



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“DINÁMICA DE FLUJOS DE ESCOMBROS
A TRAVÉS DE DATOS EXPERIMENTALES”**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LIC. EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A:

TRANQUILINO ESPINOZA CARLA GISELA



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. LIZETH CABALLERO GARCÍA**

Ciudad Universitaria, CDMX., 2020.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de Datos del Jurado

1. Datos de alumno:
Tranquilino
Espinoza
Carla Gisela
57 91 71 89
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra
312304915
2. Datos del tutor:
Dra.
Ana María Lizeth
Caballero
García
3. Datos del sinodal 1:
Dr.
José Luis
Arce
Saldaña
4. Datos del sinodal 2:
Dra.
Ana María
Soler
Arechalde
5. Datos del sinodal 3:
Dr.
Luis Ángel
Rodríguez
Sedano
6. Datos del sinodal 4:
Dr.
Mariana Patricia
Jácome
Paz
7. Datos del trabajo escrito:
Dinámica de flujos de escombros a través de datos experimentales
102 p
2020

Hay que soñar,
pero a condición de creer seriamente en nuestro sueño,
de examinar con atención la vida real,
de confrontar nuestras observaciones con nuestro sueño,
y de realizar escrupulosamente nuestra fantasía.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a la magna casa de estudio del país, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y a la Facultad de Ciencias, por la oportunidad de formarme como profesionista y como ser humano dispuesto a compartir mis habilidades para la sociedad.

A el apoyo financiero otorgado por los proyectos PAPIIT IA106317 UNAM titulado “Dinámica de flujos de escombros cohesivos y su reproducción a través de simulaciones numéricas”, y PAPIIT IN119620 UNAM titulado “Modelos reológicos empíricos de lahares aplicados a simulaciones numéricas y evaluación de peligros” a cargo de la Dra. Ana María Lizeth Caballero García, sin el cual no podría haber realizado esta tesis.

A la Dra. Ana María Lizeth Caballero García por guiarme como asesora durante el tiempo de elaboración de esta investigación. Así como el reconocimiento y agradecimiento a el Dr. Damiano Sarrochi, y al Dr. Luis Ángel Rodríguez Sedano, pertenecientes a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), por su colaboración y comentarios durante el trabajo experimental.

A el honorable comité revisor de la tesis conformado por el Dr. José Luis Arce Saldaña (presidente), la Dra. Ana María Soler Arechalde (vocal), el Dr. Luis Ángel Rodríguez Sedano (suplente) y la Dra. Mariana Patricia Jácome Paz (suplente), por sus comentarios y precisiones respecto a la mejoría del trabajo.

Mención aparte al personal a cargo y colaboradores del laboratorio de Análisis de Imágenes y Modelado Analógico (LAIMA) del Instituto de Geología de la UASLP, de Sedimentología Volcánica del Instituto de Geofísica de la UNAM, de Física de Suelos del Instituto de Geología de la UNAM.

A todos mis compañeros y profesores con los que compartí momentos y enseñanzas inolvidables en las aulas y en trabajos de campo.

Finalmente, y como parte importante de este grandioso equipo, a mi pequeña familia, que me ha educado con perseverancia y trabajo. En específico a mis padres, por ser mi sustento incondicional, y a mi hermana, por siempre ser mi cómplice y modelo por seguir. Sin olvidar las noches de desvelo en compañía de mi pequeña Kika.

INDICE

Lista de Figuras	i
Lista de Tablas	ii
I.- INTRODUCCIÓN	
I. 1. Resumen	1
I. 2. Antecedentes	2
I. 3. Justificación	3
I. 4. Objetivos	4
I. 4. 1. Objetivo general	4
I. 4. 2. Objetivos específicos	4
II.- MARCO TEÓRICO	
II. 1. Definición de flujos de escombros	5
II. 1. 1. Características del material	5
II. 2. Factores generadores	6
II. 3. Movilización	6
II. 4. Dinámica	7
II. 4. 1. Partes	7
II. 4. 2. Características	8
II. 4. 3. Procesos internos: Segregación y transporte de clastos	10
II. 5. Emplazamiento	11
II. 6. Modelos aplicados al estudio	12
II. 7. Comportamiento reológico	15
III.- METODOLOGÍA	
III. 1. Descripción de arreglo experimental	17
III. 2. Características del material	19
III. 2. 1. Caracterización de fracción >8 phi	19
III. 2. 2. Caracterización de arcilla	19
III. 3. Canaleta experimental GRANFLOW-SIM	20
III. 3. 1. Estructura	21
III. 3. 2. Red de sensores y cámaras de video	23
III. 3. 3. Sistema de control	24
III. 4. Procedimiento experimental	25
III. 4. 1. Lanzamiento	25
III. 5. Procedimiento analítico	26
III. 5. 1. Análisis cinemático	26

III. 5. 2. Análisis morfométrico	27
III. 5. 3. Análisis granulométrico	29
III. 5. 4. Análisis dimensional	32
IV.- RESULTADOS	
IV. 1. Experimento 1_0.00 wt%	35
IV. 2. Experimento 2_3.77 wt%	43
IV. 3. Experimento 3_4.16 wt%	49
IV. 4. Experimento 4_7.54 wt%	55
IV. 5. Experimento 5_15.00 wt%	61
IV. 6. Números adimensionales	67
V.- DISCUSIÓN	
V. 1. Discusión	70
V. 2. Números adimensionales	74
V. 3. Mecanismo de emplazamiento	76
V. 3. 1. Flujos con bajo contenido de arcilla	76
V. 3. 2. Flujos con alto contenido de arcilla	77
VI.- CONCLUSIONES	79
Referencias	80
Anexos	85

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1. Representación de un flujo de escombros.	8
Figura III.1. Histogramas de distribuciones de frecuencias granulométricas de las mezclas utilizadas en los experimentos.	18
Figura III.2. Histograma de distribución de frecuencia de tamaño de partícula de fracción limosa.	19
Figura III.3. Histograma de distribución de frecuencia de tamaño de partícula de caolín comercial.	20
Figura III.4. Estructura de la canaleta experimental GRANFLOW-SIM en perfil y oblicuo.	21
Figura III.5. Esquema en perfil del canal.	22
Figura III.6. Vista oblicua de la unidad de sedimentación sobre riel de acero que permite su movimiento.	23
Figura III.7. Procedimiento experimental empleado para la simulación de FE experimentales en la canaleta GRANFLOW-SIM.	25
Figura III.8. Metodología análisis morfométrico.	28
Figura III.9. Procedimiento empleado para el análisis granulométrico de los depósitos.	32
Figura IV.1. Velocidades medias de los FE con distintos contenidos de arcilla.	35
Figura IV.2. Secuencia de movimiento del flujo en el Ex1.	37
Figura IV.3. Vista en planta de la morfología de los depósitos de FE obtenidos en los experimentos.	38
Figura IV.4. Perfiles transversales del depósito del Ex1.	39
Figura IV.5. Perfiles longitudinales de los depósitos.	40
Figura IV.6. Vista en planta del Ex1 con histogramas de frecuencia de tamaño de clastos localizado en su lugar de muestreo.	41
Figura IV.7. Curvas acumulativas de las muestras extraídas del depósito.	42
Figura IV.8. Secuencia de movimiento del flujo en el Ex2.	44
Figura IV.9. Perfiles transversales del depósito del Ex2.	46
Figura IV.10. Vista en planta del Ex2 con histogramas de frecuencia de tamaño de clastos localizado en su lugar de muestreo.	48
Figura IV.11. Secuencia de movimiento del flujo en el Ex3.	50
Figura IV.12. Perfiles transversales del depósito del Ex3.	52
Figura IV.13. Vista en planta del Ex3 con histogramas de frecuencia de tamaño de clastos localizado en su lugar de muestreo.	54
Figura IV.14. Secuencia de movimiento del flujo en el Ex4.	56
Figura IV.15. Perfiles transversales del depósito del Ex4.	58
Figura IV.16. Vista en planta del Ex4 con histogramas de frecuencia de tamaño de clastos localizado en su lugar de muestreo.	60
Figura IV.17. Secuencia de movimiento del flujo en el Ex5.	62
Figura IV.18. Perfiles transversales del depósito del Ex5.	64
Figura IV.19. Vista en planta del Ex5 con histogramas de frecuencia de tamaño de clastos localizado en su lugar de muestreo.	66
Figura IV.20. Régimen de flujo colisional vs. viscoso por la variación en el contenido de arcilla.	67
Figura IV.21. Régimen de flujo colisional vs. friccional por la variación en el contenido de arcilla.	67
Figura IV.22. Régimen de flujo friccional vs. viscoso por la variación en el contenido de arcilla.	68

Figura IV.23. Régimen inercial.	68
Figura V.1. Esquema del proceso de formación de levees detrás del frente del flujo de escombros.	70
Figura V.2. Variación de la media con la distancia recorrida por los FE experimentales.	71
Figura V.3. a) Relación ancho medio del depósito vs. contenido de arcilla. b) Relación ancho máximo del depósito vs. contenido de arcilla.	73
Figura V.4. Mecanismo de emplazamiento para FE con bajo contenido de arcilla.	77
Figura V.5. Mecanismo de emplazamiento para FE con alto contenido de arcilla.	78

LISTA DE TABLAS

Tabla II.1. Variables físicas de el análisis dimensional.	14
Tabla III.1. Arreglo experimental de canaleta GRANFLOW-SIM y concentraciones de sedimento -agua presentes en los experimentos.	17
Tabla III.2. Distribución granulométrica inicial de los experimentos.	18
Tabla III.3. Relación y posición de muestras para el análisis granulométrico.	30
Tabla IV.1. Valores de aceleración y velocidad del frente del flujo.	36
Tabla IV.2. Parámetros morfométricos cuantitativos.	40
Tabla IV.3. Parámetros físicos y adimensionales de los flujos de escombros de este estudio	69
Tabla V.1. Relación de aspecto.	73
Tabla V.2. Parámetros físicos y adimensionales de flujos de escombros experimentales y naturales.	75

I.- INTRODUCCIÓN

I.1. Resumen

Los flujos de escombros son mezclas de agua y sedimentos mal clasificados, impulsados por la fuerza de gravedad a lo largo de pendientes. Los más grandes pueden exceder volúmenes de 10^9 m³; incluso flujos pequeños de 10^3 m³ pueden causar daños a infraestructura y poner en peligro vidas humanas. La concentración de sólidos y la distribución granulométrica de los clastos controlan su comportamiento, siendo los flujos de escombros ricos en material fino, los de mayor alcance y velocidad, posicionándose como los más peligrosos.

En este trabajo se estudiaron los mecanismos que operan en flujos de escombros a través de su reproducción en la canaleta experimental GRANFLOW-SIM (Instituto de Geología, UASLP, México). Dichos flujos de escombros a escala se caracterizaron por sus propiedades cinemáticas medidas con sensores digitales especializados. Los depósitos resultantes fueron estudiados a detalle a través de modelos 3D y análisis texturales.

Integrando la información obtenida durante su movimiento y el análisis de los depósitos, se observaron las propiedades que influyen en la movilidad, en los mecanismos de segregación e interacción de partículas y en las características de sus depósitos. Los resultados muestran que los flujos experimentales ricos en material fino recorrieron mayor distancia, pero mostraron menor velocidad en su frente y laterales, y los depósitos de menor espesor, en comparación con los flujos pobres en material fino. Asimismo, se observó que las características granulométricas también controlan el desarrollo de frentes enriquecidos en bloques, pulsos secundarios y levees. Las características morfológicas y texturales muestran una relación con la velocidad a la que ocurren los procesos de segregación de partículas dentro de los flujos.

Finalmente, la información obtenida permitió observar la relación entre las propiedades cinemáticas y los depósitos producidos, lo cual permitirá una mejor interpretación de los depósitos observados en campo.

I.2. Antecedentes

En la superficie terrestre, un flujo geológico es la deformación continua e irreversible de material geológico sometido a esfuerzo. Por lo regular, este esfuerzo es la fuerza de gravedad aplicada como esfuerzo de cizalla (Van Wazer et al., 1963). Con excepción del agua y aire, los fluidos geológicos son multifásicos, debido a que contienen una combinación de sólidos (sedimentos), líquidos (agua) y gases (aire). El comportamiento de estos fluidos, en respuesta a un esfuerzo de cizalla, está en función de las proporciones relativas de sus componentes (sedimentos, agua y aire), la distribución granulométrica del componente sólido y sus propiedades físicas y químicas. Ejemplos de este tipo de flujos son los hidrotermales, glaciares, y los flujos de agua y sedimentos (Pierson y Costa, 1987).

Pierson y Costa (1987) clasificaron los diferentes flujos de agua y sedimentos en dos tipos, con base en sus características reológicas, dependientes del porcentaje de materiales sólidos (sedimento): los líquidos y los fluidos plásticos. Los primeros son flujos diluidos de sedimento y agua como las corrientes fluviales y los flujos hiperconcentrados. Los segundos se refieren a flujos de escombros y granulares. Este trabajo trata específicamente de los flujos de escombros.

Los flujos de escombros (FE) son flujos continuos, constituidos por una mezcla de sedimento, escasamente clasificado, y agua impulsados por la fuerza de gravedad a lo largo de pendientes (Pierson y Costa, 1987). Los más grandes pueden exceder $10^9 m^3$ en volumen y liberar más de $10^{16} J$ de energía potencial; incluso flujos comunes pueden ser de aproximadamente $10^3 m^3$.

Su estudio se ha incrementado en años recientes debido a su peligrosidad, que influye en su gran velocidad, fuerza de impacto y gran alcance. Estos factores, junto con la mala previsibilidad temporal y amplia recurrencia, causan que los FE sean uno de los tipos de procesos de remoción en masa más peligrosos; ya que cobran cientos de vidas y causan millones de pérdidas económicas en todo el mundo cada año. Solamente en Japón, se registran alrededor de 90 muertes anualmente debido a los flujos de escombros (Takahashi, 1981). Un ejemplo que generó una gran catástrofe fue el flujo de escombros ocurrido en el volcán Nevado del Ruiz, Colombia en 1985, con 21 100 víctimas (Voight, 1990). Entre las pérdidas económicas que causan son el destrozamiento y/o daño de vegetación, drenajes, y estructuras (Iverson, 1997).

La reproducción de los FE mediante experimentos es de gran importancia debido a que esta técnica permite obtener un estudio detallado de dichos procesos a través de la implementación de diversas tecnologías que son difíciles de utilizar en FE naturales debido a su peligrosidad y eventualidad. A lo largo de varias décadas se han refinado este tipo de metodologías por parte de un gran número de investigadores, dentro de los que destacan Iverson et al. (2010), Johnson et al. (2012), De Haas et al. (2015) y Gordon et al. (2018).

Los experimentos realizados por Iverson et al. (2010) se distinguieron por tener diferentes condiciones de frontera del canal y contenidos de sedimentos de tamaño arcilla. A través de las mediciones del espesor del flujo, esfuerzo normal y presión de fluido de poro, demostraron que los FE, en todas las condiciones, desarrollan cabezas ricas en clastos gruesos con grandes valores de fricción; seguidas por cuerpos compuestos por mezclas de sedimento más fino y agua cercanas a el estado de licuefacción. La arcilla mejoró la movilidad del FE al mantener altas presiones de poro en el cuerpo del flujo, y la rugosidad de canal redujo las velocidades de flujo, pero no las distancias de alcance. La rugosidad tuvo este efecto debido a que promovió la agitación de los clastos y su segregación por tamaño, y por lo tanto ayudó al crecimiento de los levees laterales que canalizaron el flujo.

Por otro lado, Johnson et al. (2012) explicaron la formación de los levees laterales enriquecidos en clastos gruesos, a partir de la combinación de datos recolectados en experimentos a gran escala de FE y modelos de segregación de clastos por tamaños. El material grueso se segrega a la superficie del flujo, y es transportado al frente por cizallamiento. Dentro del frente del flujo, el material recircula en trayectorias en espiral debido a la segregación por tamaño, antes de ser desplazado a los bordes del flujo y depositado en los levees enriquecidos con clastos gruesos.

Finalmente, De Haas et al. (2015) investigaron experimentalmente los efectos de la composición de los FE en las distancias de alcance, los mecanismos de emplazamiento y las geometrías de los depósitos. El incremento en la concentración de los clastos gruesos conduce a un mayor alcance del FE. No obstante, el exceso de material grueso resulta en una mayor acumulación de clastos gruesos en el frente del flujo, y con ello aumenta la difusividad, al aumentar la fricción y reducir el alcance. El aumento en el contenido de arcilla, en un inicio, mejora el alcance; pero demasiada arcilla conduce a flujos muy viscosos que disminuyen sus alcances.

Dichos experimentos permiten calcular con precisión diversos parámetros y características, como las propiedades cinemáticas propias del flujo. La mayor parte de estos trabajos se han centrado en el estudio del comportamiento de los FE con base en el porcentaje de contenido de sedimentos. Sin embargo, existen otros criterios, entre los cuales sobresalen: la distribución granulométrica, la velocidad del frente del flujo, la resistencia crítica, y la tasa de deformación, como factores internos. En contraste, los factores externos a el flujo implican el estudio de los diferentes ambientes y mecanismos de generación, así como la morfología del terreno. Todos estos factores se deben de estudiar para delimitar, tanto las zonas susceptibles a su generación, como las áreas de inundación.

I.3. Justificación

En este trabajo se realizó el estudio de la cinemática de los FE a partir de simulaciones analógicas, este tipo de aproximación permite definir y delimitar las variables que influyen en su movimiento, transporte y sedimentación; evitando la consideración de factores externos que modifiquen las características del flujo y/o depósito. Además, permite obtener información que, por la peligrosidad y eventualidad inesperada de los FE naturales, es difícil de recabar.

El estudio de los FE permite estimar diversos parámetros y características de estos, las cuales pueden ser cinemáticas, presentes a lo largo del proceso de transporte y sedimentación, o características descriptivas del material depositado. Como características cinemáticas del flujo se encuentran las velocidades del frente y cuerpo del flujo. Mientras que las características de los depósitos se describen a partir de su textura reflejada en la distribución granulométrica, en el acomodo de clastos y el análisis morfométrico de los depósitos.

Han sido propuestos muchos métodos para la predicción de las características de los flujos y depósitos de los FE. Estos métodos dependen principalmente de la topografía del terreno y el volumen del flujo. Sin embargo, el efecto de la composición y la distribución de la mezcla de sedimentos no ha sido estudiado a profundidad; a pesar de que investigaciones reométricas con diferentes mezclas de sedimentos han demostrado que el comportamiento cinemático del flujo depende fuertemente de la sutil variación en la concentración de sólidos y la distribución granulométrica de clastos, particularmente el contenido de limo y arcilla (Thomas, 1965).

El conocimiento generado en este trabajo a través del entendimiento de la cinemática de los flujos de escombros puede ser aplicado en la interpretación de depósitos antiguos y en el desarrollo y calibración de modelos numéricos, los cuales son ampliamente utilizados para la realización de mapas de peligros por FE. Los mapas de peligros son de gran utilidad en la reducción del riesgo en poblaciones altamente expuestas.

I.4. Objetivos

I.4.1. Objetivo general

- Estudiar la relación entre el contenido de material fino y el comportamiento cinemático de los flujos de escombros a través de datos experimentales.

I.4.2. Objetivos específicos

- Relacionar el contenido de arcilla con la movilidad de los flujos de escombros.
- Relacionar las propiedades del flujo con la morfología de los depósitos experimentales.
- Estudiar la relación del contenido de material fino con procesos internos, como la segregación de partículas y el incremento en la viscosidad del flujo.

II. – MARCO TEÓRICO

II.1. Definición de flujos de escombros

Los flujos de escombros (FE) son flujos continuos de mezclas de sedimento escasamente clasificado y agua, impulsados por la gravedad a lo largo de pendientes (Pierson y Costa, 1987). Están compuestos por una fase continua y una dispersa. La fase continua consiste en una mezcla de agua y materiales finos (limo y arcilla) y la fase dispersa comprende arenas y gravas (Rodine, 1974; Hampton, 1975). Tanto las fuerzas generadas por la parte sólida como la fluida influyen fundamentalmente en el movimiento (Iverson, 1997).

La concentración total de sedimentos difiere de acuerdo con el autor, por ejemplo, Iverson et al. (1997) establecen que generalmente excede el 50% en volumen; Vallance y Scott (1997) mencionan concentraciones mayores a 60% en volumen, mientras que Costa (1984) sugiere un rango entre 25 y 86% en volumen o 35 a 90% en peso. Estas grandes concentraciones de sedimentos permiten que su resistencia a fluir aumente rápidamente, debido al inicio de la fricción interna de partículas (Rodine, 1974).

Los FE pueden contener tamaños de clastos desde arcilla hasta bloques. La mayor parte de su masa está compuesta por arena, grava y bloques, mientras que el limo y la arcilla comúnmente constituyen menos del 10% de la masa (Costa, 1984; Takahashi, 1991; Pierson, 1995; Major, 1997). Sin embargo, muchas de las distribuciones granulométricas publicadas de FE naturales son parcialmente correctas debido a la dificultad de muestrear los bloques.

Con base en el contenido de arcilla, es posible dividir los FE en cohesivos, que contienen más del 5% de arcilla, y en no cohesivos, que contienen menos del 5% de arcilla (Pierson y Scott, 1985). Comúnmente, los FE no cohesivos comienzan como flujos de agua que incorporan sedimento a través de erosionar la superficie y se transforman en flujos más concentrados; mientras que los cohesivos generalmente comienzan como avalanchas saturadas de agua que se transforman en FE.

II.1.1. Características del material

Las características del material se dividen en las propiedades de la fase sólida y de la fluida, es decir, de la mezcla de sedimento y del agua. Algunas propiedades pueden ser medidas fácilmente y con precisión en un estado estático, mientras que otras dependen de la movilidad del flujo.

Las principales propiedades mecánicas de los sedimentos son su densidad (ρ_s), diámetro característico (δ , definido como el diámetro de una esfera con el mismo volumen que el clasto), coeficiente de fricción ($\tan \Phi_g$, donde Φ_g es el ángulo de fricción de deslizamiento, que depende de la forma del clasto y la rugosidad) (Spiegel, 1967); y la fracción de volumen que ocupan (v_s) respecto al total de la mezcla, así como su distribución de tamaño de grano.

Por otro lado, las propiedades de la fase fluida de la mezcla son su densidad (ρ_f , se asume que es menor a la de la mezcla de sedimentos), viscosidad efectiva (μ), y la fracción volumétrica (v_f) que ocupa.

Finalmente, las propiedades que ligan el comportamiento del sólido y el fluido son: las fracciones volumétricas ($v_s + v_f = 1$) y la permeabilidad hidráulica k , que caracteriza la resistencia del movimiento relativo de sólidos y fluidos (Iverson y LaHusen, 1989).

Actualmente, muy pocas técnicas pueden medir con precisión estas propiedades sin que ocasionen un cambio en el comportamiento del flujo. Las mediciones en tiempo real más precisas se han conseguido en FE experimentales que no contienen sedimentos mayores a gravas (Iverson et al., 1992).

II.2. Factores generadores de flujos de escombros

Se requiere de cuatro factores que deben estar presentes simultáneamente para la generación de un FE. Estos son: una fuente abundante de roca y suelo no consolidados, una gran e intermitente fuente de agua, que el material se erosionable e inestable, y que se convierta la energía potencial gravitacional a energía cinética interna para lograr que, del movimiento de deslizamiento en una superficie fracturada localizada, se desarrolle una amplia deformación (Ellen y Fleming, 1987; Anderson y Sitar, 1995; Costa, 1984).

Las cuencas más pequeñas y con relieves abruptos tienen el potencial de presentar un mayor porcentaje de material disponible para generar un FE, debido a que se encuentran a gran altitud, con pendientes más pronunciadas (comúnmente superiores a 30°), lo que origina una mayor inestabilidad de los materiales en superficie (Costa, 1984).

Por otro lado, el agua necesaria para saturar la masa puede provenir de flujos torrenciales, cuerpos de agua, deshielo, y, en menor medida, de inundaciones repentinas por glaciares o lagos cratéricos (Costa, 1984); o incluso ya se encuentra presente en la masa cuando ocurre la caída de material y simplemente ocurre una redistribución en la presión de poro (Iverson, 1997).

La inestabilidad del material puede ser resultado de fallas individuales en la pendiente o de numerosas fallas pequeñas que se unen pendiente abajo (Johnson, 1984). Pueden ser fallas de deslizamiento o de caída (Costa, 1984). La caída del material se resiste principalmente por la fuerza de fricción de contacto entre los clastos (Mitchell, 1976) pero durante la caída, los enlaces cohesivos se rompen entonces, el ángulo de fricción del material y el esfuerzo efectivo determinan la resistencia del flujo al movimiento (Passman y McTigue, 1986). Durante este proceso la energía potencial del flujo se convierte a energía cinética, la cual es consumida por la fricción entre el material y el canal o superficie de deslizamiento, y por las deformaciones por esfuerzos en el interior (Takahashi, 1991).

II.3. Movilización de los flujos de escombros

La movilización es el proceso por el cual los FE se deforman a partir de una masa de suelo, sedimento o roca, saturada de agua, inicialmente estática (Iverson, 1997). El principal proceso responsable de que ocurra la movilización de la mayoría de los FE es la licuefacción. Cuando un bloque de roca y suelo rígido, por encima de una superficie de falla, comienza a saturarse de agua, la presión de poro aumenta y su resistencia de corte disminuye, causando que las partículas del material pierdan coherencia y la masa sea retrabajada lo suficiente para que cause cambios en su estructura. Lo anterior genera que los clastos modifiquen su comportamiento, de un bloque rígido a un flujo de fluido viscoso a través de la licuefacción espontánea (Costa, 1984).

Muchos otros FE son ocasionados por la licuefacción a través de la contracción del material provocando redistribución en la presión de poro (Sharp y Nobles, 1953; Sitar et al., 1992). Es necesario que los clastos se contraigan lo suficiente para exceder la presión de poro y lograr que la

masa se debilita (Bishop, 1973; Iverson y Major, 1986; Eckersley, 1990; Iverson et al., 1997). Asimismo, es posible que exista suficiente energía disponible para agitar la masa y se convierta de una caída de material localizada a un flujo (Jaeger y Nagel, 1992; Zhang y Campbell, 1992). Finalmente, los FE tienen suficiente resistencia elástica que presentan comportamiento plástico, es decir, forman escarpes, frentes lobulados, levees laterales, y transportan partículas del tamaño de gravas en suspensión (Pierson y Costa, 1987).

II.4. Dinámica de los flujos de escombros

Los FE generalmente se mueven pendiente abajo a través de uno o varios pulsos u oleadas inestables (Iverson, 1997), con periodos que van desde unos pocos segundos hasta varias horas (Costa, 1984). Es posible producir oleadas continuas a partir de la apertura de material contenido en alguna represa, la caída repentina de material que ha colapsado de los bancos del canal (Jahns, 1949), inestabilidades internas del flujo y la coalescencia de frentes de onda.

En FE experimentales, se ha observado que dichas oleadas se forman simultáneamente sin necesidad de alguna perturbación externa al flujo, incluso las grandes oleadas tienden a sobrepasar las oleadas más pequeñas que sucedieron antes. Además, la unión de varios frentes de onda puede producir oleadas con mayor amplitud, lo que las vuelve aún más inestables (Iverson, 1997).

II.4.1. Partes de los flujos de escombros

Los FE, con base en la variación en la descarga de material, se dividen en tres partes: cabeza o frente, cuerpo y cola (Pierson, 1986; Takahashi, 1991).

Comúnmente la cabeza o frente del flujo se forma por una descarga abrupta de material, seguido de una descarga más lenta que se reduce gradualmente, que representa el cuerpo, y una parte final, más diluida, conocida como cola (Pierson, 1986; Takahashi, 1991). Cuando ocurren múltiples oleadas en un solo FE, cada uno presenta cabeza, cuerpo y cola (Jahns, 1949; Sharp y Nobles, 1953; Pierson, 1980; Davies, 1990).

La cabeza de los flujos se caracteriza por cargar las mayores concentraciones de clastos grandes y algunos materiales como troncos de árboles, y la descarga suele ser más alta respecto a las oleadas secundarias sucesoras. Permanece relativamente seca y restringe la distribución del FE saturado cuesta abajo, debido a que la presión de poro es cercana a cero. El frente es seguido por un lodo más fluido, acuoso y turbulento con concentraciones de sedimento suspendido inusualmente altas, pero con menos bloques grandes (cuerpo) (Iverson, 1997). El cuerpo del flujo comúnmente alcanza, o incluso excede, la presión de poro necesaria para que ocurra la licuefacción de la masa del sedimento (Costa, 1984). Esta fase fluida continúa hasta que arriba la siguiente oleada o hasta que la actividad del flujo cesa, con la cola del flujo (Johnson, 1970; Pierson, 1980; Sharp y Nobles, 1953).

Las abundantes concentraciones de clastos grandes se concentran en la periferia de los flujos y depósitos, lo que hace que formen barreras de sedimentos llamadas levees. Los levees se encargan de la canalización del flujo pendiente abajo.

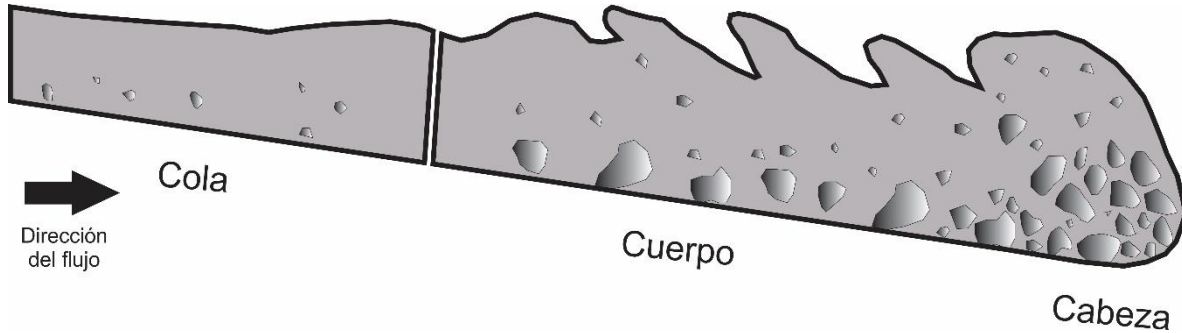


Figura II.1. Representación de un flujo de escombros. Se compone longitudinalmente de tres partes: cabeza, cuerpo y cola

II.4.2. Características de los flujos de escombros

Los FE son lo suficientemente fluidos para alcanzar grandes distancias en canales con pendientes suaves (Iverson, 1997). Generalmente siguen vías de drenaje preexistentes; pero pueden moverse pendiente abajo a través de superficies aluviales sin ningún obstáculo, debido a que a medida que fluyen tienden a construir sus propios canales debido a la formación de levees en los límites laterales del flujo (Costa, 1984).

Los FE más grandes ($\sim 10^6$ m³, Takahashi, 2014) pueden transportar clastos hasta de 10 metros, o más, de diámetro (Iverson, 1997). Los volúmenes reportados de los depósitos de FE varían desde menos de 0.1m³ (Hampton, 1972) a más de 10⁶ m³, aunque cada vez han ocurrido flujos más grandes.

Pueden tener viscosidades newtonianas tan grandes como de 1 a 8×10^3 poises (Campbell, 1975; Pierson, 1980). Las densidades aparentes medidas se encuentran en un rango de 1.40 g/cm³, para flujos de sedimentos muy fluidos (Okuda et al., 1977), hasta 2.53g/cm³, para flujos de escombros relativamente secos.

Finalmente, su velocidad varía debido al tamaño, concentración, clasificación de clastos; y a la geometría de la superficie de deslizamiento, que depende de su forma, pendiente, ancho y sinuosidad. Las velocidades observadas varían desde 0.5 a 20 m/s (Costa, 1984; Takahashi, 2014).

La movilidad de un flujo de escombros depende de la presencia de arcilla en el fluido intersticial. Un incremento de 1 – 2% de arcilla causa un cambio abrupto en la movilidad, debido a que la arcilla reduce la permeabilidad, lo que incrementa la presión de poro.

Debido a la presencia de agua de poro atrapada en la estructura de los granos; y el índice líquido es mayor que 1.0, permite que la mezcla fluya coherente y homogéneamente cuando la resistencia crítica se excede. La combinación de temperatura granular y la presión de poro en la resistencia del flujo influyen en la movilidad. El movimiento del FE genera ambos procesos: temperatura granular y presión no equilibrada de fluido de poro. A temperaturas granulares altas se mejora la habilidad de la masa a fluir, debido a que las fluctuaciones de velocidad de los clastos causan colisiones inelásticas, que permiten que la masa actúe más como un fluido que como un sólido friccional. Además, altas presiones de fluido reducen la fricción intergranular e influyen en dichas colisiones de clastos.

En FE saturados con agua, la presencia de un fluido viscoso incrementa el alcance, aunque el fluido disipe energía (Iverson, 1997). La eficiencia neta (Ec.1) describe la conversión de energía. Mientras más eficiente sea esta conversión, menos energía se degrada a formas irre recuperables como el calor; por lo tanto, el flujo alcanza mayores distancias. La eficiencia neta puede ser obtenida al resolver la igualdad entre la energía potencial total perdida durante el movimiento y la energía total degradada a formas irre recuperables por las fuerzas de resistencia. Se obtiene la relación entre la distancia horizontal desde la fuente hacia el depósito (L, metros) y la elevación vertical de la fuente del FE (H, metros) (Heim, 1932):

$$\frac{1}{R} = \frac{L}{H} \quad (\text{Ec.1})$$

R es el coeficiente adimensional de resistencia neta, el cual incorpora los efectos de fuerzas internas y externas.

Aunque se han obtenido pocas evaluaciones rigurosas del valor L/H de flujos de escombros, con ayuda de mapeo de los patrones de FE y mediciones detalladas en FE experimentales, se ha observado lo siguiente (Vallance y Scott, 1997):

- 1) L/H de FE saturados con agua excede el valor obtenido para flujos de sedimentos secos.
- 2) Los FE grandes muestran mayor eficiencia que los flujos pequeños. Según la ecuación, la masa de los FE no afectaría el alcance eficiente; sin embargo, con los experimentos realizados se ha llegado a una conclusión distinta.
- 3) L/H depende de la geometría de la trayectoria y las condiciones de confinamiento de la superficie de desplazamiento, lo cual determina el grado de erosión, sedimentación y canalización del flujo.

Algunos FE aumentan su masa pendiente abajo debido a la erosión del sustrato (Pierson et al., 1990), y otros disminuyen su concentración de sólidos, como resultado de integrar algún cuerpo de agua o de la sedimentación (Pierson y Scott, 1985). Se conoce como "bulking" al aumento de la masa o la concentración de sólidos de un FE, mientras que "debulking" se refiere a la pérdida de masa o concentración de sólidos.

La pérdida de masa durante el movimiento debería incrementar la eficiencia neta debido a que la energía potencial inicial disponible para impulsar el movimiento continua siendo la misma; mientras que, las fuerzas de resistencia aparentemente disminuyen a medida que la masa disminuye; esto ocurre solamente cuando R se mantiene constante o disminuye conforme disminuye la masa, lo cual ocurre solamente si R depende de las fuerzas internas; sin embargo, también depende de las externas que causan la pérdida de masa del flujo.

Dependiendo de la resistencia a la cizalla de los FE y los mecanismos de soporte, partículas más grandes que cantos pueden ser suspendidos en los FE. Cuando el FE se detiene, se consolida en función de la velocidad a la que el fluido de poro puede escapar. Las partículas finas y gruesas sedimentan juntas, sin ningún movimiento entre partículas.

