámetro adimensional es esencial ya que tal como se discutió en el marco teórico, la gravedad es un factor determinante en la activación y el comportamiento de los flujos detríticos

$\Pi_2$ , sigue el mismo principio que el adimensional anterior con la diferencia que este adimensional busca analizar si el largo de la quebrada tributaria juega un rol en la confluencia, la variable  $v_{aluvion}$  es la encargada en este caso.

$\Pi_3$ , este adimensional busca generar una relación del  $V_{Mezcla}$  descargado con la carga hidráulica  $H_{Mezcla}$  y la apertura de la compuerta. Para esto se hizo una relación de volúmenes

$\Pi_4$ , es análogo al adimensional anterior con la diferencia que esta vez la carga hidráulica se considera  $(H_{Mezcla} + H_{DesdeCanal})$ , de esta manera al incluir el  $H$  desde el fondo del canal del cauce principal hasta el punto más abajo de la compuerta se incluye la pendiente en el análisis.

$\Pi_5$ , busca analizar cómo la carga hidráulica interactúa con la apertura de la compuerta.

$\Pi_6$ , es análogo al adimensional anterior, salvo que al incluir  $H_{DesdeCanal}$  se considera la pendiente dentro del análisis.

$\Pi_7$ , analiza la relación entre la densidad de mezcla y la densidad del agua, el cual busca separar entre depósitos cohesivos y no cohesivos

$\Pi_8$ , analiza la relación de densidades descritas en  $\Pi_7$  junto con la relación de velocidades entre flujo detrítico y el canal principal.

$\Pi_9$ , analiza la razón de gasto másico entre el flujo detrítico y el cauce principal, es decir, busca analizar la cantidad de masa de material a través de una sección transversal.

$\Pi_{10}$ , analiza la razón de momemtum entre el flujo detrítico y el del cauce principal. En otras palabras define la relación de inercia que tiene tanto el flujo como el caudal del cauce principal

$\Pi_{11}$  analiza la razón de numero de froude entre el flujo detrítico y el canal principal, con objetivo de buscar separar depósitos cohesivos y no cohesivos.

$\Pi_{12}$  analiza la razón de numero de Reynolds entre el flujo detrítico y el canal principal, con objetivo de considerar el comportamiento.

# Capítulo 4

## Resultados experimentales

La primera fase del estudio se centró en la caracterización de la reología del fluido intersticial presente en la mezcla detrítica. Los resultados obtenidos en esta etapa son cruciales para comprender el comportamiento de la mezcla durante su manipulación y aplicación. Y de esta manera tener una idea ya preconcebida antes de realizar los experimentos

En la Figura 4.1, se presenta un gráfico que ilustra la relación entre la tasa de corte [1/s] en el eje de las abscisas y el esfuerzo de corte [Pa] en el eje de las ordenadas.

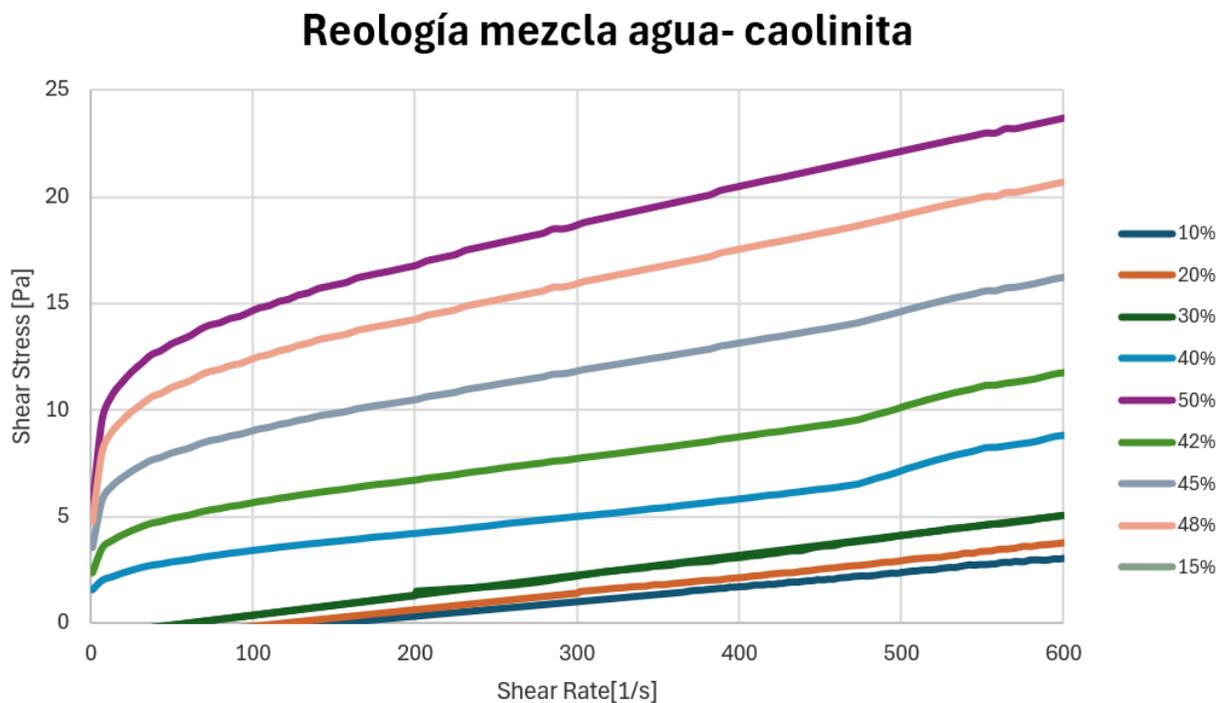


Figura 4.1: Reología de la mezcla agua-caolinita para las distintas proporciones

A partir de los ensayos realizados, se ajustaron los resultados al modelo reológico obtenido en el reómetro. En la tabla 4.1 se presentan los resultados de una tasa de deformación angular calculada con la relación entre la velocidad y la altura del flujo detrítico

Tabla 4.1: Resultados del ajuste del modelo reológico

Experimento	Veloc aluvion/ h aluvion [1/s]	Cv fino y agua	Cp fino y agua	Comportamiento
1	62	15	31	Newtoniano
2	63	15	31	Newtoniano
3	57	20	40	No newtoniano
4	51	24	45	No newtoniano
5	62	24	45	No newtoniano
6	60	20	40	No newtoniano
7	61	19	38	No newtoniano
8	31	25	47	No newtoniano
9	49	16	33	Newtoniano
10	58	19	38	No newtoniano
11	53	19	38	No newtoniano
12	54	20	40	No newtoniano
13	48	20	39	No newtoniano
14	63	22	43	No newtoniano
15	40	30	53	No newtoniano
16	49	25	46	No newtoniano
17	66	24	45	No newtoniano
18	30	28	50	No newtoniano
19	54	29	52	No newtoniano
20	9	30	53	No newtoniano
21	2	31	54	No newtoniano
22	25	31	53	No newtoniano
23	29	29	51	No newtoniano
24	20	17	35	Newtoniano
25	27	24	44	No newtoniano
26	26	27	48	No newtoniano
27	14	28	51	No newtoniano
28	3	32	56	No newtoniano

De acuerdo con los resultados de las curvas reológicas obtenidas, se observa que la tasa de deformación angular en los ensayos del flujo detrítico presentes en la tabla 4.1 el valor máximo es  $\dot{\gamma} = 66$  [1/s]. Por esta razón, el análisis del comportamiento se realizó hasta dicho valor. Se concluye que, para concentraciones inferiores al 40 %, el comportamiento es newtoniano, mientras que para concentraciones superiores al 40 %, el comportamiento se vuelve no newtoniano.

## 4.1. Resultados de los experimentos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los experimentos, junto con un análisis de los casos estudiados relacionados con el bloqueo del cauce, la erosión del depósito y la capacidad del flujo para cruzar el ancho del canal principal. Estos resultados se desglosan para ilustrar cómo las diferentes condiciones experimentales influyen en los procesos de bloqueo y erosión. Los gráficos y tablas proporcionan una visión del comportamiento del depósito bajo diversas circunstancias, permitiendo una comparación entre los casos de bloqueo parcial y no bloqueo, así como entre los casos de erosión y no erosión.

En la tabla 4.2 se presentan las diferentes concentraciones empleadas en los ensayos, junto con los resultados obtenidos para cada condición experimental. La tabla 4.3 resume los datos relativos a los caudales del río registrados y las velocidades del flujo detrítico para cada ensayo.

Esta tabla también clasifica los resultados en función de los casos de bloqueo y erosión del depósito en el canal principal, permitiendo una comparación entre las distintas condiciones experimentales. La diferenciación de los casos de bloqueo y erosión facilita la comprensión de los mecanismos que influyen en el comportamiento del depósito bajo diversas condiciones de flujo.

