

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



INSTITUTO DE GEOLOGÍA

POSGRADO  
CIENCIAS DE LA TIERRA



Dinámica de flujos de escombros:  
Nuevas evidencias a partir de datos experimentales

Tesis que para obtener el grado de  
Doctora en Ciencias

Presenta

**Ana María Lizeth Caballero García**

Tutor

**Dr. Damiano Sarocchi**

*Septiembre 2012*



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.

## **Agradecimientos**

**Al Dr. Damiano Sarocchi por dirigir este proyecto, por su apoyo y por su amistad.**

**A los sinodales Dr. Claus Siebe, Dr. Servando de la Cruz Reyna, Dra. Lucia Capra y Dr. Enrique Soto por sus valiosos comentarios para mejorar este trabajo.**

**Un agradecimiento especial a la Dra. Lucia Capra por dedicar gran parte de su tiempo a comentar y resolver mis dudas y por su apoyo, ya de muchos años, a lo largo de mi estancia en el posgrado.**

**Al Dr. Enrique Soto por introducirme al increíble mundo de la reología. ¡¡Mil gracias!!**

**Al Dr. Lorenzo Borselli por sus valiosos consejos y por compartir su gran experiencia conmigo.**

**Al Dr. Angel I. Cárdenas por facilitarme el uso del laboratorio de Ingeniería Civil de la UASLP. A la Lic. Fabiola Mendiola y a la M. en C. Carolina Muñoz por su cooperación en el análisis de las muestras.**

**Al Instituto de Geología de la UNAM, a la UASLP, al CCADET y al Centro de Geociencias por brindarme el mejor ambiente de trabajo que alguien puede tener.**

**Este trabajo fue financiado por los proyectos DGAPA-UNAM, CONACyT (SEP-83301), PROMEP UASLP-PTC-241 a cargo del Dr. Damiano Sarocchi y al proyecto I2100211 IACOD de DGAPA a cargo del Dr. Enrique Soto Castruita.**

**Y ...**

**Por supuestísimo que no puedo dejar de mencionar a LOF Cox y a mis mocositas Aris y Mime. Ustedes son mi motor. ¡Gracias por su amor, su infinita paciencia y comprensión! ¡Son los mejores del mundo!**

**A mis papás Patricia García y Froylán Caballero por su amor, su gran ejemplo y su apoyo incondicional. A Ofecita, Layda, Victor, Toño y Mundo por querer a mis niñas como nadie durante mis muchas ausencias.**

**A las mejores amigas del mundo Norma y Lia, no imagino tanta risa sin ustedes!**

## ÍNDICE

Lista de Figuras	i
Lista de tablas	iv
Resumen	v
Abstract	vii
<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
I.1. Antecedentes	1
I.2. Justificación	2
I.3. Objetivos	3
I.4. Terminología	3
I.5. Estructura del trabajo	5
<b>II. Flujos de escombros</b>	<b>6</b>
II.1. Comportamiento dinámico de los flujos de escombros	7
II.2. Clasificación	8
II.2.1. Rol de las arcillas en la dinámica de los flujos de escombros	9
II.3. Características de los depósitos	11
II.3.1. Facies deposicionales	11
II.3.2. Erosión	12
II.4. Transición entre flujos	13
II.5. Mecanismos de soporte e interacción de partículas	14
II.6. Sedimentación	17
II.7. Modelos de emplazamiento aplicados a los flujos de escombros	18
II.7.1. Flujo Granular, Modelo dilatante o modelo dispersivo	18
II.7.2. Modelo de Johnson	18
II.7.3. Flujo granular inercial	18
II.7.4. Modelo de Lowe	19
II.7.5. Modelo de Postma et al.	19
II.7.6. Modelo de crecimiento gradual	20
II.7.7. Modelo de acumulación gradual	22
II.7.8. Modificaciones en el modelo de Takahashi	22
<b>III. Metodología</b>	<b>24</b>
III.1. Preparación del material y características de las mezclas	24
III.2. Aparato experimental	26
III.3. Desarrollo de los experimentos	28
<b>IV. Granulometría</b>	<b>30</b>
IV.1. Metodología	30
IV.2. Resultados	32
IV.2.1. Fracción gruesa	32
IV.2.2. Fracción arenosa	38
IV.2.3. Fluido	43
IV.3. Comparación de datos experimentales con depósitos reales	46
IV.4. Discusión	47
<b>V. Análisis Morfológico</b>	<b>51</b>
V.1. Introducción	51
V.2. Terminología	51
V.3. Análisis bidimensional de la forma	52
V.3.1. Análisis de Fourier	52
V.4. Metodología	54

V.4.1. Preprocesado de las imágenes	54
V.4.2. Procesado	55
V.5. Resultados	56
V.6. Discusión	62
<b>VI. Reología</b>	<b>66</b>
VI.1. Introducción	66
VI.2. Reología	67
VI.3. Modelos reológicos aplicados a los flujos de escombros	68
VI.3.1. Modelos viscoplásticos	68
VI.3.2. Fluidos Power-Law (sin resistencia crítica)	70
VI.4. Metodología	72
VI.4.1. Curvas de cedencia	73
VI.4.2. Curvas de flujo	73
VI.4.3. Comparación con suspensiones de arcilla y limo y arcilla	73
VI.5. Resultados	75
VI.5.1. Curvas de cedencia	75
VI.5.2. Curvas de flujo	77
VI.6. Discusión	80
<b>VII. Discusión General</b>	<b>84</b>
VII.1. Recapitulación	84
VII.2. Revisión de los modelos actuales de flujos de escombros	86
VII.3. Importancia del limo y de la arcilla	89
VII.4. Modelo propuesto	90
<b>VIII. Conclusiones</b>	<b>95</b>
Referencias	97
Apéndices	101

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo II

- Figura II.1. Partes que constituyen un flujo de escombros en sección longitudinal (modificado de Pierson, 1986). 8
- Figura II.2. Distribución, en sección transversal, de las facies en los depósitos de flujos de escombros (Pierson y Scott, 1998). 12
- Figura II.3. Transformación de un flujo de escombros en un flujo hiperconcentrado (Pierson y Scott, 1998). 14
- Figura II.4. Tipos de sedimentación de partículas en función de la concentración y el tipo de sedimentos. a) Baja concentración-partículas no cohesivas. b) Concentración intermedia-partículas no cohesivas. c) Alta concentración-partículas no cohesivas. d) Baja concentración-partículas cohesivas. e) Alta concentración-partículas cohesivas (tomado de Amy et al., 2006). 17
- Figura II.5. Modelo propuesto por Postma et al. (1988). El flujo está dividido verticalmente en capas de diferente densidad y concentración con el desarrollo de una zona transicional con imbricación de clastos. 20
- Figura II.6. Formación de gradación normal en los depósitos de flujos de escombros por el mecanismo de crecimiento gradual (tomado de Vallance y Scott, 1997). 21
- Figura II.7. Clasificación de los flujos de escombros en función del número de Bagnold, número de Reynolds y de la profundidad relativa del flujo (tomado de Takahashi, 2009). 23

### Capítulo III

- Figura III.1. Histogramas granulométricos de las mezclas utilizadas durante los experimentos. 26
- Figura III.2. Características y diseño de la máquina de Los Ángeles. 28