II.4.3. Procesos internos: Segregación y transporte de clastos

Los clastos grandes se acumulan en el frente y los lados de los FE por dos razones: pueden ser incorporados y retenidos ahí, si el flujo va incorporando material durante su paso, o pueden migrar a la cabeza debido a un transporte preferencial (Iverson, 1997). Dichos procesos son explicados por el tamizado cinético (Middleton, 1970), que se refiere al transporte selectivo de clastos grandes debido a que la gravedad y el arrastre no son suficientes para colocarlos en los espacios vacíos que se forman a medida que el material se deforma, permitiendo que clastos pequeños se movilicen por los espacios vacíos hacia el cuerpo y la cola del flujo, entonces los clastos grandes se acumulen como residuo en la superficie y cabeza del flujo. La temperatura granular, que mide la intensidad de las fluctuaciones de energía y el grado de agitación de los clastos (Ogawa, 1978), favorece el tamizado cinético y la habilidad de los clastos a moverse uno tras otro.

La segregación de clastos por tamaño hace que un clasto grueso se eleve cerca de la superficie del flujo, donde la velocidad es mayor que la velocidad promedio de la cabeza del flujo. Si el clasto está suficientemente cerca del eje central del flujo, alcanza el frente del flujo donde migra a la base de este y luego es sobrepasado por material sucesivo. El clasto puede segregarse nuevamente hacia arriba, por tamizado cinético, hasta alcanzar la capa enriquecida de clastos gruesos que cubre la superficie del flujo para posteriormente, recircular dentro de la cabeza de este. Durante la recirculación, el material comienza a desviarse del plano central del flujo por la componente transversal de la velocidad. Por lo tanto, los clastos gruesos siguen trayectorias helicoidales en espiral dentro de la cabeza del flujo y progresivamente se mueven hacia los márgenes externos del flujo. Cerca de los márgenes y a lo largo de la profundidad del flujo, los clastos gruesos se mueven más lentamente que en el frente. Cuando los clastos se localizan en esta región, cesa la recirculación y se encuentran por detrás del avance del flujo. A medida que sale del frente del flujo, los clastos alcanzan la superficie de sedimentación y comienzan la formación acrecional de los levees, deteniéndose completamente (Johnson et al., 2012).

La carga de partículas en suspensión dentro de un FE es soportada a través de cinco mecanismos: cohesión, flotación, presión dispersiva, turbulencia y soporte estructural. Todos estos mecanismos pueden actuar en mayor o menor manera durante el FE, pero solamente la cohesión, flotación y soporte estructural actúan cuando recién se han depositados los sedimentos. En FE rápidos y dinámicos actúan la presión dispersiva, y/o la turbulencia, en conjunto con la flotabilidad y la cohesión (Iverson, 1997 y Johnson et al., 2012).

- **Cohesión** - La cohesión de los FE ha sido propuesto como el principal mecanismo de soporte de clastos (Johnson, 1970; Hampton, 1975; Rodine y Johnson, 1976). La resistencia cohesiva en el soporte de partículas sólidas depende de la cantidad de arcilla presente en los flujos, por ejemplo, cuando se presenta menos del 8% de contenido de arcilla en el flujo, solamente es posible suspender partículas de tamaño arena, mientras que los bloques más grandes son transportados por otro tipo de mecanismo.

- **Flotación** - Es la fuerza que actúa en un bloque, igual al peso del material que desplaza en el flujo (Rodine y Johnson, 1976; Hampton, 1979). Se determina por la diferencia de densidad entre los clastos y el fluido. La matriz de grano fino evita la rápida disipación de la presión de poro generada por el peso de los bloques transferido al fluido, aumentando la flotabilidad en el flujo (Hampton, 1975). Esto también reduce la resistencia de cizalla e incrementa

la movilidad. La flotabilidad puede soportar alrededor del 75 – 90% del peso de las partículas presentes (Costa, 1984).

- Presión dispersiva - Se refiere al esfuerzo ascendente de las partículas más grandes que se mueven en un flujo, con una gran concentración de clastos mal clasificados. Este ascenso es ocasionado por la fuerza que se transmite entre partículas en colisión, de manera que se desplazan unas sobre otras (Bagnold, 1954). Las fuerzas dispersivas actúan con más fuerza sobre las partículas más grandes, forzándolas a alejarse de las zonas de cizallamiento máximo, cerca del sustrato del canal. Las partículas gruesas suelen migrar al frente y arriba de los FE (Costa, 1984).

- Turbulencia - Es la variación en dirección y magnitud de los vectores de velocidad con el tiempo. La turbulencia es una componente importante en el transporte de agua y arrastre de sedimentos. A medida que el material de grano fino es agregado a los flujos, la velocidad disminuye, y con ello la turbulencia (Graf, 1971). Algunas evidencias sedimentológicas que avalan el transporte de flujos de forma laminar se refieren a la estructura de los clastos, preservación de clastos frágiles, grandes rocas sobresalientes sobre la superficie de los depósitos, y ausencia de pipas en sedimentos asociados a FE (Enos, 1977).

- Soporte estructural - Se refiere a una estructura de granos en contacto con el sustrato y entre ellos. Los efectos del soporte estructural comienzan cuando la concentración volumétrica de sedimentos está entre el 35 y 58% (Pierson, 1981), y soporta aproximadamente 1/3 del peso de las partículas gruesas.

La importancia de cada uno de los mecanismos de soporte de partículas depende de las propiedades físicas de los FE.

II.5. Emplazamiento de flujos de escombros

El emplazamiento de los FE ocurre cuando toda la energía cinética se degrada a formas irrecuperables. Esta condición se cumple en el momento en que la temperatura granular de los grandes clastos localizados en los frentes y márgenes laterales se vuelve cero. Estos clastos típicamente forman elevaciones que impiden el flujo y, eventualmente, detienen el movimiento de la siguiente oleada enriquecida de clastos más finos. Sin embargo, alternativamente pueden presentarse oleadas más móviles con suficiente momento para sobrepasar la barrera de escombros previamente depositados (Iverson, 1997). Así, los depósitos pueden desarrollarse mediante la combinación de varios mecanismos de sedimentación de material, como son: empuje hacia la dirección del flujo, acreción vertical, acomodo lateral, erosión de sedimento previamente depositado, así como depositación en masa (Major, 1997).

Los depósitos de FE comúnmente se caracterizan por ser sedimentos con una distribución de tamaño de bloques uniforme soportados en una matriz no consolidada, que contiene grandes cantidades de sedimento de grano más fino (Costa, 1984). La matriz del flujo también puede contener materiales livianos como madera, fragmentos de corteza, etc (Sharp y Nobles, 1953).

Los depósitos pueden tener estructura interna masiva dentro de unidades individuales, interpretadas como una sola oleada, aunque también pueden contener sedimentos elongados fuertemente alineados paralelamente a la dirección principal del flujo, los cuales son indicativos de un flujo laminar o incluso, algunos depósitos, presentan gradación inversa (Schmincke, 1967), que se forma debido a la pequeña diferencia de densidad entre los clastos y el fluido, las fuerzas de flotación de la matriz y las presiones dispersivas (Fisher, 1971). Además, llegan a presentar características internas del lecho sobre el que se desplazan, y se sobreponen fácilmente en materiales erosionados (Fisher, 1971). Los contactos entre los FE y los materiales subyacentes tienden a ser agudos y bien definidos (Costa, 1984). Es común encontrar abundantes vesículas, formadas al incorporar aire al flujo a medida que se desplaza corriente abajo. Finalmente, la presión de poro decae y comienza la sedimentación gravitacional de los clastos finos en la parte interna del depósito (Iverson, 1997).

A medida que los FE fluyen cuesta abajo, las fuerzas dispersivas causan la migración de los clastos gruesos a los márgenes del flujo, formando un lóbulo rico en clastos gruesos. Posteriormente pasan oleadas secundarias del flujo (cuerpo) que cortan y empujan hacia los lados el lóbulo anterior, dejando los distintivos levees (Sharp, 1942). Los flujos continuarán pendiente abajo hasta que depositen la mayor parte de su masa.

La resistencia del material y las concentraciones de material gruesos en los márgenes del flujo permiten la formación del frente y lados con bordes abruptos, creando lóbulos de espesor finito sobre un terreno inclinado. Por lo tanto, los depósitos de FE frecuentemente son en forma de lóbulos con frentes empinados, secos y con grandes concentraciones de bloques en las zonas distal y bordes laterales del depósito, mientras que en el interior son húmedos y suaves con poca concentración de bloques grandes (Costa, 1984).

El área de los depósitos está controlada por el volumen, la fuerza del flujo y la pendiente de la superficie de sedimentación (Costa, 1984). Takahashi (1981) determinó experimentalmente que el ángulo para que ocurra la sedimentación de los FE es función de la concentración volumétrica de clastos, la densidad del fluido y del sólido, el tamaño de partícula, la profundidad del flujo y el ángulo de fricción interna. Algunos depósitos pueden alcanzar espesores de 0.3 a varios metros en su zona media (Pierson, 1980) y suele disminuir el espesor corriente abajo (Costa, 1984).

II.6. Modelos aplicados al estudio de los flujos de escombros

El análisis del comportamiento de FE se realiza a través de modelos que implican algunas simplificaciones en estos sistemas. Primero, se consideran como flujos continuos con un esfuerzo de corte infinito, de mezclas de sedimentos uniformes compuestos por clastos, de densidad y tamaños idénticos y agua. En estos sistemas surgen varias formas de esfuerzo, como: esfuerzo de corte y normal de los sólidos y del fluido, así como el esfuerzo generado por la interacción entre los sólidos y fluidos. Los procesos de interacción entre ambas fases se traducen en esfuerzos colisionales, friccionales y viscosos.

Para estudiar las relaciones entre los diferentes tipos de esfuerzos se utilizan parámetros adimensionales que permiten establecer cómo ocurre el transporte de momento, y con ello, clasificar los FE e identificar los límites entre los tipos de comportamientos. Los parámetros que describen los esfuerzos adimensionales son: número de Savage, de Bagnold, másico, Reynolds granular, y de fricción (Iverson, 1997).

El número de Savage (Ec. 2) se define como la relación del esfuerzo de corte inercial, debido a las colisiones entre partículas, y esfuerzo de corte cuasiestático, asociado con el peso y la fricción de la masa granular:

$$N_{Sav} = \frac{\dot{\gamma}^2 \rho_s \delta^2}{(\rho_s - \rho_f) g H \tan \Phi} \quad (\text{Ec.2})$$

El número de Bagnold (Ec. 3) hace referencia a la relación entre el esfuerzo inercial de las partículas y el esfuerzo de corte viscoso:

$$N_{Bag} = \frac{v_s}{1 - v_s} \frac{\rho_s \delta^2 \dot{\gamma}}{\mu} \quad (\text{Ec. 3})$$

El número másico (Ec. 4) describe la relación de la inercia de las partículas y del fluido en la mezcla:

$$N_m = \frac{v_s}{1 - v_s} \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad (\text{Ec. 4})$$

Se pueden obtener más números adimensionales a través de la relación de los anteriores parámetros. Por ejemplo, el número de Reynolds granular y el de fricción.

El número de Reynolds granular (Ec. 5) se caracteriza por relacionar el número de Bagnold y el número másico. Compara los efectos producidos por las colisiones de partículas y la viscosidad del fluido, a través de la relación de esfuerzo de corte inercial de las partículas y el viscoso del fluido:

$$N_{Rg} = \frac{N_{Bag}}{N_m} = \frac{\rho_f \dot{\gamma} \delta^2}{\mu} \quad (\text{Ec. 5})$$

La relación entre el número de Bagnold y el número de Savage forman el número de fricción (Ec. 6), el cual expresa la relación entre el esfuerzo de corte generado por los contactos de las partículas y el esfuerzo de corte viscoso. Caracteriza el esfuerzo entre dos distintas fases, sólida y fluida:

$$N_{Fric} = \frac{N_{Bag}}{N_{Sav}} = \frac{v_s}{1 - v_s} \frac{(\rho_s - \rho_f) g H \tan \Phi}{\dot{\gamma} \mu} \quad (\text{Ec. 6})$$

La definición de cada variable física y sus unidades se expresan en la siguiente tabla.

Tabla II. 1. Variables físicas de el análisis dimensional

Variable física	Definición	Unidades físicas
$\dot{\gamma}$	Velocidad de esfuerzo de corte	1/s
ρ_s	Densidad másica de los sedimentos	kg/m ³
ρ_f	Densidad másica del fluido	kg/m ³
δ	Diámetro característico	m
g	Magnitud de la gravedad	m/s ²
Φ	Angulo de fricción aparente, de la masa	°
v_s	Fracción volumétrica de los sólidos granulares	Sin unidades
μ	Viscosidad dinámica del fluido de poro con sedimentos finos suspendidos	Pa.s
H	Espesor del flujo	m

Los parámetros adimensionales anteriores distinguen cinco procesos de transporte en un flujo (Iverson y Denlinger, 1987):

1. Colisiones inerciales entre granos
2. Fricción por el contacto entre partículas
3. Corte viscoso
4. Fluctuaciones inerciales (turbulentas) de velocidad en el fluido
5. Interacciones entre sólido y fluido

Todos estos procesos afectan las relaciones esfuerzo en los flujos de escombros que influyen en su movimiento. Los clastos pueden unirse por efectos de fricción mientras el flujo se moviliza desde una masa estática o cuando forma un depósito estático (Zhang y Campbell, 1992). Además, una parte del FE puede moverse dominado por colisiones y en otras partes puede ser por fricción.

Durante el régimen colisional, la interacción entre los clastos es breve, ocasionando impactos rápidos y de baja energía, cada clasto presenta trayectorias libres y bien definidas entre un contacto y otro. Por otra parte, el régimen de fricción se caracteriza por que la mayoría de los clastos están en contacto casi continuo con los clastos a su alrededor, se presentan esfuerzos de corte elevados y paralelos a la dirección del flujo, que genera presiones elevadas (Drake, 1990).

A través del análisis de un gran número de experimentos, Savage y Hutter (1989) concluyeron que los esfuerzos de colisión entre clastos dominan sobre los esfuerzos de fricción en un flujo granular seco, siempre que el N_{Sav} sea mayor que 0.1. Además, los experimentos de Bagnold (1954) demostraron que, en una mezcla de granos esféricos y líquido, el esfuerzo colisional domina sobre el esfuerzo viscoso si el N_{Bag} es mayor a 200.

Las fuerzas de fricción dominan sobre las viscosas para $N_{Fric} > 2000$. Sin embargo, Parsons et al. (2001) sugieren que las fuerzas de fricción comienzan a dominar las fuerzas viscosas con $N_{Fric} > 100$ para el cuerpo del flujo y $N_{Fric} > 250$ para el frente, en FE experimentales de pequeña escala saturados de agua.

Respecto a el N_m , la inercia de los granos comienza a perder importancia a medida que la densidad o la concentración de los clastos se acerca a cero. Con esta condición, el número de masa se vuelve más pequeño e influye más en la inercia del fluido. Adicionalmente, cuando el $N_{Rg} > 1$, el fluido comienza a mostrar efectos de inercia y se desvía significativamente de un comportamiento ideal viscoso (Vanoni, 1975).

Para flujos delgados y rápidos en pendientes pronunciadas, como los realizados en la USGS (Iverson, 1997), las altas tasas de deformación causan que el N_{Sav} y el N_{Bag} sean grandes con respecto a los obtenidos en flujos de escombros naturales. Con ello, se espera que las colisiones entre los clastos transmitan la mayor parte del esfuerzo en este tipo de flujos, pero la fricción y la viscosidad también pueden llegar a contribuir. Son flujos con comportamiento colisional (domina la colisión sobre la fricción y la viscosidad). Mientras que, para flujos con mayor espesor y bajas tasa de deformación, se obtienen valores N_{Sav} y N_{Bag} menores que indican que los esfuerzos colisionales no son significativos y el flujo es dominado por la fricción y la viscosidad. Los grandes valores en el N_{Fric} sugieren que el esfuerzo de cizalla de fricción probablemente excede el esfuerzo de cizalla viscoso (Iverson, 1997).

Es importante recordar que las relaciones de esfuerzo establecidas cambian a lo largo del transporte de los FE debido a que el tamaño de clastos dista mucho entre la cabeza, el cuerpo y/o la cola del flujo. Si la tasa de deformación es constante y el tamaño de partículas aumenta, el incremento de la fricción domina sobre la viscosidad, pero si las colisiones aumentan, entonces domina la fricción. Así, un FE puede tener regiones donde diferentes tipos de transporte de momento dominan sobre otros procesos.

II.7. Comportamiento reológico de los flujos de escombros

La reología en los FE, que es gobernada principalmente por la concentración de sedimentos, también es afectada por la distribución de granulométrica de los sólidos y de sus propiedades físicas y químicas. Las fuerzas viscosas controlan el comportamiento del flujo cuando el contenido de limo y arcilla del flujo es alto o la tasa de corte, y/o cuando el diámetro medio y densidad de los clastos, así como el contenido de agua son bajos (Bagnold, 1954). Bajo estas condiciones se utilizan las ecuaciones constitutivas del modelo Bingham plástico para predecir el comportamiento del flujo (Thomas, 1965; Johnson, 1970; Bird et al., 1982). A este tipo de flujos se les conoce como flujos de escombros viscosos. Por otro lado, cuando la viscosidad del fluido de poro y la tasa de corte son bajos, el diámetro medio, la densidad de los clastos, y el contenido de agua son suficientemente altos, dominan las fuerzas inerciales. Estos flujos se conocen como flujos de escombros inerciales y las ecuaciones constitutivas que predicen su comportamiento se basan en el modelo de fluido dilatante (Takahashi, 1978). Es posible determinar la transición entre un flujo inercial y uno viscoso a través del número de Bagnold, que relaciona el esfuerzo inercial sobre el viscoso (Bagnold, 1954).

El modelo de Bingham se puede generalizar para permitir que la resistencia crítica dependa de la fricción de Coulomb; y la viscosidad pueda depender de la tasa de deformación. Sin embargo, la aplicación de este modelo asume viscosidades, límites elásticos fijos y flujos estables y uniformes (Fink et al., 1981). Si esto ocurre, entonces la resistencia debería incrementar a medida que el contenido de finos en el flujo de escombros incrementa. En experimentos de pequeña escala con mezclas compuestas únicamente de sedimento fino y agua se produce este comportamiento

(Johnson, 1970; O'Brien y Julien, 1988; Major y Pierson, 1992). Sin embargo, los experimentos de gran escala con mezclas predominantemente de arena, gravas y agua, con un bajo porcentaje de sedimentos finos (comparable con la mayoría de los flujos de escombros naturales) muestran que el incremento en el contenido de sedimentos finos disminuye el espesor de los lóbulos y aparentemente el esfuerzo, debido a que los finos ayudan a sostener altas presiones de poro, lo que reduce la resistencia por fricción y propagación de los lóbulos (Major, 1996).

Observaciones de campo y laboratorio han otorgado evidencia que asegura que el aumento en la concentración de sedimentos en un flujo de escombros inhibe la turbulencia del flujo (Bagnold, 1954). Además, Nordin (1963) reportó que la distribución granulométrica también afecta la turbulencia. Si un flujo de escombros contiene mucho sedimento fino, como arcilla y limo, la viscosidad en el fluido intersticial comienza a ser muy grande y la turbulencia es necesariamente suprimida. Entonces el efecto de la colisión de partículas comienza a ser mínima y se dispersan a través de un mecanismo laminar (Phillips et al., 1991). Así el mecanismo común entre los flujos de escombros inerciales y viscosos es solamente la flotabilidad.

Por otro lado, Johnson (1970) reportó que los flujos de escombros se mueven de manera laminar, y el transporte y suspensión de grandes clastos es debido a la alta densidad y alto esfuerzo de cizalla, en lugar de la turbulencia. En términos del número de Reynolds, la turbulencia está gobernada por la razón entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Por lo tanto, el aumento en la concentración de los sedimentos incrementa la viscosidad, y por consecuencia la turbulencia es inhibida.

III. - METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los materiales y el procedimiento realizado para estudiar los flujos de escombros (FE). Para realizar los experimentos analógicos se utilizó como instrumento la canaleta experimental GRANFLOW-SIM perteneciente al laboratorio de Análisis de Imágenes y Modelado Analógico (LAIMA) del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

III.1. Descripción de arreglo experimental

Con el fin de conocer la influencia del contenido de arcilla en el comportamiento cinemático y cómo se refleja en los depósitos de FE, se realizaron 5 experimentos con diferentes concentraciones de arcilla (Tabla III.1). A continuación, se describe el arreglo experimental de la canaleta GRANFLOW-SIM y de los experimentos realizados con diferentes tipos de mezclas.

Para todos los experimentos se establecieron las mismas condiciones geométricas de la canaleta (inclinación y rugosidad del sustrato). La inclinación del canal fue de 35°, mientras que la unidad de sedimentación tuvo una inclinación de 4° (Tabla III.1); ambas partes estaban forradas con plástico Pirelli para simular la rugosidad de canales naturales.

Otras condiciones que se mantuvieron fijas se relacionan con las características del material (composición y densidad). El volumen total de mezcla fue de aproximadamente 0.030m³ (entre 43.38 y 50.36 kg). El contenido de sedimento varió entre 30 y 35.16 kg de sedimento; mientras que el de agua fue entre 11.59 y 16.15 L. Estos contenidos son equivalentes a concentraciones de sedimento en un rango de 65 a 73.41 porcentaje en peso (wt%) (Tabla III.1) y se establecieron con base en los límites de Atterberg.

Las mezclas de material sólido se distribuyeron granulométricamente en tres modas: grava, arena y arcilla; tomando como referencia la distribución granulométrica del depósito del flujo de escombros Pilcaya. (Tabla III.2 y Figura III.1, Capra y Macías, 2000). Esta distribución granulométrica es polidispersa y con un alto contenido de arcilla, características que se observan en los FE cohesivos. Los experimentos se dividieron respecto al contenido de arcilla, con el objetivo de relacionar la variación de los resultados únicamente con el contenido de material fino (Tabla III.1 y III.2). Las mezclas de los experimentos contenían 0, 3.77, 4.16, 7.54 y 15.00 wt% de arcilla.

Tabla III.1. Arreglo experimental de canaleta GRANFLOW-SIM y concentraciones de sedimento-agua presentes en los experimentos.

Experimento	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5
Características canaleta					
Inclinación de canal (°)	35°				
Inclinación de unidad de sedimentación (°)	4°				
Características mezcla					
Peso total de mezcla (kg)	43.59	48.02	50.36	43.38	46.15
Peso total de sedimento (kg)	32.00	32.82	35.16	30.01	30.00
Peso total de agua (kg)	11.59	15.20	15.20	13.37	16.15
%wt sedimento	73.41	68.35	69.82	69.17	65.00
%wt agua	26.59	31.65	30.18	30.83	35.00
Contenido de arcilla (%wt)	0.00	3.77	4.16	7.54	15.00

*wt% = porcentaje en peso del total.

Tabla III.2. Distribución granulométrica inicial de los experimentos.

Experimento	Ex1		Ex2		Ex3		Ex4		Ex5	
	PI (kg)	wt%	PI (kg)	wt%	PI (kg)	wt%	PI (kg)	wt%	PI (kg)	wt%
-3	3.990	12.46	3.613	11.01	3.990	11.35	3.160	10.53	2.400	8.00
-2	5.280	16.49	5.193	15.82	5.280	15.01	4.740	15.79	4.135	13.78
-1	3.990	12.46	3.613	11.01	3.990	11.35	3.160	10.53	3.000	10.00
0	2.990	9.34	2.613	7.96	2.990	8.50	2.160	7.20	1.800	6.00
1	3.990	12.46	3.613	11.01	3.990	11.35	3.160	10.53	2.400	8.00
2	5.570	17.40	5.193	15.82	5.570	15.84	4.740	15.79	4.135	13.78
3	3.990	12.46	3.613	11.01	3.990	11.35	3.160	10.53	3.300	11.00
4	2.200	6.93	2.393	7.29	2.390	6.80	2.420	8.06	2.230	7.43
5	-	-	0.879	2.68	0.880	2.50	0.610	2.03	1.220	4.07
6	-	-	0.363	1.11	0.360	1.03	0.252	0.84	0.505	1.68
7	-	-	0.151	0.46	0.150	0.43	0.105	0.35	0.211	0.70
8	-	-	0.118	0.36	0.120	0.34	0.082	0.27	0.165	0.55
9	-	-	1.463	4.46	1.460	4.16	2.260	7.54	4.500	15.00

*PI= Peso individual (kg), wt%= Porcentaje en peso del total.

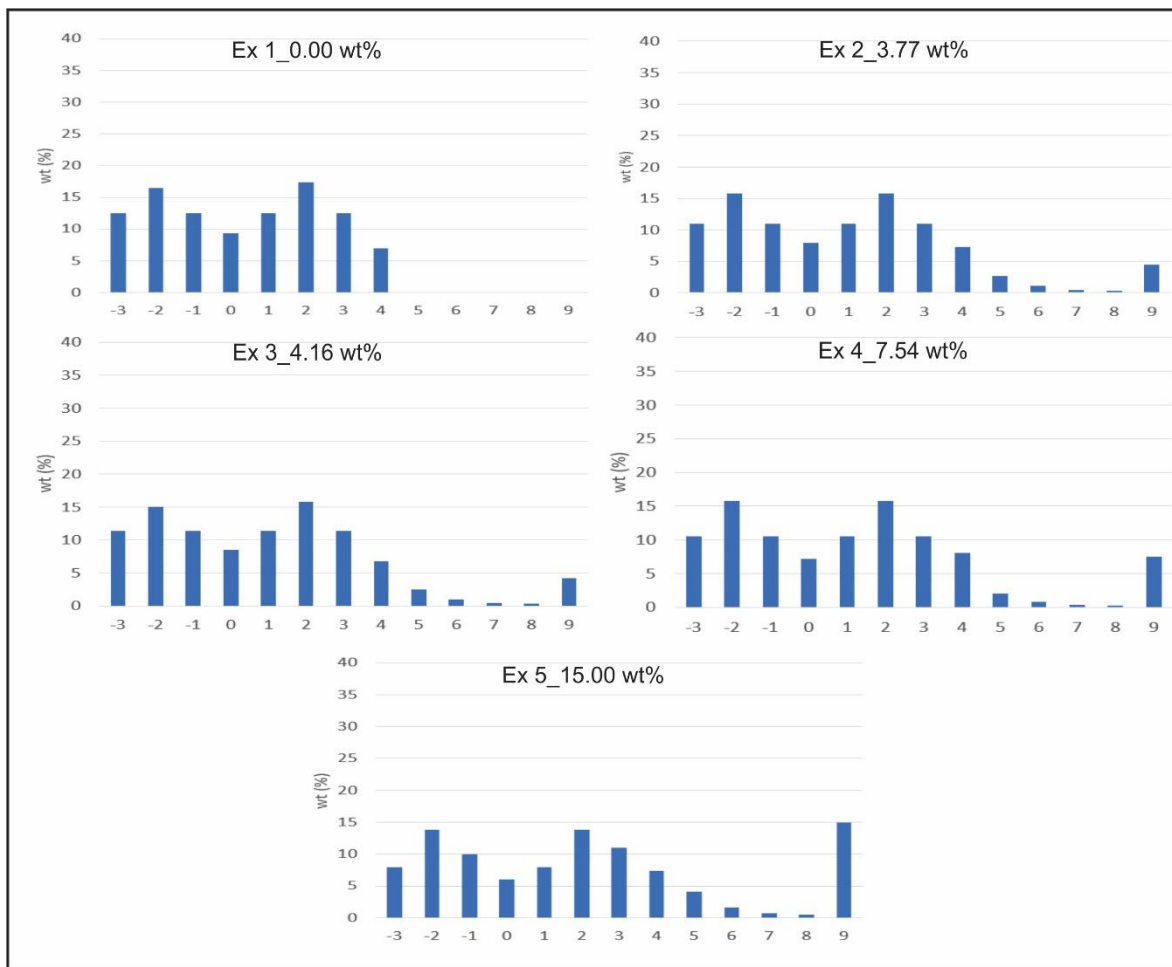


Figura III.1. Histogramas de distribuciones de frecuencias granulométricas de las mezclas utilizadas en los experimentos. Se expresa el contenido (wt%) de arcilla.

III.2. Características del material

Se realizaron 5 experimentos utilizando mezclas con distribución granulométrica trimodal. Cada mezcla contenía material de tamaño grava, arena, limo y arcilla, para recrear condiciones parecidas a FE en la naturaleza. El material sólido >8 phi fue colectado en depósitos de flujos de bloques y cenizas del volcán Nevado de Toluca (D'Antonio, 2008) y la arcilla (9 phi) empleada fue caolín comercial. Los tipos de materiales fueron caracterizados por tamaño y composición a través de tamizado en seco, para las fracciones gruesas, y método sedimentográfico, para las fracciones finas. La composición del caolín se obtuvo por difracción de rayos X.

III.2.1. Caracterización de la fracción >8 phi.

El material de tamaño grava, arena y limo fue colectado del depósito de flujo de bloques y ceniza, con una edad aproximada de 13 ka, que aflora en la localidad de El Refugio, ubicada en el sector noreste del volcán Nevado de Toluca (D'Antonio, 2008).

El estudio de tamaño de partícula de la fracción limosa fue realizado en el Laboratorio de Física del Suelo perteneciente al Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) del Instituto de Geología de la UNAM. La distribución granulométrica del limo (5 a 8 phi) se obtuvo con el método de la pipeta sugerido por Folk (1974). La medición se realizó en una pipeta de 25 mL a distintos intervalos de medición (5 phi = 1.25 min, 6 phi = 7.05 min, 7 phi = 14.30 min, 8 phi = 59.30 min y 9 phi = 3 hrs 59 min 45 seg). Se utilizaron 10 g de material disperso en una columna de agua de 1000 mL. Se agregaron 10 mL de hexametáfosfato de sodio ($(NaPO_3)_6$, 50g/L) como dispersante. La figura III.2 muestra una moda significativa en 5 phi, dicho valor corresponde a tamaño de limo grueso.

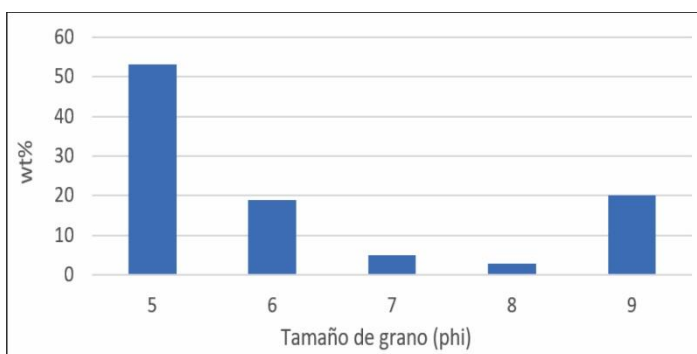


Figura III.2. Histograma de distribución de frecuencia de tamaño de partícula de fracción limosa.

III.2.2. Caracterización de arcilla.

El caolín utilizado fue analizado en el Laboratorio de Difracción de Rayos X del LANGEM. Se realizó un análisis de identificación de fases de muestra total y fracción arcilla. Los difractogramas se obtuvieron en un Difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de Fe, tubo de cobalto de foco fino y detector PIXcel3D. La identificación se realizó utilizando el software HighScore (PANalytical) y las bases de datos ICSD (Inorganic Crystal Structure database) e ICDD (International Center for Diffraction Data). La medición se realizó en el intervalo angular 2θ de 4° a 70° , en escaneo con un paso de 0.003° y un tiempo de integración de 40 s por paso. Se identificaron cuatro fases presentes en la muestra total. La muestra se compone de 36% de caolinita 1A ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), 33% de zeolita de tipo heulandita-clinoptinolita, 6% de tridimita (SiO_2) y 25% de filosilicatos de

tipo esmectita. La fracción arcillosa contiene caolinita y arcilla expansible tipo esmectita. Es congruente encontrar otras fases minerales, debido a que el caolín es un recurso mineral de donde surgen materiales como zeolita.

El estudio de tamaño de partícula fue realizado en el Laboratorio de Sedimentología Volcánica del Instituto de Geofísica de la UNAM. Los histogramas de frecuencia de tamaño de partícula se obtuvieron usando el Analizador láser de Partículas FRITTSCH "Analysette 22", y el estándar F-500 (Compact: 0.3 – 300 μm). La medición se realizó por vía húmeda en el intervalo completo de medición (0.3 – 300 μm), con 7.00% de absorción de material, velocidad de agitación 2 y el ultrasonido encendido. Se utilizó una traza de Pirofosfato de Sodio ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) como dispersante.

Se seleccionó el modelo Fraunhofer para calcular el diámetro de las partículas. La figura III.3 muestra una distribución bimodal con modas en 5 y 8 phi, dichos valores corresponden a tamaño de limo grueso, y el límite entre limo muy fino y arcilla, respectivamente. La muestra tiene un valor de diámetro medio aritmético de 22.591 μm , tamaño que corresponde a limo medio.

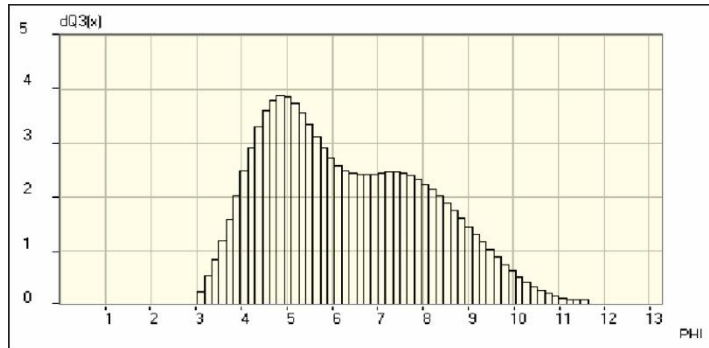


Figura III.3. Histograma de distribución de frecuencia de tamaño de partícula de caolín comercial.

III.3. Canaleta experimental GRANFLOW-SIM

La canaleta experimental GRANFLOW-SIM (Granular Flow Simulator) (Figura 3.4) sirvió como herramienta para la generación de FE experimentales realizados durante la elaboración de esta tesis. El equipo completo pesa alrededor de 2 toneladas y ocupa un espacio de 10 m de largo, 5 m de ancho y 7 m de alto. Para este trabajo se utilizaron los módulos que, desde la parte superior a la inferior, son los siguientes:

- 1) Torre de soporte
- 2) Contenedor de material
- 3) Canal
- 4) Unidad de sedimentación

Además, la canaleta está equipada con una red de sensores y cámaras de video conectados a un sistema de control electrónico.