Tabla 4.2: Resultados de los distintos casos estudiados, para las distintas composiciones de mezcla

Exp	%Fino	%Arena	%Fino + Agua	Cv	Viscosidad Mezcla [Pa s]	Volumen Total [L]	Cruza/No cruza	Tipo Bloqueo	Erosion
1	10	31	15	41	0.0051	3.7	1.0	No	No
2	10	31	15	41	0.0051	2.8	1.0	No	No
3	16	23	20	39	0.0056	1.2	1.0	No	No
4	20	20	24	39	0.0067	1.2	1.0	No	No
5	20	20	24	39	0.0067	2.5	1.0	No	No
6	16	23	20	39	0.0056	2.5	1.0	No	No
7	15	24	19	38	0.0056	1.3	1.0	No	Si
8	20	20	25	40	0.0067	1.0	0.2	No	Si
9	11	29	16	40	0.0051	1.3	0.8	No	Si
10	14	25	19	39	0.0056	1.5	1.0	No	Si
11	14	26	19	40	0.0056	1.3	1.0	No	Si
12	15	25	20	40	0.0056	2.5	1.0	No	Si
13	15	26	20	41	0.0056	1.2	0.8	No	Si
14	20	10	22	30	0.0056	1.2	1.0	No	No
15	30	0	30	30	0.0077	2.5	1.0	Parcial	No
16	20	20	25	40	0.0067	1.3	1.0	No	No
17	24	0	24	24	0.0067	1.3	1.0	No	No
18	28	0	28	28	0.0077	1.2	1.0	No	No
19	25	15	29	40	0.0077	3.0	1.0	Parcial	No
20	25	15	30	41	0.0077	3.0	1.0	No	No
21	25	20	31	45	0.0077	3.0	1.0	No	No
22	25	20	31	44	0.0077	4.5	1.0	Parcial	No
23	26	10	29	36	0.0077	3.0	1.0	Parcial	No
24	10	40	17	50	0.0051	3.0	1.0	No	No
25	15	35	24	50	0.0067	3.0	1.0	No	No
26	20	25	27	45	0.0067	3.0	1.0	Parcial	No
27	20	30	28	50	0.0077	3.0	1.0	Parcial	No
28	25	22	32	47	0.0077	6.3	1.0	Parcial	No

Tabla 4.3: Caudal del río y velocidad del flujo detrítico para los distintos ensayos

Experimento	Caudal Rio [m <sup>3</sup> /seg]	Velocidad Aluvión [m/s]	Ancho Canal/ Ancho Deposito	Bloqueo	Erosión (Barrido)
1	0.003	0.93	1.0	No	No
2	0.003	0.95	1.0	No	No
3	0.003	0.86	1.0	No	No
4	0.003	0.77	1.0	No	No
5	0.003	0.93	1.0	No	No
6	0.003	0.90	1.0	No	No
7	0.008	0.91	1.0	No	Si
8	0.008	0.47	0.2	No	Si
9	0.012	0.74	0.8	No	Si
10	0.012	0.87	1.0	No	Si
11	0.012	0.80	1.0	No	Si
12	0.012	0.81	0.8	No	Si
13	0.012	0.73	1.0	No	Si
14	0.001	0.95	1.0	No	No
15	0.001	0.59	1.0	Parcial	No
16	0.001	0.74	1.0	No	No
17	0.001	0.98	1.0	No	No
18	0.001	0.46	0.7	No	No
19	0.001	0.80	1.0	Parcial	No
20	0.001	0.27	0.6	No	No
21	0.001	0.07	1.0	No	No
22	0.001	0.76	1.0	Parcial	No
23	0.001	0.88	1.0	Parcial	No
24	0.001	0.61	1.0	No	No
25	0.001	0.80	1.0	No	No
26	0.001	0.78	1.0	Parcial	No
27	0.001	0.42	1.0	Parcial	No
28	0.001	0.08	1.0	Parcial	No

## 4.2. Resultados adimensionales

En esta sección se presentan los resultados usando los parámetros adimensionales descritos previamente para cada conjunto de experimentos considerados. Se incluyen un pequeño análisis del comportamiento de los gráficos y cómo los parámetros adimensionales influyen en el comportamiento observado. Esta comparación permite evaluar la consistencia de los resultados y entender mejor las relaciones entre las variables adimensionales en el fenómeno estudiado.

### 4.2.1. Comparación de los parámetros adimensionales para casos de bloqueo parcial y no bloqueo

En las siguientes figuras se presentan los gráficos que ilustran la combinación de los parámetros adimensionales descritos anteriormente. Estos gráficos proporcionan una representación visual de cómo interactúan las variables adimensionales y permiten una comparación para los casos de bloqueo parcial y no bloqueo.

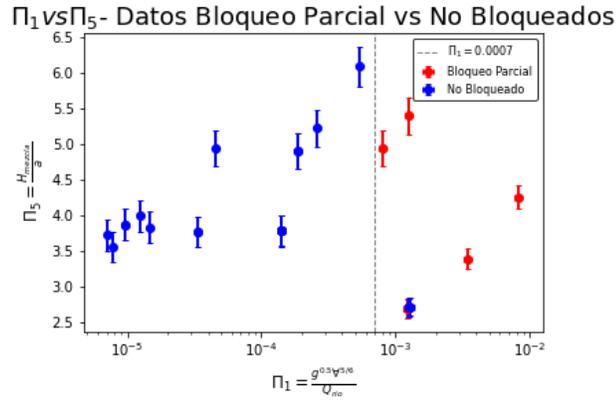


Figura 4.2: Gráfico de adimensionales  $\Pi_1$  vs  $\Pi_5$  para casos bloqueo parcial y no bloqueo

En la figura 4.2 se puede apreciar en el gráfico que para que existe una separación de los casos de bloqueo y no bloqueo del canal principal producto del flujo detrítico. En particular para  $\Pi_1 = 0.0007$  permite diferenciar entre situaciones de bloqueo y no bloqueo en los experimentos. Sin embargo, se debe destacar que algunos puntos de los no bloqueados se comportan de manera atípica en comparación con el resto de los datos. Esta diferencia sugiere la necesidad de investigar más a fondo las condiciones particulares como por ejemplo una mala preparación de la mezcla la cual podría influir en el comportamiento de estos casos atípicos para una comprensión más completa del fenómeno.

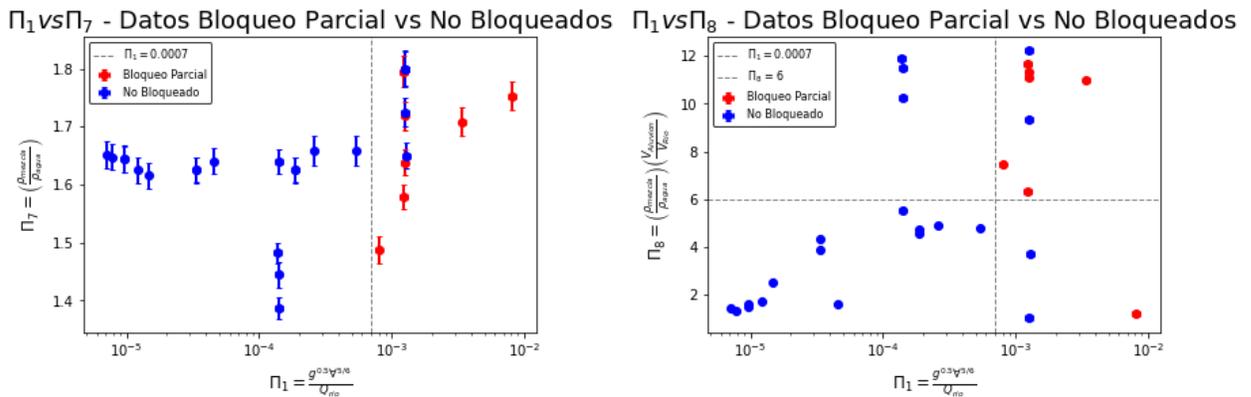


Figura 4.3: Gráfico de adimensionales  $\Pi_1$  vs  $\Pi_7$  vs  $\Pi_8$  para casos bloqueo parcial y no bloqueo

En la figura 4.3, el gráfico de la derecha muestra que para el parámetro adimensional los casos de bloqueo ocurren principalmente cuando  $\Pi_8 = 6$ , con la excepción de unos puntos de no bloqueo que no siguen la tendencia.

#### 4.2.2. Comparación de los parámetros adimensionales para casos de Erosión y No Erosión

A continuación, se presentan en las siguientes figuras gráficos que ilustran los resultados obtenidos al comparar los adimensionales descritos en la metodología. Estos gráficos están

diseñados para representar visualmente el comportamiento de los adimensionales en los casos de erosión y no erosión del material depositado.

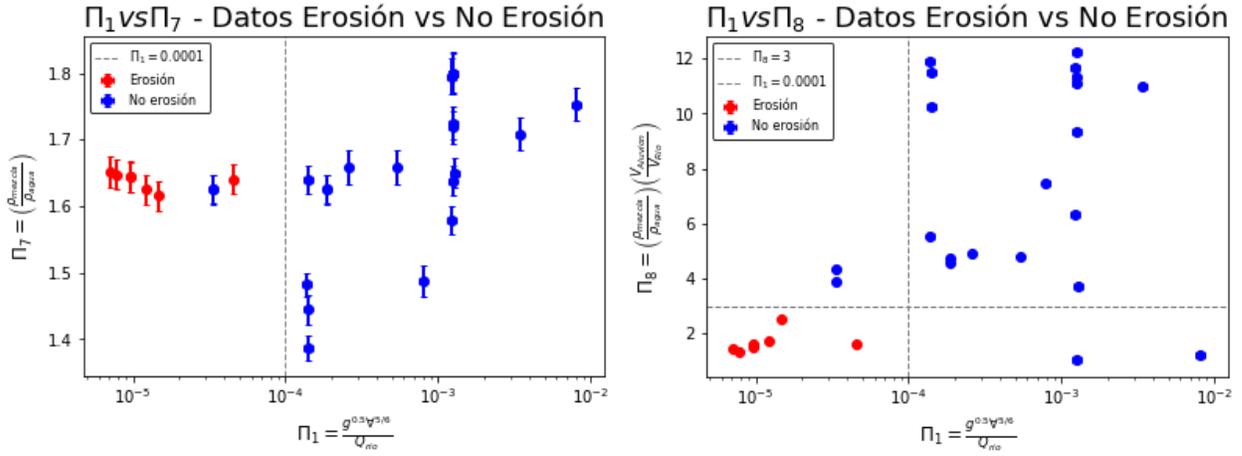


Figura 4.4: Gráfico de adimensionales  $\Pi_1$  vs  $\Pi_7$  vs  $\Pi_8$  para casos erosión y no erosión

En la figura 4.4, el gráfico de la izquierda muestra que los valores del eje de las abscisas son mayores a 1,4 lo cual indica que la densidad de la mezcla es mayor a la densidad del agua, favoreciendo así la sedimentación del material.