### Capítulo IV

- Figura IV.1. Histogramas granulométricos con las características iniciales (a) de la fracción gruesa y (b) de la fracción arenosa para las cuatro mezclas utilizadas en los experimentos. 33
- Figura IV.2. Variación de las características granulométricas de la fracción gruesa con el tiempo y número de revoluciones en la máquina de Los Ángeles para las diferentes mezclas ocupadas en los experimentos. En la parte superior se muestran los contenidos iniciales de limo y arcilla. 34
- Figura IV.3. Disminución de las clases granulométricas con el tiempo de duración de los experimentos. a)  $-1\phi$ , b)  $-2\phi$  y c)  $-3\phi$ . En la parte inferior se muestran las cantidades iniciales de limo y arcilla. 35
- Figura IV.4. Variación de la media ( $M_z$ ) en la fracción gruesa con el tiempo. 36
- Figura IV.5. Variación de los parámetros estadísticos de la fracción gruesa en función de la media ( $M_z$ ). La flecha indica la migración de los valores en función del tiempo. 37
- Figura IV.6. Histogramas granulométricos de la fracción arenosa que muestran las variaciones en la granulometría con el tiempo y/o número de revoluciones en la máquina de Los Ángeles. 39
- Figura IV.7. Disminución exponencial de clases granulométricas 0 y  $1\phi$  con el tiempo. 40
- Figura IV.8. Aumento de las fracciones granulométricas 2, 3 y  $4\phi$ , la cual sigue una ley de potencia. 41
- Figura IV.9. Variación de la media ( $M_z$ ) en la fracción arenosa con el tiempo. 41

Figura IV.10. Variación de la desviación estándar, asimetría y curtosis en función de la media para la fracción arenosa. Nótese el cambio de polaridad en los valores de la asimetría. La flecha indica la dirección de migración de los valores con el desarrollo del experimento.	42
Figura IV.11. Histogramas granulométricos del fluido y su variación con el tiempo.	44
Figura IV.12. Variación de los parámetros estadísticos del fluido en función de la media. La flecha indica el aumento en el contenido de arcilla, sin incluir a Run 4, que no mostró tendencia alguna.	45
Figura IV.13. Ejemplos de distribuciones bimodales en depósitos de flujos de escombros. a) Depósito Atenquique (Saucedo et al., 2008); b) Depósito South Fork (Scott, 1988); Depósito Osceola Mudflow (Vallance y Scott, 1997).	47
Figura IV.14. Efecto de conminución en las clases granulométricas de $-6$ a $-4\phi$ y de fragmentación en las clases de $-3$ a $-1\phi$ . Ambos fenómenos producen la disminución de las clases granulométricas de $-3$ a $1\phi$ y el aumento exponencial de la fracción arenosa.	48
Figura IV.15. Formación de cadenas de fuerza en flujos granulares. a) Orientación de las cadenas en dirección del esfuerzo de cizalla. b) Formación de fracturas en las partículas. c) Propagación de los clastos formados en dirección radial que forma zonas de alta presión ( $>P$ ) en la zona circundante (Modificado de Davies y Mc Saveney, 2009).	49

## Capítulo V

Figura V.1. Aspectos utilizados para describir la morfología de las partículas (Barret, 1980).	52
Figura V.2. Descomposición del perímetro de una partícula en coordenadas polares (Davis, 1986).	53
Figura V.3. a) Imagen de las partículas escaneadas después del tamizado y secado. b) Imagen binaria obtenida durante el preprocesado.	55
Figura V.4. Variaciones en el coeficiente $MC_2$ (elipticidad) en función del diámetro de la partícula. A la derecha se observan las variaciones granulométricas de las fracciones mayores a $-1\phi$ (2mm) al inicio, parte intermedia y final de los experimentos.	57
Figura V.5. Variaciones en el coeficiente morfológico $MC_{3-8}$ , relacionado con la redondez, en función del diámetro de la partícula.	58
Figura V.6. Valores del coeficiente morfológico $MC_{30-34}$ , relacionado con la textura superficial de las partículas, en función del diámetro.	59
Figura V.7. Ejemplo de la regresión lineal efectuada para Run 4. Se muestra la ecuación utilizada para la regresión, así como el coeficiente de correlación.	61
Figura V.8. Coeficientes angulares y su variación con el número de revoluciones en la máquina de Los Ángeles.	62
Figura V.9. Modificación de la morfología de las partículas en función de su tamaño. a) Forma inicial. b) Planos de fracturamiento a lo largo de protuberancias o en toda la superficie. c) Forma final. Las partículas más gruesas se vuelven redondeadas y las más pequeñas conservan su forma angulosa.	64

## Capítulo VI

Figura VI.1. Relación entre la tasa de deformación y el esfuerzo de cizalla para los fluidos no-Newtonianos.	68
Figura VI.2. Relación entre el esfuerzo de cizalla y la tasa de deformación para los fluidos tipo Herschel-Bulkey.	71

Figura VI.3. Reómetro Physica MCR 101 utilizado para la caracterización reológica de las muestras.	72
Figura VI.4. Segregación de partículas en las suspensiones con una relación arcilla/agua= 5/95.	74
Figura VI.5. a) Curvas de cedencia de las muestras del experimento Run 3. b) Variación del esfuerzo de cedencia con el desarrollo del experimento. c) Características granulométricas de las muestras.	75
Figura VI.6. a) Curvas de cedencia de las muestras del experimento Run 5. b) Variación del esfuerzo de cedencia con el desarrollo del experimento. c) Características granulométricas de las muestras.	76
Figura VI.7. a) Curvas de cedencia de las suspensiones de arcilla y de limo y arcilla. b) Variación del esfuerzo de cedencia con la concentración de sedimentos.	77
Figura VI.8. a) Curvas de flujo de las muestras del experimento Run 3. b) Curvas de viscosidad.	78
Figura VI.9. a) Curvas de flujo de las muestras del experimento Run 5. b) Curvas de viscosidad.	79
Figura VI.10. a) Curvas de flujo de las suspensiones de arcilla y limo y arcilla. b) Variación de la viscosidad con la tasa de deformación.	80
Figura VI.11. Comparación de las curvas de flujo de este trabajo con las de otros autores.	82
Figura VI.12. Explicación del incremento en la viscosidad aparente y en el esfuerzo de cedencia con el tiempo. a) Granulometría inicial. b) Fracturamiento y conminución de las clases con diámetro $>2\phi$ . c) Formación de arena y limo. d) Disgregación de los clastos producidos y aumento en los contactos grano a grano que ocasiona un aumento en la cedencia y viscosidad.	83

## Capítulo VII

Figura VII.1. Modelos de transporte más importantes aplicados a flujos de escombros.	88
Figura VII.2. Modelo de transporte y depositación para flujos de escombros con contenido variable de material fino.	91

## LISTA DE TABLAS

### Capítulo II

Tabla II.1. Concentraciones de sedimentos utilizadas para definir a los flujos de escombros.	6
--	---

### Capítulo III

Tabla III.1. Características sedimentológicas de las mezclas utilizadas en los experimentos para simular flujos de escombros.	25
Tabla III.2. Contenido de limo y arcilla en depósitos de flujos de escombros.	27
Tabla III.3. Intervalos de tiempo para la toma de muestras y su equivalencia en número de revoluciones.	29

### Capítulo IV

Tabla IV.1. Interpretación de los parámetros estadísticos.	32
--	----

### Capítulo V

Tabla V.1. Valores del coeficiente angular ( $m$ ) obtenidos a partir de la ecuación $MC = md + q$ .	59
Tabla V.2. Valor del coeficiente ( $a$ ) para los coeficientes morfológicos $MC_{3-8}$ y $MC_{30-34}$ .	60

## RESUMEN

La dinámica de los flujos de escombros se estudió con base en experimentos analógicos. Cuatro mezclas de agua y sedimentos con concentraciones y distribuciones granulométricas comparables a las de flujos de escombros cohesivos y no cohesivos se introdujeron en un tambor rotatorio conocido como máquina de Los Ángeles, durante intervalos de tiempo definidos, que crecen de forma exponencial.