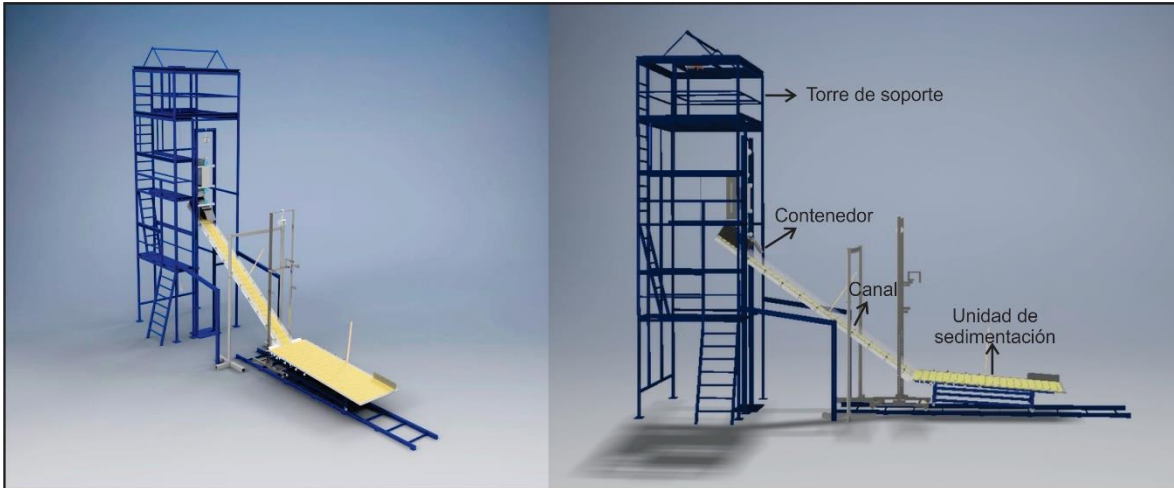


Figura III.4. Estructura de la canaleta experimental GRANFLOW-SIM en perfil y oblicuo. Se señalan los módulos que la conforman: torre de soporte, contenedor, canal y unidad de sedimentación.

III.3.1. Estructura

Torre de soporte

La torre de soporte es una estructura metálica de base cuadrada de 2 m de lado y 7 m de altura (Figura III.4). Está sujeta al edificio por varios puntos de apoyo, por ejemplo: se sujeta al piso por placas atornilladas con taquetes, y de cada lado de la torre, surgen 4 cables de acero que se fijan a placas de acero empotradas en las paredes. La torre de soporte está dividida en tres pisos, unidos entre sí, para acceder a diferentes partes de la estructura. La torre sostiene la parte superior del canal, el contenedor de material, los sistemas de poleas, que permiten el cambio de inclinación de la canaleta, y el sistema de poleas eléctrico que permite el ascenso del material hasta el último piso donde se abastece el contenedor.

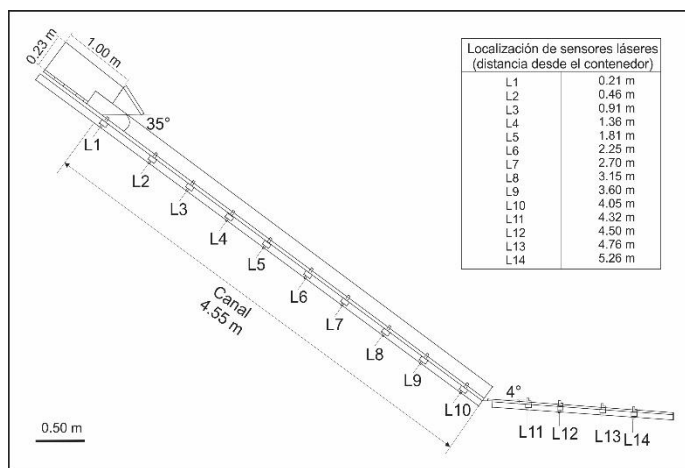
Contenedor de material

El contenedor de material es un recipiente de PVC en forma de prisma cuadrangular, con 23 cm de cada lado y 100 cm de altura, el cual puede contener 53 dm³ de material (Figura III.4 y III.5). Se colocó el contenedor alineado sobre el plano inclinado de la canaleta, dejando libre la pared superior del contenedor, donde se tiene un espacio cuadrangular abierto que permite el ingreso del material. La pared frontal del contenedor funge como puerta que permite la liberación del material al canal, la cual se cierra y abre a través de un electroimán que recibe señales desde el sistema de control electrónico. La puerta está sujeta a un resorte en la parte externa que la mantiene abierta mientras el material se libera.

Canal

El canal es un plano inclinado de metal con 30 cm de ancho y 4.55 m de longitud (Figura III.4 y III.5) y es sostenido por una estructura metálica. Cuenta con dos postes de soporte en la parte central y alta, los cuales son puntos críticos necesarios para brindar estabilidad al plano inclinado. Además, cuenta con dos soleras en la parte inferior que le dan un mejor soporte y ayudan a evitar la propagación de vibraciones producidas por el impacto del material en el canal.

El canal se conecta en la parte inferior con la unidad de sedimentación por medio de una bisagra de acero soldada en ambas partes, lo que permite que ambos módulos se encuentren siempre alineados. Por el extremo opuesto, está anclado a un sistema de poleas y rodillos giratorios que permiten modificar su inclinación. La polea se encuentra en la torre de soporte, y la cadena permite un recorrido vertical de 3 metros.



Al igual que en la unidad de sedimentación, la estructura del canal se encuentra cubierta por piso Pirelli, con el fin de simular la rugosidad natural del terreno.

Figura III.5. Esquema en perfil del canal. Se observa el contenedor de material y la localización exacta de los interruptores ópticos.

A lo largo de todo el canal se tienen paredes de vidrio de 15 cm de alto, con excepción de la parte cercana al contenedor de material, donde son de 25 cm de altura, para evitar pérdidas de material. De los lados externos a las paredes de vidrio se tienen algunos centímetros libres de la placa de metal suficientes para colocar y sujetar los distintos sensores empleados a lo largo de la canaleta y la unidad de sedimentación.

Unidad de sedimentación

La unidad de sedimentación corresponde a una superficie de metal de 1.2 m de ancho y 2.44 m de largo (Figura III.4 y III.6). Se encuentra soportada sobre una estructura metálica en forma de prisma rectangular abierta, es decir, solo las aristas del prisma están reforzadas por distintos travesaños. En la parte inferior cuenta con cuatro llantas de hule posicionadas en cada esquina de la estructura y, a la vez, sobre dos rieles de acero alineados.

La inclinación de la unidad de sedimentación se modifica a través de dos soportes en la parte inferior que son ajustados con tornillos niveladores a la misma distancia. Este mecanismo permite que pueda tener una inclinación desde 4° a 20°.

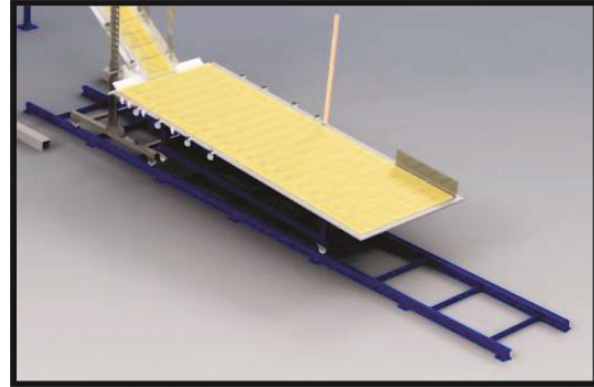


Figura III.6. Vista oblicua de la unidad de sedimentación sobre riel de acero que permite su movimiento.

III.3.2. Red de sensores y cámaras de video

Los sensores instalados a lo largo de la canaleta GRANFLOW-SIM permiten obtener los parámetros físicos de los experimentos realizados en ella. En total se tienen instalados 14 interruptores ópticos y 4 cámaras de video. Todos los sensores son administrados por un sistema de control.

Los interruptores ópticos son barreras láser conformadas por pares de emisores láseres y fotodiodos que permiten medir la velocidad en el frente del flujo. Son estructuras de PVC atornilladas a la canaleta; de un lado de la canaleta se tiene colocado un emisor láser que emite un haz de luz monocromático y coherente dirigido al otro extremo donde es detectado por un fotodiodo. El paso del material es registrado debido a la interrupción del haz en un tiempo exacto. De los 14 interruptores ópticos colocados en la canaleta, 10 se encuentran distribuidos a lo largo del canal y 4 a lo largo de la unidad de sedimentación. Las posiciones donde se localizan los interruptores ópticos se muestran en la figura III.5.

Las cámaras de video permiten estudiar procesos internos del flujo en tiempo real, como la formación del frente principal y los pulsos secundarios, formación de levees, y la segregación de partículas. La canaleta GRANFLOW-SIM cuenta con una cámara de alta velocidad y 3 cámaras de velocidad mediana. Las cámaras se activan mecánicamente a través de disparadores automáticos sincronizados cuando el material es detectado por alguna de las barreras láser.

La cámara de alta velocidad es marca Fastec IL5, que graba a 1200 fotogramas por segundo (FPS) a una resolución HD (1080 x 1220 píxeles). Está colocada paralelamente a la unidad de sedimentación, entre los láseres L12 y L13, sobre un soporte profesional. Se encuentra a una distancia de 50 cm de la unidad de sedimentación, lo que permite obtener un amplio cuadro para la grabación de la mayor parte del flujo en perfil. Adicionalmente, hay dos cámaras Nikon 1 (una J1 y otra S1), que graban a 400 FPS (640 x 240 píxeles), colocadas sobre la unidad de sedimentación entre los láseres L12 y L13, y L13 y L14, respectivamente, lo que genera grabaciones con mayor acercamiento y detalle del flujo en perfil.

Finalmente, se cuenta con una cámara GoPro Hero 4 silver edition, que graba a 30 FPS (720 x 1280 píxeles). Se encuentra colocada sobre un soporte metálico sujeto a la canaleta sobre la unidad de sedimentación, para obtener un cuadro de grabación del flujo en planta.

III.3.3. Sistema de control

El sistema de control se divide en dos secciones, por las acciones que realiza, las cuales son: adquisición de datos y control de sensores de manera simultánea.

La adquisición de datos se realiza en dos tarjetas electrónicas que se encargan de adquirir las señales generadas por la red de interruptores láser. La comunicación entre la parte electrónica de la canaleta y el sistema de cómputo se realiza mediante una interfaz creada en Labview.

El sistema de control de sensores cuenta con un botón de inicio. Cuando este se acciona ocurren diferentes funciones: la apertura de la puerta del contenedor, el establecimiento del tiempo inicial para las tarjetas de adquisición de señales de la red de sensores láser y cronómetro, y el encendido del obturador de la cámara rápida y de los disparadores de las cámaras de velocidad media.

La puerta del contenedor de material se cierra debido al voltaje establecido por un electroimán. Al accionar el botón de inicio, el voltaje se interrumpe permitiendo la apertura y liberación del material. La señal es recibida por las tarjetas de adquisición de datos, de esta manera, las lecturas de ambas tarjetas y el cronómetro se realizan sincronizadamente. La unidad de tiempo del cronómetro son los segundos, en un intervalo de 0 a 5, con una resolución de milisegundos. Dicha sincronización asegura que la escala de tiempo establecida para los videos y los archivos obtenidos por los sensores láser sea la misma.

Finalmente, también se sincroniza el encendido del obturador de la cámara rápida de manera automática. Se realiza a través de completar un circuito abierto por el pulso emitido por la interrupción de la señal del láser 4. Además, a través de una acción magnética se presionan los disparadores de las cámaras medianas en el mismo tiempo.

III.4. Procedimiento experimental

El procedimiento realizado para la simulación de FE se ilustra en la figura III.7. Se denominó lanzamiento a la liberación de las mezclas por la pendiente de la canaleta GRANFLOW-SIM. Se realizaron los siguientes pasos para cada experimento:

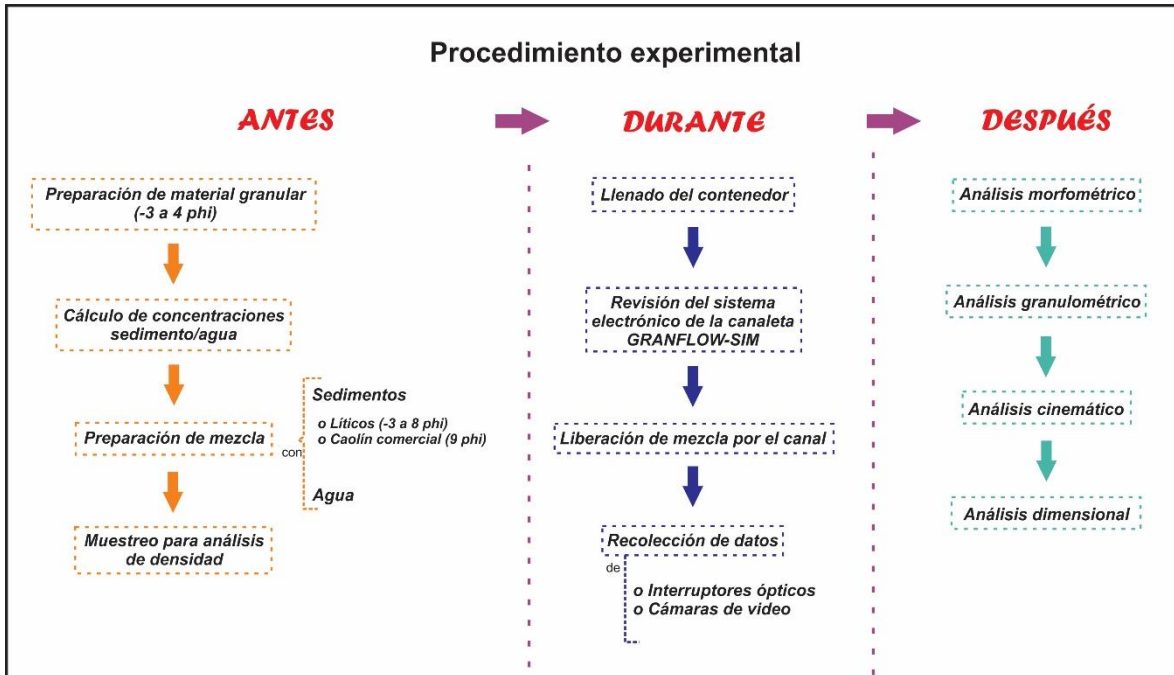


Figura III.7. Procedimiento experimental empleado para la simulación de FE experimentales en la canaleta GRANFLOW-SIM.

III.4.1. Lanzamiento

Antes del lanzamiento:

1. El material granular natural se tamizó desde tamaños de -3 a 4 phi en intervalos de 1 phi.
2. Cada fracción granulométrica se pesó de acuerdo con el porcentaje establecido en la mezcla (Tabla III.2), y posteriormente, se mezclaron todos los tamaños en un contenedor plástico hasta lograr que la mezcla fuera homogénea.
3. Se rectificó que la mezcla de material sólido tuviera un volumen de 0.019 m^3 , al verificar que ocupara todo el espacio de un contenedor de referencia con volumen fijo. En caso contrario, se reajustaron los pesos y las proporciones de sólidos y se ajustó el volumen. Posteriormente, se calculó el peso de agua correspondiente al porcentaje para cada experimento.
4. Para preparar la mezcla de sólidos y agua, se traspasó la mezcla de sólidos a una revoladora para concreto y se fue agregando poco a poco, la cantidad de agua

establecida; permitiendo que el agua fuera integrada a la mezcla hasta que esta fuera homogénea.

5. Para medir la densidad del fluido, se tomó una muestra de la mezcla con un volumen de 15 mL, antes de la realización del experimento. Mientras que, la medición de la densidad de la mezcla se realizó a través de un densímetro para concreto Leutert.

Durante el lanzamiento:

1. La mezcla se subió, con ayuda del sistema de poleas del GRANFLOW-SIM, hasta el contenedor de material y se vertió dentro de este. Previo a su liberación, se realizaron pruebas del funcionamiento adecuado al sistema electrónico.
2. Posteriormente, se accionó el botón de inicio para abrir la puerta del contenedor de material y este fue liberado, comenzando a fluir por la canaleta experimental. A lo largo del recorrido del flujo se recabaron datos de los interruptores ópticos y las cámaras de video de alta y mediana velocidad. Se almacenaron en un archivo .txt.

III.5. Procedimiento analítico

Cuando el flujo se detuvo y se depositó en la unidad de sedimentación, se realizaron los procedimientos establecidos para el análisis cinemático, morfométrico, granulométrico y dimensional del depósito y/o flujo. Finalmente, se recogió el material de la canaleta y la unidad de sedimentación, procurando recuperar todo material.

III.5.1. Análisis cinemático

El análisis cinemático consistió en la descripción a detalle de los videos obtenidos por las cámaras en tiempo real y rápido. Además, la obtención de los valores de velocidad en tres secciones de la canaleta.

La descripción visual de los videos presenta a detalle los procesos que ocurren en el momento de sedimentación del material en la unidad de sedimentación de la canaleta. Consistió en la identificación de las partes del flujo, como: frente, cuerpo y cola. Se describieron las siguientes características de cada una de ellas: tiempo de arribo y duración, velocidad, espesor, abundancia/cantidad y distribución de distintos tamaños de clastos y la consistencia del material, además de su coherencia o separación con el resto del flujo; así como el tipo de régimen de flujo, laminar o turbulento, en facies centrales y laterales; y el tipo de transporte de partículas: rodamiento, saltación o suspensión. También se describen los procesos de sedimentación con respecto al material depositado y al sustrato, por ejemplo, sedimentación, adelgazamiento, y/o segregación de material. Se identificaron y describieron diversas inestabilidades del flujo presentadas como oleadas, sus amplitudes, velocidades, distribuciones de tamaños de clastos, distancias de transporte y tipos de transporte de partículas específicos.

Además, se describió el movimiento del frente del flujo en el canal y la unidad de sedimentación a partir de la cuantificación de la velocidad. Se dividió la canaleta en tres secciones diferentes,

caracterizadas por su distribución espacial: inicio de canal (contenedor – L3), canal medio (L4-100.15-4.05 m), y final de canal y zona de sedimentación (L11-13).

Finalmente, se obtuvieron valores de velocidad instantáneas de las distintas partes del flujo en la unidad de sedimentación con ayuda del software Tracker.

III.5.2. Análisis morfométrico

El procedimiento realizado para el análisis morfométrico se ilustra en la figura III.8. Se le tomaron fotografías al depósito formado durante los experimentos (Figura III.8a) con una cámara Canon EOS 50D. El propósito de dichas fotografías fue generar modelos tridimensionales con el software Agisoft PhotoScan, que posteriormente fueron analizados con el software CloudCompare. Además, se midieron diferentes parámetros morfométricos, como el alcance máximo, el ancho y el espesor en distintas secciones transversales al depósito, que sirvieron para calibrar el modelo tridimensional con el depósito.

Para la construcción de las nubes de puntos de los depósitos (Figura III.8b) se insertaron las imágenes en el software, se alinearon las cámaras, se encontró la posición de la cámara para cada imagen y se refinaron los parámetros de calibración de la cámara. Como resultado, se generó una nube de puntos dispersos y un conjunto de posiciones de cámara. Posteriormente, el modelo se calibró a los datos morfométricos tomados en el depósito. Finalmente, se construyó la nube de puntos densos a partir del conjunto de posiciones de cámara.

Dichas nubes de puntos fueron exportadas como archivos .txt. e insertadas a CloudCompare (Figura III.8c), donde se analizaron a través de la herramienta “point picking”. Se obtuvieron mediciones de diversos parámetros morfométricos como el alcance máximo, el ancho medio y máximo del depósito. Posteriormente, se construyeron modelos digitales de elevación (MDEs) de los depósitos con resolución milimétrica. Dichos modelos fueron obtenidos a partir de la diferencia de elevación entre la nube de puntos del depósito y la unidad de sedimentación, considerando como referencia ésta última. A partir de los MDEs fue posible construir perfiles del depósito en sección longitudinal y secciones transversales, con el fin de observar los alcances máximos, espesores, y tasas de adelgazamiento de los distintos experimentos. El perfil longitudinal fue realizado a la mitad del depósito, y los perfiles transversales fueron realizados separadamente desde el inicio de la unidad de sedimentación hasta el final del depósito. Adicionalmente, se extrajeron los histogramas de frecuencia de los valores de espesores de los MDEs.

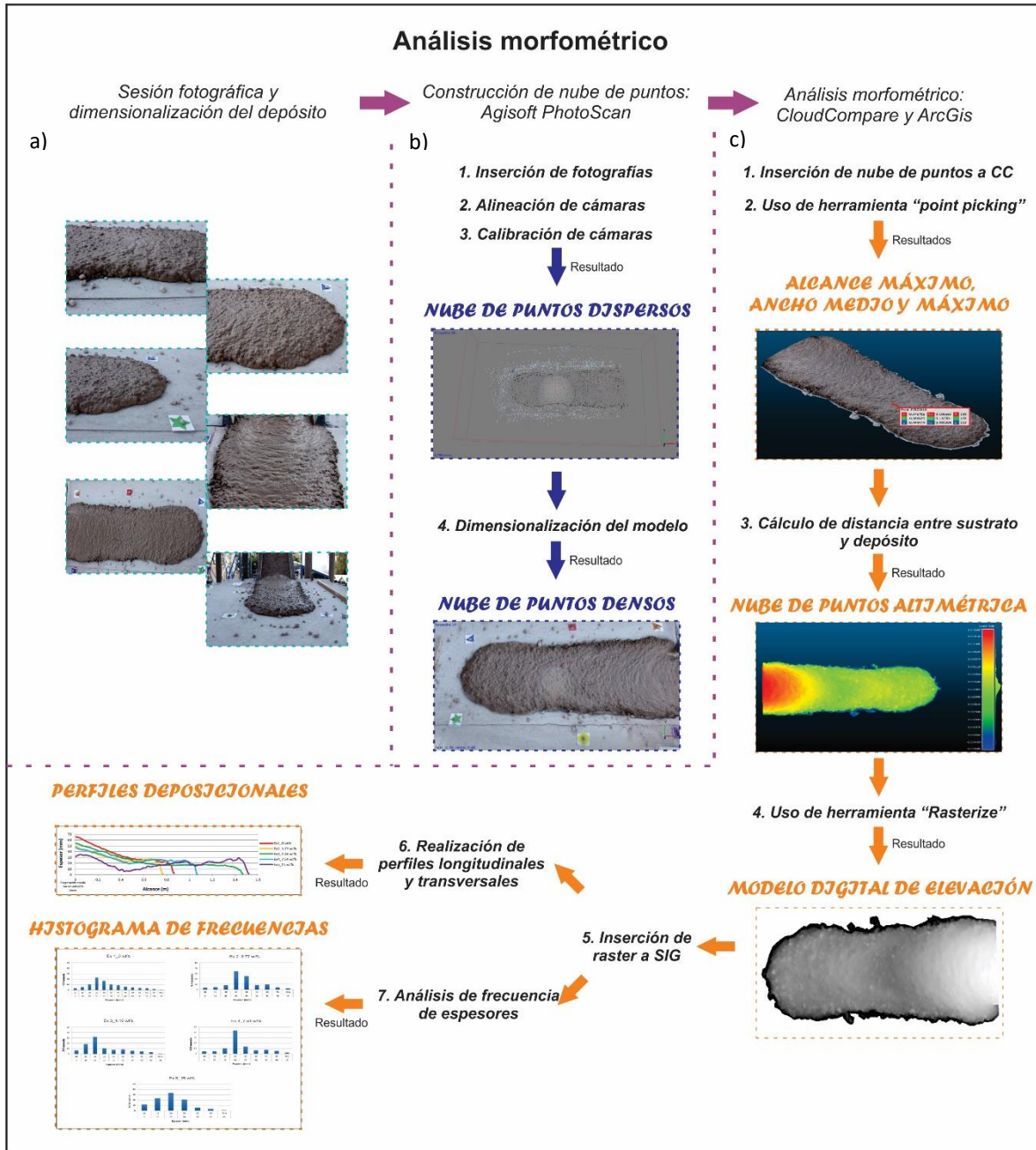


Figura III.8. Metodología análisis morfométrico. a) Sesión fotográfica y dimensionalización del depósito. b) Construcción de nube de puntos. c) Análisis morfométrico.

Descripción de parámetros morfométricos

El estudio morfométrico involucró todo el depósito. Los modelos de los depósitos fueron utilizados para medir parámetros geométricos comunes en todos los depósitos experimentales. Los parámetros morfométricos utilizados son los siguientes:

El alcance máximo ($D_{m\acute{a}x}$) se refiere a la distancia máxima alcanzada por el flujo. Se consideró el inicio de la unidad de sedimentación como la referencia de medición de todos los experimentos. La unidad de medición es el metro.

El ancho máximo ($W_{m\acute{a}x}$) es la mayor distancia presente en la parte proximal del depósito, donde se observan parábolas de compresión más definidas. Mientras que, el ancho medio (W_{mean}) se refiere al promedio del ancho del depósito en las secciones transversales posteriores a la zona proximal, después del ensanchamiento del depósito y antes de la sección transversal en la zona distal. Se encuentra expresado en metros.

El espesor máximo ($Th_{m\acute{a}x}$) es el valor de mayor espesor en el depósito. Se obtuvo a través de secciones transversales en la parte proximal del flujo, y se confirmó con los valores obtenidos en los histogramas de frecuencia de los MDEs. Se expresa en milímetros.

El espesor de los levees (Th_{lev}) es el valor promedio del espesor generado por la segregación de clastos gruesos en la periferia del depósito. Para obtener dicho valor se decidió una distancia fija desde el cambio de pendiente en la canaleta (0.6 m), donde los levees están bien desarrollados en todos los experimentos.

Finalmente, la relación de aspecto se define como la razón entre las características de los parámetros morfométricos de los depósitos. En ese estudio, se utilizaron dos relaciones de aspecto del depósito. La primera fue la razón entre el espesor máximo y el alcance de los depósitos ($Th_{m\acute{a}x}/D_{m\acute{a}x}$). La segunda fue el ancho medio y el alcance de los depósitos ($W_{mean}/D_{m\acute{a}x}$). Dichas razones son para generar números adimensionales que describen la forma del depósito, y permiten comparar los resultados obtenidos. Los depósitos con una relación $Th_{m\acute{a}x}/D_{m\acute{a}x}$ cercana a 0.1 son más gruesos y cortos, mientras que valores cercanos a 0 indican depósitos más delgados y largos. Por otro lado, la relación $W_{mean}/D_{m\acute{a}x}$ describe la redondez de los depósitos; los depósitos con valores cercanos a 1, son más compactos o circulares, mientras que valores cercanos a 0, indican depósitos más dispersos longitudinalmente o rectangulares.

III.5.3. Análisis granulométrico

Este procedimiento se divide en dos pasos: muestreo de depósito y análisis de la fracción gruesa y fina (Figura III.10).

Muestreo de depósitos

Los depósitos fueron muestreados sistemáticamente en facies centrales y laterales, así como en zonas del ápice, proximal, media y distal (Figura III.9a). Este muestreo se realizó a través de la utilización de núcleos de pvc enterrados en el material inmediatamente después de su sedimentación. El material circundante a los núcleos fue removido para asegurar la exactitud en la

toma de muestras y evitar su perturbación. Posteriormente, el material recolectado fue dispuesto en charolas de metal. Con las especificaciones anteriores, se recolectaron entre 5 y 8 muestras por experimento. La localización de cada muestra se indica en la tabla III.3 y en las figuras IV.5, 9, 12, 15 y 18.

Tabla III.3. Relación y posición de muestras para el análisis granulométrico.

Muestra	Localización
Experimento 1_ 0.00 wt%	
Ex1_PC	Proximal centro
Ex1_PD	Proximal derecha
Ex1_MC	Media centro
Ex1_MD	Media derecha
Ex1_DC	Distal centro
Número de muestras	5
Experimento 2_ 3.77 wt%	
Ex2_PC	Proximal centro
Ex2_PD	Proximal derecha
Ex2_MC	Media centro
Ex2_MD	Media derecha
Ex2_DC	Distal centro
Número de muestras	5
Experimento 3_ 4.16 wt%	
Ex3_AC	Ápice centro
Ex3_AD	Ápice derecha
Ex3_PC	Proximal centro
Ex3_PD	Proximal derecha
Ex3_MC	Media centro
Ex3_MD	Media derecha
Ex3_DC	Distal centro
Ex3_DD	Distal derecha
Número de muestras	8
Experimento 4_ 7.54 wt%	
Ex4_PI	Proximal izquierda
Ex4_PD	Proximal derecha
Ex4_MI	Media izquierda
Ex4_MD	Media derecha
Ex4_DI	Distal izquierda
Ex4_DD	Distal derecha
Número de muestras	6
Experimento 5_ 15.00 wt%	
Ex5_PD	Proximal derecha
Ex5_MPC	Media proximal centro
Ex5_MPD	Media proximal derecha
Ex5_MDC	Media distal centro
Ex5_MDD	Media distal derecha
Ex5_DD	Distal derecha
Número de muestras	6
Número total de muestras	30

*El nombre de la muestra hace referencia al experimento y localización correspondiente. La primera parte indica el experimento (ejem: Ex1=Experimento 1); y las letras posteriores al guion se refieren a la posición: la primera letra indica las zonas A=Ápice, P=Proximal, M=Media y D=Distal, y la segunda letra hace referencia a las facies I=Izquierda, D=Derecha y C=Centro.

Las muestras recolectadas fueron analizadas de -3 a 9 phi en intervalos de 1 phi, a través de dos métodos de análisis granulométricos. Se realizó tamizado por vía seca y húmeda para las fracciones gruesas (-3 a 4 phi), y método de la pipeta para las fracciones finas (4 a 9 phi). Previo a la realización de cada análisis, las muestras se secaron a 105°C por 24 horas en un horno eléctrico.

Para realizar la granulometría de fracciones gruesas (Figura III.9b), cada muestra se vertió en una torre de tamices estandarizados ASTM ordenados de mayor a menor tamaño de clasto, de arriba hacia abajo, respectivamente. Se colocó una bureta sobre dicha torre con un flujo de agua constante, con el fin de remover la mayor cantidad de sedimentos finos adheridos a la superficie de las partículas gruesas. Cada fracción correspondiente a diferente tamaño de clasto se secó y pesó. Mientras que las fracciones mayores a 4 phi se recuperaron para la realizar el método de la pipeta (Figura III.9c).

La muestra recuperada del tamizado se vertió, junto con 250 mL de agua destilada y 10 mL de agente dispersante de limos y arcillas (hexametáfosfato de sodio, $(NaPO_3)_6$, 50 g/L), en botes plásticos que se agitaron por 12 horas en una plancha de agitación. Posteriormente, se vertieron en probetas de un litro, para la toma de mediciones de diferentes tamaños de clastos. A partir de la Ley de Stokes, se calcularon las velocidades de caída según el tamaño de clasto correspondiente (Anexo A). Considerando el tiempo preciso de medición, se extrajeron alícuotas de 25 mL con una pipeta específicamente diseñada para tales fines. Las alícuotas se depositaron sobre charolas de aluminio previamente pesadas, y se secaron por 24 horas a 105 °C en el horno eléctrico. Finalmente, se pesaron las charolas sin contenido de agua excedente.

La unión entre ambos métodos granulométricos resultó en la distribución total porcentual de los pesos individuales de cada tamaño de clasto. A través de esta información se obtuvieron parámetros estadísticos con el software DECOLOG 6.0 (Borselli y Sarocchi, 2019), que permite separar la distribución de una mezcla multimodal de partículas a distribuciones log-normales que más se aproximan a las modas principales de la distribución. El programa proporciona los parámetros estadísticos de cada distribución log-normal y de la distribución entera por medio de varios métodos de interpolación. Para este análisis se seleccionó el método de Montecarlo y como parámetros estadísticos, se consideraron la media (Mz), la desviación estándar (σ) y la simetría (Sk).

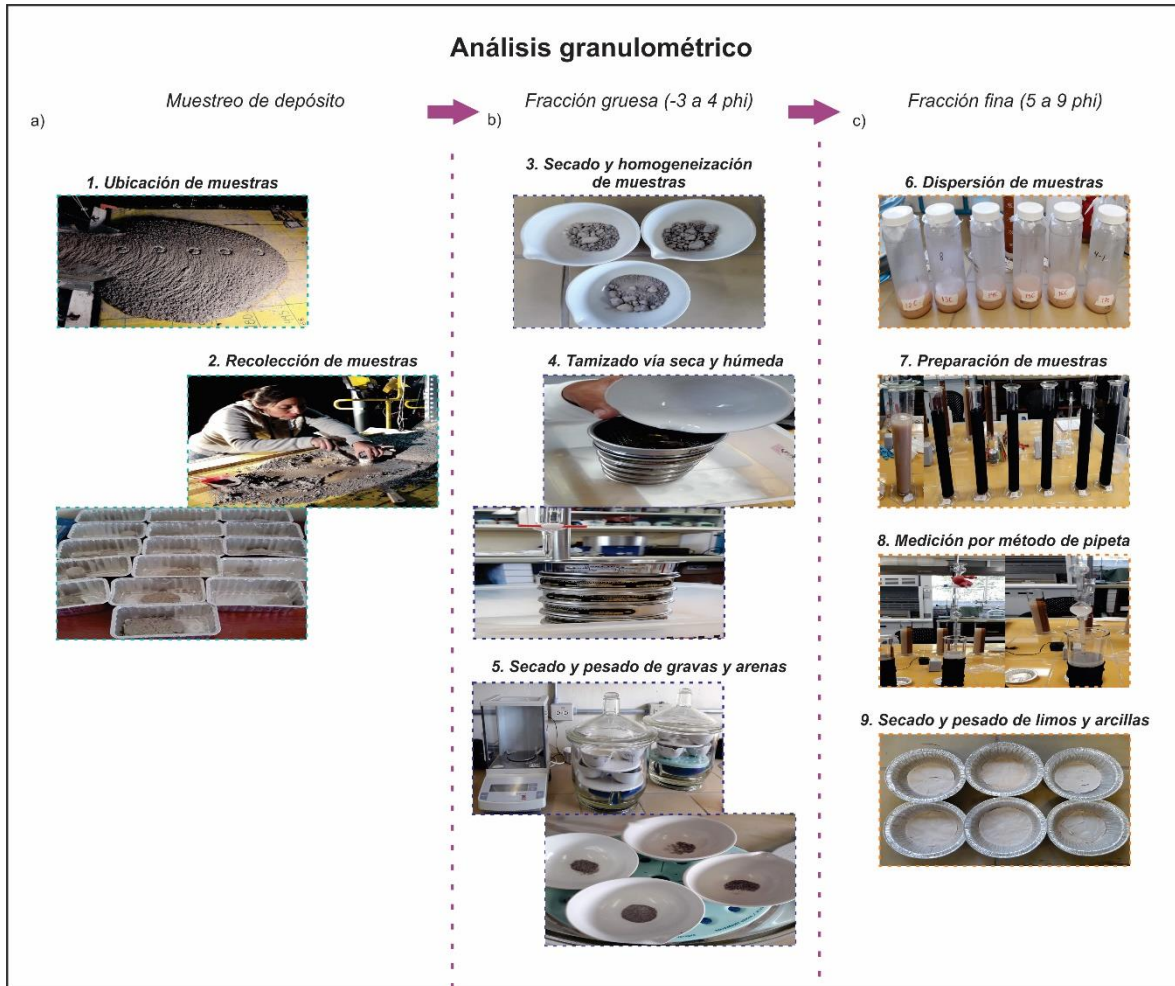


Figura III.9. Procedimiento empleado para el análisis granulométrico de los depósitos.

III.5.4. Análisis dimensional

El análisis dimensional consistió en obtener parámetros adimensionales que fueron utilizados para clasificar los FE, e identificar los límites de los tipos de comportamientos. Se obtuvieron parámetros físicos y adimensionales.

Los seis parámetros adimensionales que determinaron las relaciones de esfuerzo entre el sólido, el fluido y la interacción entre ellos en la mezcla fueron: número de Bagnold (N_{Bag}), número de Savage (N_{Sav}), número de Fricción (N_{Fricc}), número de Reynolds granular (N_{Rg}) y número de masa (N_m). Para obtener dichos valores se utilizaron las ecuaciones descritas en el marco teórico (Ec. 2 - 6). Como ejemplo de parámetros físicos, se obtuvieron los valores de diámetro característico de la mezcla, la tasa de deformación y la viscosidad efectiva del fluido.