Por otro lado, en el gráfico derecho de la figura 4.4 se observa que la relación de velocidades entre el flujo detrítico y del canal principal desempeña un papel importante para distinguir entre los casos de erosión y no erosión. En particular  $\Pi_8 = 3$  señala un umbral que separa los dos comportamientos.

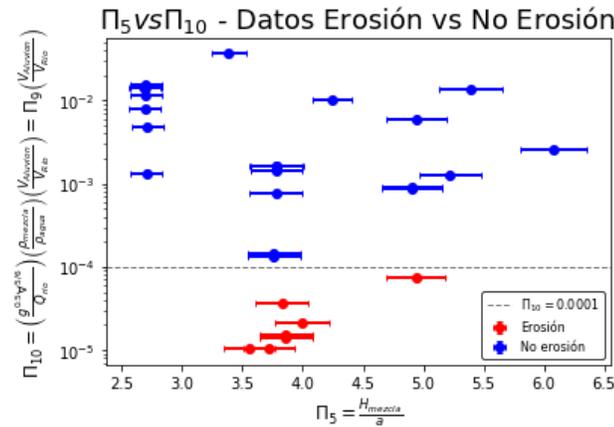


Figura 4.5: Gráfico de adimensionales  $\Pi_5$  vs  $\Pi_{10}$  para casos erosión y no erosión

El gráfico de la figura 4.5 el eje de las ordenadas el parametro adimensional analiza la relacion de momentum entre el flujo detrítico y del canal principal, se puede notar una

separacion entre los casos de erosión y no erosión para  $\Pi_{10} = 0.0001$

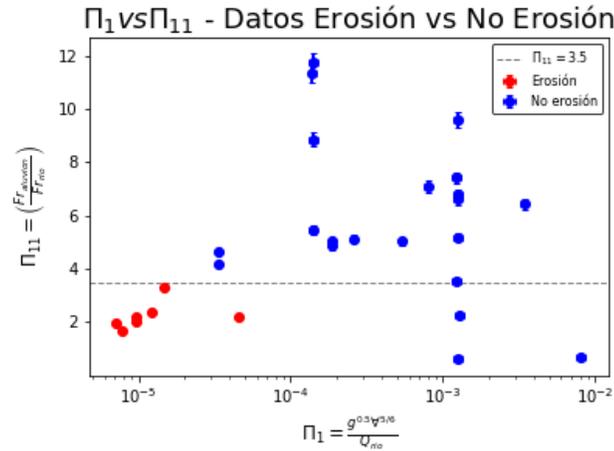


Figura 4.6: Gráfico de adimensionales  $\Pi_1$  vs  $\Pi_{11}$  para casos erosión y no erosión

En la figura 4.6 se puede apreciar que los datos de erosión se agrupan en valores de  $\Pi_{11}$  cercanos a 2-4, lo que indica que cuando la relación de ambos froude está dentro de ese rango ocurre la erosión del depósito del aluvión en la confluencia. Esto sugiere que el régimen del flujo detrítico no domina en exceso al régimen del canal principal, permitiendo una mayor interacción entre ambos.

Cuando  $\Pi_{11}$  es mayor a 4 indica que el régimen del flujo detrítico está en un régimen más rápido (supercrítico) en comparación con el canal principal, haciendo que el régimen del canal principal no sea capaz de erosionar el depósito formado en la confluencia. La línea discontinua en  $\Pi_{11} = 3.5$ , marca una separación entre los regímenes de erosión y no erosión despreciando tres puntos que se escapan de la tendencia. Esto indica que si el régimen del flujo detrítico tiene una velocidad relativa significativamente mayor al canal principal (relación de froude mayor), es menos probable que ocurra erosión

### 4.3. Resultados de la caracterización de los depósitos de los flujos detríticos ensayados

A continuación, se muestran los gráficos que ilustran la altura y la forma del depósito de flujo detrítico para diferentes composiciones de mezcla. En los gráficos, el eje de las abscisas indica el largo del canal y el eje de las ordenadas muestra el ancho del depósito.

Primero se presentan los resultados para todas las proporciones de mezcla con un volumen total de 3 litros.

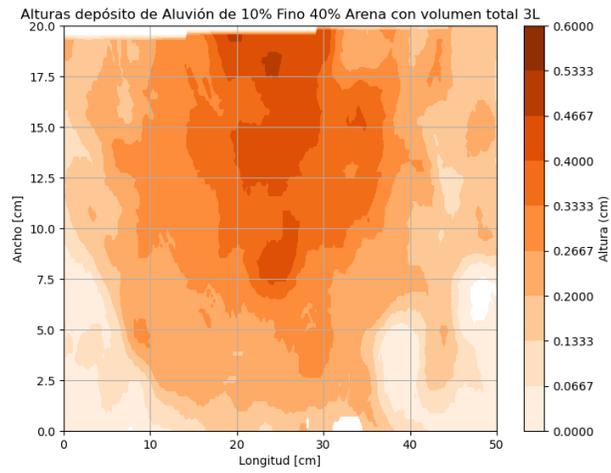


Figura 4.7: Alturas del depósito del flujo detrítico de 10 %Fino y 40 %Arena para un volumen total de 3 Litros, caso de no bloqueo (Experimento numero 24)

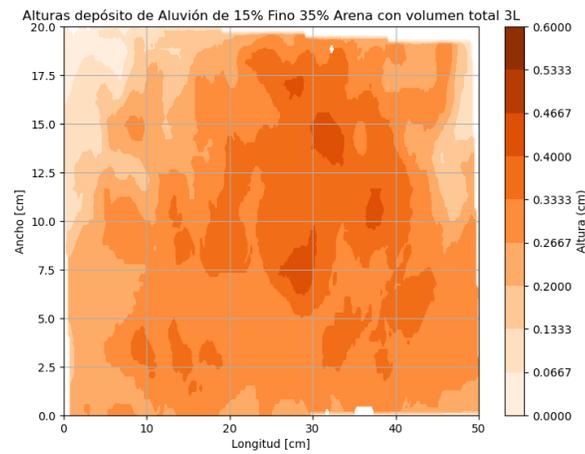


Figura 4.8: Alturas del depósito del flujo detrítico de 15 %Fino y 35 %Arena para un volumen total de 3 Litro, caso de no bloqueo (Experimento numero 25)

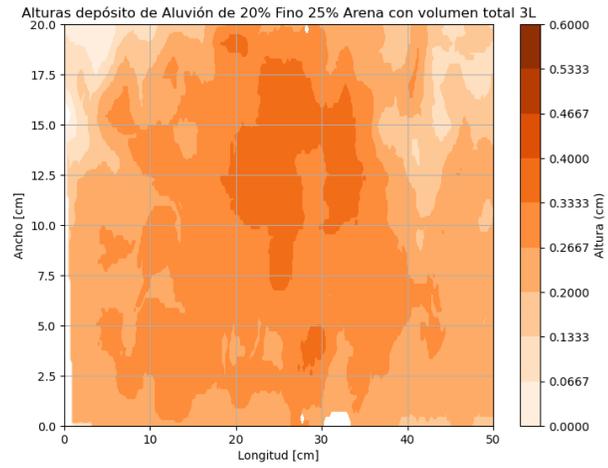


Figura 4.9: Alturas del depósito del flujo detrítico de 20 %Fino y 25 %Arena para un volumen total de 3 Litros, caso de bloqueo parcial (Experimento numero 26)

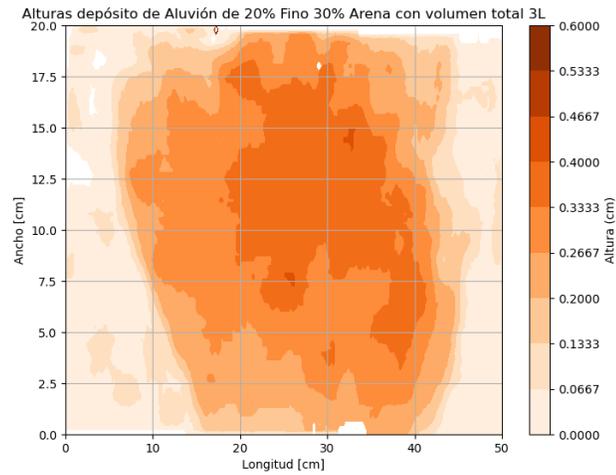


Figura 4.10: Alturas del depósito del flujo detrítico de 20 %Fino y 30 %Arena para un volumen total de 3 Litros, caso de bloqueo parcial (Experimento numero 27)

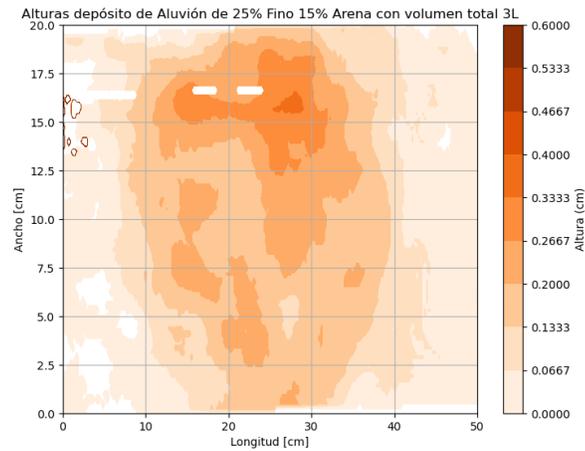


Figura 4.11: Altura del depósito del flujo detrítico de 25 %Fino y 15 %Arena para un volumen total de 3 Litros, caso de no bloqueo (Experimento numero 20)