Los cambios en las características granulométricas, la evolución morfológica de las partículas utilizadas, así como las variaciones en el esfuerzo de cedencia y en la viscosidad, fueron utilizados para analizar la interacción entre partículas y su relación con el tipo de material fino presente en la matriz.

Las distribuciones granulométricas evolucionaron hacia distribuciones bimodales, con modas muy claras en las fracciones  $-4/-5\phi$  y en  $2/3\phi$ . Además, se observó una disminución importante en las partículas dentro del intervalo de  $-3$  a  $1\phi$ . Dichas distribuciones habían sido descritas previamente en flujos de escombros y atribuidas a erosión o depositación selectiva de material, sin tomar en cuenta los procesos internos, que son capaces de modificar la distribución granulométrica por sí solos, sin necesidad de que intervengan los fenómenos antes mencionados.

Por otro lado, los análisis morfológicos indican que los cambios en la morfología de las partículas son graduales y siguen una ley de potencia. Las fracciones granulométricas más gruesas analizadas ( $-6$  a  $-4\phi$ ), adquieren una forma más circular y perfiles más suaves. En contraste, las partículas más pequeñas ( $-3$  a  $-1\phi$ ) mantienen su forma angulosa y perfiles irregulares hasta el final de los experimentos.

La caracterización reológica de las muestras del fluido indica un aumento en la resistencia crítica y en la viscosidad aparente en las mezclas con mayor contenido de arcilla. Además, la viscosidad aparente presenta una relación inversa con respecto al esfuerzo de cizalla, es decir, a menor esfuerzo de cizalla, mayor viscosidad y viceversa.

Estos resultados son el producto de los procesos de interacción entre partículas dentro de las mezclas. La colisión de clastos produce la abrasión y conminución de las fracciones más gruesas incluidas en el rango de  $-6$  a  $-4\phi$  (16 a 64mm). Por otro lado, las partículas dentro del intervalo  $-3$  a  $-1\phi$  (2 a 8mm), se fracturan a lo largo de toda su superficie. Ambos fenómenos aumentan el contenido de arena y limo, que incrementa la resistencia crítica y la viscosidad aparente. La tasa de cambio a la que ocurren dichos procesos está relacionada con la cantidad y tipo de material fino presente en la matriz.

El limo desempeña un rol primario en las variaciones de la distribución granulométrica de la fracción gruesa y en la modificación de las irregularidades gruesas de las partículas, las cuales influyen en la dinámica interna y en las condiciones de sedimentación. La importancia de la arcilla radica en la evolución de las características granulométricas de la arena, en la textura superficial de las partículas y en el desarrollo del esfuerzo de cedencia y de la viscosidad aparente. Por lo tanto, la clasificación de los flujos de escombros, las interpretaciones de su dinámica y sobre todo las implicaciones del peligro asociadas con estos fenómenos, basadas únicamente en la arcilla presente en los depósitos debe ser reevaluada.

Los cambios observados en los experimentos son una herramienta importante para entender la dinámica de los flujos de escombros. Las variaciones en la granulometría y morfología de las partículas están relacionadas con la interacción entre partículas y afectan los procesos de sedimentación dentro de estos flujos. Asimismo, el aumento en la viscosidad aparente y en la resistencia crítica afecta el comportamiento reológico durante el transporte y favorece el depósito.

Con base en lo anterior se propone un modelo de transporte y depositación para flujos de escombros que consta de cuatro etapas: La primera de agitación, la segunda de fracturamiento, la tercera de producción de arena y la última de disgregación.

El modelo propuesto toma en cuenta la importancia de cada uno de los integrantes del material fino por separado, la eficiencia de los procesos de interacción entre clastos, características dominantes en los flujos de escombros y hace una revisión de los modelos por flujos homogéneos y por procesos de segregación.

Por lo tanto, este estudio constituye una nueva aproximación al estudio de los flujos de escombros, ya que su dinámica no debe ser evaluada únicamente con base en los depósitos, sino también debe incluir el estudio de estos fenómenos cuando los flujos se encuentran en movimiento bajo un régimen de erosión o no depositación.

Finalmente, este tipo de experimentos permiten el estudio de una gran variedad de parámetros texturales y su observación a intervalos de tiempo definidos. Los patrones experimentales observados arrojan nuevos datos relacionados con la interacción partícula-partícula, partícula-matriz, así como aportes a la teoría de la abrasión y conminución en flujos de escombros. Estos resultados tienen implicaciones importantes para entender mejor el comportamiento reológico y la cinemática de estos fenómenos, así como para determinar su alcance y por lo tanto, deben ser considerados al realizar una evaluación del peligro que representan.

## ABSTRACT

Results of analytical experiments related to the dynamic behavior of debris flows are presented. Four different mixtures of water and sediment with compositions resembling cohesive and non-cohesive debris flows were prepared. The mixtures were put into a rotating drum, known as a Los Angeles standard abrasion machine, and studied at different time intervals that grow exponentially.

Particle interaction and the amount and type of the fines-content in the matrix, and other factors that govern debris flow behavior, were studied by analyzing grain size distribution, morphological evolution of constituent particles, as well as rheologic characteristics.

Granulometric histograms of the mixtures evolve in time toward bimodal distributions. Clear modes in the  $-4/-5\phi$ , and  $2/3\phi$  range and a strong decrement in the percentage of  $-3$  to  $1\phi$  granulometric classes are developed. Such distributions were previously described from debris flows and were attributed to erosion followed by selective deposition of certain grain sizes. This explanation does not consider internal processes which are known to be capable of modifying granulometric distributions.

Morphological coefficients point to the fact that changes in shape between granulometric classes are gradual and follow a power law. Coarse granulometric classes ( $-6$  a  $-4\phi$ ) acquire more circular and smooth profiles while small particles ( $-3$  a  $-1\phi$ ) maintain their irregular profiles until the end of the experiments.

Rheologic characterizations of fluid samples show an increase in yield strength and apparent viscosity with time. Besides, apparent viscosity has an inverse relation with shear rate. Low values of shear rate correlate with high values of apparent viscosity.

These phenomena are the result of clast-interaction processes in the mixtures. Clast collisions between particles produce comminution of the coarsest fractions ( $-6$  a  $-4\phi$ ) while finer particles fracture along their entire surface ( $-3$  a  $-1\phi$ ). Both processes cause the exponential growth of sand and silt, and are accompanied by an increase in yield strength and apparent viscosity. The rate at which these changes occur is related to the type of fine sediment present in the matrix.

Silt influences the granulometric evolution of the coarse fraction and coarse irregularities on particle surfaces. Both aspects influence internal dynamics and sedimentation. Clay participates in granulometric changes of the sand fraction, in particle surface texture, and in yield strength and apparent viscosity. For these reasons, debris flow classification, dynamic interpretation, and hazard evaluation based solely on the influence of clay must be reevaluated.

The study of changes in granulometric characteristics and particle shape analysis are important tools for determining internal dynamics because they are related to clast interaction and affect sedimentation processes within these flows. Likewise, the increase of yield strength and apparent viscosity affects rheologic behavior and favors the soon cease of movement.

Based on the above, a transport and emplacement model for debris flows is presented that consists of four stages: The agitation, the fracture, the sand production, and finally the disaggregation stage.

The model proposed here takes into account separately the role of silt and clay, but also clast interaction efficiency, and hence constitutes a new approach to the study of debris flow dynamics. Finally, the type of experiments carried out, although not on a real scale, provide important physical information for understanding the phenomena that occur inside debris flows, enabling the study of a variety of textural parameters and their changes at regular time intervals. The experimental results observed offer new insights into clast–clast and clast- matrix interaction, as well as rounding and comminuting processes, with important implications for understanding rheological behavior and kinematics of flows and related hazards.