El diámetro característico (δ , metros) se define como el tamaño de grano medio de la mezcla de sedimento (Ec. 7, Iverson, 1997).

$$\delta = \phi_{medio} (mz) \tag{Ec. 7}$$

La tasa de deformación (γ , 1/s) se definió por la ecuación 8, donde u es la velocidad del flujo (m/s) y H es el espesor del flujo (m).

$$\gamma = \frac{u}{H} \quad (\text{Ec. 8})$$

Finalmente, la presencia de clastos finos influye en la viscosidad efectiva del fluido, relacionándose mediante la ecuación 9 (Thomas, 1965), para el caso específico donde la sedimentación ocurre por gravedad, debido a que la flotabilidad y el arrastre, dominan las fuerzas de interacción de sólido-fluido.

$$\frac{\mu}{\mu_w} = 1 + 2.5v_{finos} + 10.05v_{finos}^2 + 0.00273\exp(16.6v_{finos}) \quad (\text{Ec. 9})$$

Con μ = viscosidad efectiva de la suspensión de clastos finos, μ_w = viscosidad dinámica del agua (0.001002 Pa.s), y v_{finos} = fracción volumétrica de los clastos finos. Con esta fórmula se predijo el aumento en la viscosidad efectiva Newtoniana como consecuencia del aumento de la concentración de partículas finas en la fracción del fluido.

Se realizó el análisis adimensional en el canal y en la unidad de sedimentación, debido a las diferencias en el comportamiento del flujo. Se denota L11 a la información que hace referencia a las características del flujo en el canal, y L12 a la información propia de la unidad de sedimentación.

IV. – RESULTADOS

En el presente capítulo se describen las características cinemáticas de los flujos y los depósitos producidos en los experimentos desarrollados en el presente trabajo. Las propiedades cinemáticas describen el flujo y los procesos de sedimentación del material. Estas dependen de la identificación de las partes del flujo y sus características, como: distancia alcanzada, velocidad, régimen y profundidad, además de tiempo de arribo, modo de transporte de las partículas y procesos de segregación. Así como, el reporte del movimiento del frente del flujo en el canal y la unidad de sedimentación de la canaleta experimental GRAN-FLOWSIM.

Por otro lado, las propiedades que describen el material depositado por el flujo se refieren a su estudio morfométrico y granulométrico. El estudio morfométrico se realiza a través de la descripción morfológica longitudinal y transversal cuantitativa de los depósitos. Mientras que, el estudio granulométrico muestra la variación de la distribución granulométrica inicial de la mezcla con la distancia. Para ello se observa el incremento o decremento de los valores iniciales de la moda, media, desviación estándar y asimetría; además de los porcentajes diferenciales entre los distintos tamaños de clastos en las zonas distales.

A partir de las cámaras de video se observó que el flujo se dividió en tres partes: frente, cuerpo y cola, con base en la descarga y tipo de material. Asimismo, dentro del cuerpo y la cola se observaron el desarrollo de pulsos u oleadas inestables que formaron ondas en superficie con diferentes amplitudes. La transición entre las diferentes partes del flujo se observa gradual. Comúnmente, el frente del flujo se formó por una descarga abrupta de material, seguida de una descarga más lenta que se reduce gradualmente, el cuerpo y finalmente una más diluida conocida como la cola.

Los depósitos formados presentaron características morfológicas generales, tales como: el desarrollo de lóbulos constituidos por una parte central o frente y márgenes laterales o levees. Además, los depósitos se dividen por su extensión longitudinal en zona proximal, media y distal. La zona proximal es el área del depósito más cercana a la desembocadura del canal. La zona distal corresponde con el lóbulo frontal y el cuerpo es la sección del depósito localizada entre ambas. Por otro lado, la mayor cantidad de material se encuentra contenida en el lóbulo central del depósito, y pocos clastos se encuentran dispersos fuera de éste (Figura IV.3).

Cabe recordar que, las mezclas experimentales iniciales presentan valores de media entre 1.62 y -0.19 phi (de arena media a muy gruesa) y su valor va en aumento en función del contenido de arcilla. Todas ellas presentan un bajo grado de selección (entre 2.14 a 3.75) y, con excepción del Ex1, todas presentan asimetría positiva (entre 0.43 y 0.85), y son platicúrticas, debido a la cantidad de material fino adicionado (Anexo B).

Con fines prácticos de entendimiento para el lector, se describe cada experimento de manera individual con sus diferentes resultados. La descripción de los experimentos comienza del menor contenido de material fino al mayor, específicamente arcilla.

IV.1. Experimento 1_0.00 wt%

Cinemática

En la tabla IV.1 y Anexo C, se presentan los datos registrados por los sensores láser debido al paso del frente del flujo en la canaleta experimental. Durante el primer metro de recorrido (contenedor - L3) el frente del flujo alcanza una velocidad media de 2.94 m/s. Posteriormente, en la longitud restante de la canaleta (L4 – 10, 1.36 a 4.06 m), su velocidad media fue entre 3.00 y 4.27 m/s, con una velocidad promedio de 3.40 m/s. Finalmente, en la zona de transición del canal a la unidad de sedimentación (L11 – 13, 4.33 a 4.77 m), la velocidad del frente disminuye hasta un valor mínimo registrado de 2.08 m/s, a una razón de disminución de 1.56 (Figura IV.1), hasta su depósito.

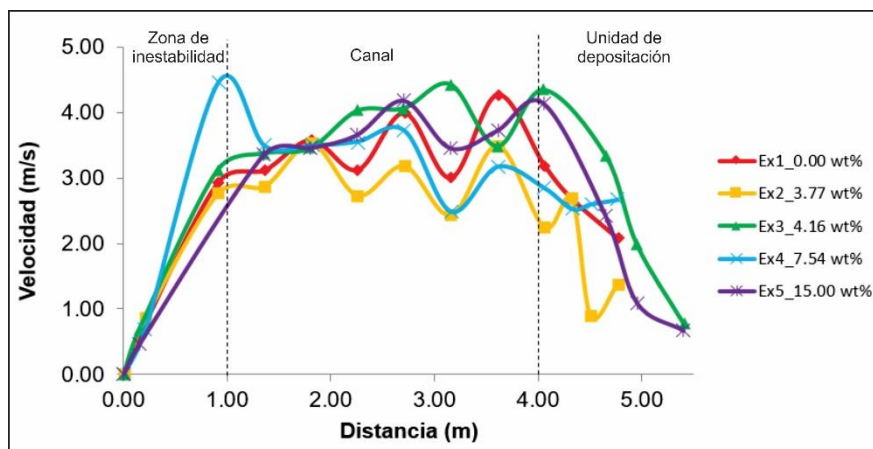


Figura IV.1. Velocidades medias de los FE con distintos contenidos de arcilla. la distancia está definida por la separación entre los sensores ópticos. La canaleta experimental GRANFLOW-SIM se divide en tres secciones.

Por otro lado, en las cámaras de video se observa el arribo del flujo a la zona de sedimentación. Este arribo ocurre 1.3 s después de la liberación del material del contenedor. Se observan clastos de tamaño grava aislados, separados del flujo, que se mueven por saltación y rodamiento (Figura IV.2a).

El frente del flujo arriba aproximadamente 0.15 s después. Se caracteriza por un movimiento laminar y el desarrollo de un borde frontal y de márgenes laterales constituidos por clastos gruesos, que confinan parcialmente la parte central. Los clastos gruesos del borde se transportan por rodamiento. En contraste, la parte central y confinada, totalmente saturada de agua y en estado de licuefacción, se mueve como un fluido homogéneo a una velocidad de aproximadamente 1.00 m/s. La superficie de la parte central del flujo está formada por clastos gruesos que viajan en suspensión dentro de una matriz de arena y agua (Figura IV.2b). El frente sobrepasa y se moviliza sobre los clastos aislados previamente depositados, y se separa algunos milímetros del sustrato. Lo que se refleja como un aumento abrupto en la profundidad en el frente, de 2.5 a 6 cm, que marca la descarga pico del flujo (Figura IV.2c y d). Posteriormente, el pico de descarga, la profundidad y la concentración de clastos gruesos disminuyen progresivamente.

El cuerpo del flujo está formado por oleadas de material, que se distinguen por una mayor cantidad de arena y agua, y por clastos gruesos dispersos transportados en suspensión por el fluido que sobresalen en la parte superior de flujo. Estas oleadas son de baja amplitud, con una descarga relativamente constante (Figura IV.2e). El cuerpo presenta una diferencia significativa de velocidad en la parte central y en los márgenes. La parte central del flujo es un fluido homogéneo que se desplaza a una velocidad de 2.20 m/s; en contraste, los márgenes, enriquecidos en clastos gruesos, se encuentran casi estáticos por el desarrollo de levees laterales. La descarga máxima del material ocurre en la parte central. El cuerpo se encuentra con el material depositado previamente por el frente, por lo que disminuye su velocidad. Los márgenes presentan menor espesor que la parte central, y contienen el flujo de manera parcial. El fluido se desborda por encima de los márgenes (Figura IV.2f).

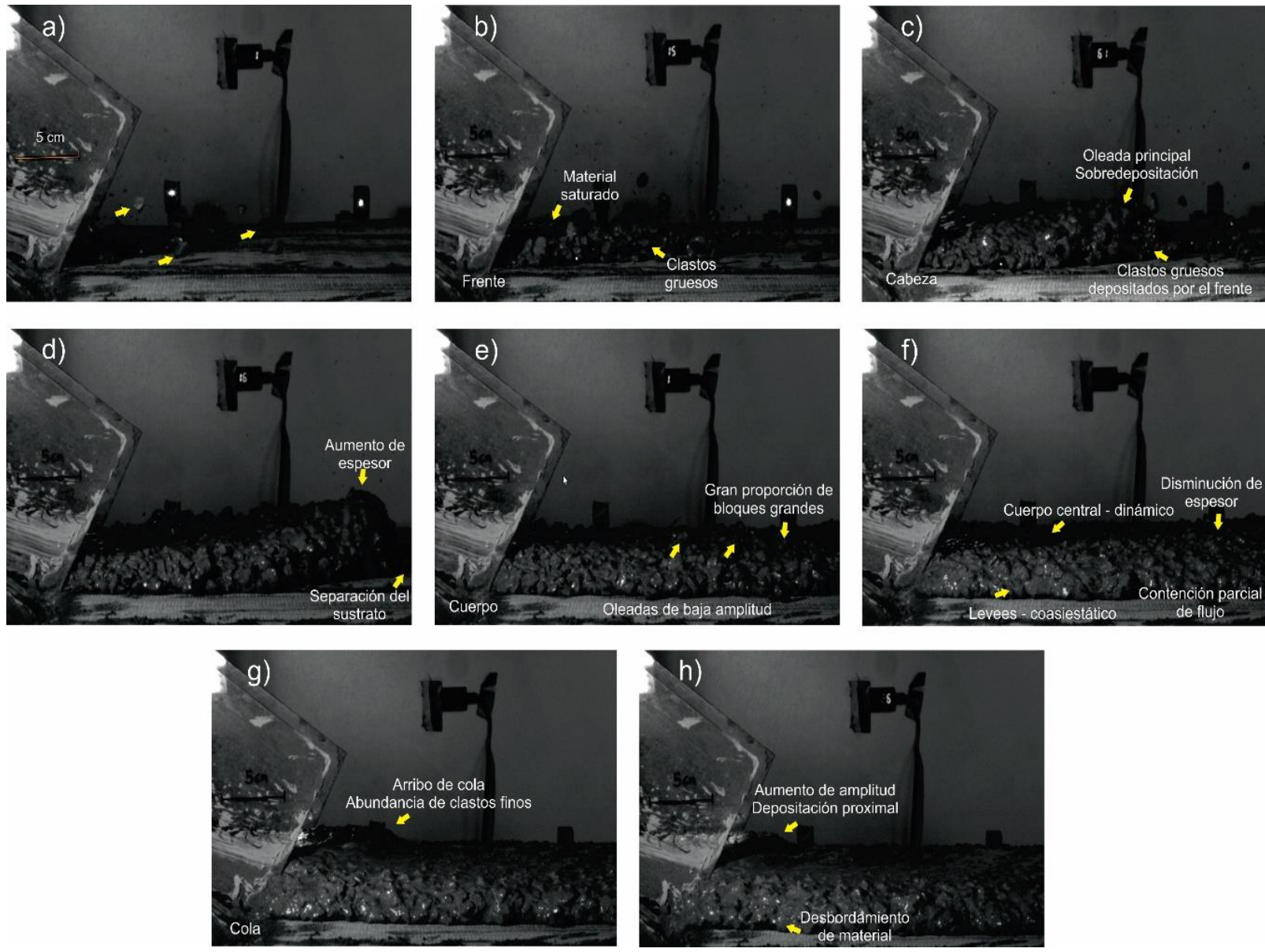
La cola del flujo arriba 2.5 s después de la liberación del material. Se caracteriza porque la descarga y velocidad del material disminuye. La cola está constituida por una gran cantidad de material arenoso, con escasos clastos gruesos que se transportan en suspensión en la parte central del flujo a través de un movimiento laminar (Figura IV.2g). En su superficie, se desarrollan oleadas que tienen una mayor amplitud que las desarrolladas en el cuerpo, inclusive algunas logran rebasar 6 cm de profundidad desde el sustrato, y generan variaciones abruptas en la descarga. Las primeras oleadas están separadas entre ellas por algunas décimas de segundo, mientras que las últimas, por alrededor de 2 segundos. El material transportado por la cola del flujo se deposita sobre el depositado por el frente y el cuerpo, lo que genera un aumento en la profundidad y ancho del flujo en la zona proximal, hasta que el flujo se detiene completamente. (Figura IV.2h).

Tabla IV.1. Valores de aceleración y velocidad del frente del flujo.

Láser	Contenedor-L3	L4-L10		L11-L13	
Intervalo de distancia recorrida por el flujo(m)	INICIO CANAL 0.913	CANAL 1.36- 4.06		UNIDAD DE SEDIMENTACIÓN 4.33-4.77	
	Velocidad media (m/s)	Intervalo de velocidad media (m/s)	Velocidad promedio (m/s)	Velocidad media (m/s)	Razón de disminución
Ex1_0.00 wt%	2.94	3.00 - 4.27	3.40	2.08	1.56
Ex2_3.77 wt%	2.77	2.25 - 3.52	2.91	0.90	1.75
Ex3_4.16 wt%	3.12	3.38 - 4.44	3.79*	0.78**	2.70
Ex4_7.54 wt%	4.46	2.49 - 3.72	3.40	2.60	0.22
Ex5_15.00 wt%	3.35	3.46 - 4.19	3.77*	0.67**	2.69

Los valores de aceleración y velocidad se obtuvieron en tres secciones distintas de la canaleta. *1.35 a 4.05 m, **4.65 a 5.40 m

Figura IV. 2. Secuencia de movimiento del flujo en el EX1.



Características del depósito

El depósito formado por el Ex1, constituido por un lóbulo frontal y levees laterales, tiene un alcance (Dmax) de 0.87 m, sobre la unidad de sedimentación (Figura IV.3). La zona proximal se localiza desde el cambio de pendiente hasta 0.53 m de longitud del depósito. Se caracteriza por mostrar los valores de ancho (Wmax) y espesor máximos (Thmax), de 0.62 m y 65 mm, respectivamente. El espesor disminuye gradualmente con una tasa de adelgazamiento de 0.0808, hasta 26 mm. En sección transversal, el depósito tiene forma convexa en esta zona y se presenta el mayor grado de curvatura (Figura IV.4). La superficie del depósito es lisa, constituida por material fino y presenta estructuras de deformación parabólicas. Estas estructuras se encuentran bien definidas hasta 0.4 m de longitud del depósito, cerca de la transición a la zona media. Los clastos gruesos se localizan únicamente en los levees laterales.

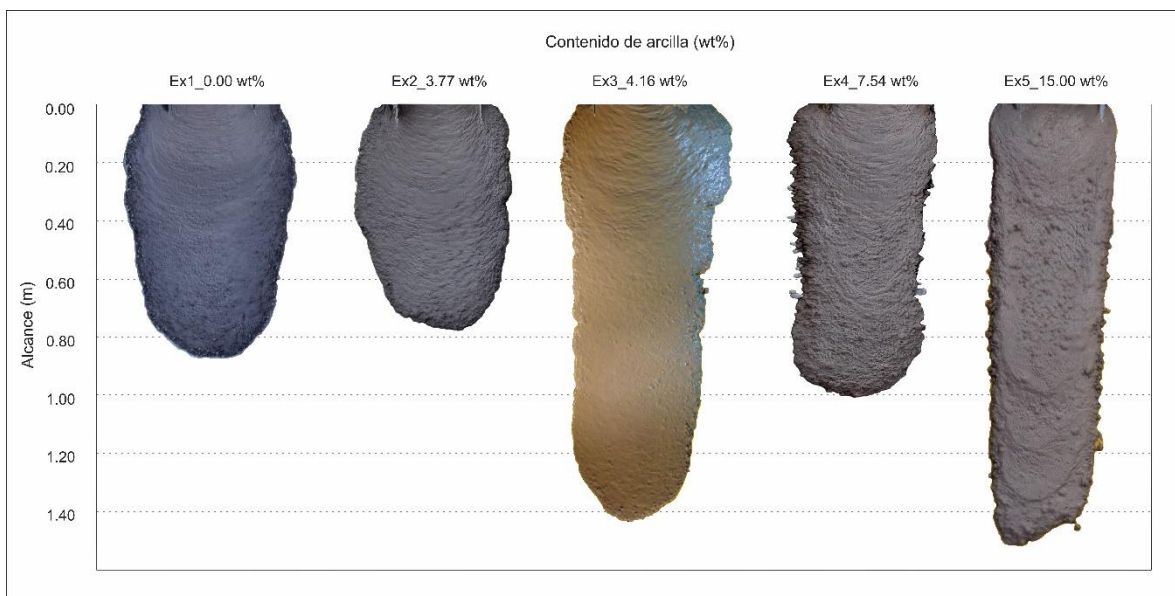
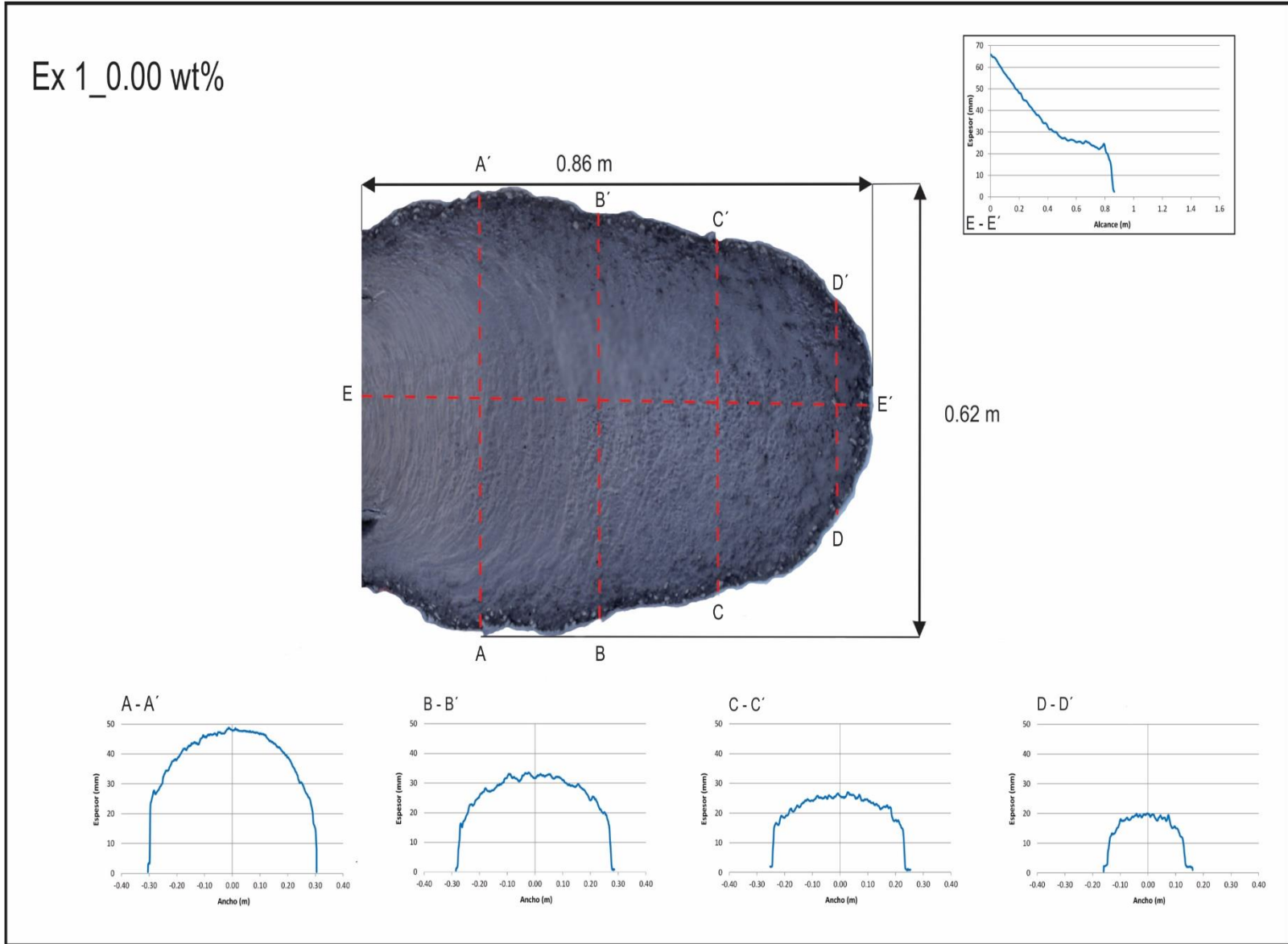


Figura IV.3. Vista en planta de la morfología de los depósitos de FE obtenidos en los experimentos. Los modelos se acomodaron de izquierda a derecha según el contenido de arcilla agregado, siendo el primer modelo el de menor contenido (0.00 %wt) y el último el de mayor contenido (15.00 %wt). Se observa el alcance, ancho y textura superficial que presenta cada depósito.

La zona media está comprendida entre 0.53 y 0.70 m de longitud del depósito. Se caracteriza por presentar un ancho (Wmean) de 0.539 m, que disminuye gradualmente a 0.40 m; y un espesor casi constante entre el intervalo de 26 a 24 mm. En sección transversal, la zona media tiene forma convexa. Sin embargo, el grado de curvatura disminuye con respecto a la zona proximal. Su superficie es suave, constituida principalmente por arena, con clastos gruesos que sobresalen del depósito y pliegues, poco definidos, en forma de parábolas. Estas parábolas se van atenuando hacia la zona distal. Finalmente, los levees se encuentran mal desarrollados y tienen un espesor (Thlev) de 16 mm.

Figura IV.4. Perfiles transversales del depósito del Ex1.



La zona distal se encuentra a partir de los 0.70 metros de longitud hasta el final del depósito. Forma un lóbulo, cuyos bordes están definidos por la acumulación de material grueso. Se caracteriza por ser la zona más angosta del depósito, con el ancho menor, el cual es de 0.32 m. Presenta un cambio gradual del espesor desde la zona media hasta 17 mm. En sección transversal, la superficie en esta zona es casi plana. El depósito continúa presentando perfiles transversales con márgenes de menor espesor que la parte central, y con ello se expresa que el desarrollo de los levees es mínimo con la distancia.

Con los datos anteriores, se obtuvieron relaciones de aspecto de 0.075 y 0.620 para el espesor máximo/alcance (T_{hmax}/D_{max}) y el ancho medio/alcance (W_{mean}/D_{max}), respectivamente (Tabla IV.2 y Figura IV.5).

Tabla IV.2. Parámetros morfométricos cuantitativos

Experimento	Parámetros morfométricos							
	Alcance máximo (D_{max})(m)	Ancho máximo (W_{max})(m)	Ancho medio (W_{mean})(m)	Espesor máximo (T_{hmax})(mm)	Espesor levee (T_{hlev})(mm)	$T_{hmax}/D_{máx}$	$W_{mean}/D_{máx}$	Tasa de adelgazamiento
Ex 1_0.00 wt%	0.87	0.621	0.539	65	16	0.075	0.620	-0.080
Ex 2_3.77 wt%	0.78	0.558	0.537	45	18	0.058	0.688	-0.057
Ex 3_4.16 wt%	1.44	0.639	0.473	56	21	0.038	0.322	-0.060
Ex 4_7.54 wt%	1.01	0.411	0.343	45	23	0.044	0.338	-0.059
Ex5_15.00 wt%	1.53	0.467	0.429	35	24	0.023	0.282	-0.082

*Los parámetros de alcance máximo, ancho máximo y ancho medio del depósito se encuentran expresados en metros, el espesor máximo y de los levees se encuentran expresados en mm, y las razones entre los parámetros morfométricos y la tasa de adelgazamiento son números adimensionales. Se decidió colocar los valores en dichas escalas porque son los resultados obtenidos en las escalas reales de los depósitos.

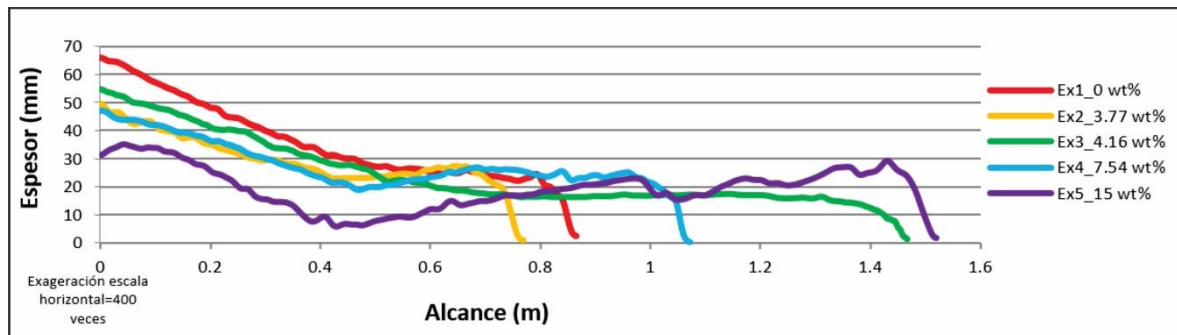


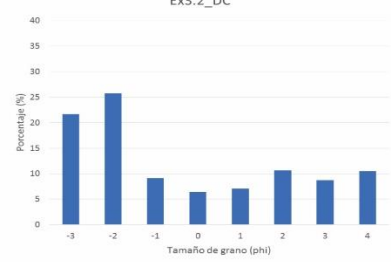
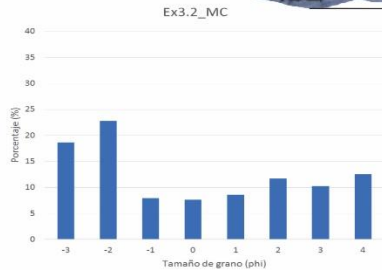
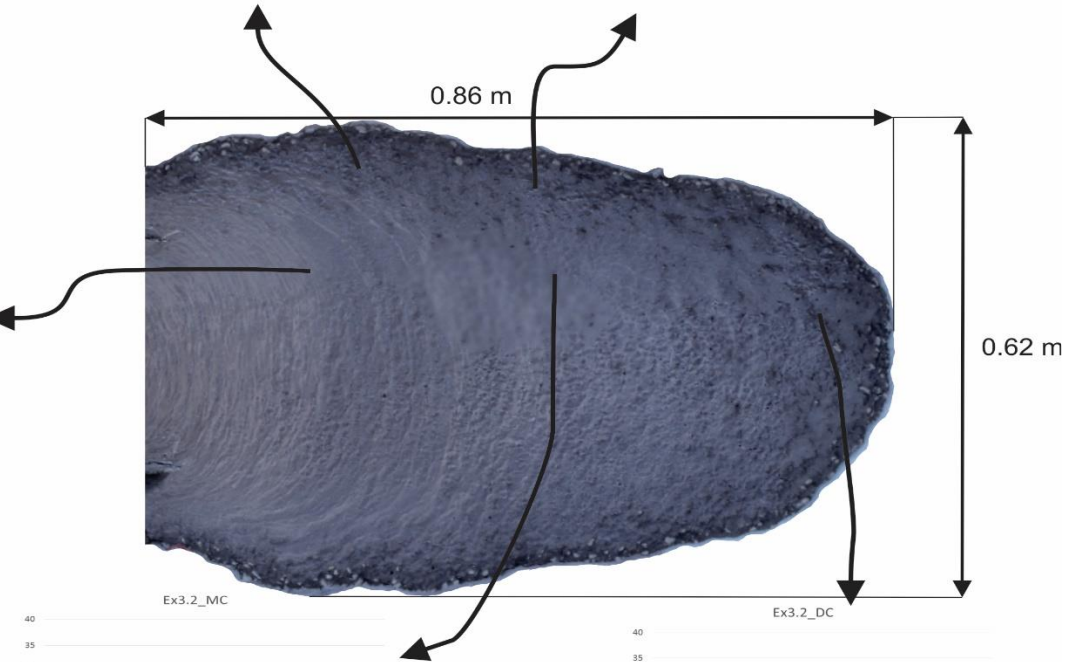
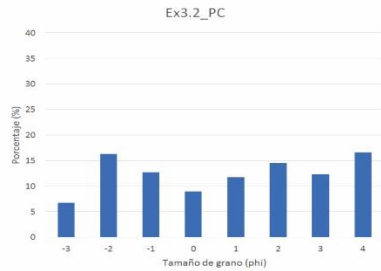
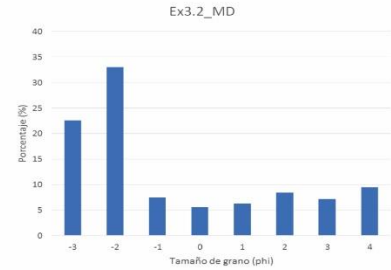
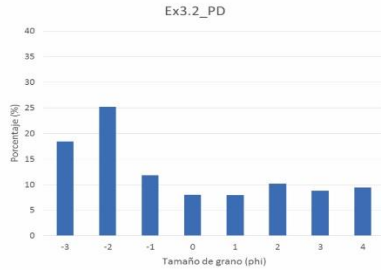
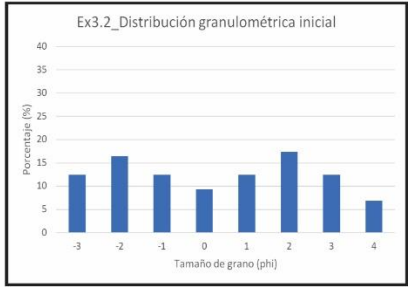
Figura IV.5. Perfiles longitudinales de los depósitos. Los perfiles se encuentran expresados con una exageración horizontal de 400 veces la escala vertical.

Granulometría

En la zona proximal, el depósito muestra un histograma con modas en las fracciones de -2, 2 y 4 phi. De forma longitudinal, el contenido de grava aumenta con la distancia, de la zona proximal (PC) a la distal (DC); particularmente, en los clastos con diámetro de -2 phi (aumento de 16.26 a 25.74%) (Figura IV.6). Por el contrario, la fracción arenosa, particularmente los tamaños de 2 y 4 phi, disminuyen de 14.55 y 16.61% a 10.63 y 10.51%, respectivamente.

Ex 1_0.00 wt%

Figura IV.6. Vista en planta del Ex1 con histogramas de frecuencia de tamaño de clastos localizado en su lugar de muestreo.



En los márgenes del depósito, los levees están constituidos principalmente por clastos de -1 a -3 phi (PD: 11.86 y 18.45% y MD: 7.47 y 22.58%, respectivamente) y muestran modas muy pronunciadas en la fracción -2 phi (PD y MD), con porcentajes de 25.23% y 33.03%. Cabe mencionar que, a pesar de estos cambios con la distancia, la distribución granulométrica bimodal inicial, con modas en -2 y 2 phi, se conserva durante toda la extensión del depósito.

Con respecto a los parámetros estadísticos (Anexo D), el diámetro medio de los clastos aumenta con la distancia de 0.25 a -0.764 phi, lo cual se refleja en la migración de las curvas acumulativas hacia la fracción gruesa (Figura IV.7). Además, el grado de selección es muy malo en todo el depósito ($\sigma = 2.20$ a 2.38). Finalmente, las distribuciones granulométricas son simétricas en la zona central del depósito ($Sk = -0.09$ y 0.297), mientras que en el borde del depósito (frente y levees), presentan una asimetría positiva ($Sk = 0.52$).

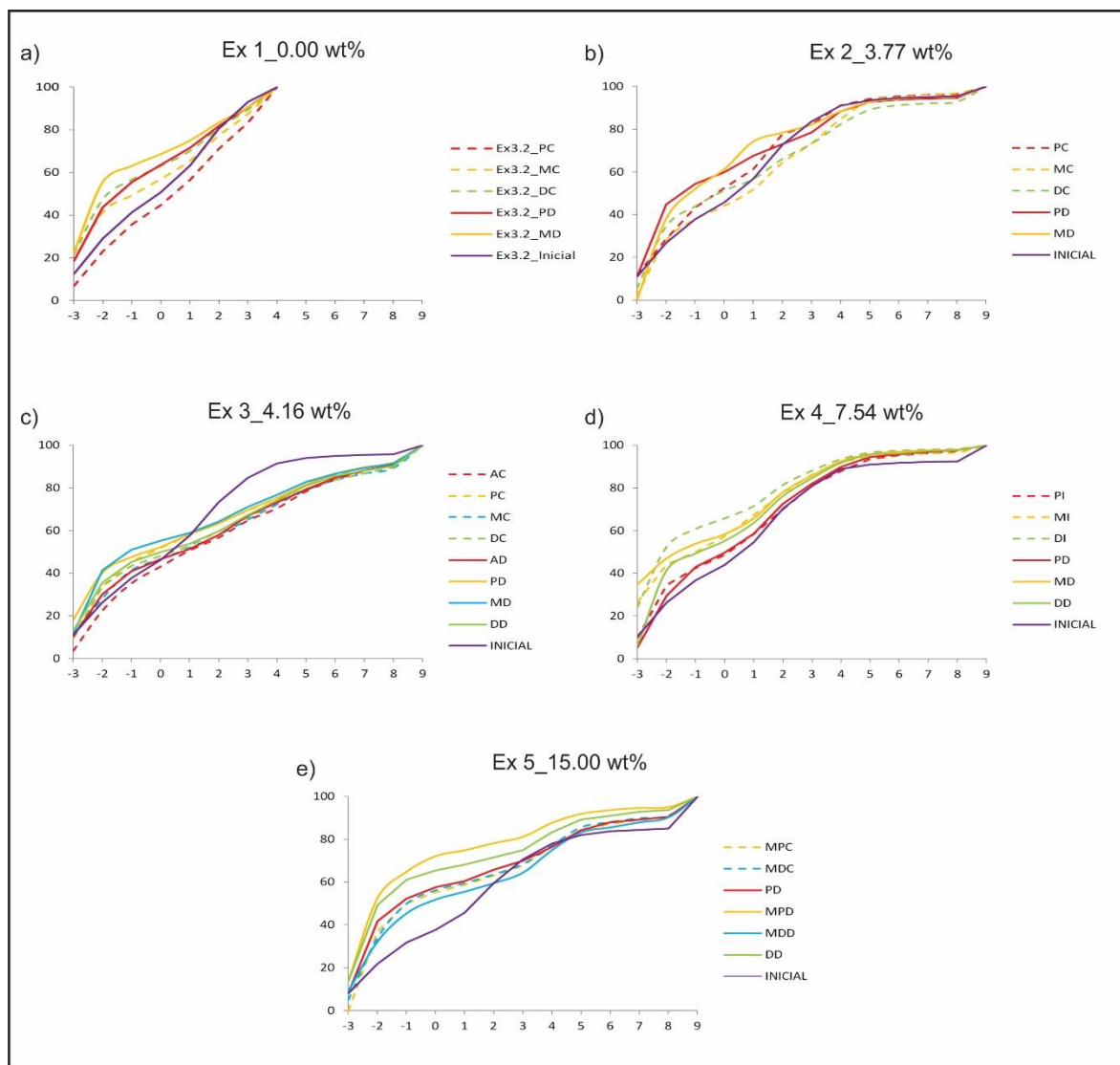


Figura IV.7. Curvas acumulativas de las muestras extraídas del depósito. La línea punteada indica las muestras en facies centrales, mientras que la continua hace referencia a la facies lateral.