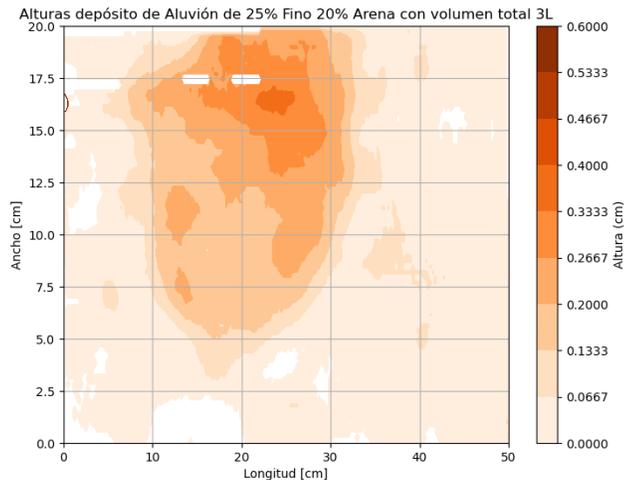


Figura 4.12: Alturas del depósito del flujo detrítico de 25 %Fino y 20 %Arena para un volumen total de 3 Litros, caso de no bloqueo (Experimento numero 22)

Según las figuras anteriores, se observa que la forma del depósito varía según la concentración de finos. Con concentraciones del 10 %, 15 % y 20 %, el flujo detrítico llega de manera más dispersa a la confluencia. En las figuras ?? y 4.11, se aprecia que la forma del depósito empieza a mostrar una característica similar, lo que se debe a que son las mezclas con menor cantidad de agua en la mezcla.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con volúmenes mayores a 3 litros. Se buscaba que el flujo detrítico llegase al canal principal, ya que para un volumen de 3 litros y esas concentraciones, el flujo no alcanzaba a recorrer todo el canal tributario y llegar al canal principal.

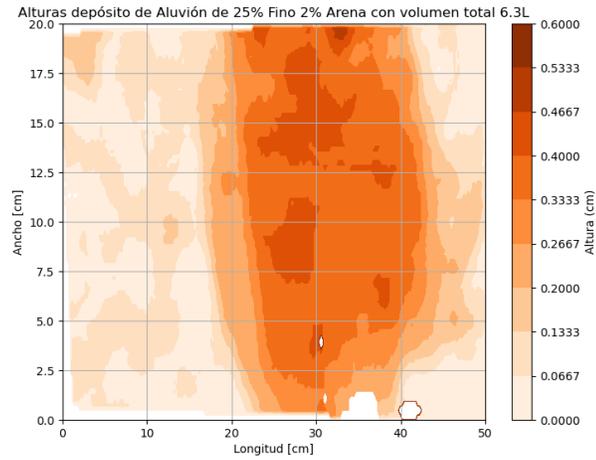


Figura 4.13: Alturas del depósito del flujo detrítico de 25 %Fino y 22 %Arena para un volumen total de 6.3 Litros, caso de bloqueo parcial (Experimento numero 28)

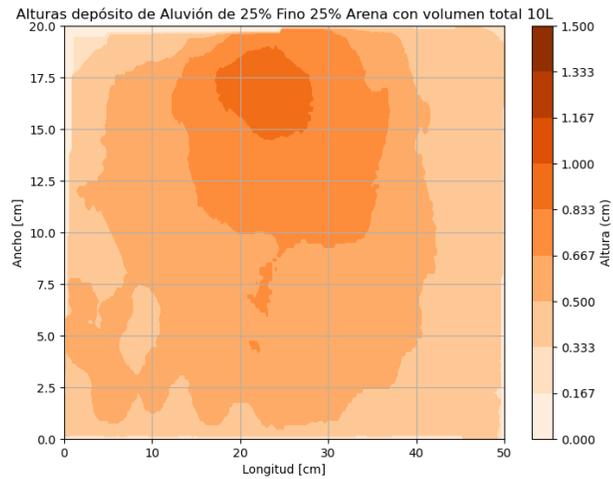


Figura 4.14: Alturas del depósito del flujo detrítico de 25 %Fino y 25 %Arena para un volumen total de 10 Litros, caso de bloqueo parcial

En la figura 4.13 se puede apreciar que el depósito alcanza una altura similar en toda el área, mientras que en la figura 4.14 por primera vez se aprecia la forma de abanico fluvial en la confluencia, y al mismo tiempo se puede visualizar la diferencia de alturas en el depósito.

# Capítulo 5

## Análisis de Resultados

### 5.1. Bloqueo Parcial y No bloqueo

El parámetro adimensional  $\Pi_1$  se utilizó para relacionar el caudal del flujo detrítico en función del volumen de la mezcla con el caudal del canal principal. Las figuras 4.2 y 4.3, muestran que  $\Pi_1$  presenta un valor límite de  $\Pi_1 = 0.0007$ , el cual permite distinguir entre casos de bloqueo parcial y ausencia de bloqueo en el canal principal. Sin embargo, algunos puntos correspondientes a escenarios sin bloqueo no siguen esta tendencia.

Al examinar más detalladamente estos puntos fuera de la tendencia, se identificó que pertenecían a las mezclas con las mayores concentraciones de arena estudiadas: una mezcla con  $C_{Arena} = 40\%$  y  $C_{Caolinita} = 10\%$ , otra con  $C_{Arena} = 35\%$  y  $C_{Caolinita} = 15\%$ , y una última con  $C_{Arena} = 20\%$  y  $C_{Caolinita} = 25\%$ . Todas estas mezclas tenían un volumen total de 3 litros, lo que dio como resultado un valor de  $\Pi_1 = 0.00125$ .

La posible explicación para este comportamiento radica en la metodología de los ensayos, la cual pudo haber generado problemas de homogeneidad en la mezcla. El tiempo transcurrido entre la carga del estanque y la liberación del flujo permitió la sedimentación de la arena, provocando que, al momento de la liberación, el flujo estuviera compuesto predominantemente por agua y caolinita, sin la cantidad de arena esperada.

### 5.2. Erosión y no erosión

En la Figura 4.4, el gráfico de la izquierda muestra que, con excepción del parámetro adimensional  $\Pi_1$ , el parámetro adimensional  $\Pi_7$  no presenta una tendencia clara que permita distinguir entre casos de erosión y no erosión. Sin embargo, al multiplicar  $\Pi_7$  por la relación de velocidades entre el flujo detrítico y el canal principal, se observó un cambio significativo en el comportamiento de los datos. Este ajuste dio lugar a un valor límite de  $\Pi_8 = 3$ , destacando la relevancia de la relación de velocidades en los procesos de erosión del depósito en la confluencia. Este hallazgo sugiere que la dinámica del flujo influye en la erosión de manera más compleja de lo que se había anticipado inicialmente.

De manera similar, en la figura 4.5, se presenta el análisis del parámetro adimensional  $\Pi_{10}$ , que examina la relación de momentum entre el flujo detrítico y el canal principal. Se identificó un valor de  $\Pi_{10} = 0.0001$  como límite efectivo para diferenciar entre casos de erosión y no

erosión, resaltando la importancia de la relación de momentum en la ocurrencia de procesos erosivos en la confluencia.

Por último, en la Figura 4.6, muestra el análisis del parámetro adimensional  $\Pi_{11}$ , que establece una relación entre los números de Froude del flujo detrítico y del flujo en el canal principal. Se observó que un valor de  $\Pi_{11} = 3.5$  separa los distintos casos analizados, permitiendo clasificar los flujos como cohesivos y no cohesivos. Las mezclas cohesivas, en general, presentaron un régimen de Froude subcrítico, mientras que las no cohesivas exhibieron un régimen de Froude supercrítico.

Este análisis contribuye a una comprensión más profunda de cómo las propiedades del flujo afectan los procesos de erosión en la confluencia, proporcionando información clave para la predicción y gestión de estos fenómenos.

### 5.3. Comparación con referencias

Comparando los resultados obtenidos 4.2 y 4.3 con referencias, se observa que en todos los casos de bloqueo parcial del canal, el flujo detrítico atraviesa el canal principal (Dang et al., 2009). Esto sugiere que el flujo detrítico presenta una alta velocidad y un gran volumen, lo cual se alinea con los resultados del parámetro adimensional  $\Pi_1$ , que representan la relación de caudal del flujo detrítico con el del canal principal, considerando todas la mezcla y la gravedad.

En la figura 4.3 en el gráfico de la derecha se puede apreciar que ambos parámetros adimensionales tienen un valor límite de  $\Pi_1 = 0.0007$  y  $\Pi_8 = 6$  que separa los casos de bloqueo parcial y no bloqueo en canal principal. Al considerar ambos parámetros adimensionales juntos se aprecia que arriba y a la derecha es el sector del gráfico en que se ubican los resultados de bloqueo parcial. Esto rectifica los resultados obtenidos por Dang et al. (2009) y Stancanelli et al (2015) en donde los resultados obtenidos en sus experimentos tienen un comportamiento similar. Esto se puede apreciar al comparar las figuras 5.1 y 5.2

Grafico comparacion (Stancanelli et al.2015)- Datos Bloqueo Parcial vs No Bloqueados

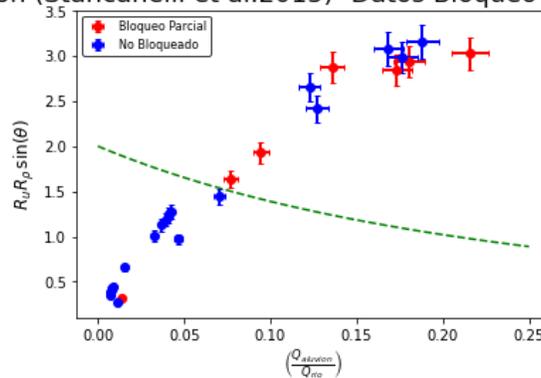


Figura 5.1: Relación Stancanelli et al. 2015 con datos obtenidos en el experimento

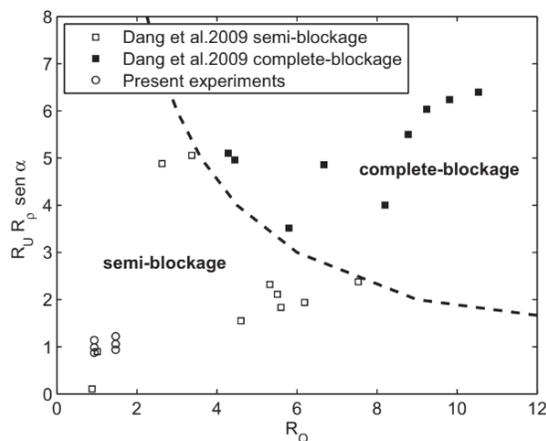


Figura 5.2: Umbral de obstrucción total-parcial del canal principal, identificada con datos de Stancanelli et al. (2015) y de Dang et al. (2009), extraído de Stancanelli et al. (2015)

En cuanto a la erosión del deposito del flujo detrítico se plantea que un valor límite para el parámetro adimensional  $\Pi_{10} = 0.0001$ , este parámetro busca analizar la relación entre momentum del flujo detrítico y el canal principal, destacando la importancia del momentum en el fenómeno estudiado- (Dang et al. 2009).