## I. INTRODUCCIÓN

### I.1. ANTECEDENTES

Los flujos de escombros son mezclas acuosas con alta concentración de sedimentos caracterizadas por su alta movilidad y capacidad para transportar grandes bloques en suspensión. Estos fenómenos son muy comunes y de acuerdo al ambiente natural donde se generan tienen diferentes implicaciones geológicas. En el caso de los ambientes submarinos, junto con las corrientes de turbidez y los flujos granulares, se les conoce como flujos de sedimentos por gravedad (Middleton y Hampton, 1976). Estos procesos se encargan de transportar sedimentos de ambientes someros a ambientes profundos. Por otro lado, dentro del contexto de los procesos de remoción en masa, representan una amenaza importante, ya que ocasionan la pérdida de un gran número de vidas humanas y la destrucción de infraestructura. Claros ejemplos de lo anterior son los casos del pueblo de Atenquique en Colima, México (16 de octubre de 1955; Saucedo et al., 2008) y de la ciudad de Vargas en Venezuela (15-16 de diciembre de 1999; Wieczorek et al., 2001). Finalmente, cuando los flujos de escombros se presentan en ambientes volcánicos se conocen con el término de “lahar” y constituyen un peligro importante, dado que son capaces de recorrer distancias de más de 100 km (Osceola Mudflow, Monte Rainier, E.E.U.U; Vallance y Scott, 1997) y se pueden presentar sin estar necesariamente asociados a actividad magmática. En este caso, no existe actividad volcánica precursora, como lo demuestra el ejemplo del depósito de flujo de escombros Pilcaya, en el volcán Nevado de Toluca, México (Capra y Macías, 2000).

Su amplia ocurrencia y su potencial amenaza por los grandes volúmenes y las distancias recorridas han motivado los estudios que intentan explicar su dinámica interna. Los estudios más comunes se centran en el análisis de sus depósitos, su reproducción en modelos analógicos, en la aplicación de teorías como la de flujo granular (Iverson y Vallance, 2001), o su caracterización a través de modelos reológicos (Fink et al., 1981; Major y Pierson, 1992; Coussot et al., 1998). Todos ellos coinciden en que estos fenómenos están gobernados por la interacción entre partículas y las características del fluido intersticial, y en que su comportamiento depende de la concentración de material sólido y de las características granulométricas, en particular del contenido y tipo de material fino.

Con base en lo anterior y debido a su gran variabilidad con respecto al ambiente donde se generan, al tamaño y grado de concentración de las partículas, los cambios en sus propiedades y su relación con los mecanismos de soporte de partículas no están bien definidos (Dumaisnil et al., 2010).

## I.2. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se centra en el estudio de los flujos de escombros mediante experimentos analógicos. Este enfoque tiene la ventaja de simular el fenómeno en condiciones controladas y evitar, en el caso de los flujos de escombros reales, las particularidades de cada ambiente de generación y las simplificaciones relacionadas con la granulometría de los sedimentos involucrados y/o asumir flujos bidimensionales en el caso de simulaciones numéricas.

Como se mencionó anteriormente los flujos de escombros están gobernados por los procesos de interacción entre partículas y por las características del fluido intersticial. Los procesos de interacción entre partículas dentro de los flujos de escombros se han estudiado previamente por Major y Pierson (1992) e Iverson (1997). Sin embargo, trabajos enfocados únicamente en este fenómeno y a sus efectos durante el transporte son escasos en la literatura. La historia de transporte y la interacción entre clastos se puede deducir a partir de la textura de los depósitos. Los estudios texturales implican la determinación de la granulometría, la fábrica y la morfología de los clastos. La granulometría de los depósitos da información acerca de las condiciones del flujo y sus modificaciones con el tiempo, sin embargo, está influenciada por las variaciones en el tipo de material disponible, por la geometría del canal y la pendiente, por lo que es difícil observar estos cambios únicamente por procesos internos. Información sobre estudios texturales detallados en depósitos de flujos de escombros se puede encontrar en Scott (1988), Carrasco-Núñez et al. (1993), Scott et al. (1995) y Carreras (2008). En lo relacionado a la morfología de los clastos, existen numerosos estudios que intentan deducir la historia de transporte. No obstante, éstos usan sólo diámetros muy específicos o estudian varios intervalos de clase simultáneamente (Diepenbroek et al., 1992; Dellino y Liotino, 2002; Manga et al., 2011). Asimismo, estudios morfológicos sistemáticos en flujos de escombros son muy escasos en la literatura (Scott, 1988; Pierson et al., 1990; Sarocchi, 2006; Carreras, 2008; Dumaisnil et al., 2010; Sarocchi et al., 2011). Por esta razón, el estudio de la morfología de clastos transportados por estos fenómenos es un campo poco explorado, que podría arrojar grandes aportes para explicar la dinámica interna.

En lo relacionado a las propiedades del fluido intersticial, constituido por agua, arena, limo y arcilla, la mayoría de los estudios previos se enfocan en la fracción arcillosa, que aporta propiedades cohesivas a estos flujos (Hampton, 1975; Coussot et al., 1998). Con base en lo anterior, los flujos de escombros volcánicos se clasifican en cohesivos y no cohesivos (Scott, 1988; Scott et al., 1995; Vallance y Scott, 1997). Esta clasificación tiene el inconveniente de estar basada únicamente en el contenido de arcilla de los depósitos del Monte Santa Elena (E.E.U.U.) y no en la reología de las partículas cohesivas que también incluyen el limo fino. Además, no toma en cuenta la precisión analítica en la medición de la arcilla (Konert y Vandenberghe, 1997; Xu y Di Guida, 2003; Goossens, 2008), que en muchos casos, es menor al límite establecido para dividir a los flujos de escombros.

Adicionalmente, dicho límite no toma en cuenta las propiedades de las arcillas ya que algunos grupos son muy reactivos y podrían influenciar el umbral entre un tipo de flujo u otro.

### **I.3. OBJETIVOS**

#### **Objetivo general:**

Estudiar la dinámica interna de los flujos de escombros, relacionada con los procesos de interacción entre partículas y las características del fluido intersticial, a partir de datos experimentales.

#### **Objetivos específicos:**

- Determinar la importancia de la presencia de limo en la dinámica de los flujos de escombros.
- Estudiar las variaciones en la granulometría y forma de las partículas como una evidencia de la interacción entre partículas.
- Caracterizar desde un punto de vista reológico las propiedades del fluido intersticial.

### **I.4. TERMINOLOGÍA**

En este trabajo se aplicó la siguiente terminología:

- *Abrasión*. Desgaste mecánico que consiste en rasguños, molienda y/o pulverización, producidos en la superficie de las rocas por fricción o impacto y donde los agentes de transporte (aire, agua o hielo) son los agentes de abrasión.
- *Clasto*. Un componente individual, grano o fragmento de roca producido por desintegración mecánica o química.
- *Cohesión*. Fuerza de resistencia por unidad de área a la aplicación de un esfuerzo de cizalla. En el caso de los flujos de escombros, la cohesión es el resultado de fuerzas electrostáticas entre la arcilla.