IV.2. Experimento 2_3.77wt%

Cinemática

Durante el primer metro de recorrido (contenedor - L3), el frente del flujo alcanza una velocidad media de 2.77 m/s. Posteriormente, en la longitud restante del canal (L4 - 10, 1.36 a 4.06 m), el frente se transportó en un intervalo de velocidad media entre 2.25 y 3.52 m/s, con una velocidad promedio de 2.91 m/s. Finalmente, en la zona de transición del canal a la unidad de sedimentación (L11 - 13, 4.33 a 4.77 m), disminuye la velocidad del frente hasta un valor mínimo registrado de 0.90 m/s, a una razón de 1.75, hasta su depósito (Tabla IV. 1 y Figura IV.1).

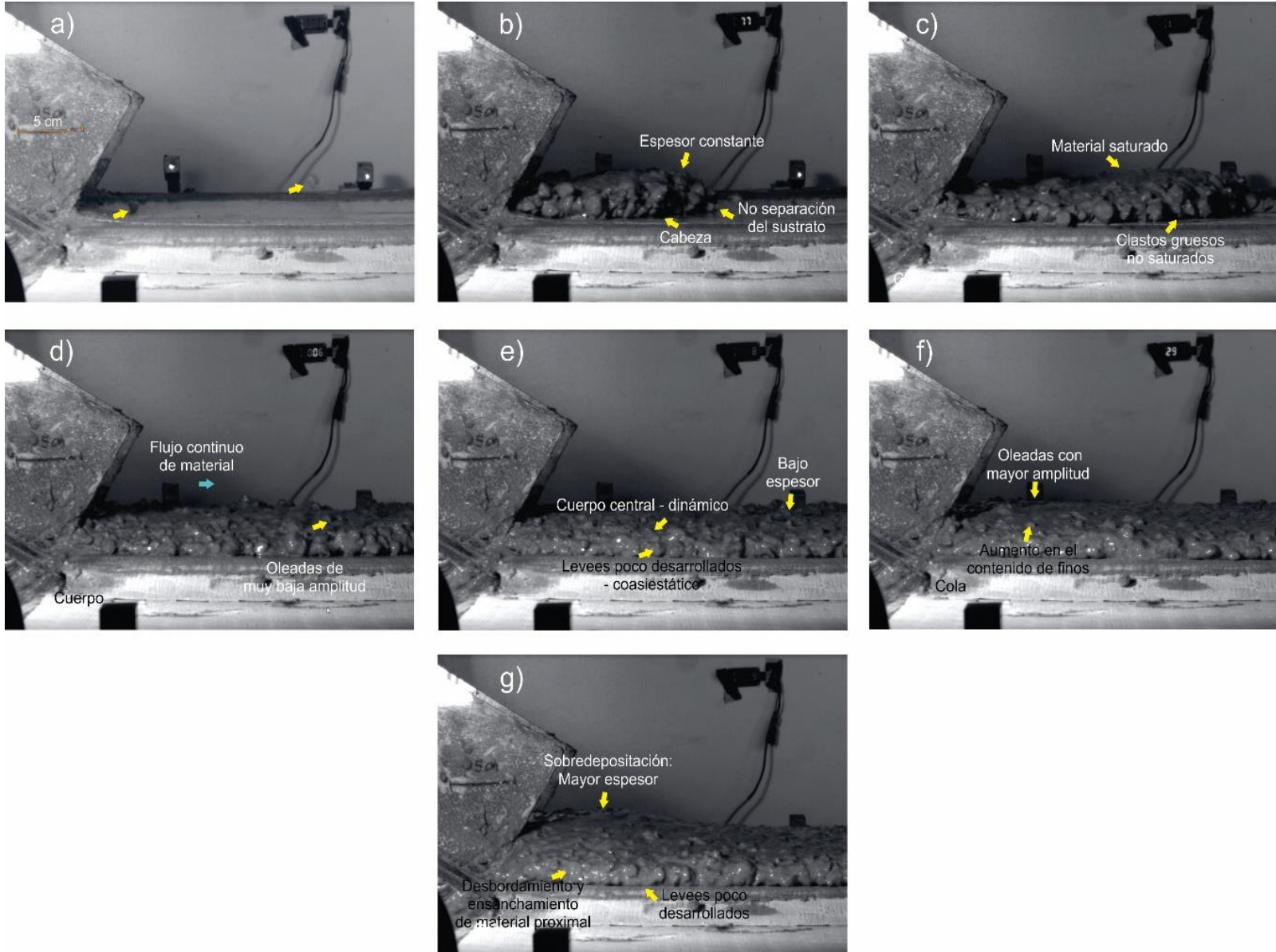
A través de los videos se observa el arribo de clastos de tamaño grava aislados, a la zona de sedimentación. Este arribo ocurre 1.3 s después de la liberación del material del contenedor. Los clastos se mueven por rodamiento y saltación (Figura IV.8a). Su depósito ocurre a una distancia de 0.5 m, a partir del cambio de pendiente.

El frente del flujo arriba aproximadamente 0.14 s después (Figura IV.8b). Se caracteriza por un movimiento laminar y el desarrollo de un borde frontal y lateral constituido por clastos gruesos, que confinan parcialmente la parte central. Los clastos del borde se transportan algunos centímetros por rodamiento. Mientras que, la parte central, confinada, totalmente saturada de agua y en estado de licuefacción, se mueve como un fluido homogéneo a una velocidad de 1.10 m/s. Su superficie está formada por clastos gruesos dispersos que se transportan por suspensión en una matriz de arena y agua (Figura IV.8c). El frente mantiene una profundidad constante de aproximadamente 3.5 cm en todo su recorrido.

El cuerpo del flujo está formado por varias oleadas de material, con mayor cantidad de arena y agua, y con menor contenido de clastos gruesos dispersos en suspensión transportados por el fluido. Estas oleadas son de muy baja amplitud y la descarga es relativamente constante (Figura IV.8d). El cuerpo presenta una diferencia significativa de velocidad en la parte central y en los márgenes. La parte central es un fluido homogéneo que se desplaza a una velocidad de 1.70 m/s; mientras que los márgenes, enriquecidos en material grueso, se encuentran casi estáticos. La descarga máxima del material ocurre en la parte central. Esta disminuye su espesor a 1.5 cm aproximadamente. En contraste, los márgenes presentan menor espesor que la parte central, y contienen el flujo de manera parcial. El fluido logra desbordarse por encima de los márgenes (Figura IV.8e).

La cola del flujo se caracteriza por que la descarga y velocidad del material disminuyen. La cola está constituida por una gran cantidad de material arenoso con pocos clastos gruesos que se transportan en suspensión en la parte central del flujo a través de un movimiento laminar (Figura IV.8f). Al igual que en el cuerpo, se forman oleadas en la superficie con amplitudes que aumentan con el tiempo, inclusive rebasan 5 cm de profundidad desde el sustrato. Finalmente, el material transportado por la cola del flujo se deposita sobre el depósito formado por el frente y el cuerpo, lo que ocasiona un aumento en la profundidad y ancho del flujo en la zona proximal, hasta que el flujo se detiene completamente. (Figura IV.8g).

Figura IV. 8. Secuencia de movimiento del flujo en el EX2.



Características del depósito

El depósito formado por el Ex2 está constituido por un lóbulo frontal y levees laterales (Figura IV.3). Tiene un alcance (D_{max}) de 0.78 m sobre la unidad de sedimentación. La zona proximal se localiza desde el cambio de pendiente hasta 0.43 m de longitud del depósito. Se caracteriza por mostrar los valores de ancho (W_{max}) y espesor máximos (T_{max}), de 0.55 m y 45 mm, respectivamente. El espesor disminuye gradualmente con una tasa de adelgazamiento de 0.057, hasta 22 mm. En sección transversal, el depósito tiene forma convexa; en esta zona se observa el mayor grado de curvatura (Figura IV.9). La superficie del depósito, constituida por material fino, es lisa y presenta estructuras de deformación parabólicas. Las zonas más elevadas son compresivas, y las de menor elevación son extensivas. Los clastos gruesos se localizan únicamente en los laterales, y forman levees con menor profundidad que la parte central del depósito.

La zona media, comprendida entre 0.43 y 0.60 m de longitud del depósito, se caracteriza por presentar un ancho (W_{mean}) de 0.483 m y un espesor casi constante, con un ligero aumento entre 22 a 26 mm. La zona media tiene forma convexa, en sección transversal; sin embargo, el grado de curvatura disminuye con respecto a la zona proximal. Su superficie es suave, constituida principalmente por arena, con clastos gruesos que sobresalen del depósito y pliegues en forma de parábolas. Estas estructuras se encuentran bien definidas hasta 0.5 m de longitud del depósito. El desarrollo de estas parábolas disminuye hacia la zona distal. Finalmente, el desarrollo de los levees mejora con la distancia. Tienen un espesor (T_{lev}) de 18 mm, el cual es similar al de la parte central.

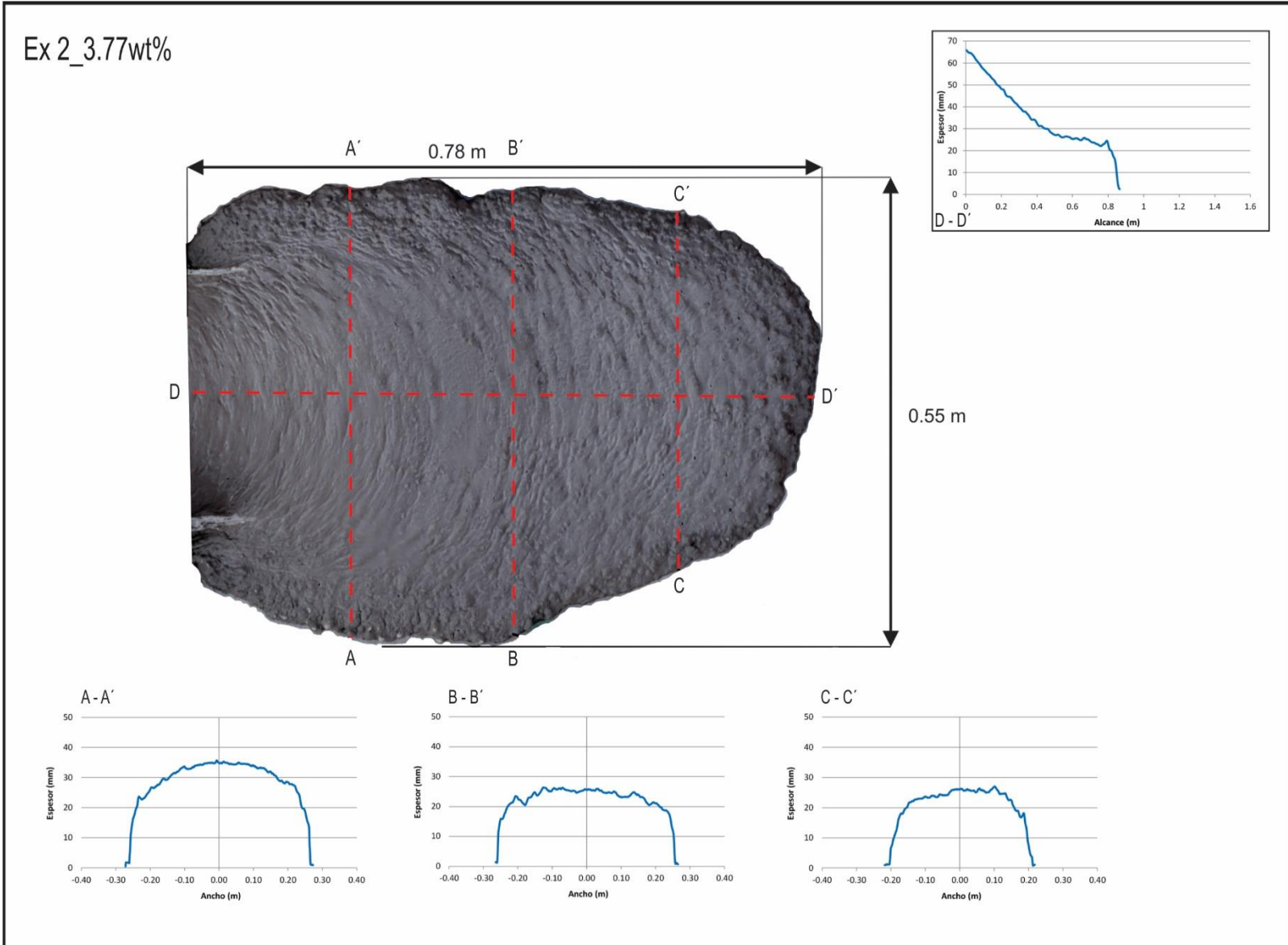
La zona distal se encuentra bien definida por la acumulación de material grueso en los bordes de la longitud restante del depósito (de 0.60 a 0.78 m). Con ello, se caracteriza por ser la zona más angosta del depósito, con un ancho de 0.436 m. Presenta un aumento gradual inicial de espesor de 26 a 27 mm, que posteriormente disminuye a 19 mm con la distancia. La superficie está constituida principalmente por arena y una gran cantidad de clastos gruesos que sobresalen en la cima. Las estructuras de deformación están ausentes, y la superficie en sección transversal es plana. El depósito continúa presentando perfiles transversales con márgenes de menor espesor que la parte central, y con ello se expresa que el desarrollo de los levees es mínimo con la distancia.

La relación de aspecto entre el espesor máximo y alcance (T_{max}/D_{max}) es de 0.058, y para el ancho medio y alcance (W_{mean}/D_{max}) es 0.688 (Tabla IV.2 y Figura IV.5).

Granulometría

En la zona proximal, el depósito muestra un histograma con modas en las fracciones de -2, 2, 4 y 9 phi. De forma longitudinal, el contenido de grava aumenta con la distancia, de la zona proximal (PC) a la distal (DC), particularmente en los clastos con diámetro de -2phi (16.78 a 28.95%) (Figura IV.10). Por el contrario, la fracción arenosa; particularmente el tamaño de 2 phi disminuye de 16.38 a 9.44%. Finalmente, la fracción arcillosa aumenta con la distancia, en específico el tamaño 9 phi, con porcentajes de (PC) 3.58 a (DC) 7.11%.

Figura IV.9. Perfiles transversales del depósito del Ex2.

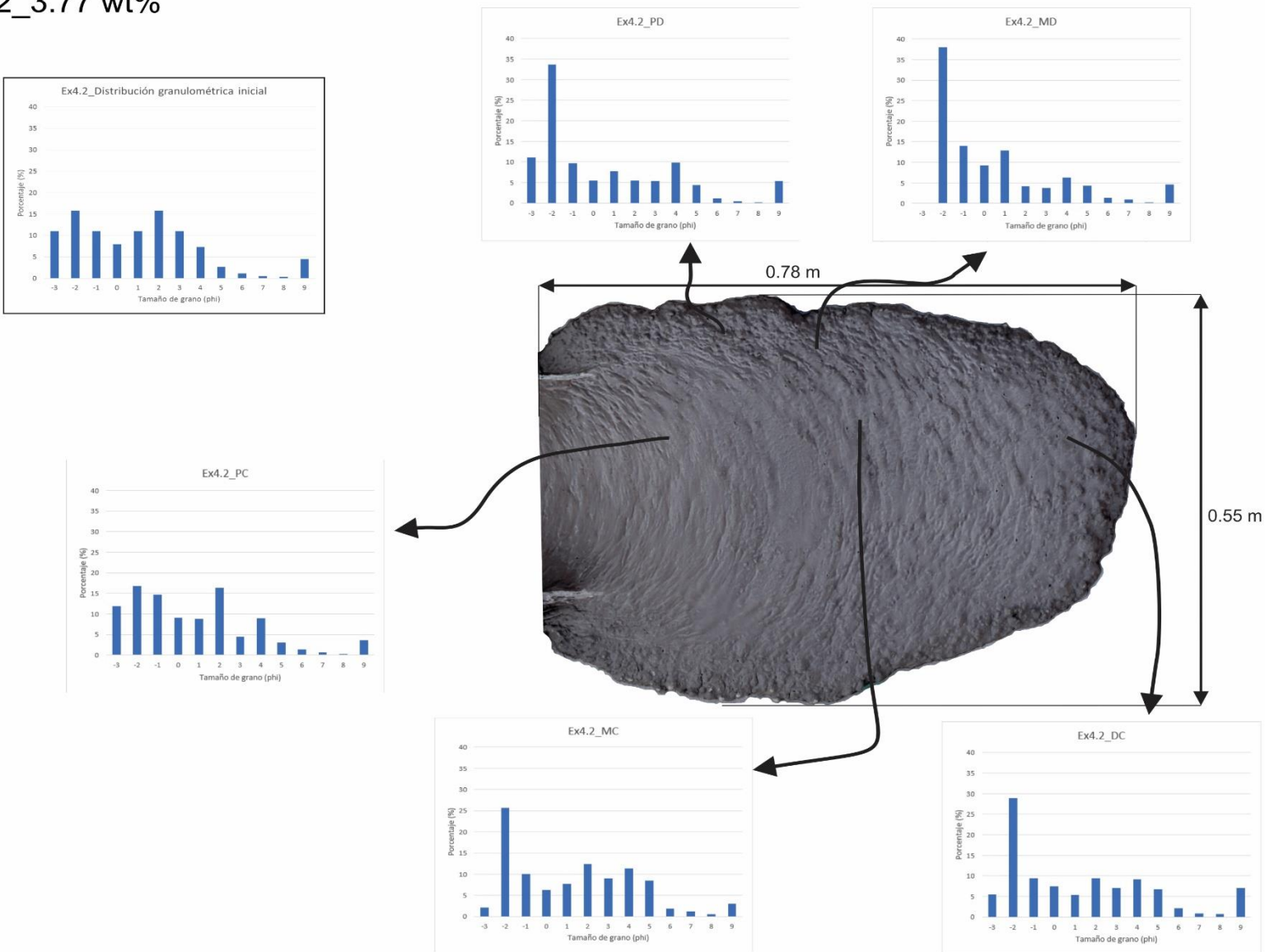


En los márgenes del depósito, los levees están constituidos principalmente por clastos de -1 a -3 phi (PD: 9.64 y 11.12% y MD: 14.05 y 0%, respectivamente). Además, las distribuciones granulométricas muestran modas muy pronunciadas en la fracción -2 phi (PD y MD), con porcentajes de 33.63% y 37.98%. Cabe mencionar que, a pesar de estos cambios con la distancia, la distribución granulométrica bimodal inicial, con modas en -2 y 2, 4 y 9 phi, se conserva durante toda la extensión del depósito.

Con respecto a los parámetros estadísticos (Anexo D), el diámetro medio de los clastos disminuye con la distancia de 0.20 a 0.72 phi, lo cual se refleja en las curvas acumulativas (Figura IV.7). El grado de selección es muy malo en todo el depósito ($\sigma = 2.88$ a 3.43). Finalmente, las distribuciones granulométricas son positivas en la zona central del depósito ($Sk = 0.906, 0.563$ y 0.779), mientras que el borde del depósito (frente y levees), presenta un aumento de asimetría positiva a muy positiva, con la distancia ($Sk = 1.069$ y 1.427).

Ex 2_3.77 wt%

Figura IV.10. Vista en planta del Ex2 con histogramas de frecuencia de tamaño de clastos localizado en su lugar de muestreo.



IV.3. Experimento 3_4.16wt%

Cinemática

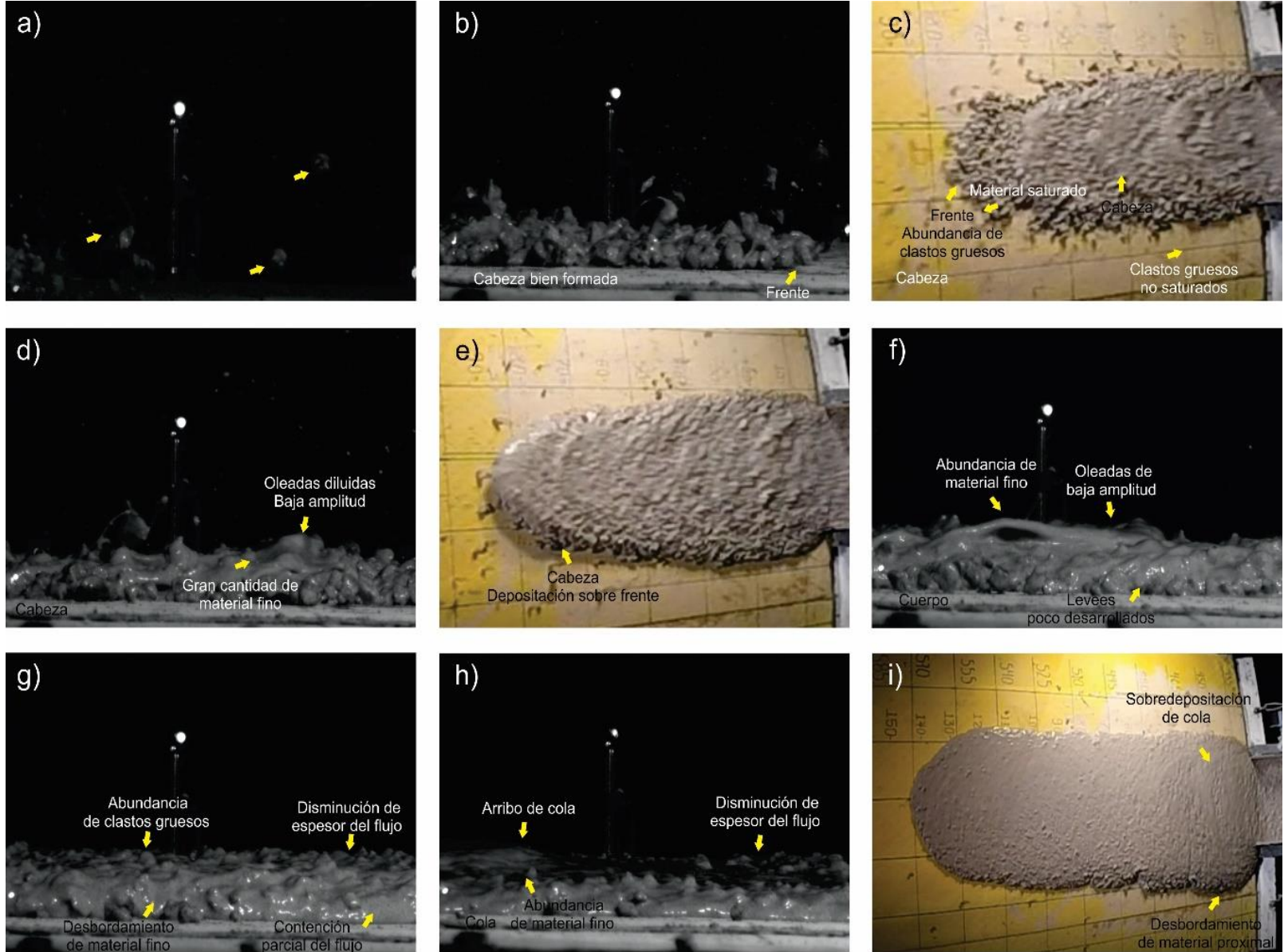
Durante el primer metro de recorrido (contenedor - L3), el frente del flujo alcanza una velocidad media de 3.12 m/s. Posteriormente, el frente se transportó en un intervalo de velocidad media entre 3.38 y 4.44 m/s, con una velocidad promedio de 3.79 m/s, en la longitud restante del canal (L4 – 10, 1.35 a 4.05 m). Finalmente, de la zona de transición del canal a la unidad de sedimentación (L11 – 13, 4.65 a 5.40 m), disminuye la velocidad del frente hasta un valor mínimo registrado de 0.78 m/s, a una razón de 2.70, hasta su depósito (Tabla IV. 1 y Figura IV.1).

Con la observación de videos, se describe el arribo a la zona de sedimentación de pocos clastos de tamaño grava separados del flujo, que se mueven por saltación (Figura IV.11a). El frente del flujo arriba aproximadamente 1.7 s después de la liberación del material. Se caracteriza por presentarse bien desarrollado y con un movimiento laminar (Figura IV.11b). Se desarrolla a través de un borde frontal y lateral constituido por clastos gruesos, que confinan la parte central. Estos clastos se transportan algunos centímetros por rodamiento sobre el sustrato. En contraste, la parte central y confinada, se mueve como un fluido homogéneo, con una superficie formada por clastos gruesos dispersos que se transportan por suspensión dentro de una matriz de arena y agua (Figura IV.11d). La cabeza se desplaza sobre los materiales previamente depositados por los clastos aislados (Figura IV.11e). El espesor del frente del flujo se mantiene constante durante todo su recorrido. Finalmente, el material que es transportado por el frente del flujo se deposita sobre la unidad de sedimentación a una distancia de 0.80 m, desde el cambio de pendiente (Figura IV.11c).

El cuerpo del flujo está formado por varias oleadas de material, con mayor contenido de arena, limo, arcilla y agua, y con menor contenido de clastos gruesos dispersos en suspensión transportados por el fluido. Estas oleadas son de baja amplitud y la descarga es relativamente constante (Figura IV.11f). La parte central del flujo presenta una diferencia significativa de velocidad con respecto a los márgenes. La parte central es un fluido homogéneo que se desplaza a una velocidad continua durante todo su recorrido, inclusive mayor que la alcanzada por el frente; mientras que los márgenes, enriquecidos en material grueso, se encuentran casi estáticos. La descarga máxima del material ocurre en la parte central. La parte central disminuye su espesor. En contraste, los márgenes presentan menor espesor que la parte central, y contienen el flujo de manera parcial. El fluido de la parte central logra desbordarse por encima de los márgenes, debido a que presenta mayor espesor. El cuerpo disminuye su velocidad cuando se encuentra con el material depositado previamente por el frente (Figura IV.11g).

Finalmente, la cola del flujo se caracteriza porque la descarga y velocidad del material disminuyen. Está constituida principalmente por arena, limo y arcilla y agua, con escasos clastos gruesos que se transportan en suspensión. La parte central del flujo se mueve de forma laminar (Figura IV.11g). Se desarrollan oleadas en la superficie, con mayor amplitud que las desarrolladas por cuerpo; las cuales generan variaciones abruptas en la descarga. El material de las primeras oleadas logra disminuir el espesor del flujo (Figura IV.11h); sin embargo, el material de las siguientes oleadas se deposita sobre el depósito formado por el frente y cuerpo, específicamente en la zona proximal al cambio de pendiente. Esto genera un aumento en la profundidad y ancho del flujo en la zona proximal, hasta que el flujo se detiene completamente (Figura IV.11i).

Figura IV. 11. Secuencia de movimiento del flujo en el EX3.



Características del depósito

El depósito formado por el Ex3 está constituido por un lóbulo frontal y levees laterales (Figura IV.3). Tiene un alcance (D_{max}) de 1.44 m, sobre la unidad de sedimentación. La zona proximal se localiza desde el cambio de pendiente hasta 0.70 m de longitud del depósito. Se caracteriza por mostrar los valores de ancho (W_{max}) y espesor máximos (Th_{max}), de 0.63 m y 56 mm, respectivamente. El espesor disminuye gradualmente con una tasa de adelgazamiento de 0.060, hasta 17 mm. En sección transversal, el depósito tiene forma convexa en esta zona, y se observa el mayor grado de curvatura (Figura IV.12). La superficie del depósito es lisa, constituida por material fino y presenta estructuras de deformación parabólicas. Estas estructuras se encuentran bien definidas hasta 0.5 m de longitud del depósito, y se van atenuando hacia la zona distal. Los clastos gruesos se localizan únicamente en los levees laterales.

La zona media, comprendida entre 0.70 y 1.20 m de longitud del depósito, se caracteriza por presentar un ancho (W_{mean}) de 0.473 m, que disminuye gradualmente a 0.440 m. Tiene un espesor casi constante entre el intervalo de 16 a 17 mm. En sección transversal, tiene forma convexa, sin embargo, el grado de curvatura disminuye con respecto a la zona proximal. Su superficie es suave, constituida principalmente por arena, con clastos gruesos que sobresalen del depósito. Finalmente, los levees se encuentran poco desarrollados y tienen un espesor (Th_{lev}) de 21 mm.

La zona distal forma un lóbulo, en la longitud restante del depósito (de 1.20 a 1.44 m), cuyos bordes están definidos por la acumulación de material grueso. Se caracteriza por ser la zona más angosta del depósito, con el ancho menor general de 0.25 m, muy cerca del borde frontal del depósito. Presenta un cambio gradual del espesor desde la zona media hasta 10 mm. En sección transversal, la superficie es casi plana (Figura IV.12). El depósito continúa presentando perfiles transversales con márgenes de menor espesor que la parte central, y con ello se expresa que el desarrollo de los levees es mínimo con la distancia.

Con los datos anteriores, se obtuvieron relaciones de aspecto de 0.038 y 0.332 para el espesor máximo/alcance (Th_{max}/D_{max}) y el ancho medio/alcance (W_{mean}/D_{max}), respectivamente (Tabla IV.2 y Figura IV.5).

Granulometría

En la zona proximal, el depósito muestra un histograma con modas en las fracciones de -2, 3 y 9 phi. La moda de la fracción arenosa se mueve en el rango de tamaño entre 2 y 4 phi. De forma longitudinal, el contenido de grava aumenta con la distancia, de la zona proximal (AC) a la distal (DC), particularmente los clastos con diámetro de -2 phi (18.84 a 23.74%) (Figura IV.13). Por el contrario, la fracción arenosa, particularmente los tamaños de 2 y 4 phi, aumentan de 6.03 y 5.75% a 6.81 y 7.18%, respectivamente. Finalmente, la fracción arcillosa aumenta con la distancia, en específico el tamaño 9 phi, con porcentajes de (AC) 8.95 a (DC) 10.35%.

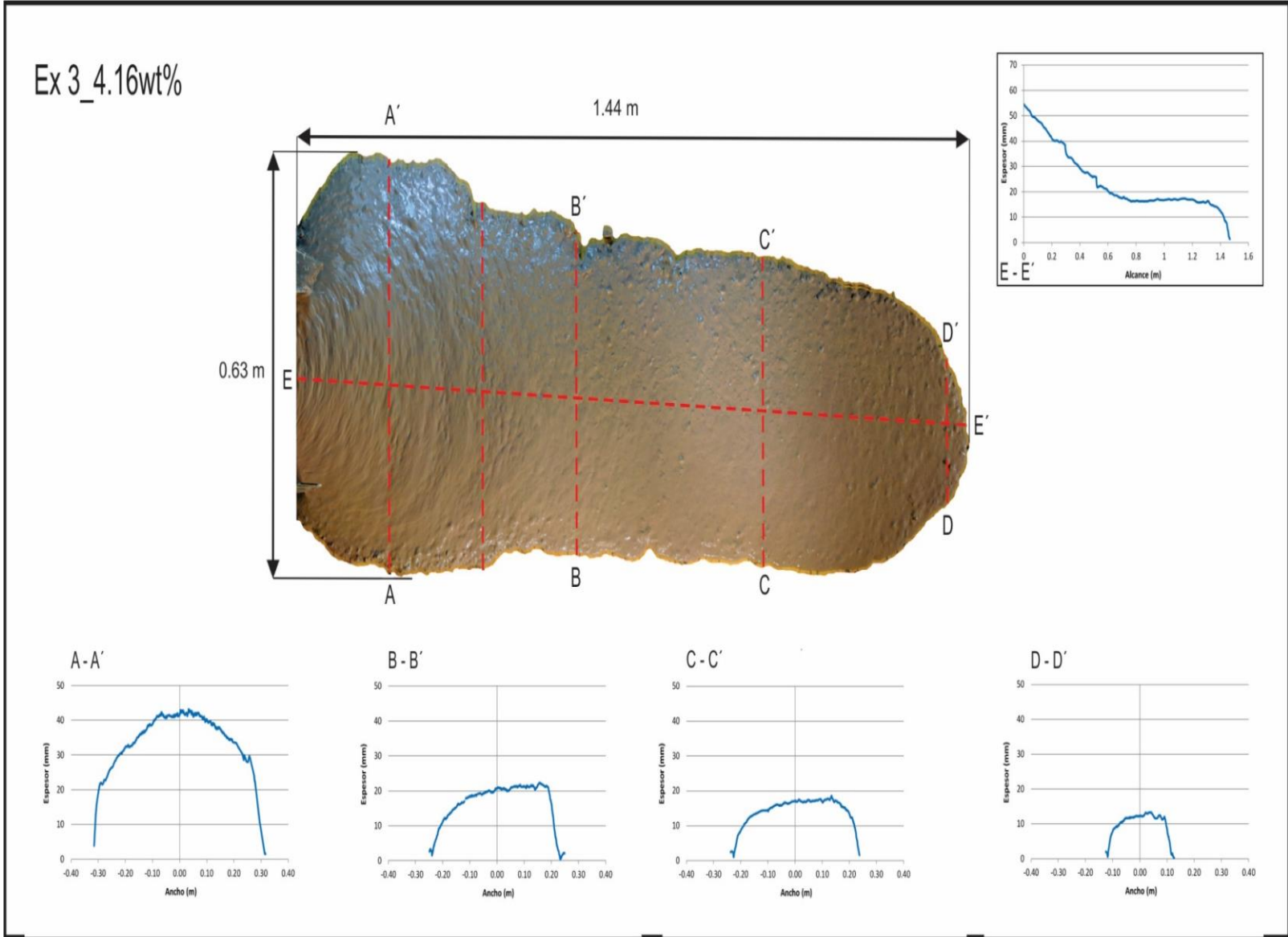
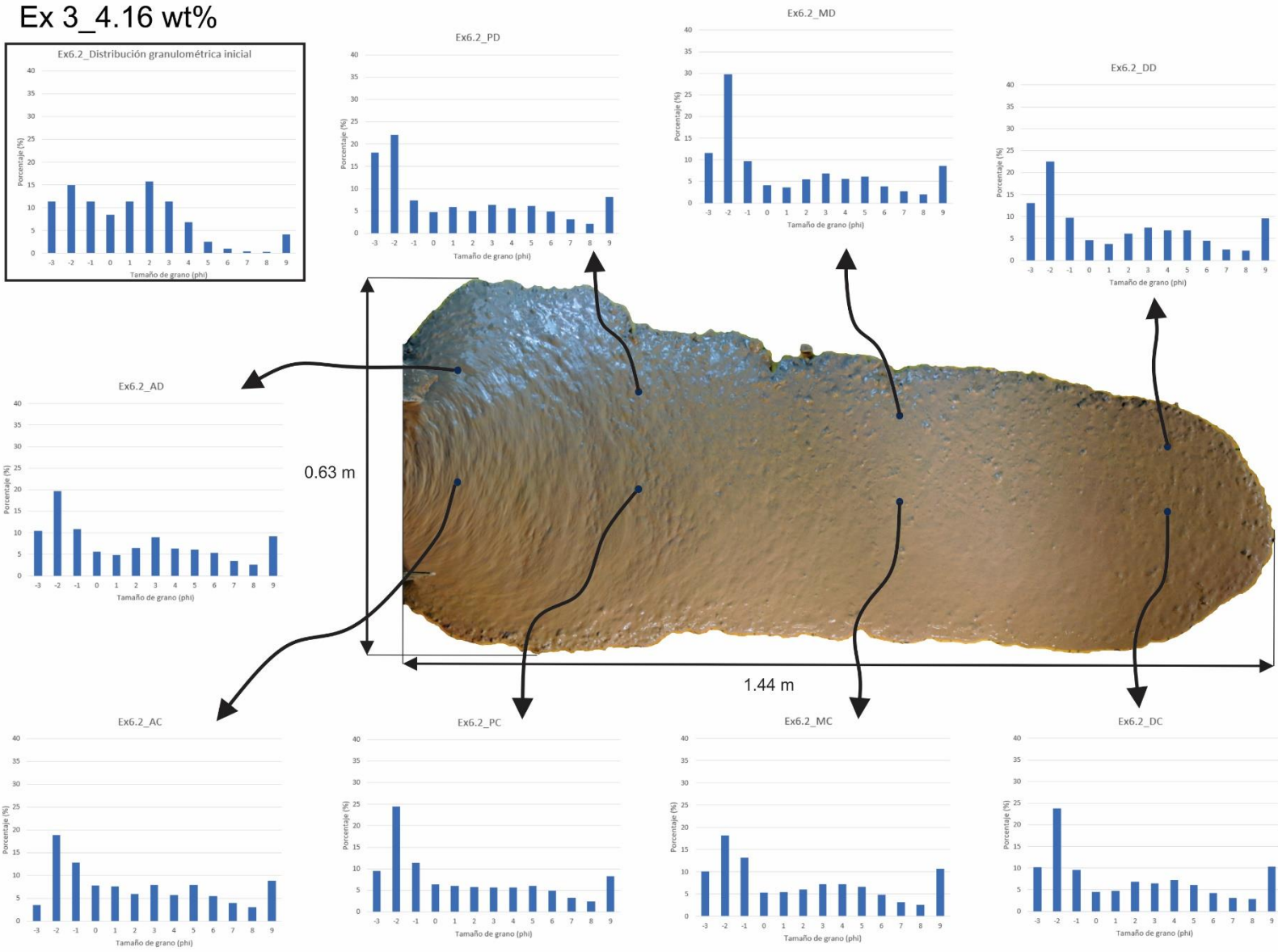


Figura IV.12: Perfiles transversales del depósito del Ex3.