En relación con la forma de los depósitos de flujos detríticos captados por la cámara Intel, se puede observar que muchas de estas formas son simétricas y muestran un desplazamiento mínimo aguas abajo. al mismo tiempo estos depósitos simétricos fueron más resistentes a la erosión (Dang et al. 2009; Stancanelli et al. 2015)

A cerca de la altura de los depósitos formados por los flujos detríticos, se observa que, a mayor volumen del flujo, los depósitos tienden a ser más altos (Haas et al., 2015). Esto ocurre porque un mayor volumen de flujo contribuye a una mayor cantidad de material depositado en la llanura de desbordamiento, lo que resulta en depósitos más prominentes con mayor altura.

Cuando se comparan los casos con el mismo volumen de flujo, se nota que un menor contenido de agua en la mezcla hace que el flujo sea más concentrado y menos disperso al llegar a la confluencia. Esto significa que con menos agua, el flujo mantiene una estructura más cohesionada y los depósitos formados son más altos. De manera similar, cuando se comparan diferentes concentraciones de partículas finas, se observa que flujos con una mayor concentración de finos tienden a formar depósitos más cohesivos y menos dispersos al entrar en contacto con el río, manteniéndose como una masa más unida. En contraste, flujos con menos partículas finas pueden dispersarse más fácilmente al entrar en contacto con el río, lo que puede reducir la altura del depósito y afectar su forma final.

# Capítulo 6

## Conclusiones

En este trabajo se presentaron los resultados experimentales sobre la interacción entre un flujo detrítico en la confluencia de un río y una quebrada. Los hallazgos obtenidos mediante el análisis dimensional permitieron identificar las principales variables que influyen tanto en el bloqueo del canal principal como en la erosión del depósito de flujo detrítico.

Aunque no se logró el bloqueo total del cauce principal, se observaron bloqueos parciales en varios casos, lo que permitió determinar condiciones clave para la obstrucción. Estos bloqueos parciales proporcionaron datos valiosos sobre factores influyentes, como el caudal del río y el volumen de sedimentos, sugiriendo que el comportamiento observado podría extrapolarse a condiciones de bloqueo completo en futuros estudios. Estos resultados confirman y amplían los hallazgos de investigaciones anteriores (Dang et al., 2009; Stancanelli et al., 2015).

En cuanto a los criterios de erosión y estabilidad del depósito generado por el flujo detrítico, el análisis dimensional ayudó a identificar variables críticas, como la relación de caudales, la relación de Froude y la relación de momentums, que determinan la capacidad del río para transportar y redistribuir los sedimentos aportados por la quebrada. Estos criterios ofrecen una base preliminar para predecir la capacidad de transporte y redistribución de sedimentos en confluencias de ríos.

La utilización de la cámara Intel RealSense facilitó la caracterización de la geometría de los depósitos formados durante los experimentos, permitiendo visualizar su forma y estructura. Sin embargo, no se encontró una correlación directa entre la geometría del depósito y el patrón de deposición, lo que sugiere la influencia de otros factores aún no controlados. Este hallazgo subraya la necesidad de realizar estudios adicionales para identificar y evaluar mejor estos factores.

En conclusión, aunque uno de los objetivos principales del estudio no se logró por completo, los resultados obtenidos contribuyen significativamente al entendimiento de las dinámicas de flujos detríticos en la confluencia de ríos y quebradas. Este conocimiento es crucial para futuras investigaciones y para el diseño de medidas de mitigación que puedan aplicarse en áreas propensas a este tipo de fenómenos, mejorando la planificación y gestión del riesgo en regiones vulnerables.

# Bibliografía

- [1] Aguilar, G., Cabre, A., Fredes, V., & Villela, B. (2020). Erosion after an extreme storm event in an arid fluvial system of the southern Atacama Desert: an assessment of the magnitude, return time, and conditioning factors of erosion and debris flow generation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(5), 1247–1265. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1247-2020>
- [2] Bagnold, R. A. (1954). Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 225(1160), 49-63. <https://www.jstor.org/stable/99440>
- [3] Benda, L., & Cundy, T. W. (1990). Predicting Deposition of Debris Flows in Mountain Channels. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(4), 409-417. <https://doi.org/10.1139/t90-057>
- [4] Benda, L., Hassan, M.A., Church, M., & May, C.L. (2005). Geomorphology of steep-land headwaters: The transition from hillslopes to channels. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(4), 835-851. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03776.x>
- [5] Chen, H., Ruan, H., Chen, J., Li, X., & Yu, Y. (2022). Review of Investigations on Hazard Chains Triggered by River-Blocking Debris Flows and Dam-Break Floods. *Frontiers*, 10(830044), 1-7. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.830044>
- [6] Chen, K.-T., Chen, X.-Q., Niu, Z.-P., & Guo, X.-J. (2019). Early identification of river blocking induced by tributary debris flow based on dimensionless volume index. *Landslides*, 16(4), 2335-2352. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01221-8>
- [7] Cheng, Z., Dang, C., Liu, J., & Gong, Y. (2007). Experiments of Debris Flow Damming in Southeast Tibet. *Earth Science Frontiers*, 14(6), 181–187. [https://doi.org/10.1016/S1872-5791\(08\)60010-X](https://doi.org/10.1016/S1872-5791(08)60010-X)
- [8] Costa, J.E., & Schuster, R.L. (1988). The formation and failure of natural dams. *Geological Society of America Bulletin*, 100(7), 1054-1068. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1054:TFONDA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1054:TFONDA>2.3.CO;2)
- [9] Cotroneo, J., Montserrat, G., Montserrat, S., Niño, Y., & Tamburrino, A. (2018). Modelo físico de obras de desvío aluvional. Quebrada de Macul, Región Metropolitana, Chile. En Actas del XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos Aires, Argentina.
- [10] Cui, P., Zeng, C., & Lei, Y. (2015). Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow. *Earth Surf. Process. Landforms*, 40, 1644–1655. [DOI:10.1002/esp.3744](https://doi.org/10.1002/esp.3744)
- [11] Dang, C., Cui, P., & Cheng, Z. (2009). The formation and failure of debris flow-dams,

- background, key factors and model tests: case studies from China. *Springer*, 57(1), 1901-1910. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1479-6>
- [12] Garcés, A., Zegers, G., Cabré, A., Aguilar, G., Tamburrino, A., & Montserrat, S. (2022). A modeling methodology to study the tributary-junction alluvial fan connectivity during a debris flow event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(1), 377-393. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-377-2022>
- [13] González Bilbao, Á. (2021). Modelación numérica de los procesos de erosión/depositación en flujos detríticos: aplicación en quebradas afluentes a Río El Carmen, Huasco. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/182951>
- [14] Haas, T., Braat, L., Leuven, J. R.F.W., Lokhorst, I. R., & Kleinhans, M. G. (2015). Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(9), 1949-1972. <https://doi.org/10.1002/2015JF003525>
- [15] Huggel, C., Clague, J. J., & Korup, O. (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(1), 77-91. <https://doi.org/10.1002/esp.2223>
- [16] Hunt, M. L., Zenit, R., Campbell, C., & Brennen, C. E. (2002). Revisiting the 1954 Suspension Experiments of R. A. Bagnold. *Journal of Fluid Mechanics*, 452, 1-24. <https://doi.org/10.1017/S0022112001006577>
- [17] Ibarrola, E. L. (2009). Introducción a los fluidos no newtonianos. *Cátedra de Mecánica de los Fluidos-UNCOR*. Argentina: Universidad Nacional de Cordoba
- [18] IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647)
- [19] Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245-297. <https://doi.org/10.1029/97RG00426>
- [20] Iverson, R. M., Reid, M. E., Logan, M., LaHusen, R. G., Godt, J. W., & Griswold, J. P. (2011). Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment. *Nature Geoscience*, 4, 116-121. <https://doi.org/10.1038/ngeo1040>
- [21] Larsen, M., Wieczorek, G., Eaton, L., Morgan, B., & Torres-Sierra, H. (2022). The Venezuela Debris Flow and Flash Flood Disaster. *Natural Hazards on Alluvial Fans*, U.S. Department of Interior (U.S. Geological Survey). <http://pubs.er.usgs.gov/pubs/fs/fs10301>
- [22] Major, J., & Iverson, R.M. (1999). Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins. *GSA Bulletin*, 111(10), 1424-1434. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111<1424:DFDEOP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111<1424:DFDEOP>2.3.CO;2)
- [23] Martínez, H., Meyer, N., Martínez, H., & Jonhni, P. (2020). Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando Flo-2D, de la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica. Disponible en <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3339>
- [24] Martínez, V. (2022). Aplicación y comparación de modelos de flujos detríticos, FLO-2D y HEC-RAS a quebradas Acerilla y La Mesilla. Tesis de pregrado, Universidad de Chile.

Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/189195>

- [25] Montserrat, S. R. (2005). Estudio experimental de obras de protección contra aluviones. Tesis de magíster en ciencias de la ingeniería, mención recursos y medio ambiente hídrico; tesis de ingeniero civil, Universidad de Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102803>
- [26] Pérez Garcia, D.L., & Garcell Puyáns, D. L. R. (2016). Analysis of effect of main variables determining the behavior suspensions rheological limonitic. *Chemical Technology*, 31(3), 106-118. <https://doi.org/10.1590/2224-6185.2011.3.%x>
- [27] Perez-Trejo, L., Sanchez, A.F.M., & Mercado, A.P. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos. Una revisión del viscosímetro de Couette. *Latin-American Journal of Physics Education*, 4(1).
- [28] Pierson, T.C. (1985). Processes and dynamics of debris flows. In Coates, D. R. (Ed.), *Debris Flows/Avulsions and Subsidence* (Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, 7), 1-47.
- [29] Song, Z., Fan, G., Chen, Y., & Liu, D. (2023). Identification Method of River Blocking by Debris Flow in the Middle Reaches of the Dadu River, Southwest China. *Water*, 15(4301), 4-5. <https://doi.org/10.3390/w15244301>
- [30] Song, Z., Zhan, Y., Chen, Y., & Fan, G. (2024). Field physical model tests on the mechanism of river blocking by debris flow in the middle reaches of the Dadu River, Southwest China. *PLoS ONE*, 19(4), 1-2. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298076>
- [31] Stancanelli, L.M., Lanzoni, S., & Foti, E. (2015). Propagation and deposition of stony debris flows at channel confluences. *Water Resources Research*, 51(10), 5100–5116. <https://doi.org/10.1002/2015WR017116>
- [32] Stancanelli, L. M., & Musumeci, R. E. (2018). Geometrical characterization of sediment deposits at the confluence of mountain streams. *Water*, 10(4), 401. [10.3390/w10040401](https://doi.org/10.3390/w10040401)
- [33] Takahashi, T., & Satofuka, Y. (1999). Unified Dynamics of the Inertial Debris Flows. *Annuals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 44B-2, 185-191. <https://www.iahr.org/library/infor?pid=13742>
- [34] Takahashi, T. (2007a). *Debris flow: Mechanics, prediction and countermeasures* (1st ed.). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9780203946282>
- [35] Takahashi, T. (2007b). Progress in debris flow modeling. In Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, F., & Wang, G. (Eds.), *Progress in landslide science*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-70965-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-70965-7_5)
- [36] VanDine, D. F. (1996). Debris flow control structures for forest engineering. *Research Branch, BC Ministry of Forests*, Victoria, BC, Work. Pap, 8, 1996.

# Anexos

## Anexo A. Fuentes y propagación de errores

### A.1. Antecedentes generales

Sea  $F$  una función dependiente de un determinado número de variables  $x_i$ , donde cada una de la cuales posee errores aleatorios conocidos. El error aleatorio de  $F$ ,  $\epsilon_F$ , puede ser expresado como:

$$\epsilon_F = \sqrt{\sum \left( \frac{dF}{dx_i} \cdot \epsilon_{x_i} \right)^2} \quad (\text{A.1})$$

Donde  $\epsilon_{x_i}$  corresponde a los errores aleatorios de la variable  $x_i$ .

### A.2. Error asociado al cálculo del volumen total de la mezcla

#### A.2.1. Fuentes de error

El error asociado al cálculo del volumen total de la mezcla, se debe principalmente al error cometido cada vez que se pesa caolinita ( $W_c$ ) y arena ( $W_s$ ) en la balanza, y también al error en la medición del volumen de agua ( $V_w$ ) en donde se disuelve la caolinita y la arena. Al mismo tiempo se considero un error del 3% para las densidades de la arena y caolinita, y un error del 5% considerado en las perdidas del volumen total de la mezcla. El error asociado a cada uno de los parámetros considerados se presentan en la Tabla A.1 .

Tabla A.1: Errores asociados al cálculo del volumen total de la mezcla agua, arena y caolinita

Parámetro	Unidad	Error $\pm \epsilon_i$
Masa caolinita	gr	1
Volumen de agua	cm <sup>3</sup>	10
Densidad caolinita	%	3
Masa Arena	gr	1
Densidad Arena	%	3
Perdidas	%	5

#### A.2.2. Propagación de error

El volumen total de la mezcla se puede calcular como:

$$V_m = \frac{W_c}{\rho_c} + \frac{W_s}{\rho_s} + V_w \quad (\text{A.2})$$

Donde el error asociado es:

$$\epsilon_{V_m} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{ws}}{\rho_s}\right)^2 + \left(\frac{-W_s}{\rho_s^2} \cdot \epsilon_{\rho_s}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{wc}}{\rho_c}\right)^2 + \left(\frac{-W_c}{\rho_c^2} \cdot \epsilon_{\rho_c}\right)^2 + (\epsilon_{V_w})^2} \quad (\text{A.3})$$

Debido a la metodología escogida en hacer la mezcla en otro recipiente y después pasar esta al estanque, parte de la mezcla queda en el recipiente inicial, por lo que el error final viene siendo el error asociado al cálculo de la mezcla más el error debido a las pérdidas:

$$\epsilon_V = \sqrt{(\epsilon_{V_m})^2 + (\epsilon_{V_p})^2} \quad (\text{A.4})$$

### A.3. Error asociado al cálculo del caudal del canal principal

#### A.3.1. Fuentes de error

El caudal es calculado en primera instancia a partir del volumen aforado y el tiempo de aforo y para cada uno de estos se mide la diferencia de presión en el tablero de Venturi, y así después poder regular con la válvula de la bomba un caudal específico. Para el cálculo del error en los coeficientes se obtuvieron mediante una función en python

Tabla A.2: Errores asociados al cálculo del caudal del canal principal

Parametro	Unidad	Error $\pm \epsilon_i$
Volumen aforado	cm3	2
Tiempo aforado	seg	0.5
Diferencia de presión	mm	2
pendiente regresion lineal, m	%	0.1
coeficiente de posición, n	%	0.1

#### A.3.2. Propagación de error

El caudal es calculado a partir del volumen aforado y el tiempo de aforo, es decir:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{A.5})$$

de esta manera el error asociado al caudal queda determinado por la ecuación:

$$\epsilon_{Qa} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_V}{t}\right)^2 + \left(\frac{V}{t^2} \cdot \epsilon_t\right)^2} \quad (\text{A.6})$$

Luego del cálculo de los caudales aforados la regresión lineal queda como:

$$Q_r = \Delta P \cdot M + N \quad (\text{A.7})$$

Donde el error en la regresión lineal queda como:

$$\epsilon_Q = \sqrt{(\Delta P \cdot \epsilon_M)^2 + (\epsilon_N)^2 + (M \cdot \epsilon_{\Delta P})^2} \quad (\text{A.8})$$

Expresando el cálculo del error total del caudal como:

$$\epsilon_Q = \sqrt{(\epsilon_{Qa})^2 + (\epsilon_{Qr})^2} \quad (\text{A.9})$$

## A.4. Error asociado al cálculo de velocidad del flujo detrítico

### A.4.1. Fuentes de error

La velocidad es calculada con el vídeo obtenido de la cámara ubicada paralela al canal tributario. El error asociado a cada uno de los parámetros considerados se presentan en la Tabla

Tabla A.3: Errores asociados al cálculo de la velocidad del aluvión

Parámetro	Unidad	Error $\pm \epsilon_i$
Largo	cm	1
Finicial	unid	5
Ffinal	unid	5
Tasa cuadros	FPS	2

### A.4.2. Propagación de error

La velocidad del aluvión es calculado como:

$$V_{aluvion} = \frac{L}{(F_{Final} - F_{Inicial})} \cdot T \quad (\text{A.10})$$

Donde  $V_{Aluvion}$  es la velocidad del aluvión en m/s,  $F_{Final}$  y  $F_{Inicial}$  son los cuadros final e inicial respectivamente y T es la tasa de cuadros por segundo en que fue grabado el vídeo.

De esta manera el error asociado se determina como:

$$\epsilon_{V_{aluvion}} = \sqrt{\left(\frac{T \cdot \epsilon_L}{(F_f - F_o)}\right)^2 + \left(\frac{L \cdot \epsilon_T}{(F_f - F_o)}\right)^2 + \left(\frac{-L \cdot T \cdot \epsilon_{F_f}}{(F_f - F_o)^2}\right)^2 + \left(\frac{L \cdot T \cdot \epsilon_{F_o}}{(F_f - F_o)^2}\right)^2} \quad (\text{A.11})$$

## A.5. Error asociado al cálculo de concentración de fino y volumétrica

### A.5.1. Fuentes de error

El cálculo de las concentraciones esta estrechamente relacionado con el cálculo del volumen de mezcla por lo que los errores son los mismos presentes en la tabla.