- *Conminución*. Reducción progresiva de una roca a partículas cada vez más pequeñas por efectos de intemperismo, erosión o movimientos tectónicos.
- *Esfuerzo de cedencia*. El esfuerzo por arriba del cual el material comienza a sufrir deformación permanente o a fluir en el caso de líquidos.
- *Flujo de escombros*. Mezclas de agua y sedimentos donde la fracción sólida corresponde al 70-90% en peso de la masa total (Costa, 1984), o más del 80% en peso, con base en la clasificación de Vallance y Scott (1997).
- *Flujo de escombros cohesivo*. Flujos de escombros con un contenido mayor al 3-5% en peso de arcilla. Cuando el contenido es menor se denominan flujos de escombros no cohesivos.
- *Forma*. Incluye la forma general, la redondez y la textura superficial (Barret, 1980). En la primera se describe la relación de las tres dimensiones que componen la partícula, es decir, la variación en las proporciones de la partícula. La redondez refleja las variaciones en los ángulos presentes en un perfil y, la textura superficial, mide las asperezas en la superficie o la rugosidad.
- *Material fino*. Mezcla de limo y arcilla.
- *Matriz*. Mezcla de agua, arena, limo y arcilla.
- *Partícula*. Término general usado sin restricción de tamaño, composición, forma o estructura interna para una unidad separable y distinta en una roca.
- *Sedimento*. Fragmento de material sólido que se origina por el intemperismo o erosión de las rocas y es transportado y depositado por aire, agua o hielo.
- *Textura*. Apariencia física o carácter de una roca que incluye aspectos y relaciones geométricas entre sus componentes. La textura incluye el tamaño, la forma y el arreglo de los elementos constituyentes de una roca.
- *Viscosidad*. Resistencia que los fluidos oponen a la deformación es decir, su fricción interna o la relación entre el esfuerzo y la deformación.
- *Viscosidad aparente*. Se determina a partir de la fuerza aplicada y una velocidad de deformación característica cuando no se cumple la condición de flujo homogéneo, por ejemplo, en el caso del viscosímetro de Brookfield.
- *Viscosidad molecular o dinámica*. Es la que se deriva de las fuerzas entre las moléculas del fluido, se refiere también como viscosidad dinámica debido a que se pone de manifiesto sólo cuando hay un movimiento relativo entre las diferentes partes de un fluido.

## **I.5. ESTRUCTURA DEL TRABAJO**

El presente trabajo está estructurado de la siguiente forma:

Primero se expone brevemente un marco teórico que incluye las características generales de los flujos de escombros, sus depósitos y las teorías más importantes que tratan de explicar los mecanismos de transporte y emplazamiento. A continuación, se describe la metodología general empleada en la tesis. Posteriormente, se muestran los resultados del trabajo en tres capítulos diferentes que incluyen la granulometría, el análisis morfológico y la caracterización reológica. Cada capítulo incluye la metodología específica para su desarrollo, sus resultados, además de una comparación con datos de depósitos reales y termina con una discusión parcial. Finalmente, se presenta una discusión general que incluye los resultados más sobresalientes de cada aspecto del estudio y se propone un modelo para el transporte y depositación de los flujos de escombros.

## II. FLUJOS DE ESCOMBROS

Los flujos de escombros son mezclas muy concentradas de agua y sedimentos que fluyen pendiente abajo debido a la fuerza de gravedad. Están constituidos por dos fases, una continua y una dispersa, que de forma conjunta controlan su dinámica. La fase continua, denominada matriz, consiste en una mezcla de agua y partículas (arena, limo y arcilla). La fase dispersa está constituida por partículas gruesas, cuyo diámetro varía de 2 mm hasta grandes bloques de más de 1 m de diámetro (Fisher, 1971).

La concentración de sólidos que los constituye varía de acuerdo al autor (Tabla II.1), sin embargo, su clasificación basada únicamente en la cantidad de material sólido no es suficiente, ya que se deben tomar en cuenta algunas características como la granulometría y las propiedades hidrodinámicas de los sedimentos (Pierson, 1995).

Tabla II.1. Concentraciones de sedimentos utilizadas para definir a los flujos de escombros.

Autor	Proporción de sedimentos	
	peso (%)	volumen (%)
Costa (1984)	70-90	47-77
Dumaisnil et al. (2010)	> 60	>40
Vallance y Scott (1997)	>80	>60
Zanuttigh y Lamberti (2007)	>70	>50

Los flujos de escombros se originan por la erosión e incorporación de un gran volumen de sedimentos por agua y a partir de deslizamientos de masas saturadas con agua (Iverson et al., 1997). En ambientes volcánicos se incluyen además, la interacción de flujos u oleadas piroclásticas con agua, hielo o nieve, o por el colapso total o parcial del edificio.

## II.1. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS

Los flujos de escombros se mueven aguas abajo en forma de uno o más pulsos sucesivos que pueden estar separados por flujos con menor concentración de sedimentos. La forma en la que se crea un pulso puede variar (Takahashi, 1991), algunos resultan de la inestabilidad del flujo causada por la variación en la concentración del material de forma longitudinal, que da origen al frente enriquecido en bloques, al cuerpo y la cola. Otro tipo de oleadas se da en flujos de escombros finos que carecen de gran proporción de bloques; en ellos el flujo principal durante el pico de descarga puede ser de tipo laminar, pero es retenido detrás de un flujo turbulento (Takahashi, 1991). El comportamiento en oleadas se puede crear también por la inestabilidad del flujo originada por deslizamientos no simultáneos o por periodos de disminución en la velocidad del flujo, seguidos por enriquecimiento en bloques y removilización. Los intervalos de tiempo entre un pulso y otro pueden variar de segundos a horas.

Los pulsos que ocurren en los flujos de escombros constan, en sección longitudinal, de tres partes (Figura II.1):

- (1) cabeza, con una alta concentración de material grueso, que se acumula al frente y en los márgenes del flujo y genera resistencia al movimiento lo que provoca su depósito; en esta zona la presión de poro es casi igual a cero.
- (2) cuerpo, donde el flujo de escombros se encuentra totalmente desarrollado, es muy móvil y el material está en estado de licuefacción.
- (3) cola (o *afterflow*), donde la concentración de sedimentos disminuye y puede dar lugar a un flujo hiperconcentrado (Pierson y Scott, 1985; Pierson y Costa, 1987).

Si no existe una fuente de sedimentos gruesos, la cabeza del flujo es similar al cuerpo, pero el primero es más agitado como consecuencia de la segregación de clastos suspendidos en el frente del flujo por un proceso de selección interna y del gradiente de velocidad.

La velocidad dentro de un flujo de escombros no es uniforme, el frente del flujo viaja a menor velocidad que el cuerpo, pero pueden alcanzar velocidades de hasta 150 km/hr (Pierson, 1998). Cerca de la fuente, la velocidad depende del momento impartido a la masa de sedimentos por el mecanismo disparador, de la profundidad del flujo y de la pendiente del canal; en las partes más distales, la gravedad y la concentración de material sólido, son los mecanismos más importantes.

El régimen de flujo generalmente es laminar debido a la viscosidad y a la cohesión sin embargo, en algunos flujos puede ser localmente turbulento debido a las irregularidades del suelo y a la alta velocidad.