En los márgenes del depósito, los levees están constituidos principalmente por clastos de -1 a -3 phi (MD: 9.71 y 11.54% y DD: 9.74 y 13.04%, respectivamente) y muestran modas muy pronunciadas en la fracción -2 phi (MD y DD), con porcentajes de 29.83% y 22.54%. A pesar de estos cambios con la distancia, la distribución granulométrica bimodal inicial, con modas en -2, 2 y 4, y 9 phi, se conserva durante toda la extensión del depósito.

Con respecto a los parámetros estadísticos (Anexo D), el diámetro medio de los clastos aumenta con la distancia de 1.62 a 1.22 phi, lo cual se refleja en la migración de las curvas acumulativas hacia la fracción gruesa. Además, el grado de selección es muy malo en todo el depósito ($\sigma = 3.67$ a 3.93). Finalmente, las distribuciones granulométricas son positivas en todo el depósito, como en la zona central y lateral ($Sk = 0.452$ a 0.522), y presentan un aumento en la asimetría con la distancia.

Figura IV.13: Vista en planta del Ex3 con histogramas de frecuencia de tamaño de clastos localizada en su lugar de muestreo.



IV.4. Experimento 4_7.54 wt%

Cinemática

El frente del flujo alcanza una velocidad media de 4.46 m/s, durante el primer metro de recorrido (contenedor – L3). Posteriormente, se transportó en un intervalo de velocidad media entre 2.49 y 3.72 m/s, con una velocidad promedio de 3.40 m/s, en la longitud restante del canal (L4 – 10, 1.36 a 4.06 m). Finalmente, en la zona de transición del canal a la unidad de sedimentación (L11 – 13, 4.33 a 4.77), disminuye la velocidad del frente hasta un valor mínimo registrado de 2.60 m/s, a una razón de 0.22, hasta su depósito (Tabla IV.1 y Figura IV.1).

A través de los videos, se observa el arribo de clastos de tamaño grava aislados, a la zona de sedimentación. Este arribo ocurre 1.3 s después de la liberación del material del contenedor. Los clastos se mueven por rodamiento y saltación (Figura IV.14a). Su depósito ocurre a una distancia mayor a 0.5 metros a partir del cambio de pendiente.

El frente del flujo arriba aproximadamente 0.35 s después. Se caracteriza por el desarrollo de un borde frontal y lateral constituido por clastos gruesos (Figura IV.14b), que confinan perfectamente la parte central del flujo, la cual se encuentra totalmente saturado de agua y en estado de licuefacción (Figura IV.14c). La parte central del flujo se transporta mediante un movimiento laminar a una velocidad de 1.90 m/s, mientras que, los márgenes se transportan algunos centímetros por rodamiento. La superficie del frente se forma a partir de una gran cantidad de clastos gruesos que se transportan por suspensión en una matriz poco abundante de arena y agua. El frente mantiene una profundidad constante de aproximadamente 3 cm en todo su recorrido. Momentáneamente, los márgenes del frente se depositan; mientras que la parte central continúa en movimiento. Esta divide y remueve el material del borde frontal hacia los lados del flujo (Figura IV.14d).

El cuerpo del flujo se forma por varias oleadas de material más fluido, que transporta por suspensión un gran contenido de clastos gruesos. El abundante contenido de clastos gruesos disminuye en las oleadas sucesivas. Estas oleadas son de muy baja amplitud y la descarga es relativamente constante (Figura IV.14e). El cuerpo presenta una diferencia significativa de velocidad en la parte central y en los márgenes. La parte central es un fluido homogéneo, con clastos gruesos suspendidos en una abundante matriz de clastos finos y agua, que se desplaza a una velocidad de 2.20 m/s. Por otro lado, los márgenes, enriquecidos en clastos gruesos, se encuentran casi estáticos (Figura IV.14f). La descarga máxima del material ocurre en la parte central, lo que provoca un aumento inicial en el espesor del flujo. Sin embargo, la continua descarga de material en las oleadas sucesivas disminuye su espesor a 1.5 cm aproximadamente. Los márgenes presentan mayor espesor que la parte central, y generan levees bien desarrollados, que contienen el flujo en su totalidad durante el paso del cuerpo.

La cola de flujo se caracteriza por que la descarga y velocidad del material disminuyen. Se presenta a través de algunas oleadas de material con amplitudes que disminuyen con el tiempo de descarga (Figura IV.14g). Estas oleadas se constituyen por una gran cantidad de arena, limo y arcilla transportada de forma laminar, sin la presencia de clastos gruesos. El material transportado por la cola aumenta el espesor general del flujo. Finalmente, la cola se deposita en la parte proximal del depósito formado por el frente y el cuerpo, y desplaza gradualmente este material. Los levees se encuentran muy bien desarrollados, al igual que el frente, lo que confina el material recién depositado, sin inducir ninguna perturbación, como el ensanchamiento del depósito, al material depositado inicialmente.

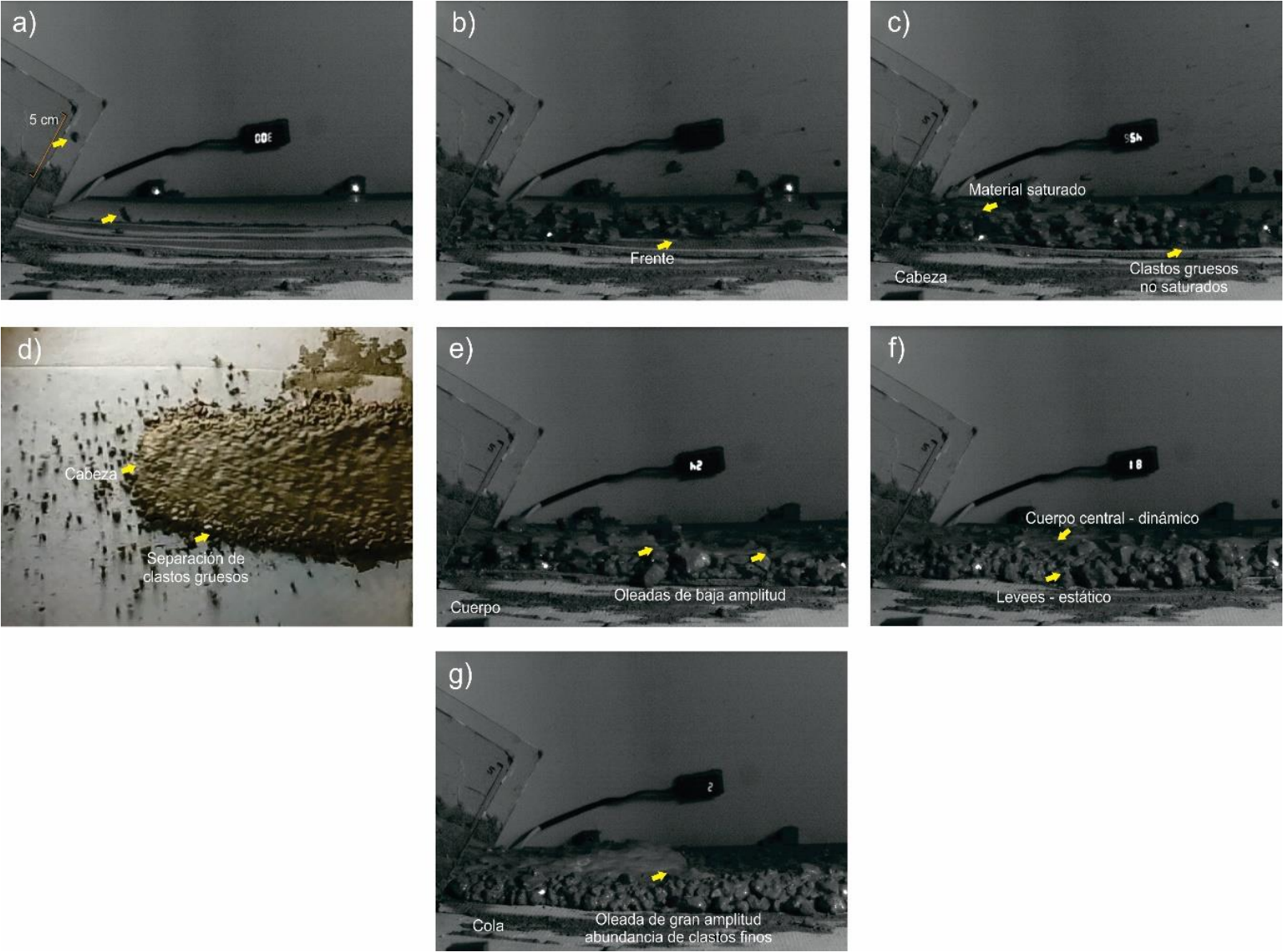


Figura IV.14. Secuencia de movimiento del flujo en el Ex4.

Características del depósito

El depósito formado por el Ex4 está constituido por un lóbulo frontal y levees laterales (Figura IV.3). Tiene un alcance (D_{max}) de 1.01 m, sobre la unidad de sedimentación. La zona proximal se localiza desde el cambio de pendiente hasta 0.47 m de longitud del depósito. Se caracteriza por mostrar los valores de ancho (W_{max}) y espesor máximos (T_{hmax}), de 0.41 m y 45 mm, respectivamente. El espesor disminuye gradualmente con una tasa de adelgazamiento de 0.059, hasta 18 mm. En sección transversal, el depósito tiene forma convexa en esta zona y se observa el mayor grado de curvatura (Figura IV.15). La superficie del depósito es lisa, constituida por material fino y presenta estructuras de deformación parabólicas. Los clastos gruesos se localizan únicamente en los levees laterales.

La zona media, comprendida entre 0.47 y 0.80 m de longitud del depósito, se caracteriza por presentar un ancho constante (W_{mean}) de 0.343 m; y un espesor variable con la distancia. El espesor es de 18 mm, en la parte inicial, posteriormente aumenta a 26 mm, y finalmente disminuye a 23 mm. En sección transversal, la zona media tiene forma convexa, sin embargo, el grado de curvatura disminuye con respecto a la zona proximal. Su superficie es suave, constituida principalmente por arena, con clastos gruesos que sobresalen del depósito y pliegues en forma de parábolas. Estas estructuras se encuentran bien definidas hasta 0.7 m de longitud del depósito, y se van atenuando hacia la zona distal. Finalmente, los levees se encuentran bien desarrollados y tienen un espesor (T_{hlev}) de 23 mm.

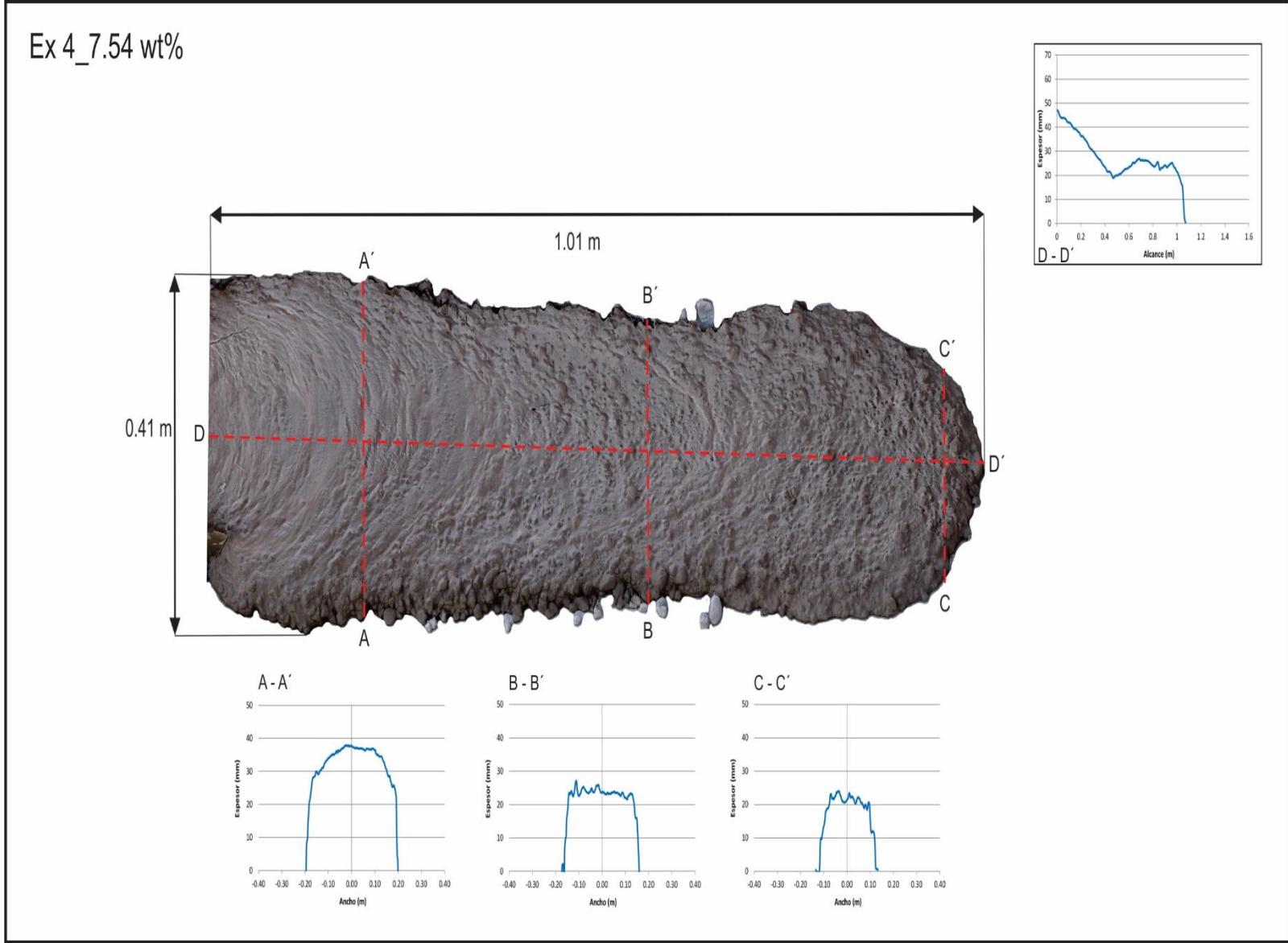
La zona distal forma un lóbulo, en la longitud restante del depósito (de 0.80 a 1.01 m), cuyos bordes están definidos por la acumulación de material grueso. Se caracteriza por ser la zona más angosta del depósito, con el ancho menor general de 0.26 m. Presenta un espesor constante desde la zona media de 23 mm. En sección transversal, la superficie es casi plana (Figura IV.15). El depósito presenta perfiles transversales con márgenes de igual espesor que la parte central, y con ello se expresa que el buen desarrollo de los levees continua con la distancia

La relación de aspecto para el espesor máximo/alcance (T_{hmax}/D_{max}) es de 0.044 y para el ancho medio/alcance (W_{mean}/D_{max}) es de 0.338 (Tabla IV.2 y Figura IV.5).

Granulometría

En la zona proximal, el depósito muestra un histograma con modas en las fracciones de -2, 2 y 9 phi. De forma longitudinal, el contenido de grava aumenta con la distancia, de la zona proximal (PI) a la distal (DI); particularmente, los clastos con diámetro de -2phi (24.51 a 28.03%) (Figura IV.16). Por el contrario, la fracción arenosa, particularmente el tamaño de 2 phi, disminuye de 11.51 a 9.84%. Finalmente, la fracción arcillosa disminuye con la distancia, en específico la fracción 9 phi, con porcentajes de (PI) 2.60 a (DI) 1.64%.

Figura IV.15. Perfiles transversales del depósito del Ex4.

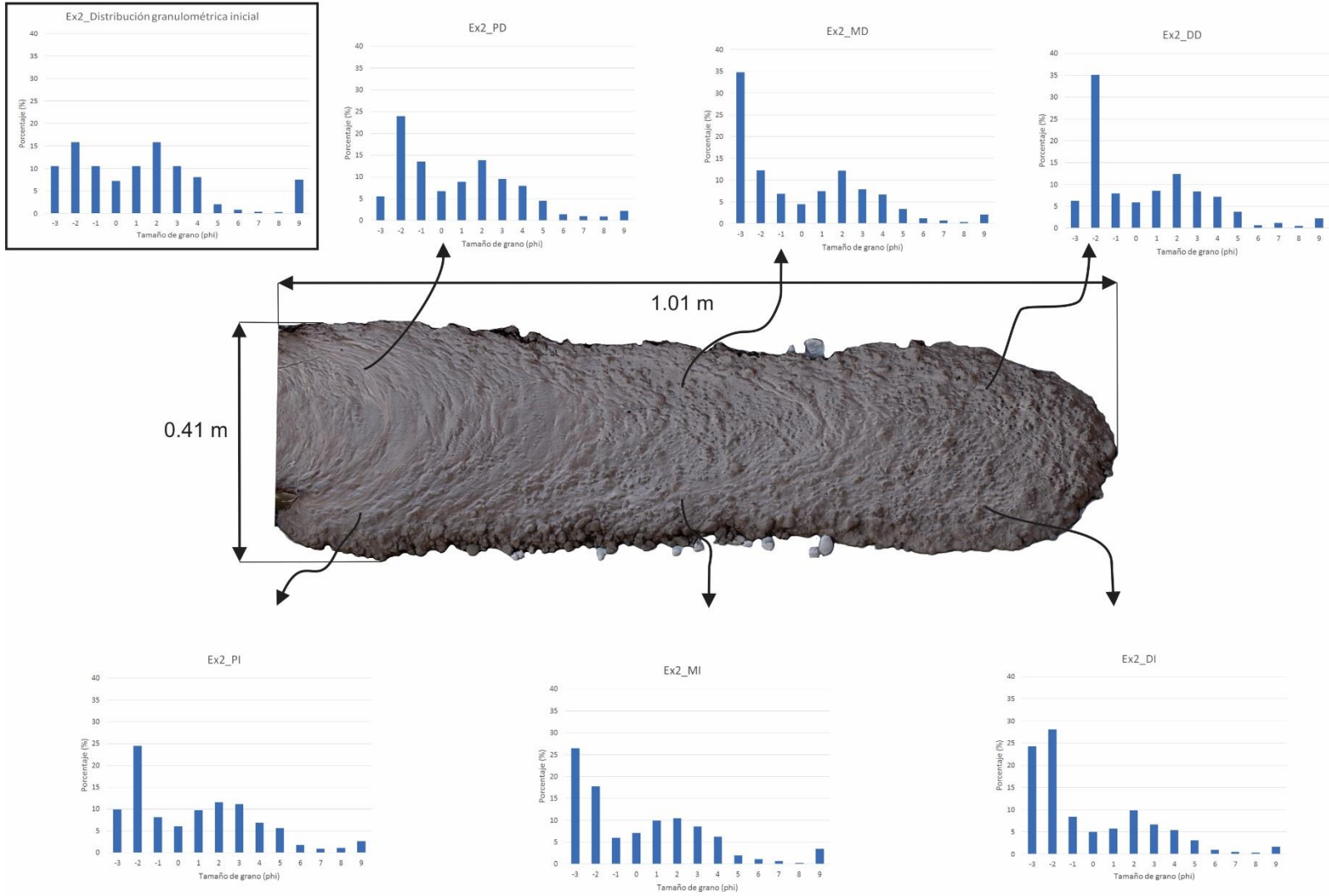


En los márgenes del depósito, los levees están constituidos principalmente por clastos de -1 a -3 ϕ . Las distribuciones granulométricas muestran modas muy pronunciadas en la fracción -3 ϕ (MD: 34.80%) y -2 ϕ (DD: 35.13%). A pesar de estos cambios con la distancia, la distribución granulométrica bimodal inicial, con modas en -2 y 2 , y 9 ϕ , se conserva durante toda la extensión del depósito.

Con respecto a los parámetros estadísticos (Anexo D), el diámetro medio de los clastos aumenta con la distancia de 0.34 a -0.73 ϕ , lo cual se refleja en la migración de las curvas acumulativas hacia la fracción gruesa. Además, el grado de selección es muy malo en todo el depósito ($\sigma = 2.78$ a 3.01). Finalmente, las distribuciones granulométricas son positivas en la zona central y márgenes del depósito ($Sk = 0.682$ a 1.156).

Ex 4_7.54 wt%

Figura IV.16. Vista en planta del Ex4 con histogramas de frecuencia de tamaño de clastos localizado en su lugar de muestreo.



IV.5. Experimento 5_15.00wt%

Cinemática

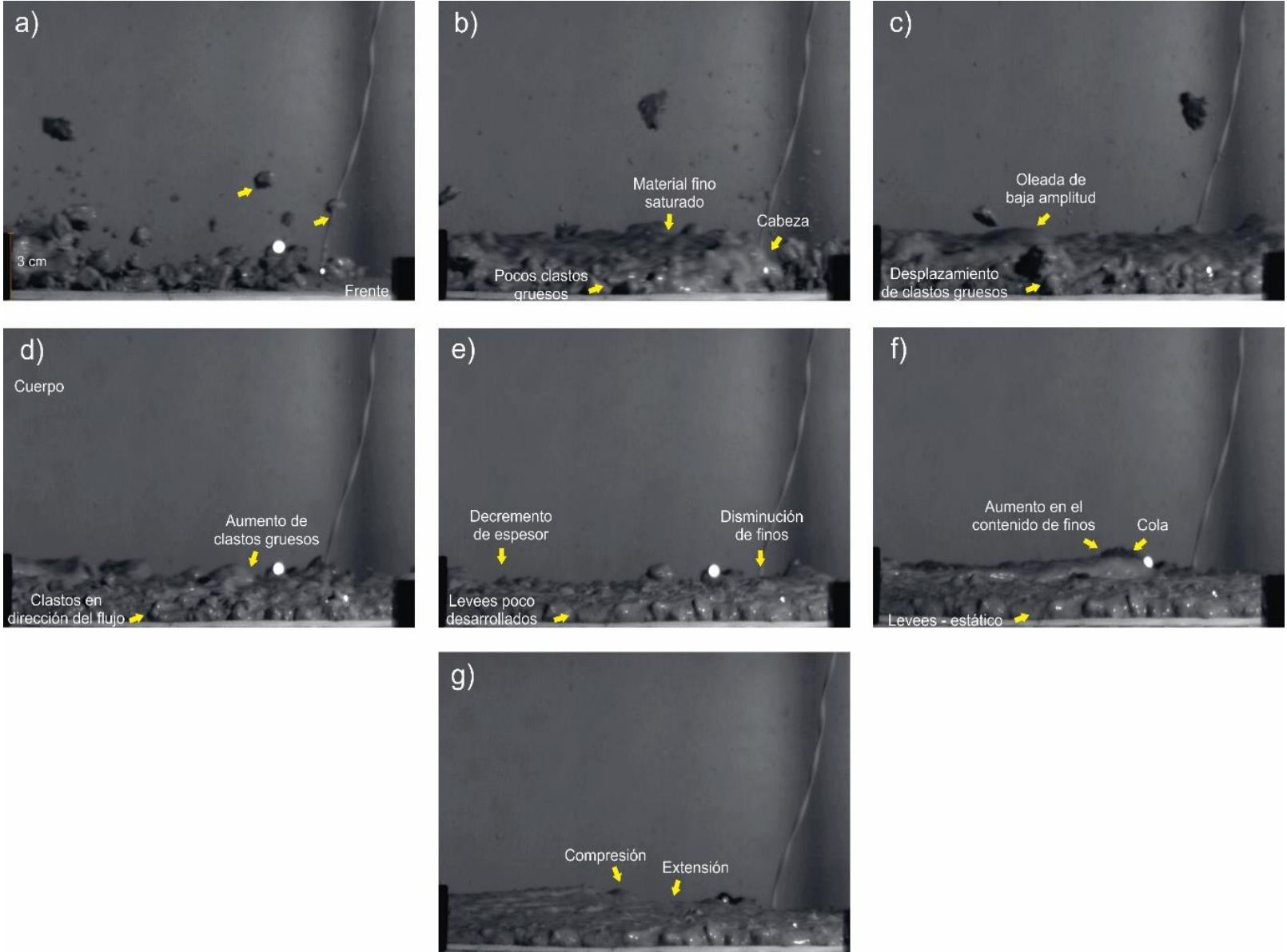
El frente del flujo alcanza una velocidad media de 3.35 m/s en esta sección del canal. Posteriormente, el frente se transportó en un intervalo de velocidad media entre 3.46 y 4.19 m/s, con una velocidad promedio de 3.77 m/s, en la longitud restante del canal (L4 – 10, 1.35 a 4.05 m). Finalmente, en la zona de transición del canal a la unidad de sedimentación (L11 – 13, 4.65 a 5.40 m), disminuye la velocidad del frente hasta un valor mínimo registrado de 0.67 m/s a una razón de 2.69, hasta su depósito (Tabla IV.1 y Figura IV.1).

El frente del flujo se encuentra bien desarrollado a partir de un borde frontal y lateral constituido por clastos gruesos, que confinan la parte central del flujo (Figura IV.17a). La parte central presenta una gran cantidad de clastos finos que se encuentran saturada de agua y en estado de licuefacción. Los clastos del borde se transportan por rodamiento durante un largo periodo de tiempo y distancia. Mientras que, la parte central del frente se mueve como un flujo homogéneo de forma laminar. La oleada principal de material presenta una profundidad de 3 cm aproximadamente (Figura IV.17b). El frente incluye un par de oleadas, transportadas inmediatamente después de la principal, con profundidad constante (Figura IV.17c).

El cuerpo del flujo está formado por varias oleadas de material con muy baja amplitud. Dichas oleadas contienen una gran cantidad de clastos finos y agua; además de una mayor cantidad de clastos gruesos, con respecto a el contenido en el frente, que aumenta en las oleadas sucesivas (Figura IV.17d y e). La descarga de material es relativamente constante durante el desarrollo del cuerpo del flujo. La descarga máxima ocurre en la parte central, que se desplaza a grandes velocidades de forma laminar. Además, los clastos gruesos localizados en los márgenes continúan en movimiento de forma rotacional en la misma dirección del flujo. El espesor general del flujo disminuye a medida que ocurre la descarga de material. Los márgenes presentan poco espesor, con ello desarrollo, y contienen el flujo de manera parcial (Figura IV.17e). El fluido logra desbordarse por encima de ellos.

La cola del flujo se caracteriza por que la descarga y velocidad del material disminuyen. Está constituida por una gran cantidad de material fino, que aumenta de manera considerablemente en las oleadas posteriores. El material fino se transporta en la parte central del flujo a través de un movimiento laminar. Finalmente, el material transportado por la cola del flujo se deposita en la parte proximal y media del depósito formado por el cuerpo del flujo, lo que ocasiona un aumento general de la profundidad (Figura IV.17f). La sedimentación de este material es a través de varias oleadas (Figura IV.17g). Los márgenes del flujo se encuentran estáticos, presentan poco espesor; pero logran confinar el flujo totalmente.

Figura IV.17. Secuencia de movimiento del flujo en el Ex5.



Características del depósito

El depósito formado por el Ex5 está constituido por un lóbulo frontal y levees laterales (Figura IV.3). Tiene un alcance (D_{max}) de 1.53 m, sobre la unidad de sedimentación. La zona proximal se localiza desde el cambio de pendiente hasta 0.40 m de longitud del depósito. Se caracteriza por mostrar los valores de ancho (W_{max}) y espesor máximos (T_{hmax}), de 0.467 m y 35 mm, respectivamente. El espesor disminuye gradualmente con una tasa de adelgazamiento de 0.082, hasta 4.5 mm. En sección transversal, el depósito tiene forma convexa en esta zona y se observa el mayor grado de curvatura (Figura IV.18). La superficie del depósito es lisa, constituida por material fino. Se presentan estructuras de deformación parabólicas que reflejan superficies de compresión y extensión distribuidas sobre todo el depósito. La mayor cantidad de clastos gruesos se localiza en los levees laterales.

La zona media comprende entre 0.40 y 1.20 m de longitud del depósito. Se caracteriza por presentar un ancho (W_{mean}) de 0.429 m, que se mantiene constante con la distancia. La acumulación de material en estructuras parabólicas de deformación genera variaciones del espesor con la distancia. En la primera estructura de acumulación de material el espesor aumenta de 4.5 mm a 23 mm, y se ubica entre 0.4 y 1.0 m de longitud. Posteriormente, el espesor disminuye abruptamente a 16 mm. En la siguiente zona de acumulación, el espesor aumenta de 16 mm a 23 mm, y se ubica entre 1 y 1.2 m de longitud. En sección transversal, la zona media tiene forma convexa, sin embargo, el grado de curvatura disminuye con respecto a la zona proximal. Su superficie es suave, constituida principalmente por arena, con clastos gruesos que sobresalen del depósito. Finalmente, los levees se encuentran bien desarrollados y tienen un espesor (T_{lev}) de 24 mm.

La zona distal forma un lóbulo, en la longitud restante del depósito (de 1.20 a 1.53 m), cuyos bordes están definidos por la acumulación de material grueso. El ancho se mantiene constante y similar a la zona media. La zona más distal se caracteriza por ser la zona más angosta del depósito, con el ancho menor general de 0.268 m, muy cerca de la longitud final. El espesor aumenta de manera gradual desde la zona media hasta alcanzar 29 mm, determinado por lo menos por dos zonas de acumulación de material. En sección transversal, la superficie es casi plana (Figura IV.18). El depósito presenta perfiles transversales con márgenes de mayor o igual espesor que la parte central, y con ello se expresa que el buen desarrollo de los levees continua con la distancia.

Con los datos anteriores, se obtuvieron relaciones de aspecto de 0.023 y 0.282 para el espesor máximo/alcance (T_{hmax}/D_{max}) y el ancho medio/alcance (W_{mean}/D_{max}), respectivamente (Tabla IV.2 y Figura IV.5).

Granulometría

En la zona proximal, el depósito muestra un histograma con modas en las fracciones de -2, 2, 5 y 9 phi. De forma longitudinal, el contenido de grava aumenta con la distancia, de la zona proximal (P) a la distal (DD), particularmente los clastos con diámetro de -2 phi (33.55 a 35.42%) (Figura IV.19). Por el contrario, la fracción arenosa presenta la migración de los tamaños de 2 a 4 phi. La moda en 2 phi disminuye de (P) 5.32 a 3.35 % (DD), mientras que la fracción de 4 phi aumenta de 6.51 (P) a 8.43 % (DD). Finalmente, la fracción arcillosa disminuye con la distancia, en específico el tamaño 9 phi, con porcentajes de (P) 9.47 a (DD) 6.26 %.