### A.5.2. Progación de error

Se tiene que las fórmulas para la concentración de fino y arena se realizan de manera análoga, siendo la fórmula para el fino como:

$$C_{fino,arena} = \frac{\frac{W_{c,s}}{\rho_{c,s}}}{V_m} \quad (\text{A.12})$$

Luego para el cálculo de la concentración volumétrica se tiene:

$$C_v = C_{fino} + C_{arena} \quad (A.13)$$

De esta manera el error para el fino y la arena se determina como:

$$\epsilon_{C_f, C_a} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{W_{c,s}}}{\rho_{c,s} \cdot \nabla_m}\right)^2 + \left(\frac{-W_{c,s} \cdot \epsilon_{\rho_{c,s}}}{\rho_{c,s}^2 \cdot \nabla_m}\right)^2 + \left(\frac{-W_{c,s} \cdot \epsilon_{\nabla_m}}{\rho_{c,s} \cdot \nabla_m^2}\right)^2} \quad (A.14)$$

Por último el error para la concentración volumétrica queda de la forma:

$$\epsilon_{C_v} = \sqrt{(\epsilon_{C_f})^2 + (\epsilon_{C_a})^2} \quad (A.15)$$

## A.6. Error asociado al cálculo de los parámetros adimensionales

### A.6.1. Propagación de errores

Se define  $\Pi_1$  como:

$$\Pi_1 = \frac{g^{1/2} \cdot \nabla^{5/6}}{Q_{rio}} \quad (A.16)$$

Donde la propagación de errores es:

$$\epsilon_{\Pi_1} = \sqrt{\left(\frac{5 \cdot g \cdot \epsilon_{\nabla} \cdot \nabla^{2/3}}{6 \cdot Q \sqrt{g \cdot \nabla^{5/3}}}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_Q \cdot \sqrt{g \cdot \nabla^{5/3}}}{Q^2}\right)^2} \quad (A.17)$$

Se define  $\Pi_2$  como:

$$\Pi_2 = \frac{g^{1/2} \cdot \nabla^{1/6}}{v_{aluvion}} \quad (A.18)$$

Donde la propagación de errores es:

$$\epsilon_{\Pi_2} = \sqrt{\left(\frac{g \cdot \epsilon_{\nabla}}{6 \cdot v_{aluvion} \cdot g^{1/2} \cdot \nabla^{1/3}}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_Q \cdot \sqrt{g \cdot \nabla^{1/3}}}{v_{aluvion}^2}\right)^2} \quad (A.19)$$

Se define  $\Pi_3$  como:

$$\Pi_3 = \frac{\nabla}{a \cdot b_{trib} \cdot H_{Mezcla}} \quad (A.20)$$

Donde la propagación de errores es:

$$\epsilon_{\Pi_3} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{\nabla}}{a \cdot b_{trib} \cdot H_{Mezcla}}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_a \cdot \nabla}{a^2 \cdot b_{trib} \cdot H_{Mezcla}}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{b_{trib}} \cdot \nabla}{a \cdot b_{trib}^2 \cdot H_{Mezcla}}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{H_{Mezcla}} \cdot \nabla}{a \cdot b_{trib} \cdot H_{Mezcla}^2}\right)^2} \quad (A.21)$$

Se define  $\Pi_4$  como:

$$\Pi_4 = \frac{\nabla}{a \cdot b_{trib} \cdot (H_{Mezcla} + H_{DesdeCanal})} \quad (A.22)$$

y se define  $H_{Total}$  como:

$$H_{Total} = H_{Mezcla} + H_{DesdeCanal} \quad (A.23)$$

Donde la propagación de errores es:

$$\epsilon_{\Pi_4} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{\forall}}{a \cdot b_{trib} \cdot H_{Total}}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_a \cdot \forall}{a^2 \cdot b_{trib} \cdot H_{Total}}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{b_{trib}} \cdot \forall}{a \cdot b_{trib}^2 \cdot H_{Total}}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{H_{Total}} \cdot \forall}{a \cdot b_{trib} \cdot H_{Total}^2}\right)^2} \quad (\text{A.24})$$

Se define  $\Pi_5$  como:

$$\Pi_5 = \frac{H}{a} \quad (\text{A.25})$$

Donde la propagación de error es:

$$\epsilon_{\Pi_5} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_H}{a}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_a \cdot H}{a^2}\right)^2} \quad (\text{A.26})$$

Se define  $\Pi_6$  como:

$$\Pi_5 = \frac{H_{Total}}{a} \quad (\text{A.27})$$

Donde la propagación de error es:

$$\epsilon_{\Pi_5} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{H_{Total}}}{a}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_a \cdot H_{Total}}{a^2}\right)^2} \quad (\text{A.28})$$

Se define  $\Pi_7$  como:

$$\Pi_7 = \frac{\rho_{Aluvion}}{\rho_w} \quad (\text{A.29})$$

Donde la propagación de errores es:

$$\epsilon_{\Pi_7} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{\rho_w} \cdot \rho_{Aluvion}}{\rho_w}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{\rho_{Aluvion}}}{\rho_w^2}\right)^2} \quad (\text{A.30})$$

Se define  $\Pi_8$  como:

$$\Pi_8 = \Pi_7 \cdot \frac{v_{Aluvion}}{v_{Rio}} \quad (\text{A.31})$$

Donde la propagación de errores es:

$$\epsilon_{\Pi_8} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{\Pi_7} \cdot v_{Aluvion}}{v_{Rio}}\right)^2 + \left(\frac{\Pi_7 \cdot \epsilon_{v_{Aluvion}}}{v_{Rio}}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{v_{Rio}} \cdot v_{Aluvion}}{v_{Rio}^2}\right)^2} \quad (\text{A.32})$$

Se define  $\Pi_9$  como:

$$\Pi_9 = \Pi_1 \cdot \Pi_7 \quad (\text{A.33})$$

Donde la propagación de errores es:

$$\epsilon_{\Pi_9} = \sqrt{(\Pi_7, \epsilon_{\Pi_1})^2 + (\Pi_1, \epsilon_{\Pi_7})^2} \quad (\text{A.34})$$

Se define  $\Pi_{10}$  como:

$$\Pi_{10} = \Pi_1 \cdot \Pi_8 \quad (\text{A.35})$$

Donde la propagación de errores es:

$$\epsilon_{\Pi_{10}} = \sqrt{(\Pi_8, \epsilon_{\Pi_1})^2 + (\Pi_1, \epsilon_{\Pi_8})^2} \quad (\text{A.36})$$

Se define  $\Pi_{10}$  como:

$$\Pi_{11} = \frac{Fr_{Aluvion}}{Fr_{CanalPrincipa}} \quad (\text{A.37})$$

Donde la propagación de errores es:

$$\epsilon_{\Pi_{11}} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{Fr_{Aluvion}}}{Fr_{CanalPrincipa}}\right)^2 + \left(\frac{Fr_{Aluvion}, \epsilon_{Fr_{CanalPrincipa}}}{Fr_{CanalPrincipa}^2}\right)^2} \quad (\text{A.38})$$

## Anexo B. Tablas de resultados

A continuación se presenta la tabla con los parámetros adimensionales obtenidos en cada ensayo.

Tabla B.1: Resultados adimensionales desde  $\Pi_1$  a  $\Pi_6$

Pi1	Pi2	Pi3	Pi4	Pi5	Pi6
0.0005363	0.11869519	15.3641882	4.91281513	6.08307692	19.0240292
0.0002612	0.10102075	13.4320933	3.86002453	5.21855769	18.1595099
0.0000334	0.07397543	8.17577925	1.84198207	3.76346154	16.7044138
0.0000334	0.08219493	8.17577925	1.84198207	3.76346154	16.7044138
0.0001887	0.09631412	12.5539427	3.44890946	4.90192308	17.8428753
0.0001887	0.0996353	12.5539427	3.44890946	4.90192308	17.8428753
0.0000146	0.07155532	8.49118223	1.93816337	3.8275	16.7684523
0.0000077	0.12149823	7.08222955	1.52698536	3.55711538	16.4980676
0.0000096	0.08954214	8.66188769	1.99128067	3.86307692	16.8040292
0.0000123	0.07958895	9.25122868	2.18065471	3.99115385	16.9321061
0.0000096	0.08265428	8.66188769	1.99128067	3.86307692	16.8040292
0.0000459	0.11107931	12.6582278	3.49582834	4.9375	17.8784523
0.0000070	0.08539602	7.94122973	1.7720579	3.71721154	16.6581638
0.0001392	0.06712951	8.24148545	1.86181284	3.776625	16.7175773
0.0007967	0.15224827	12.662368	3.49770121	4.93892308	17.8798753
0.0001406	0.08632236	8.26446281	1.868773	3.78125	16.7222023
0.0001417	0.06512199	8.28209949	1.87412434	3.78480769	16.7257599
0.0001395	0.13991794	8.24679291	1.86341937	3.77769231	16.7186446
0.0012468	0.12315131	13.8715544	4.08030751	5.39288462	18.3338369
0.0012873	0.37007509	6.97888621	2.06237476	2.71423077	9.1847069
0.0012710	1.39296081	6.96171059	2.0534967	2.70711538	9.17759151
0.0034285	0.15925806	8.27631243	2.8435154	3.38663462	9.85711074
0.0012309	0.11245395	6.91837391	2.03124119	2.68932692	9.15980305
0.0012549	0.16151808	6.94444444	2.04460485	2.7	9.17047613
0.0012549	0.1233095	6.94444444	2.04460485	2.7	9.17047613
0.0012508	0.12670171	6.94011368	2.04237974	2.69822115	9.16869728
0.0012349	0.23717139	6.92273336	2.03347063	2.69110577	9.1615819
0.0081746	1.75336071	9.33890975	3.7015923	4.24866346	10.7191396