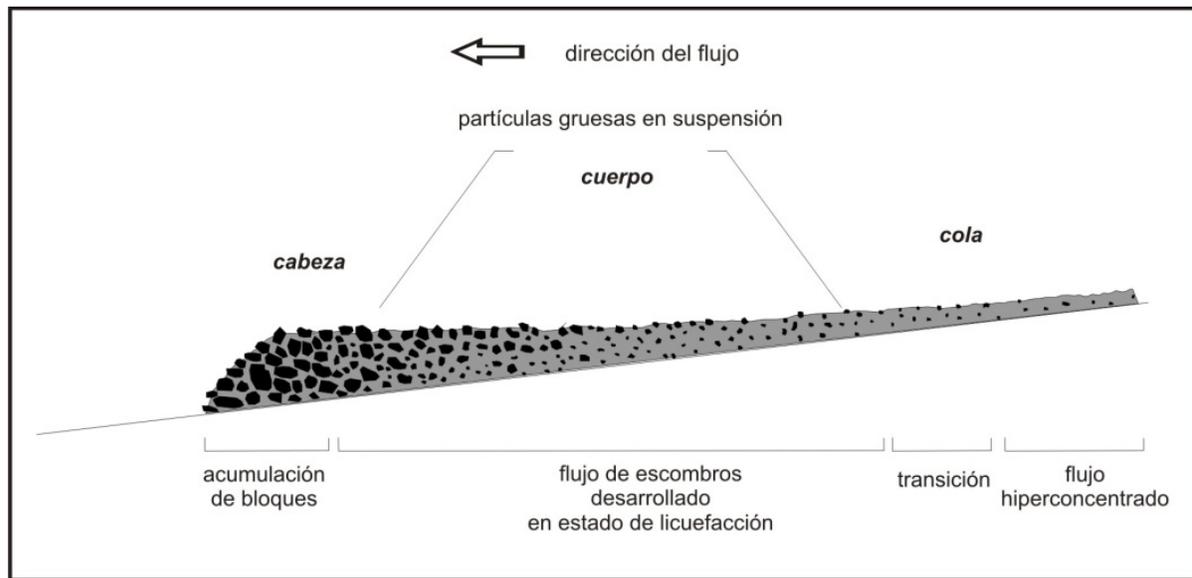


Figura II.1. Partes que constituyen un flujo de escombros en sección longitudinal (modificado de Pierson, 1986).

## II.2. CLASIFICACIÓN

Con base en el contenido de arcilla, los flujos de escombros volcánicos se dividen en cohesivos y no cohesivos (Pierson y Scott, 1985).

Los flujos de escombros no cohesivos (FENC) son flujos con un contenido de arcilla menor al 3-5%. Sus depósitos exhiben mayor interacción entre partículas que los flujos cohesivos, especialmente en los bordes del flujo, lo cual juega un papel muy importante en su comportamiento reológico y cinemático. Esta interacción produce capas basales ("*sole layers*"), gradación inversa, erosión a lo largo de la trayectoria del flujo, distribuciones granulométricas truncadas y cataclasis. La granularidad de estos flujos aumenta su miscibilidad con cuerpos de agua, por lo que se vuelven más diluidos y pierden fuerza, lo que provoca la sedimentación de la fase sólida y su transformación en flujos hiperconcentrados.

Los flujos de escombros cohesivos (FEC) poseen un contenido de arcilla mayor al 3-5% del volumen del depósito. Estas arcillas se originan cuando los sedimentos constituyentes del edificio volcánico han sido sometidos a un alto grado de alteración hidrotermal o a procesos de intemperismo.

La transición entre un tipo de flujo y otro es dependiente de la distribución granulométrica, así como de los tipos de arcilla presentes y de su grado de dispersión (Pierson y Costa, 1987). Lo anterior, se ha demostrado por otros autores, quienes han propuesto diversos límites para que las fuerzas de cohesión en la matriz, tengan un rol importante en el comportamiento total del flujo.

Hampton (1975) observó que, en suspensiones con arcillas del grupo de la esmectita, las fuerzas de cohesión en la matriz aparecen a concentraciones del 3% en volumen, pero en el caso de la caolinita este fenómeno aparece hasta que la arcilla ocupa un 5% en volumen de la suspensión. Sin embargo, la caolinita es de gran tamaño y baja capacidad de intercambio de cationes por lo que otro tipo de arcilla podría requerir mayor o menor concentración en función de estas propiedades.

Coussot y Piau (1994) y Coussot et al. (1998) establecen este límite cuando existe un contenido de partículas menores a 0.04 mm (limo grueso) mayor o igual al 10% en volumen. Estos autores incluyen además limo de medio a grueso como sedimento cohesivo puesto que los sedimentos de este tamaño también tienden a flocular.

Posteriormente, Amy et al. (2006) proponen una concentración del 7% en volumen, con base en experimentos realizados con una mezcla de caolinita y balines de vidrio del tamaño de la arena, sin embargo, la arcilla es de las menos cohesivas y el experimento fue realizado en una suspensión estática por lo que no considera la influencia del esfuerzo de cizalla producida por el flujo, que rompe los agregados de arcillas.

En suma, según los autores antes mencionados, la variabilidad en el contenido de sedimentos finos, en particular de las arcillas, para establecer el límite entre un FEC y un FENC, se debe principalmente al tipo de arcilla presente en los experimentos, por lo que este umbral sigue en debate actualmente.

### *II.2.1. Rol de las arcillas en la dinámica de los flujos de escombros*

En la dinámica de transporte, la influencia de los sedimentos finos, juega un papel muy importante, ya que a cierta concentración, cambia o altera la forma de depósito dentro del flujo. Cambios relativamente pequeños en el contenido o tipo de arcilla, del 2 al 5% (O'Brien y Julien, 1988; Major y Pierson, 1992; Amy et al., 2006), modifican el régimen de depositación, debido a cambios en el esfuerzo de cedencia y en la viscosidad de casi un orden de magnitud y su incremento con respecto

a la concentración es exponencial. El contenido de arcilla necesario para aumentar el esfuerzo de cedencia del fluido y la fuerza de la matriz dependen también del tipo de arcilla dentro del flujo. De los grupos de arcillas antes mencionados, los tres principales tipos de arcillas son: 1) La caolinita, que es relativamente estable y de baja cohesión y junto con las micas constituyen las arcillas más gruesas; 2) la Illita con estabilidad y cohesión media y; 3) la esmectita que presenta gran sensibilidad al agua y alto grado de cohesión por ser de las arcillas más finas. En esta última, el mayor grado de cohesión puede ser atribuido a que es el tipo de arcilla con mayor superficie específica y mayor capacidad de intercambio catiónico. Así, un FEC con montmorillonita probablemente tendría mayor cohesión, a la misma concentración, que uno con caolinita o illita aunque, en realidad, estos fenómenos presentan asociaciones variables de arcilla.

En los FEC, los clastos más grandes son transportados por las fuerzas de cohesión y flotación de la matriz que lubrica el movimiento de los clastos y disminuye la fricción entre ellos. La fuerza y la coherencia de la matriz están en función del agua libre y el agua que se encuentre absorbida o adsorbida en la estructura de las arcillas (Major y Pierson, 1992). También influyen el contenido de arena y el esfuerzo de cizalla al que es sometido el flujo, debido a que la interacción entre los clastos gruesos rompe los flóculos de arcilla y genera su dispersión, lo que disminuye la fuerza total de la matriz (Hampton, 1975).

Texturalmente, los depósitos producidos por FEC mantienen sus características generales a lo largo de toda su extensión, aunque sus depósitos pueden mostrar cambios texturales, muy graduales con la distancia (Scott, 1988). Esta característica indica que son capaces de mantener su coherencia y textura por grandes distancias sin transformarse en flujos diluidos y la falta de miscibilidad es una función del contenido de material fino en la matriz (Scott, 1988; Sohn, 2003). Por el contrario, los depósitos de FENC se encuentran generalmente asociados a depósitos de flujos hiperconcentrados y a corrientes diluidas.

La arcilla en los sistemas hidrotermales incrementa la porosidad y reduce la permeabilidad. Los grandes volúmenes de material alterado hidrotermalmente almacenan grandes volúmenes de agua en sus poros (Vallance y Scott, 1997) y no necesitan una fuente externa de agua como intensas lluvias, el rompimiento de un lago cratérico o deshielo.