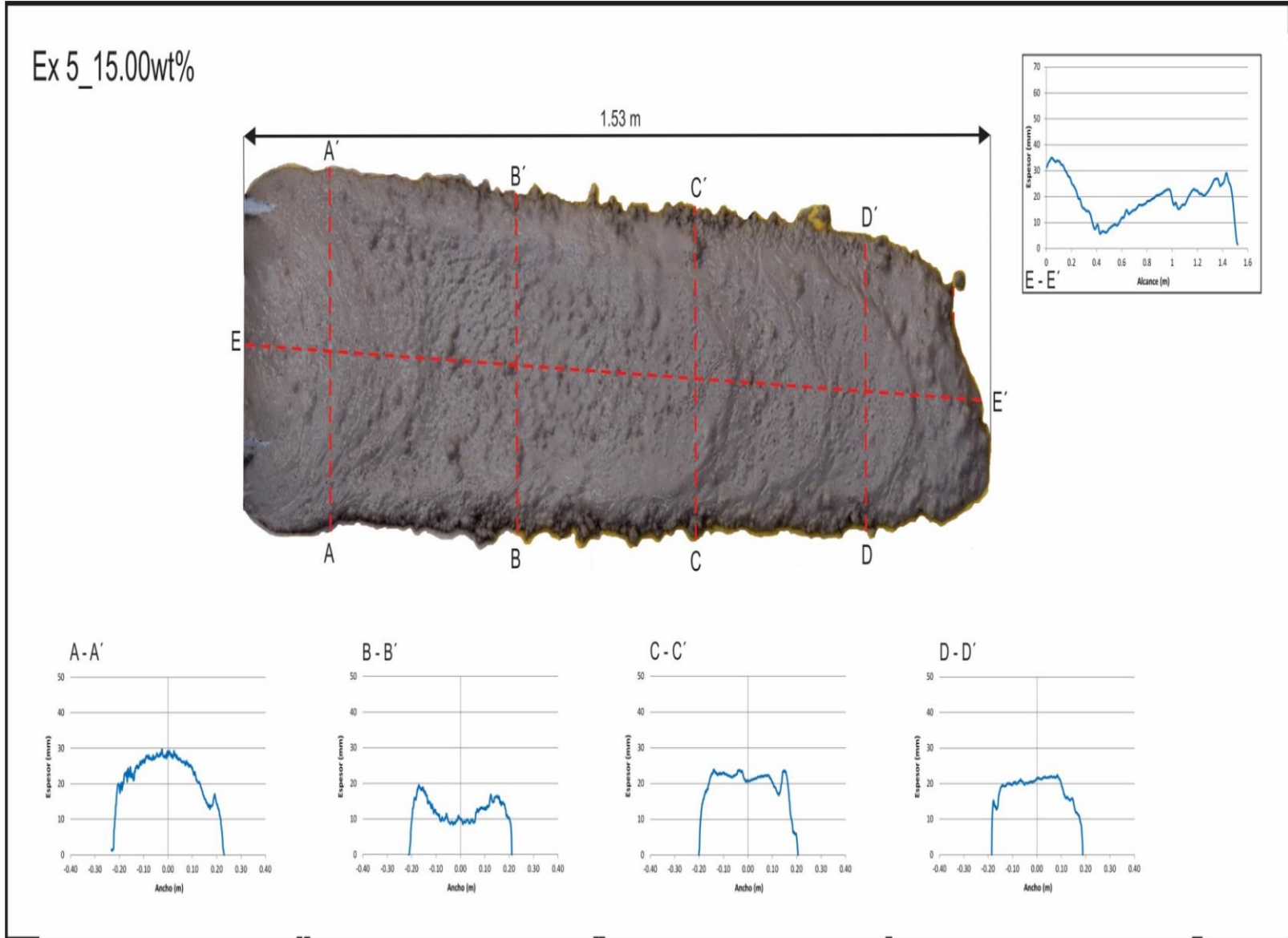


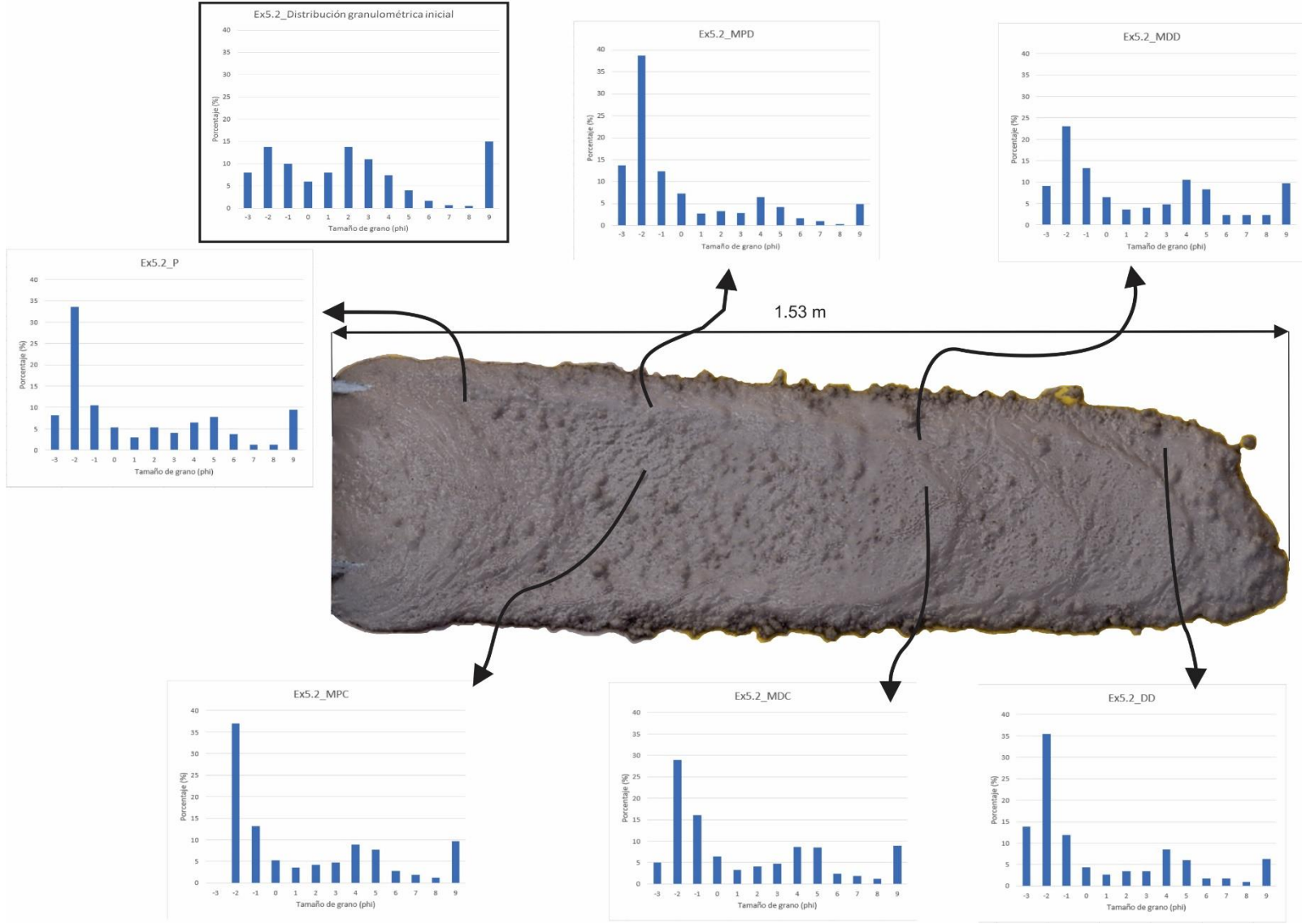
Figura IV.18: Perfiles transversales del depósito del Ex5.

En los márgenes del depósito, los levees están constituidos principalmente por clastos de -1 a -3 phi (MPD: 12.41 y 13.71% y MDD: 13.25 y 9.05%, respectivamente). Además, las distribuciones granulométricas de muestran modas muy pronunciadas en la fracción -2 phi (MPD y MDD), con porcentajes de 38.70% y 23.07%. A pesar de estos cambios con la distancia, la distribución granulométrica bimodal inicial, con modas en -2, 2, 4 o 5, y 9 phi, se conserva durante toda la extensión del depósito.

Con respecto a los parámetros estadísticos (Anexo D), el diámetro medio de los clastos aumenta con la distancia de 0.66 a -0.025 phi, lo cual se refleja en la migración de las curvas acumulativas hacia la fracción gruesa. Además, el grado de selección es muy malo en todo el depósito ($\sigma = 3.266$ a 3.840). Finalmente, las distribuciones granulométricas son positivas en todo el depósito, como en la zona central y lateral, ($Sk = 0.586$ a 1.082). La distribución de la MPD es muy positiva ($Sk = 1.405$).

Ex 5_15.00 wt%

Figura IV.19. Vista en planta del Ex5 con histogramas de frecuencia de tamaño de clastos localizado en su lugar de muestreo.



IV.6. Números adimensionales

En los FE se desarrollan diferentes tipos de fuerzas en función de sus características, como el tipo de material, la concentración, la velocidad a la que se desplazan, entre otras. Estas son las fuerzas inerciales, las viscosas, las de fricción; y la relación entre una y otra se expresa a través de números adimensionales (Iverson, 1997). El análisis dimensional de los FE permite conocer su comportamiento, lo que caracteriza los tipos de interacciones que resultan entre los clastos y fluido intersticial que los forman. Se realizó el análisis adimensional en el canal y en la unidad de sedimentación, debido a las diferencias en el comportamiento del flujo. Se denota L11 a la información que hace referencia a las características del flujo en el canal, y L12 a la información propia de la unidad de sedimentación. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de diversos números adimensionales (Sección II.6) que permiten caracterizar el régimen de flujo de los FE realizados (Tabla IV. 3).

El número de Bagnold, que expresa la relación entre las fuerzas colisionales y las fuerzas viscosas, presenta valores en un intervalo de 13 a 233. Esto implica que dominan las fuerzas viscosas sobre las colisionales, en la mayoría de los FE experimentales (Figura IV.20), sin importar si se encuentran en el cambio de pendiente de la canaleta o la unidad de sedimentación. Sin embargo, los valores de los números de Bagnold son relativamente mayores cuando el flujo se encuentra en el canal. Es decir que, las fuerzas colisionales entre clastos aumentan su importancia cuando la

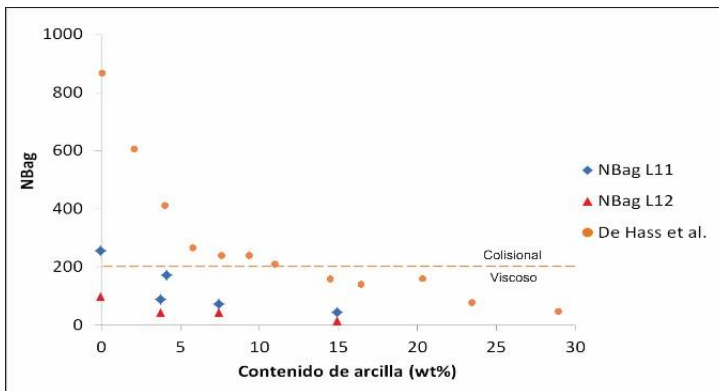


Figura IV. 20. Régimen de flujo colisional vs. viscoso por la variación en el contenido de arcilla. L11 hace referencia a las características del flujo en el canal, L12 en la unidad de sedimentación.

pendiente, la tasa de deformación y la velocidad aumentan ($\dot{\gamma}$ (1/s) L11: 47.05 – 216.18 y v (m/s) L11: 2.42 – 3.34). Una vez que el flujo llega a la unidad de sedimentación, este pierde confinamiento y disminuye la velocidad y la tasa de deformación ($\dot{\gamma}$ (1/s) L12: 17.59 – 69.01 y v (m/s) L12: 0.78 – 1.18), por lo que aumenta la importancia de las fuerzas viscosas durante el movimiento. Por lo tanto, inicia la sedimentación.

Respecto a los números de Savage, que nos hablan de la relación entre las fuerzas de colisión y de fricción entre clastos (Figura IV.21), los flujos presentan valores desde 0.0040 hasta 0.1590. Los cuales indican la presencia de comportamientos dominados por la fricción, en el canal y la unidad de sedimentación. Se observan números de Savage

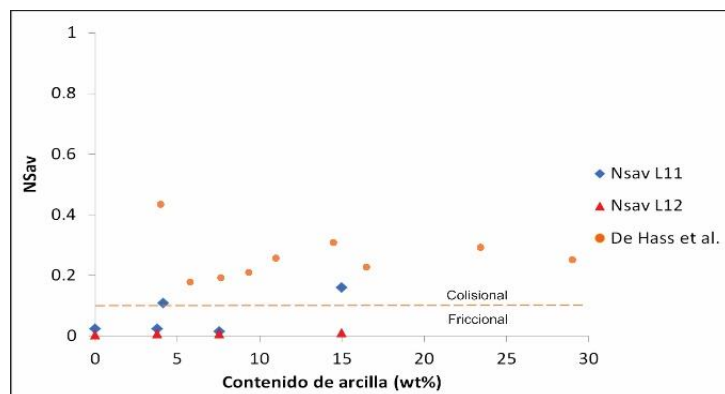
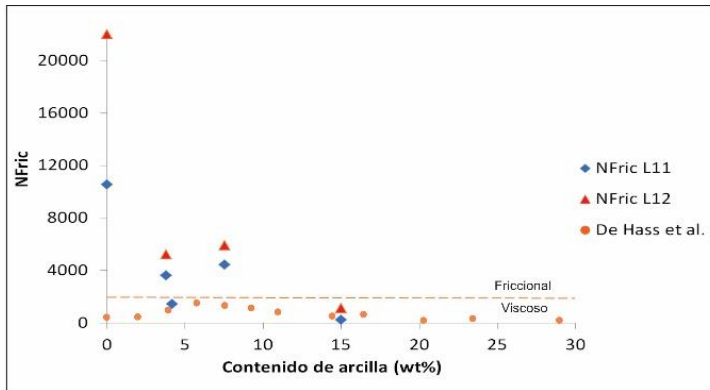


Figura IV.21. Régimen de flujo colisional vs. friccional por la variación en el contenido de arcilla.

relativamente mayores cuando el flujo se encuentra sobre el canal, con respecto a su posición sobre la unidad de sedimentación. Lo que evidencia la importancia de las fuerzas colisionales entre los clastos en el canal, lo cual es concordante con lo obtenido a partir del número de Bagnold.

El número de fricción, que establece la relación entre las fuerzas de fricción y las fuerzas viscosas, (Figura IV.22) confirma el dominio de las fuerzas de fricción en la mayoría de los flujos con poco contenido de arcilla, a través de la presencia de números entre el intervalo de 251 a 21 970. Con el



aumento de material arcilloso, los flujos presentan números de fricción más cercanos a el límite establecido ($N_{fric} = 2000$; Iverson, 1997) entre el régimen friccional y viscoso. El Ex5, con un 15 wt% de arcilla, presenta un comportamiento viscoso, adjudicado a la alta viscosidad del fluido intersticial por el gran contenido de arcilla.

Figura IV.22. Régimen de flujo friccional vs. viscoso por la variación en el contenido de arcilla.

De forma similar, para este trabajo los números de masa, que expresan la relación entre las fuerzas inerciales entre los clastos y el fluido, disminuyen (Figura IV.23a). Lo anterior se atribuye a la disminución de los efectos de inercia producidos por los clastos, es decir disminuyen la colisión entre partículas por el aumento en la viscosidad del fluido. Asimismo, este efecto se ve reflejado en la disminución del número de Reynolds granular, que relaciona el efecto de la viscosidad al tamaño del flujo (Figura IV.23b). Esto se debe a la suspensión de arcilla en el agua de poro, que mejora la viscosidad del fluido intersticial.

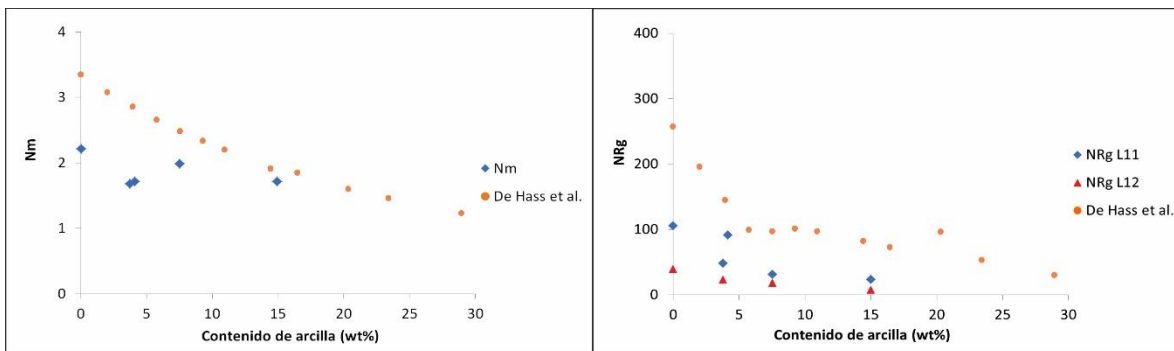


Figura IV.23. Régimen inercial. a) Número de masa, y b) Número de Reynolds granular.

Tabla IV.3. Parámetros físicos y adimensionales de los flujos de escombros de este estudio

Parámetro	Símbolo (Unidades)	Ex1 0.00wt%	Ex2 3.77wt%	Ex3 4.16wt%	Ex4 7.54wt%	Ex5 15wt%
Parámetros físicos						
Diámetro característico	δ (m)	0.00114	0.00072	0.00074	0.00061	0.00032
Espesor del flujo	H (m)	L11: 0.057	0.042	0.029	0.041	0.011
		L12: 0.044	0.029	0.016	0.032	0.015
Velocidad del flujo	v (m/s)	VinsL11: 2.68	2.68	3.34	2.52	2.42
		VinsL12: 0.78	0.9	3.98	1.18	1.09
Tasa de deformación del flujo	γ (1/s)	γ 11: 47.05	63.85	115.05	61.45	216.18
		γ 12: 17.59	30.72	242.93	36.5	69.01
Densidad de sólidos	ρ_s (kg/m ³)	2330	2330	2330	2330	2330
Densidad de fluido	ρ_f (kg/m ³)	1727.14	1733.11	1710.00	1680.00	1605.54
Fracción volumétrica de sólidos	Vs (-)	0.62	0.56	0.56	0.59	0.54
Fracción volumétrica de fluido	Vf (-)	0.38	0.44	0.44	0.41	0.46
Viscosidad del fluido	μ (Pa.s)	0.00100474	0.00120144	0.00120147	0.00122864	0.00155635
Ángulo de fricción	ϕ (°)	42	42	42	42	42
Parámetros adimensionales						
Número de Savage	NSav	L11: 0.0221	0.0224	0.1078	0.0139	0.1590
		L12: 0.0040	0.0074	-	0.0062	0.0114
Número de Bagnold	NBag	L11: 233	81	155	62	40
		L12: 87	39	-	37	13
Número de Fricción	NFric	L11: 10525	3608	1441	4441	251
		L12: 21970	5230	-	5894	1114
Número de masa	Nm	2.21	1.68	1.7	1.97	1.71
Número de Reynolds granular	NRg	L11: 105	48	91	31	23
		L12: 39	23	-	19	7

V. - DISCUSIÓN

V.1. Discusión

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos a través del análisis y observación de las características cinemáticas del flujo, y como se reflejan en los depósitos producidos. Con ello, fue posible describir a relación entre el contenido de material fino en el comportamiento de los flujos.

Integrando la información de los videos, morfometría y la granulometría se observó que, uno de los mecanismos más importantes, durante el transporte y emplazamiento del flujo, es el proceso de segregación de partículas. La segregación de partículas causa el movimiento de las partículas más gruesas hacia el frente y los márgenes del flujo (Figura V. 1), y provoca el desarrollo del frente, cuerpo y cola. La cantidad de material grueso disminuye hacia el cuerpo y la cola del flujo, por lo tanto, existe un aumento gradual en el contenido de fluido compuesto por el material más fino (arena a arcilla). Los frentes desarrollados se caracterizaron por una disminución de la velocidad sobre la unidad de sedimentación, lo que se relaciona con su alto contenido de material grueso y la poca cantidad de fluido. Esto aumenta la fuerza de fricción con el sustrato, por la irregularidad de las partículas. Por su parte, los cuerpos de los flujos se caracterizaron por el aumento en la velocidad y la disminución de la profundidad y descarga, debido a que la mayor cantidad de fluido disminuyó la fuerza de fricción. Finalmente, las colas presentan una disminución gradual de la velocidad y de la descarga. Respecto al contenido de arcilla, no se presenta ninguna tendencia en la velocidad media del frente del flujo (Figura IV.1).

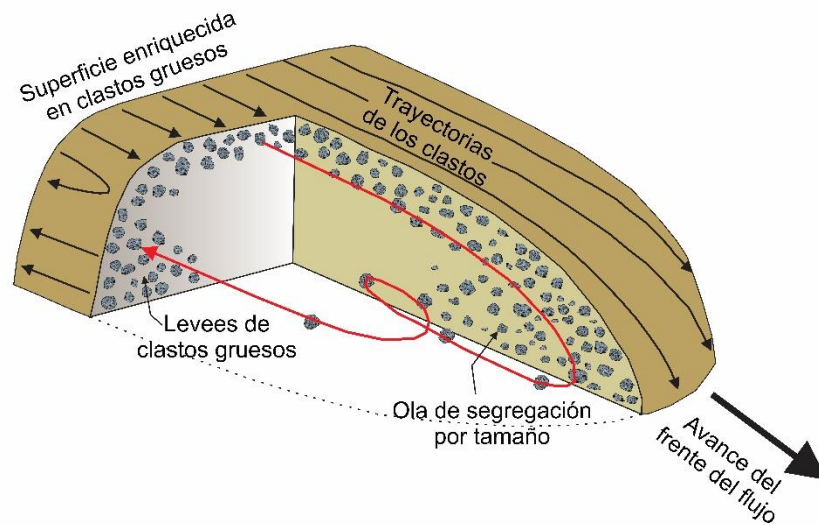


Figura V.1. Esquema del proceso de formación de levees detrás del frente del flujo de escombros (Tomada de Johnson et al., 2012).

El mecanismo de segregación de partículas por tamaño, se refleja en las variaciones transversales y longitudinales de las distribuciones granulométricas de los depósitos, especialmente, en el aumento en los valores de la media (Figura V.2 y Anexo D), en el intervalo de 2 a -1 phi (arena media a grava), en la migración de las curvas acumulativas hacia las fracciones gruesas con la distancia (Figura IV.7) y en el desarrollo de un frente lobular. El enriquecimiento en la fracción gruesa, en el frente y los márgenes del flujo, con la distancia se vio favorecido por el contenido de arcilla en los experimentos.

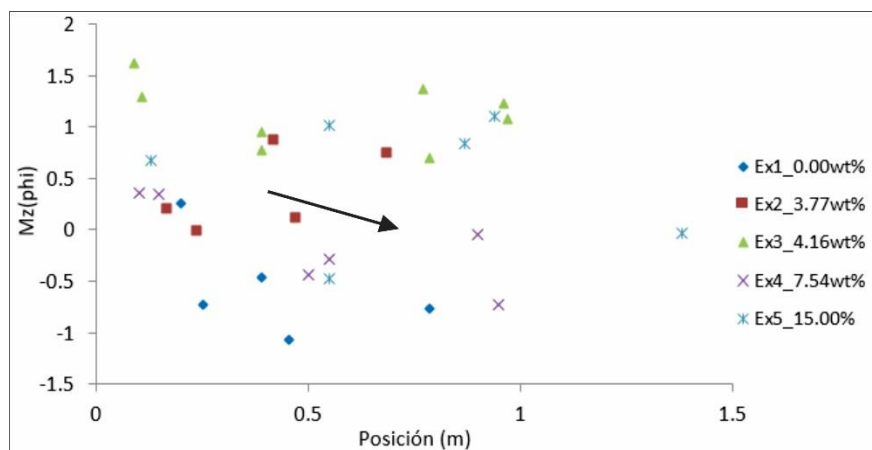


Figura V.2. Variación de la media con la distancia recorrida por los FE experimentales. Las muestras del mismo experimento que se encuentran casi en la misma posición están localizadas en la parte central y lateral de los depósitos. Se observa valores de la media muy similares en la parte central y lateral de los depósitos.

Otra de las evidencias del proceso de segregación, es la variación en el porcentaje de partículas entre -3 y -1 phi con la distancia en la parte central del flujo. Por ejemplo, las diferencias entre los porcentajes de abundancias entre las zonas distal y proximal para el tamaño de -2 phi son 9.48 % para el Ex1 (0 wt% arcilla), 12.17 % para el Ex2 (3.77 wt% arcilla), 4.9 % para el Ex3 (4.16 wt% arcilla) y 2% para el Ex5 (15 wt% arcilla) (Figuras IV.5, IV.9, IV.12, IV.15 y IV.18). Por lo tanto, el proceso de segregación de partículas por tamaño ocurre de forma más eficiente en los experimentos con menor contenido de arcilla.

Asimismo, el proceso de segregación longitudinal y la velocidad desarrollada en la zona del canal genera inestabilidades en la superficie de los flujos experimentales, que se manifiestan en forma de oleadas a lo largo de todo el flujo. Mediante la observación y el análisis de los videos, se identificó que las distintas oleadas provocaron variaciones en la velocidad y profundidad de los flujos y, por lo tanto, en la descarga. Por ejemplo, una oleada en el Ex4 causó una variación de profundidad, de 3 cm, en el frente, a 1.5 cm en el cuerpo (Figura IV.14c y e). Para todos los experimentos, el pico de descarga se presentaba siempre detrás del frente enriquecido en bloques, y fue más abrupto en el Ex1 (Figura IV.12). Las oleadas localizadas detrás del pico de descarga, particularmente en el cuerpo y cola, se reflejan en la superficie de los depósitos a través de la formación de parábolas de deformación observadas en todos los experimentos. Los experimentos con mayor contenido de arcilla (Ex4, con 7.54 wt% de arcilla y Ex5, con 15 wt% de

arcilla) reflejan estas parábolas en toda su extensión. Mientras que, en los experimentos con menor contenido de arcilla (Ex1, con 0.0 wt% de arcilla, Ex2, con 3.77 wt% de arcilla y Ex3, con 4.16 wt% de arcilla), las parábolas de deformación se encuentran sólo en la zona proximal y media de sus depósitos (Figura IV.3).

Otra de las características observadas en los flujos fue el desarrollo de levees laterales, los cuales tienen su origen en el proceso de segregación antes mencionado. Su formación tiene gran influencia en el alcance de los flujos y en la geometría de los depósitos, ya que su espesor afecta el cambio de velocidad en la transición entre el canal y la unidad de sedimentación. Cuando la altura de los levees es similar o mayor a la profundidad del flujo, este se mantiene canalizado, aún en la transición a la unidad de sedimentación. Esto se observó en los depósitos de los experimentos con mayor contenido de arcilla (Ex3, con 4.16 wt% de arcilla, Ex4, con 7.54 wt% de arcilla y Ex5, con 15 wt% de arcilla), en donde la altura de los levees es similar ($T_{lev} = 21, 23$ y 24 mm, respectivamente), a la profundidad del flujo ($20, 23$ y 23 mm respectivamente). Por lo tanto, estos experimentos lograron depósitos con alcances mayores a un metro ($D_{max} = 1.44, 1.01$ y 1.53 m, respectivamente) (Tabla IV.2).

En contraste, los flujos con menor contenido de arcilla (Ex1, con 0.0 wt% de arcilla y Ex2, con 3.77 wt% de arcilla), en donde la altura de los levees fue de 16 y 18 mm respectivamente, se observó que, debido a que la profundidad del flujo es mayor, estos se desbordaron lateralmente; lo que provocó el ensanchamiento del depósito en la parte proximal, reflejado en mayores valores de W_{max} (0.621 y 0.558 m) comparado con los valores de W_{max} observados en los depósitos con mayor contenido de arcilla ($0.639, 0.411$ y 0.467 m). Esta expansión lateral ocasionó flujos con un alcance menor ($D_{max} = 0.87$ y 0.78 m, respectivamente).

Las características morfológicas de los depósitos experimentales se sintetizan en las relaciones de aspecto. En este estudio, se obtuvieron valores de $T_{hmáx}/D_{máx}$ entre 0.075 y 0.023 , que disminuyen con el aumento del contenido de arcilla. Al comparar estos resultados con los obtenidos por De Hass et. al (2015) en la canaleta experimental de pequeña escala (Tabla V.1 y Figura V.3), ambos resultados morfométricos resultan concordantes, con la disminución en las relaciones de aspecto con el aumento del contenido de arcilla. Es decir, los depósitos con menor contenido de arcilla presentan morfologías elipsoidales o circulares y son gruesos. En contraste, los depósitos con mayor contenido de arcilla presentan morfologías tubulares, con espesor constante en toda su distribución longitudinal, y son delgados. Por otro lado, para la relación de $W_{mean}/D_{máx}$ se obtuvieron valores entre 0.688 y 0.282 . Los valores cercanos a 1 se refieren a los depósitos con menor contenido de arcilla, es decir, depósitos con morfologías compactas, cercanas a la redondez.

La tasa de adelgazamiento del material depositado permite confirmar los valores obtenidos en las relaciones de aspecto. Los depósitos con menor contenido de arcilla presentan una menor tasa de adelgazamiento por la acumulación de material en la zona proximal. Mientras que, el aumento en el contenido de arcilla genera una mayor tasa de adelgazamiento, y con ello una mejor dispersión el material en la longitud del depósito (Tabla IV.2).

Tabla V.1. Relación de aspecto

De Haas et al., 2015			Este estudio	
Contenido de arcilla (wt%)	Th _{máx} /D _{máx}	W _{mean} /D _{máx}	Th _{máx} /D _{máx}	W _{mean} /D _{máx}
0.000	0.05310	0.36666	0.075	0.620
1.026	0.03377	0.15244		
2.999	0.02642	0.16097		
3.77			0.058	0.688
3.972	0.02282	0.11684		
4.051	0.02897	0.12803		
4.16			0.038	0.322
4.906	0.01877	0.10469		
5.840	0.01292	0.09502		
7.54			0.044	0.338
7.682	0.01680	0.11866		
9.365	0.01322	0.09008		
11.036	0.01363	0.10272		
14.206	0.01323	0.10845		
15.00			0.023	0.282
17.112	0.00692	0.07615		
20.560	0.01692	0.15589		

*Los wt% de arcilla fueron calculados respecto a el wt% total de sedimentos. Las relaciones de aspecto son adimensionales.

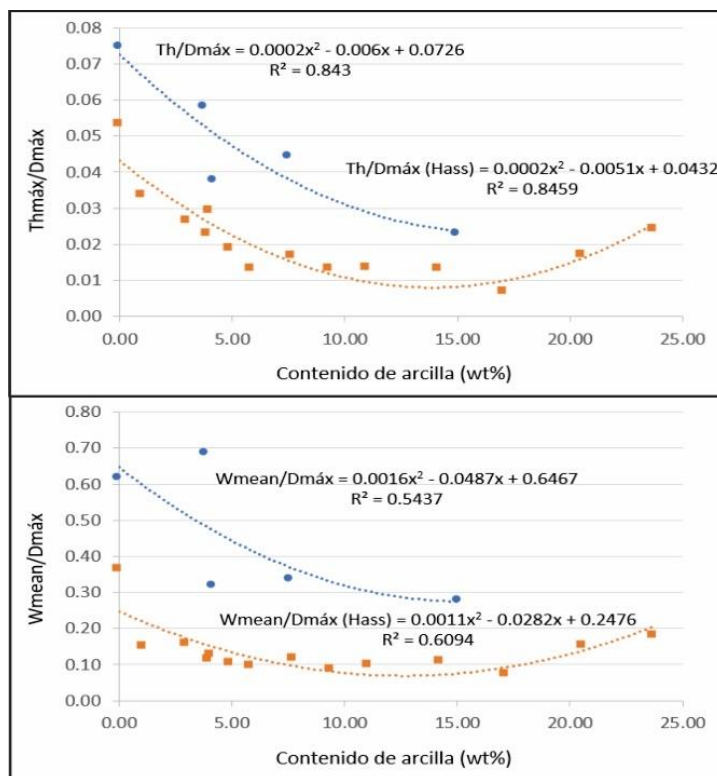


Figura V.3. a) Relación de aspecto Th_{máx}/D_{máx} vs. Contenido de arcilla. b) Relación de aspecto W_{mean}/D_{máx} vs. Contenido de arcilla.

V.2. Números adimensionales

El análisis dimensional permite demostrar que los números de Bagnold y de fricción disminuyen con el aumento en el contenido de arcilla (Figura V.9 y 11). Esto implica que, a mayor contenido de arcilla, el flujo aumenta en los efectos de arrastre viscoso y disminuye en los esfuerzos de contacto continuo entre clastos (Iverson, 1997). Por otro lado, el número de Savage (Figura V.10) indica que dominan las fuerzas de fricción. Por lo tanto, los datos experimentales muestran FE transicionales, ya que con el incremento del contenido de arcilla se presenta la transición de flujos dominados por fuerzas de fricción a dominados por fuerzas viscosas.

La mayoría de los experimentos realizados por De Hass et al. (2015), excepto aquellos con gran contenido de arcilla, se encuentran por arriba de la transición entre los regímenes de flujo colisional a viscoso, y colisional a friccional (Figura V.9 y 10) propuestos por Bagnold (1954), y Savage y Hutter (1989). Sin embargo, las observaciones de los depósitos implican que las fuerzas de fricción dominan sobre las colisionales en sus experimentos (Figura V.11). Esto sugiere que los límites propuestos por Bagnold (1954), y Savage y Hutter (1989), para flujos secos, no fueron aplicables para sus experimentos, realizados en flujos saturados. La transición en el comportamiento de sus flujos experimentales coincide con la transición propuesta por Parsons et al. (2001), la cual está basada en flujos de escombros experimentales. Para el presente estudio, ambos límites propuestos, coinciden en que los flujos estudiados presentan comportamiento friccional. Este resultado sugiere que la frontera entre el comportamiento viscoso, friccional y colisional puede variar significativamente entre flujos de clastos secos y saturados, y en función de la geometría del canal sobre la cual fluyen los FE.

Los números de Savage (L11: 0.0139 – 0.1590 y L12: 0.0040 – 0.0114), Bagnold (L11: 40 – 233 y L12: 13 – 87) y Reynolds granular (L11: 23 – 105 y L12: 7 – 39) obtenidos en este estudio se encuentran más cercanos a los valores obtenidos en los FE realizados en la canaleta de gran escala de la USGS (0.2, 400 y 100, respectivamente); aunque presentan espesores y velocidades de flujo, y con ello las tasas de deformación, similares a los flujos de pequeña escala (Tabla V.2). Por otro lado, los números de fricción presentan valores altos (L11: 251 – 10525 y L12: 1114 – 21970), debido a la gran fracción volumétrica de sólidos y al mayor tamaño relativo del diámetro característico de la mezcla de sedimentos.

Comparado con los FE naturales, los FE experimentales a escala exhiben efectos desproporcionadamente grandes en la resistencia elástica del fluido, la resistencia viscosa del flujo y la inercia de los clastos, mientras que presentan efectos desproporcionadamente pequeños en la presión de poro (Iverson y Denlinger, 2001; Iverson et. al., 2010). Los números adimensionales que caracterizan el comportamiento de los flujos experimentales de este trabajo se encuentran entre los rangos de valores de los flujos de escombros realizados en la canaleta de pequeña escala de De Haas et al. (2015), en la canaleta de gran escala de la USGS (Iverson, 1997) y en flujos de escombros naturales típicos (Tabla V.2). Sin embargo, los valores reportados en la literatura presentan rangos de valores muy amplios relacionados con la variabilidad en el comportamiento de los flujos y en la instrumentación. Por lo tanto, establecer formas de medición más precisas en el futuro permitirá acotar más estos valores y realizar mejores interpretaciones de los resultados obtenidos.

Tabla V.2. Parámetros físicos y adimensionales de flujos de escombros experimentales y naturales

Parámetro	Símbolo (Unidades)	Este trabajo Gran escala	de Haas (2015) Pequeña escala (a)	Canaleta USGS Gran escala (b)	Típicos flujos de escombros naturales (b)
Parámetros físicos					
Diámetro característico	δ (m)	0.0003-0.001	0.0005-0.002	0.001	10^{-5} - 10
Espesor del flujo	H (m)	L11: 0.011 - 0.057 L12: 0.015-0.044	0.005-0.018	0.1	0.1-10
Velocidad del flujo	v (m/s)	VinsL11: 2.42 - 3.34 VinsL12: 0.78 - 1.18	0.9-2.9	10	0.1-20
Tasa de deformación del flujo	γ (1/s)	L11: 47.05 - 216.18 L12: 17.59 - 69.01	105-371	100	1-100
Densidad de sólidos	ρ_s (kg/m ³)	2330	2650	2700	2500-3000
Densidad de fluido	ρ_f (kg/m ³)	1605.54 - 1733.11	1000-1533	1100	1000-1200
Fracción volumétrica de sólidos	Vs (-)	0.54-0.62	0.35-0.59	0.6	0.4-0.8
Fracción volumétrica de fluido	Vf (-)	0.38-0.46	0.65-0.41	0.4	0.2-0.6
Viscosidad del fluido	μ (Pa.s)	0.0010-0.0015	0.001-0.0035	0.001	0.001-0.1
Ángulo de fricción	ϕ (°)	42	42	40	25-45
Parámetros adimensionales					
Número de Savage	NSav	L11: 0.0139-0.1590 L12: 0.0040-0.0114	0.17-2.25	0.2	10^{-7} - 10^0 (b, c, d)
Número de Bagnold	NBag	L11: 40-233 L12: 13-87	37-1589	400	10^0 - 10^8 (b, c)
Número de Fricción	NFric	L11: 251-10525 L12: 1114-21970	141-2760	2000	10^0 - 10^5 (b, d)
Número de masa	Nm	1.68-2.21	1.2-3.63	4	1 – 10 (e)
Número de Reynolds granular	NRg	L11: 23-105 L12: 7-39	31-504	100	0.01-2 (b, d)

a De Haas et. al (2015)

b Iverson (1997)

c Iverson y Denlinger (2001)

d Zhou y Ng (2010)

e Basado en flujos de escombros en un rango del 20% al 70% de agua en volumen.