Tabla B.2: Resultados adimensionales desde  $\Pi_7$  a  $\Pi_{12}$

Pi7	Pi8	Pi9	Pi10	P11	P12
1.65893389	4.82663956	0.00088965	0.00258843	5.03937196	407.212315
1.65893389	4.91131745	0.00043339	0.00128305	5.127782	414.35639
1.62548765	4.35398477	5.4211E-05	0.00014521	4.63942181	334.308676
1.62548765	3.91858629	5.4211E-05	0.00013069	4.17547963	253.636495
1.62548765	4.72932828	0.00030666	0.00089223	5.03937196	306.113011
1.62548765	4.57168401	0.00030666	0.00086249	4.8713929	351.02411
1.61586938	2.54060282	2.3633E-05	0.00003716	3.2729666	135.050649
1.64782259	1.34339971	1.2749E-05	0.00001039	1.69709379	60.1986475
1.64417141	1.4806797	1.5835E-05	0.00001426	2.01371975	74.952894
1.62548765	1.73000902	2.0023E-05	0.00002131	2.37985062	79.7003744
1.64417141	1.60406967	1.5835E-05	0.00001545	2.18152973	73.8984315
1.64049215	1.62760693	7.5331E-05	0.00007474	2.21850481	74.9827773
1.65196139	1.46515422	1.1629E-05	0.00001031	1.98320885	67.4986884
1.48237242	11.9007364	0.00020638	0.00165688	11.3535455	1370.64768
1.48753113	7.46384458	0.00118516	0.00594668	7.09596594	626.323131
1.64049215	10.2624532	0.0002307	0.00144318	8.84691857	996.37948
1.38814651	11.5285601	0.00019672	0.00163373	11.7450471	1119.30554
1.44487791	5.56786754	0.00020163	0.00077698	5.44970184	467.223587
1.63802354	11.1129548	0.00204235	0.01385604	9.59454549	932.535581
1.65024127	3.74955164	0.00212434	0.00482676	2.27212331	629.28184
1.7250073	1.03864876	0.00219251	0.00132014	0.60211268	174.314922
1.70857432	10.9733787	0.00585789	0.03762248	6.42253521	1841.64632
1.57928516	11.7034783	0.0019439	0.01440549	7.41061755	1964.17787
1.80054016	9.32583273	0.00225944	0.01170267	5.17946388	2360.39622
1.80054016	12.2155274	0.00225944	0.01532884	6.78436818	2372.00611
1.71938616	11.3453611	0.00215069	0.01419132	6.59849508	2203.03759
1.79537732	6.3125223	0.00221703	0.00779503	3.51598643	1059.42151
1.75370677	1.21720931	0.01433581	0.00995017	0.69407801	204.282482

Tabla B.3: Resultados de los errores de los adimensionales desde  $\Pi_1$  a  $\Pi_6$

Error $\Pi_1$	Error $\Pi_2$	Error $\Pi_3$	Error $\Pi_4$	Error $\Pi_5$	Error $\Pi_6$
0.00002367	0.00619926	0.55100373	0.18440177	0.27575814	0.53127623
0.00001153	0.00535698	0.48178622	0.14551772	0.25541351	0.52100666
0.00000147	0.00359784	0.29334687	0.07005339	0.21690403	0.50324869
0.00000147	0.00365968	0.2933121	0.070046	0.21690403	0.50324869
0.00000831	0.00503009	0.44981621	0.1301157	0.24754419	0.51719436
0.00000832	0.00505267	0.44986967	0.13012965	0.24754419	0.51719436
0.00000062	0.00385397	0.3045944	0.07366572	0.21874149	0.50404337
0.00000033	0.0039108	0.25433969	0.05819994	0.21087444	0.50067945
0.00000041	0.00424143	0.3109077	0.0757084	0.21975566	0.50448432
0.00000052	0.00435537	0.33179694	0.08278193	0.22336855	0.50606857
0.00000041	0.0041921	0.31080805	0.07568677	0.21975566	0.50448432
0.00000194	0.00571602	0.45368749	0.13189551	0.24844081	0.51762411
0.00000030	0.00399342	0.28508288	0.06744645	0.21556723	0.50267397
0.00000937	0.00340418	0.29536073	0.07072825	0.217283	0.50341214
0.00005366	0.00531241	0.45398429	0.1320041	0.24847661	0.51764129
0.00000948	0.00355808	0.29652146	0.07106246	0.21741599	0.50346956
0.00000954	0.00340106	0.29690568	0.07121123	0.21751824	0.50351372
0.00000940	0.0041071	0.29585777	0.0708542	0.2173137	0.50342539
0.00008395	0.00541913	0.49711862	0.15356393	0.25964427	0.52309371
0.00008668	0.00849868	0.19933659	0.06348083	0.13024962	0.26175931
0.00008562	0.02650498	0.19904068	0.06326763	0.1300788	0.26167435
0.00023091	0.0067034	0.23649975	0.08675521	0.14549051	0.26966731
0.00008285	0.00532557	0.19748849	0.06251351	0.12965074	0.26146183
0.00008470	0.0057679	0.19933535	0.06321587	0.12990775	0.26158936
0.00008464	0.005427	0.1990329	0.06313321	0.12990774	0.26158936
0.00008426	0.00545077	0.19840908	0.06292972	0.12986495	0.26156811
0.00008325	0.00660711	0.19822558	0.06274738	0.12969361	0.26148309
0.00055074	0.03355278	0.26703651	0.1119254	0.16295757	0.27947833

Tabla B.4: Resultados de los errores de los adimensionales desde  $\Pi_7$  a  $\Pi_{12}$

Error Pi7	Error Pi8	Error Pi9	Error Pi10	Error Pi11	Error Pi12
0.02496563	0.02507175	0.0000237	0.00002367	0.15118116	12.2163694
0.02497222	0.02509323	0.0000115	0.00001153	0.15383346	12.4306917
0.02163947	0.02170516	0.0000015	0.00000147	0.13918265	10.0292603
0.02121521	0.02124582	0.0000015	0.00000147	0.12526439	7.60909484
0.02116347	0.02128856	0.0000083	0.00000831	0.15118116	9.18339032
0.02158699	0.02168197	0.0000083	0.00000832	0.14614179	10.5307233
0.02143277	0.02156117	0.0000006	0.00000062	0.09818900	4.05151947
0.02201549	0.02201678	0.0000003	0.00000033	0.05091281	1.80595943
0.02378897	0.02381896	0.0000004	0.00000041	0.06041159	2.24858682
0.02194242	0.0220557	0.0000005	0.00000052	0.07139552	2.39101123
0.02272838	0.02278523	0.0000004	0.00000041	0.06544589	2.21695294
0.02225225	0.02231809	0.0000019	0.00000194	0.06655514	2.24948332
0.02298932	0.02301707	0.0000003	0.00000030	0.05949627	2.02496065
0.01721579	0.01736323	0.0000094	0.00000937	0.34060637	41.1194304
0.02335024	0.02335381	0.0000537	0.00005366	0.21287898	18.7896939
0.02172726	0.02174564	0.0000095	0.00000948	0.26540756	29.8913844
0.01859074	0.0187671	0.0000095	0.00000954	0.35235141	33.5791663
0.02133481	0.02133551	0.0000094	0.00000940	0.16349106	14.0167076
0.02230177	0.02233423	0.0000839	0.00008395	0.28783636	27.9760674
0.02268951	0.0226896	0.0000867	0.00008668	0.0681637	18.8784552
0.0246898	0.02468986	0.0000856	0.00008562	0.01806338	5.22944767
0.02414034	0.02416039	0.0002309	0.00023091	0.19267606	55.2493895
0.02131972	0.02138514	0.0000829	0.00008285	0.22231853	58.9253361
0.03163649	0.03163977	0.0000847	0.00008470	0.15538392	70.8118867
0.02914769	0.02917254	0.0000846	0.00008464	0.20353105	71.1601834
0.02453687	0.02456092	0.0000843	0.00008426	0.19795485	66.0911276
0.02750907	0.02750939	0.0000833	0.00008325	0.10547959	31.7826452
0.02563108	0.02563113	0.0005507	0.00055074	0.02082234	6.12847446

## Anexo C. Resultados de los caudales aforados para la calibración del tablero venturi

A continuación en la fig C.1 se muestran los caudales para cada diferencia de presión, estos se usaron para la calibración del tablero de venturi (3.2) y así poder regular el caudal del canal principal.

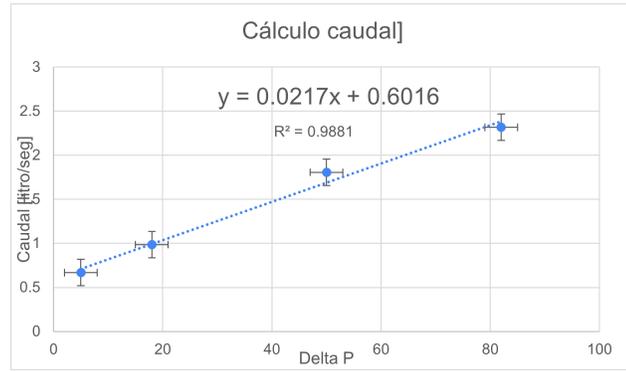


Figura C.1: Regresión de caudal y diferencia de presión

La regresión, en teoría, no debería ser lineal, pero debido a que la variación en la diferencia de presión es tan pequeña, termina tomando esa forma, como se muestra en la figura C.1

## Anexo D. Resultados de la curva granulométrica

A continuación en la figura D.1 se muestra la curva granulométrica de la arena utilizada en los experimentos

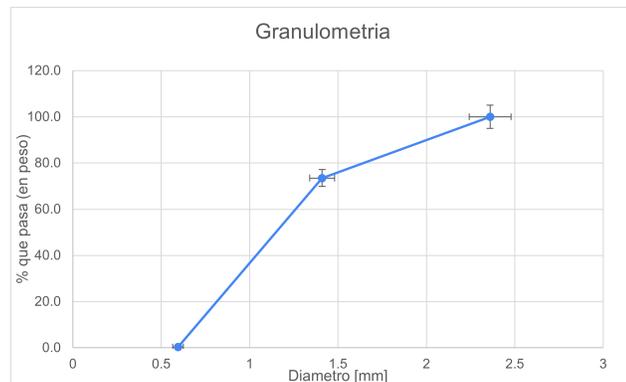


Figura D.1: Curva granulométrica