Estudios realizados por Vallance y Scott (1997) indican que la cataclasis y el redondeamiento de los clastos son substanciales en FECs y son comparables a los de FENCs, a pesar del efecto lubricante de las arcillas.

### II.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS DEPÓSITOS

Los depósitos de flujo de escombros son compactos, de espesor uniforme y presentan superficies planas, resultados condicionados por la topografía, si existe material grueso, los clastos sobresalen de la superficie del depósito en forma de “narices”. Como consecuencia del drenado de agua de poro postdeposicional, se producen estructuras como pipas de drenaje, acanalamiento en la superficie y capas superficiales de limo y arcilla que pueden servir como líneas divisorias en secuencias verticales de flujos múltiples de textura similar. Cuando los flujos de escombros están confinados a lo largo de su trayecto, al llegar a los valles se depositan y adquieren en el frente una forma lobular.

Sus depósitos remanentes consisten en: *Levees*, constituidos por material grueso depositado en los márgenes del flujo y zonas de acumulación de clastos gruesos a lo largo del cauce debido a obstrucciones en la superficie.

Los flujos de escombros tienen diferentes patrones de estratificación en función de la velocidad y la topografía. El depósito es masivo cuando el flujo que emplazó el depósito fue muy rápido o cuando se depositaron flujos múltiples en un breve intervalo de tiempo (Major, 1997); con gradación normal por la acción de la gravedad y a la sedimentación de cada una de las partes del flujo por separado (Vallance y Scott, 1997); y muestra gradación inversa cuando el flujo es inicialmente diluido y constituido por sedimentos finos y luego se convierte en uno más grueso (Pierson y Scott, 1985) o cuando las partículas finas caen en huecos que se abren y cierran entre los granos y dejan a los clastos más gruesos en la superficie.

El contacto basal de un depósito de flujo de escombros es discordante cuando el flujo se emplazó rápidamente, y concordante cuando el emplazamiento fue lento y no erosivo.

Texturalmente, los depósitos presentan soporte de matriz o clasto a clasto, el grado de selección es malo a muy malo y la distribución granulométrica generalmente es bimodal o multimodal, pero puede evolucionar a unimodal con la distancia o del fondo a la cima del depósito.

#### II.3.1. *Facies deposicionales*

Existen tres facies deposicionales (Scott, 1988) características en los flujos de escombros (Figura II.2), en función de la estratificación por densidad, el tiempo de depositación y la reología del flujo.

- a) Facies de canal. Se encuentra a lo largo del eje principal del canal, incluye flujos basales y depósitos de barras con capas basales bien desarrolladas, su textura es soportada por clastos y generalmente tienen gradación normal o inversa (Vallance y Scott, 1997).
- b) Facies de planicie de inundación. Incluye depósitos en la superficie de las terrazas, en las paredes de los valles bajo el lecho del canal, en la planicie de inundación o cerca de la descarga pico del flujo. Está compuesta de clastos más finos que en la facies anterior, debido a la segregación por densidad, por lo que su textura es soportada por matriz.
- c) Facies transicionales. El depósito puede incluir el cuerpo principal de un flujo que es transicional entre un flujo de escombros y un flujo hiperconcentrado, o sedimentos depositados en el frente del flujo, en la interfase de mezcla con un cuerpo de agua o cuando la cola del flujo se vuelve más diluida.

### II.3.2. Erosión

Los flujos de escombros generalmente erosionan los sedimentos y las rocas subyacentes en pendientes abruptas, el umbral entre el régimen de erosión y depositación depende de la pendiente y de la geometría del canal. El material erosionado se incorpora al flujo por medio del proceso llamado “*bulking*” que incrementa el volumen del flujo y cambia sus propiedades. La eficiencia del *bulking* está relacionada al lecho del canal, a la erodibilidad de los bancos, al esfuerzo cortante aplicado al lecho del río y a los bancos, y al volumen de sedimentos disponibles en el cauce (Pierson, 1995).

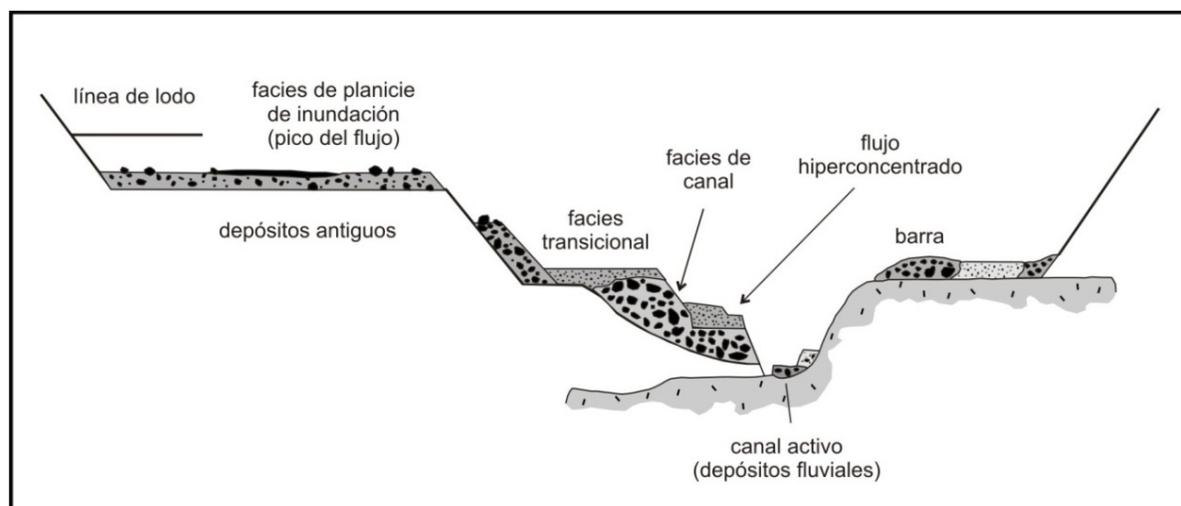


Figura II.2. Distribución, en sección transversal, de las facies en los depósitos de flujos de escombros (Pierson y Scott, 1998).

Los sedimentos erosionados provienen del sustrato y de las paredes del canal. En el primer caso, el material incorporado se desestabiliza debido a las fuerzas de gravedad y de arrastre provocadas durante el movimiento del flujo y a la alta presión de poro generada por el peso del flujo en materiales saturados con agua, que induce un estado de licuefacción y causa que este material se incorpore al flujo de escombros activo (Sassa y Wang, 2005). En el segundo, la incisión en la base de las paredes del canal perturba su estado de equilibrio por la disminución de material en la base y el material en la parte superior de las paredes colapsa y cae dentro del flujo.

#### **II.4. TRANSICIÓN ENTRE FLUJOS**

##### **a) Transformación de un flujo de escombros en un flujo hiperconcentrado**

Esta transformación ocurre por incorporación de cuerpos de agua o por sedimentación de los clastos más gruesos. En el primer caso, la transformación comienza en el frente del flujo y se va desplazando horizontalmente hasta llegar a la cola; este fenómeno ocurre en la “zona de mezcla”, donde ocurre una rápida selección de clastos debido a la acreción rápida del lecho (Figura II.3). En el segundo caso, los sedimentos más gruesos se depositan por el cambio de velocidad dentro del flujo. Esto ocurre cuando existe incorporación de cuerpos de agua, y conforme el flujo se vuelve más diluido, decrece el tamaño medio de las partículas y mejora el grado de selección dentro del flujo.