Finalmente, el conjunto de resultados obtenidos en este estudio sugiere que existe una amplia variedad de FE. Los regímenes de flujo de este trabajo indican que su dinámica es predominantemente gobernada por fuerzas de fricción entre los clastos y de arrastre (viscosas) por el fluido. El frente de todos los flujos se caracteriza por el dominio de fuerzas de fricción entre los clastos, sobre las fuerzas de colisión, predominantemente durante la movilización del material en el canal. Este régimen, presente en todos los experimentos, permite la segregación preliminar de partículas por tamaño de clastos, lo cual se observa en los videos, las morfologías de los depósitos (específicamente en la formación de levees) y las distribuciones granulométricas de los clastos. Posteriormente, el régimen del flujo, en el cuerpo y cola, se transforma a un régimen viscoso durante su transporte y sedimentación en la unidad de sedimentación.

Por lo tanto, la movilidad de los flujos de escombros depende del contenido de arcilla, y cómo ésta se relaciona con los regímenes de esfuerzos entre las partículas de mayor tamaño a través de los procesos internos al flujo. El hecho de que todos los flujos se movilizan en un régimen viscoso y friccional, independientemente del contenido de arcilla, sugiere que la proporción de material grueso y la concentración de sedimentos también influyen en los procesos internos y no solo el contenido de material fino. Por lo tanto, el comportamiento de los flujos depende de la composición del flujo, la distribución de los tamaños de clastos en la mezcla de sedimentos, el contenido de arcilla y la geometría del canal.

V.3. Mecanismo de emplazamiento

A partir de los resultados obtenidos se proponen dos tipos de mecanismo de emplazamiento con base en el contenido de arcilla:

V.3.1. Flujos con bajo contenido de arcilla

Los flujos con bajo contenido de arcilla se emplazaron por un mecanismo de crecimiento gradual, favorecido por el emplazamiento rápido del frente, cerca de la desembocadura. Los pulsos subsecuentes, no tuvieron la fuerza suficiente para empujar el material previamente depositado, por lo que el material del cuerpo, y posteriormente de la cola del flujo, se depositaba encima del material recién depositado del frente (los momentos de emplazamiento del material a través de distintos pulsos se denominan t_1 , t_2 y t_3 , en los esquemas). Esto ocasionó un aumento en el espesor (T_{hmax}) y ancho (W_{max}) del flujo en la zona proximal. Los levees no son capaces de contener el flujo, debido a su altura menor, comparada con la profundidad (T_{hlev}), lo que provocó el crecimiento del depósito hacia los márgenes laterales y no al frente (D_{max}). Este mecanismo de emplazamiento se ve reflejado en depósitos circulares con parábolas de deformación sólo en la parte proximal y media del depósito y tasas de adelgazamiento menores que, en sección transversal, forman cuerpos convexos.

Los números adimensionales reflejan valores más altos de las fuerzas de fricción en comparación con las fuerzas viscosas, lo que favorece la disipación de energía cinética, debido a los enormes efectos de inercia entre los clastos, y reduce la movilidad.

Caso 1: Flujos de escombros experimentales con bajo contenido de arcilla

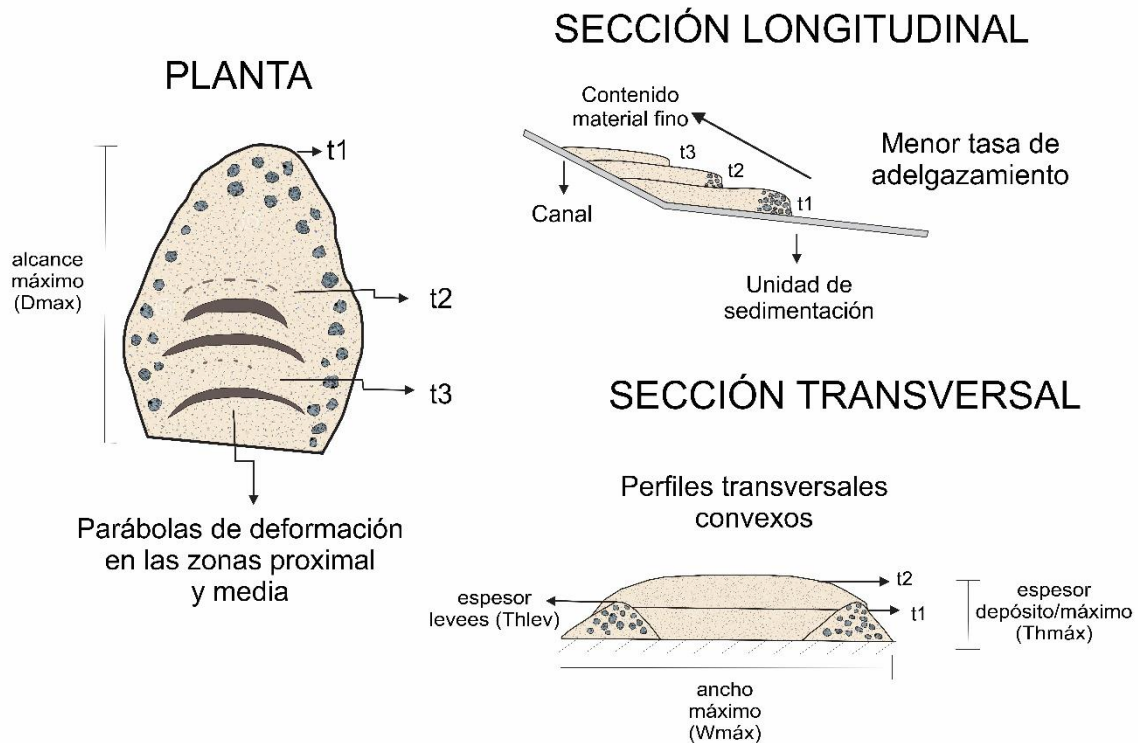


Figura V.4. Mecanismo de emplazamiento para FE con bajo contenido de arcilla.

V.3.2. Flujos con alto contenido de arcilla

Los flujos con alto contenido de arcilla se emplazaron a través de una serie de pulsos sucesivos en donde cada pulso empujaba el frente anterior, lo que ocasiona que el flujo tuviera gran movilidad. Este proceso fue favorecido por el mejor desarrollo de levées laterales (Th_{lev}) que mantuvieron canalizado en flujo, aún en la unidad de sedimentación. Este mecanismo de emplazamiento se ve reflejado en la forma tubular general de los depósitos, con parábolas de deformación distribuidos en todo el depósito (D_{max}) y con tasas de adelgazamiento mayores. En sección transversal los levées presentan alturas similares o mayores al espesor del depósito.

Durante el movimiento, el fluido intersticial controla gran parte del movimiento, reflejado en los números de adimensionales de Bagnold, a través de el dominio de las fuerzas viscosas en el flujo. El fluido con arcilla lubrica e inhibe la colisión entre partículas y favorece la movilidad al disminuir la fricción entre clastos, y entre los clastos y el substrato (Major, 1996). Además, el aumento en el contenido de arcilla permite menores interacciones de tipo friccional entre los clastos y un pequeño incremento en las interacciones colisionales (Número de Savage).

Caso 2: Flujos de escombros experimentales con alto contenido de arcilla

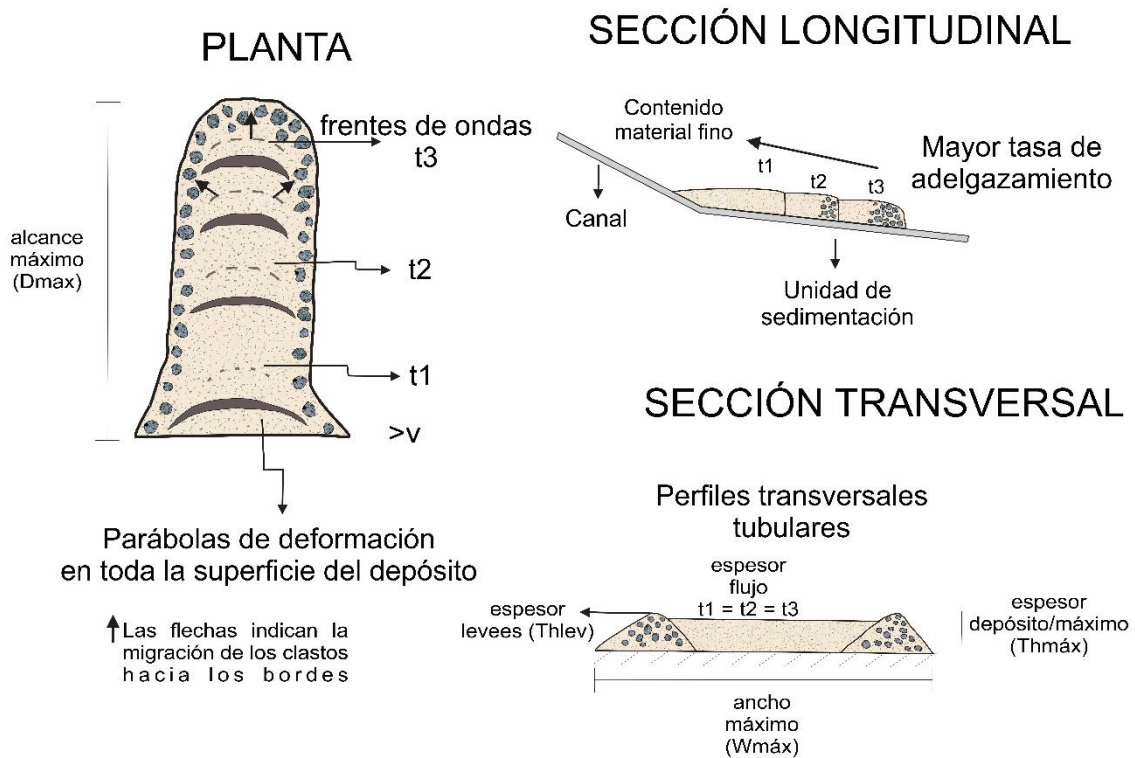


Figura V.5. Mecanismo de emplazamiento FE con alto contenido de arcilla.

Finalmente, los mecanismos de emplazamiento propuestos representan una modificación importante al mecanismo de emplazamiento gradual propuesto por Vallance y Scott (1997), ya que consideran la importancia del desarrollo de levees y la cohesión en el alcance y profundidad del flujo. Además, existen diferentes implicaciones del peligro debido a las variaciones en la dinámica de los flujos de escombros. De acuerdo con los modelos de emplazamientos anteriores, los FE con alto contenido de arcilla presentan mayor impacto en áreas lejanas a la zona de generación debido a que la mayor cohesión del flujo permite alcanzar grandes distancias. Por otro lado, los FE con bajo contenido de arcilla pueden afectar zonas cercanas porque el emplazamiento se da por un crecimiento lateral, y no longitudinal; en conjunto con la presencia de una gran cantidad de bloques frontales que viajan a grandes velocidades, pueden impactar y dañar bienes expuestos.

VI. – CONCLUSIONES

Con base en los resultados de este trabajo se concluye que:

El diseño e implementación de la metodología utilizada en este trabajo experimental permitieron obtener y parametrizar diferentes propiedades físicas de los flujos de escombros en condiciones controladas, difíciles de medir en flujos naturales.

Existe un proceso de segregación de partículas evidenciado por la división del flujo en cabeza, cuerpo y cola, así como la formación de levees y la presencia de oleadas secundarias.

Los resultados mostraron que los flujos de escombros con alto y bajo contenido de arcilla presentan distintos modelos de emplazamiento, y esto se refleja en su movilidad. En los FE experimentales con bajo contenido de arcilla, la altura de los levees es menor que la parte central del flujo, lo que permite la acumulación de material en la zona proximal y el aumento en el ancho y espesor, y por consiguiente alcance con menor distancia. En contraste, los flujos con alto contenido de arcilla forman levees con alturas similares o mayores que la parte central del flujo, lo que permite el confinamiento de este, y con ello alcance con mayor distancia y menor espesor.

Los regímenes de flujos de este trabajo indican que la dinámica es predominantemente gobernada por fuerzas de fricción entre los clastos y viscosas por el fluido. El frente del flujo se caracteriza por el dominio de fuerzas de contacto colisional entre clastos hasta su arribo a la unidad de sedimentación. A partir del inicio de la sedimentación, comienza el dominio de las fuerzas de fricción. De manera similar, para los flujos con regímenes viscosos los procesos de sedimentación pueden estar gobernados por la alta viscosidad del fluido.

Los resultados de este estudio sugieren que existe una amplia variabilidad interna de flujos de escombros, y que los resultados que utilizan un tipo de composición de flujo no pueden ser universalmente aplicables a la dinámica de todos los tipos de flujos, por lo que se debe hacer un mayor número de experimentos y replicarlos, con el fin de robustecer las conclusiones del presente trabajo; además de mejorar la estimación de los números adimensionales, por la complejidad en la medición de los parámetros físicos utilizados para su cálculo.

La información relacionada con el movimiento y las fuerzas dominantes permitirán afinar ecuaciones constitutivas utilizadas en los modelos numéricos que reproducen estos fenómenos.

Finalmente, el acoplamiento de la información proveniente de las cámaras de video y los depósitos, a través de sus características morfométricas y texturales, permite hacer una mejor interpretación de las características observadas en campo, comparando los distintos modelos de emplazamiento en sistemas experimentales y naturales.

REFERENCIAS

- Anderson, S. A., y Sitar, N., 1995. Analysis of rainfall-induced debris flows. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 121, p. 544 – 552.
- Bagnold, R. A., 1954. Experiments on a gravity-free dispersión of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings of the Royal Society*, v. 225, p. 49 – 63.
- Bird, R. B., Dai, G. C., y Yaruso, B. J., 1982. The rheology and flow viscoplastic materials. *Reviews in Chemical Engineering*, v. 1, p. 1 – 70.
- Bishop, A. W., 1973. The stability of tips and spoil heaps. *Journal of Engineering Geology*, v. 6, p. 335 – 376.
- Borselli, L., y Sarocchi, D., 2019. DECOLOG. (disponible en: <http://www.decolog.org>.)
- Campbell, R. H., 1975. Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California. *US Geological Survey Professional Paper 851*, pp. 51.
- Capra, L., y Macías, J.L., 2000. Pleistocene cohesive debris flows at Nevado de Toluca Volcano, central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Elsevier, v. 102 (1/2), p. 149 – 167.
- Costa, J. E., 1984. Physical geomorphology of debris flows. *Developments and applications of Geomorphology*. Springer - Verlag, Berlin, p. 269 – 317.
- D'Antonio, M., Capra, L., Sarocchi, D., y Bellotti, F., 2008. Reconstrucción del evento asociado al emplazamiento del flujo piroclástico El Refugio hace 13 ka, volcán Nevado de Toluca (México). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v.25, p. 115 – 134.
- Davies, T. R. H., 1990. Debris-flow surges – Experimental simulation. *Journal of Hydrology*, New Zealand, v. 29, p. 18 – 46.
- De Hass, T., Braat, L., Leuven, J. R. F. W., Lokhorst, I. R., y 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*, v. 120, p. 1949 – 1972.
- Drake, T. G., 1990. Structural features in granular flows. *Journal of Geophysics Research*, v.95 (B6), p. 8681 – 8696.
- Eckersley, D., 1990. Instrumented laboratory flowslides. *Geotechnique*, v. 40, p. 489 – 502.
- Enos, P., 1997. Flow regimes in debris flows. *Sedimentology*, v. 24, p. 133 – 142.
- Ellen, S. D. y Fleming, R. W., 1987. Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay región, California. *Debris flows/Avalanches: Process, recognition, and mitigations*. Geological Society of America, Boulder, Colorado, p. 31 – 40.

Fink, J. H., Malin, M. C., D'Alli, R. E., y Greeley, R., 1981. Rheological properties of mudflows associated with the spring 1980 eruptions of Mount St. Helens volcano, Washington, *Geophysical Research Letters*, v. 8, p. 43 – 46.

Fisher, R. V., 1971. Features of coarse-grained, high-concentration fluids and their deposits. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 41, p. 916 – 927.

Folk, R. L., 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Department of Geological Sciences, University of Texas at Austin, United States of America, pp. 183.

Gordon, G. D. Z., Dongri, S., Shual, L., y Xiaoqing, C., 2019. Depositional mechanisms and morphology of debris flow: physical modelling. *Landslides*, v. 16, p. 314 – 332.

Graf, W.H., 1971. *Hydraulics of sediment transport*. McGraw-Hill, New York, pp. 513.

Hampton, M. A., 1972. The role of subaqueous debris flows in generating turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, v.42, p. 775 – 793.

Hampton, M. A., 1975. Competence of fine-grained debris flows. *Journal of Sedimentary Petrology*, v.45, p. 834 – 844.

Hampton, M. A., 1979. Buoyancy in debris flows. *Journal of Sedimentary Petrology*, v.49, p. 753 – 758.

Heim, A., 1932. *Landslide and human life*. Fretz y Wasmuth, Suiza, pp. 218.

Iverson, R. M., y Major, J. J., 1986. Groundwater seepage vectors and the potential for hillslope failure and debris flows mobilization. *Water Resources Research*, v. 22, p. 1543 – 1548.

Iverson, R. M., y Denlinger, R. P., 1987. The physics of debris flows – A conceptual assessment, in *Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim*. International Association of Hydrological Sciences, v. 165, p. 155 – 165.

Iverson, R. M., 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, v.35(3), p. 245 – 296.

Iverson, R. M., Reid, M. E. y LaHusen, R. G., 1997. Debris-Flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 25, p. 85 – 138.

Iverson, R. M., y Denlinger, R. P., 2001. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, v. 106 (B1), p. 537 – 552.

Iverson, R. M., Logan, M., LaHusen, R. G., y Berti, M., 2010. The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. *Journal of Geophysical Research Earth Surface* 115.

Iverson, R. M., 2015. Scaling and design of landslide and debris flows experiments. *Geomorphology*, v. 244, p. 9 – 20.

- Jaeger, H. M., y Nagel, S. R., 1992. Physics of the granular state. *Science*, v. 255, p. 1523 – 1531.
- Jahns, R. H., 1949. Desert floods, *Contrib.* 499, California Institute of Technology, Pasadena, p. 10 - 15.
- Johnson, A. M., 1970. *Physical Processes in Geology*. W.H. Freeman, New York, pp. 557.
- Johnson, A. M., 1984. Debris flow. *Slope Instability*, John Wiley, New York, p. 257 – 361.
- Johnson, C. G., Kokelaar, B. P., Iverson, R. M., Logan, M., LaHusen, R. G., y Gray, J. M. N. T., 2012. Grain-size segregation and levee formation in geophysical mass flows. *Journal of Geophysical Research*, v. 117, p. 1 – 23.
- Li, Y., Zhou, X., Su, P., Kong, Y., y Liu, J., 2013. A scaling distribution for grain composition of debris flows. *Geomorphology*, v. 192, p. 30 – 42.
- Major, J. J., y Pierson, T. C., 1992. Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resources Research*, v. 28, p. 841 – 857.
- Major, J. J., 1996. Experimental studies of deposition by debris flows: Process, characteristics of deposits and effects of pore-fluid pressure. [Ph. D. Thesis], University of Washington, Seattle, pp. 226.
- Major, J. J., 1997. Depositional processes in large-scale debris flow experiments. *Journal of Geology*, v. 105, p. 345 – 366.
- Middleton, G., 1970. Experimental studies related to the problem of flysch sedimentation. *Geological Association of Canada Special Paper*, v. 7, p. 253 – 272.
- Mitchell, J. K., 1976. *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley, New York, pp. 422.
- Nordin, C. F., 1963. A preliminary study of sediment transport parameters Rio Puerco near Bernardo New Mexico, US. Geological Survey Professional Paper 462: C, p. 21.
- O'Brien, J. S., y Julien, P. Y., 1988. Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulics Engineering*, v. 114, p. 877 – 887.
- Ogawa, S., 1978. Multitemperature theory of granular materials. *Proceedings of the U.S.-Japan Seminar on Continuum-Mechanics and Statistical Approaches to the Mechanics of Granular Materials*, Gukujutsu Bunken Fukyukai, Tokyo, p. 208 – 217.
- Okuda, S., Suwa, H., Okunishi, K., Nakano, M., y Yokoyama, K., 1977. Synthetic observation on debris flow, part. 3 Observation at Valley Kamikamihorizawa of Mt. Yakedake in 1976. *Ann Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University* 20B-1, p. 237 – 263.
- Parson, J. D., Whipple, K. X., y Simoni, A., 2001. Experimental study of the grain-flow, fluid-mud transition in debris flows. *Journal of Geology*, v. 109 (4), p. 427 – 447.

Passman, S. L., y McTigue D. F., 1986. A new approach to the effective stress principle. *Compressibility Phenomena in Subsidence*. Engineering Foundation, New York, p. 79 – 91.

Phillips, C. J., y Davies, T. R. H., 1991. Determining rheological properties of debris flow material. *Geomorphology*, v. 4, p. 101 – 110.

Pierson, T. C., 1980. Erosion and deposition by debris flows at Mt. Thomas, North Canterbury, New Zealand. *Earth Surface Processes*, v. 5, p. 227 – 247.

Pierson, T. C. y Scott, K. M., 1985. Downstream dilution of a lahar: Transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Resources Research*, v. 21 (10), p. 1511 – 1524.

Pierson, T. C., 1981. Dominate particle support mechanisms in debris flows at Mount Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility. *Sedimentology*, v. 28, p. 49 – 60.

Pierson, T. C., 1986. Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. *Hillslope Processes*, p. 269 – 296.

Pierson, T. C., y Costa, J. C., 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, v.7, p. 1 – 12.

Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J. C., y Borrero, C. A., 1990. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia and consequent mobilization, flow, and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v.41, p. 17 – 66.

Pierson, T. C., 1995. Flow characteristics of large eruption-triggered debris flow at snow-clad volcanoes: constraints of debris flow models. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 66, p. 283 – 294.

Rodine, J. D., 1974. Analysis of mobilization of debris flows [Ph. D. Thesis]. Stanford, California, Stanford University, pp. 226.

Rodine, J. D., Johnson, A. M., 1976. The ability of debris, heavily freighted with coarse clastic materials, to flow on gentle slopes. *Sedimentology*, v. 23, p. 213 – 234.

Savage, S. B. y Hutter, K., 1989. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 199, p. 177 – 215.

Schmincke, H. U., 1967. Graded lahars in the type section of the Ellensburg Formation, south-central Washington. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 37, p.438 – 448.

Sharp, R. P., 1942. Mudflow levees. *Journal of Geomorphology*, v. 5, p. 222 – 227.

Sharp, R. P., y Nobles, L. H., 1953. Mudflow of 1941 at Wright-wood, southern California. *Geological Society of America Bulletin*, v. 64, p. 547 – 560.

Sitar, N., Anderson, S. A., y Johnson, K. A., 1992. Conditions for initiation of rainfall-induced debris flows. *Stability and Performance of Slopes and Embankment II Proceedings. Journal of Geotechnical Engineering Division of American Society of Civil Engineering*, New York, p. 834 – 849.

Takahashi, T., 1981. Debris flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v.13, p. 57 – 77.

Takahashi, T., 1978. Mechanical characteristics of debris flow. *Journal of the Hydraulics Division American Society of Civil Engineering*, v. 106, p. 1153 – 1169.

Takahashi, T., 1991. Debris flow. A. A. Balkema, Brookfield, pp. 165.

Takahashi, T., 2014. Debris flow: Mechanics, prediction and countermeasures. Taylor and Francis, Leiden, pp. 448.

Thomas, D. G., 1965. Transport characteristics of suspension, VII, A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles. *Journal of Colloid Science*, v. 20, p. 267 – 277.

Vallance, J. W. y Scott, K. M., 1997. The Osceola Mudflow from Mount Rainier. Sedimentology and hazard implications of a huge clay-rich debris flow. *Geological Society of America Bulletin*, v. 109(2), p. 143 – 163.

Vanoni, V. A., 1975. *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineering, New York.

Van Waazer, J. R., Lyons, J. W., Kim, K. Y., y Colwell, R. E., 1963. Viscosity and flow measurements. New York, Interscience, pp. 405.

Voight, B., 1990. The 1985 Nevado del Ruiz Volcano catastrophe: anatomy and retrospection. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 44, p. 349 – 386.

Zhang, Y., y Campbell, C. S., 1992. The interface between fluid-like and solid-like behavior in two-dimensional granular flows. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 237, p. 541 – 568.

ANEXO A

		Empezar la agitación	Terminar la agitación	Empezar la agitación	Terminar la agitación	Empezar la agitación	Terminar la agitación
		09:59:00 (1)	10:00:00 (2)	10:19:00 (6)	10:20:00 (7)	10:39:00 (11)	10:40:00 (12)
Φ 4	Pipeta 10 cm 00:00:29						
Φ 5	Pipeta 10 cm 00:01:53	(3)	10:01:53 10:01:25	(8)	10:21:53 10:21:25	(13)	10:41:53 10:41:25
Φ 6	Pipeta 10 cm 00:07:30	(4)	10:07:30 10:07:05	(9)	10:27:30 10:27:05	(14)	10:47:30 10:47:05
Φ 7	Pipeta 5 cm 00:15:01	(5)	10:15:01 10:14:30	(10)	10:35:01 10:34:30	(15)	10:55:01 10:54:30
Φ 8	Pipeta 5 cm 01:00:03	(16)	11:00:03 10:59:30	(17)	11:20:03 11:19:30	(18)	11:40:03 11:39:30
Φ 9	Pipeta 5 cm 04:00:11	(19)	14:00:11 13:59:45	(20)	14:20:11 14:19:45	(21)	14:40:11 14:39:45

*Tiempos y distancias de medición para el análisis granulométrico por el método de pipeta.

ANEXO B

Parámetros estadísticos de las mezclas de sedimentos iniciales.

Experimento	Contenido de arcilla (wt%)	Mz (phi)	Desviación estándar (σ)		Simetría (Sk)		Curtosis (k)	
Ex1	0.00	-0.191	2.146	Muy mal seleccionado	0.044	Simétrica	-1.341	Muy platicúrtica
Ex2	3.77	0.469	2.941		0.437	Positiva	0.437	Mesocúrtica
Ex3	4.16	0.422	2.886		0.816		0.530	
Ex4	7.54	0.713	3.211		0.859		0.291	
Ex5	15.00	1.628	3.751		0.575		-0.707	Platicúrtica

*Los valores de desviación estándar, simetría y curtosis son adimensionales.

ANEXO C

Mediciones obtenidas por los interruptores ópticos

Láser		Posición (m)	Ex1 0.00 wt% (s)	Ex4 3.77 wt% (s)	Ex2 7.54 wt% (s)	Posición (m)	Ex3 4.16 wt% (s)	Ex5 15.00 wt% (s)
Canal	1	0.210	0.26726	0.24474	0.30618	0.150	0.21709	0.08396
	2	0.465	0.30720	0.33075	0.37683	0.450	0.30925	0.32768
	3	0.913	0.45978	0.49254	0.46387	0.900	0.45363	0.46285
	4	1.360	0.60314	0.64819	0.59187	1.350	0.58675	0.59699
	5	1.811	0.72909	0.77619	0.72090	1.800	0.71680	0.72704
	6	2.259	0.87245	0.94003	0.84685	2.250	0.82842	0.84992
	7	2.709	0.98509	1.08130	0.96768	2.700	0.93901	0.95744
	8	3.158	1.13460	1.26570	1.20830	3.150	1.04040	1.08750
	9	3.609	1.24010	1.39470	1.25130	3.600	1.16940	1.20830
	10	4.058	1.38040	1.59440	1.31280	4.050	1.27280	1.31690
Unidad de sedimen tación	11	4.327	1.48070	1.69470	1.41930	4.650	1.45200	1.56470
	12	4.505	1.70800	1.89240	1.56980	4.950		1.83810
	13	4.767	1.83400	2.08280	1.66810	5.400	1.60260	2.50980
	14	5.267	1.83400	2.08280	1.66810	5.700	1.60260	

*Valores del tiempo (segundos) correspondiente al paso del frente del flujo entre cada interruptor óptico.

ANEXO D

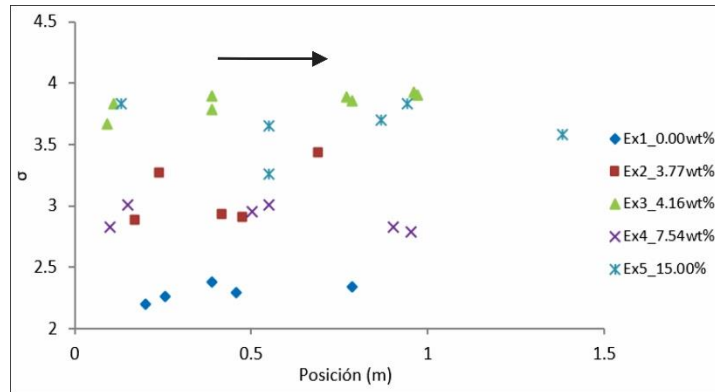
Parámetros estadísticos del muestreo de depósitos

Muestra	Posición (m)	Mz(phi)	Desviación estándar (σ)		Simetría (S_k)		Curtosis (k)	
Experimento 1_ 0.00 wt%								
Ex1_PC	0.200	0.255	2.205	Muy mal clasificado	-0.099	Simétrica	-1.375	Muy platicúrtica
Ex1_PD	0.255	-0.727	2.266		0.524	Positiva	-1.195	Platicúrtica
Ex1_MC	0.390	-0.458	2.383		0.297	Simétrica	-1.464	Muy platicúrtica
Ex1_MD	0.457	-1.068	2.297		0.790	Positiva	-0.935	Platicúrtica
Ex1_DC	0.785	-0.764	2.346		0.529		-1.275	
Experimento 2_ 3.77 wt%								
Ex2_PC	0.170	0.200	2.888	Muy mal clasificado	0.906	Positiva	0.473	Mesocúrtica
Ex2_PD	0.240	-0.022	3.272		1.069		0.254	
Ex2_MC	0.420	0.858	2.938		0.563		-0.431	
Ex2_MD	0.475	0.104	2.906		1.427	Muy positiva	-1.258	Leptocúrtica
Ex2_DC	0.690	0.729	3.436		0.779	Positiva	-0.381	Mesocúrtica
Experimento 3_ 4.16 wt%								
Ex3_AC	0.090	1.621	3.677	Muy mal clasificado	0.452	Positiva	-1.084	Platicúrtica
Ex3_AD	0.110	1.295	3.836		0.479		-1.076	
Ex3_PC	0.390	0.950	3.796		0.651		-0.914	
Ex3_PD	0.390	0.779	3.897		0.637		-0.962	
Ex3_MC	0.770	1.373	3.888		0.482		-1.106	
Ex3_MD	0.785	0.700	3.860		0.727		-0.843	
Ex3_DC	0.960	1.220	3.932		0.522		-1.095	
Ex3_DD	0.970	1.066	3.907		0.552		-1.042	
Experimento 4_ 7.54 wt%								
Ex4_PD	0.100	0.352	2.825	Muy mal clasificado	0.757	Positiva	0.035	Mesocúrtica
Ex4_PI	0.150	0.347	3.012		0.682		-0.226	
Ex4_MD	0.500	-0.439	2.961		0.891		0.050	
Ex4_MI	0.550	-0.279	3.019		1.010		0.508	
Ex4_DD	0.900	-0.043	2.825		0.905		0.242	
Ex4_DI	0.950	-0.731	2.786		1.156		0.657	
Experimento 5_ 15.00 wt%								
Ex5_PD	0.130	0.666	3.837	Muy mal clasificado	0.800	Positiva	-0.723	Platicúrtica
Ex5_MPC	0.550	1.017	3.657		0.813	-0.710		
Ex5_MPD	0.550	-0.478	3.266		1.405	Muy positiva	0.896	Leptocúrtica
Ex5_MDC	0.870	0.836	3.700		0.777	Positiva	-0.696	Platicúrtica
Ex5_MDD	0.940	1.100	3.840		0.586		-0.993	
Ex5_DD	1.380	-0.025	3.589		1.082		-0.110	

*Los valores de desviación estándar, simetría y curtosis son adimensionales.

Todas las muestras recolectadas, sin importar el contenido de arcilla o su posición, presentan valores de desviación estándar altos. Estos valores se encuentran entre 2.205 y 3.932; lo que describe a las muestras como muy mal seleccionadas. El bajo grado de selección del tamaño de clasto se mantiene constante con la distancia longitudinal de los depósitos. Es decir, se encuentran muestras con distribuciones de tamaños de clastos dispersas en todo el depósito, sin acotarse la selección a un tamaño de clasto específico.

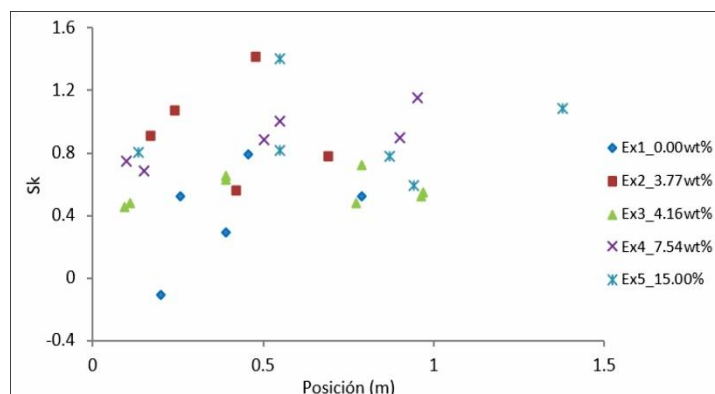
Las muestras del Ex1 presentan los valores de desviación estándar menores, siendo las menos dispersas. Por el contrario, los valores de desviación estándar de tamaño de clastos aumenta con el contenido de arcilla.



* Variación de la desviación estándar con la distancia recorrida por el FE. Los valores de la desviación estándar no distan significativamente con respecto a su posición central o lateral en el depósito.

La mayoría de los valores de simetría obtenidos se encuentran en un intervalo de 0.452 a 1.427, caracterizando a las muestras como positivas, o incluso algunas como muy positivas; lo cual se traduce en la abundancia de material de tamaño fino para todas las muestras. Dichos valores son concordantes con las distribuciones granulométricas iniciales planteadas en la realización de las mezclas de sedimento y agua.

Los valores de simetría aumentan con la distancia. Lo cual indica un exceso de material fino para las muestras distales. Este aumento es más evidente para el Ex1 (mayor razón de cambio). Mientras que, para los Ex3, Ex4 y Ex5 el aumento de material fino se presenta a una razón de cambio menor. Es importante recordar que el tamaño de clastos finos del Ex1 (arenas medias y finas) es diferente con respecto a los demás experimentos (limo y arcilla).



* Variación de la simetría con la distancia recorrida por el FE.