El depósito de la zona de mezcla exhibe textura arenosa, soportada por clastos, con grado de selección bajo, e intermedio entre ambos tipos de flujo. La estratificación horizontal es débil o puede ser masiva con lentes de grava en varios niveles, especialmente cerca de los márgenes (Pierson y Scott, 1985). Comienza tan pronto como el frente del flujo se transforma y continúa hasta que el cambio entre ambos tipos de flujo es total, por ello, el depósito del flujo hiperconcentrado es más grueso río abajo y subyace al depósito de flujo de escombros que se va haciendo más fino y el contacto entre ambos es transicional.

##### **b) Transformación de un flujo hiperconcentrado a un flujo de escombros**

Esta transformación ocurre por la erosión e incorporación de sedimentos saturados del lecho del río. Este fenómeno incrementa la resistencia crítica del fluido y la mezcla se vuelve capaz de mantener en suspensión sedimentos del tamaño de la grava.

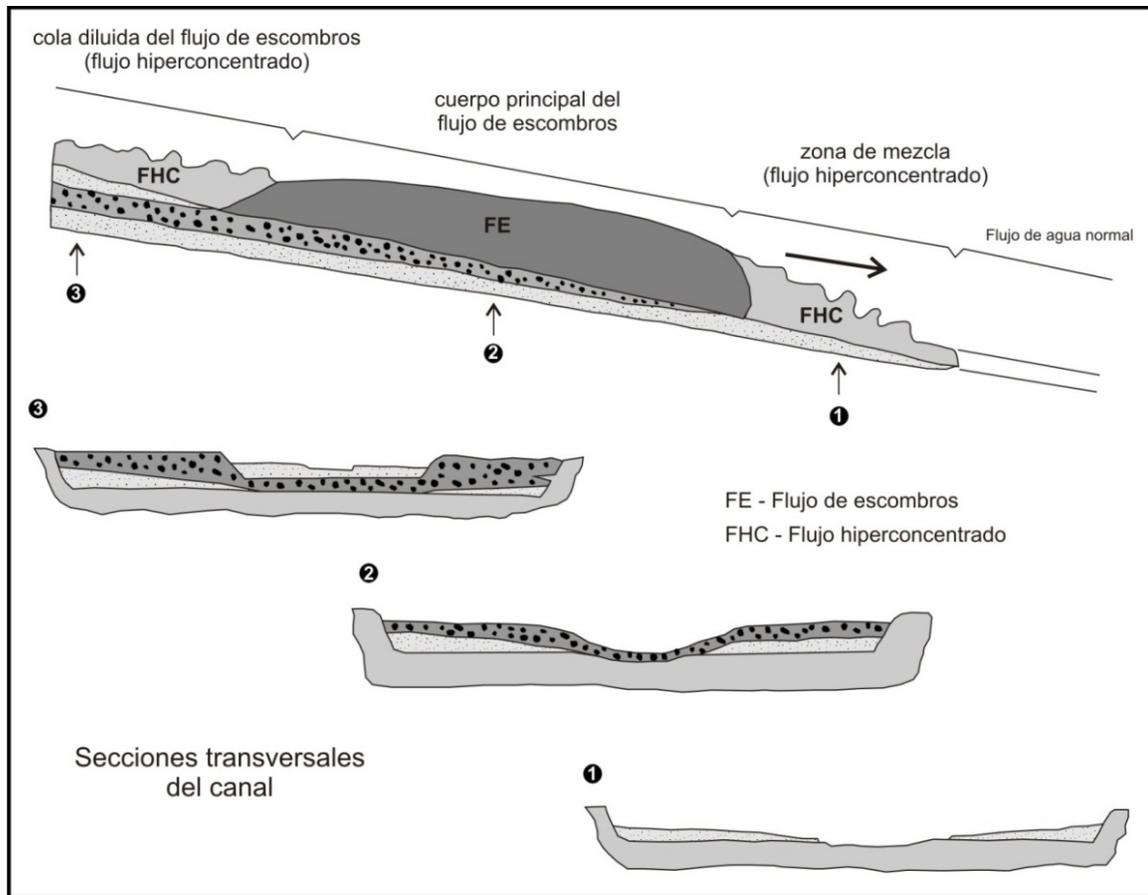


Figura II.3. Transformación de un flujo de escombros a un flujo hiperconcentrado (Pierson y Scott, 1998).

### II.5. MECANISMOS DE SOPORTE E INTERACCIÓN ENTRE PARTÍCULAS

Dentro de un flujo de escombros existe una combinación compleja de interacciones entre partículas, las cuales varían en función de la concentración de sedimentos dentro del flujo y de la distribución granulométrica, principalmente del contenido de material fino.

De acuerdo con Major y Pierson (1992), cuando el contenido de material fino es bajo, las colisiones entre clastos dominan la dinámica interna del flujo y se dice que está bajo un régimen inercial. La fricción y la transferencia de momento están definidas por la colisión de partículas gruesas. Cuando por el contrario, el contenido de material fino es alto, se forma un fluido intergranular que controla el comportamiento del flujo; en este caso el régimen es macroviscoso. En este tipo de flujos las interacciones entre partículas son electromecánicas.

Las fuerzas que actúan sobre una partícula estática son la fuerza de arrastre, la sustentación, el peso de la partícula sumergida y la cohesión interpartícula. La magnitud de estas fuerzas varía con las circunstancias de incorporación. Por ejemplo, para la arena y la grava, las fuerzas de cohesión son prácticamente despreciables dejando sólo al arrastre, al peso de la partícula sumergida y a la sustentación como factores importantes. Sin embargo, en el caso de las arcillas, las fuerzas de cohesión son de gran importancia en relación a las demás.

Una vez que la partícula ha sido incorporada al flujo, su transporte está determinado por su comportamiento hidráulico, el cual está en función del tamaño, la forma, la densidad, y velocidad de sedimentación, así como por las propiedades del fluido, como la concentración, la viscosidad y la velocidad. Mientras más difiera la partícula de su forma redondeada, menor será su velocidad de sedimentación y más irregular será su movimiento. Además, durante el transporte, las partículas dentro de un flujo de escombros pueden chocar, rozar, rotar y vibrar conforme se trasladan pendiente abajo (Jan y Shen, 1997), por lo que las colisiones entre ellas juegan un rol dominante en la transferencia de momento.

Los cuatro modos de transporte dentro de un fluido son el deslizamiento, rodamiento, saltación y suspensión Pierson (1981). En el deslizamiento y el rodamiento, las partículas permanecen en contacto permanente con el substrato. Sin embargo, en el primero no experimentan rotación y en el segundo sí. En la saltación, las partículas brincan sobre el substrato y existen colisiones repetidas entre partículas y entre partículas y el substrato. Las partículas que se desplazan por estos tres medios forman parte de la carpeta de tracción.

Por otro lado, la carga en suspensión está formada por partículas cuya trayectoria describe caminos largos e irregulares dentro del fluido y, prácticamente, nunca entran en contacto con el substrato. Los mecanismos de soporte de las partículas en suspensión que actúan dentro de los flujos de escombros son los siguientes:

- *Flotación (buoyancy; Johnson, 1970)*. Es igual al peso del material desplazado y se debe a la fuerza de empuje ejercida por el fluido, su magnitud está relacionada con el esfuerzo de cedencia del fluido es decir, a la fuerza de la matriz.
- *Sustentación (lift; Goldsmith y Mason, 1967)*. Las esferas suspendidas en un fluido viscoso que fluyen axialmente en un tubo circular son sujetas a la sustentación. El levantamiento causa la migración de las esferas hacia afuera o hacia adentro, en función de las densidades relativas de las esferas y del fluido y de su posición dentro del tubo.
- *Turbulencia*. La turbulencia tiende a homogenizar el fluido y agrega partículas pequeñas a las más grandes.
- *Presión dispersiva (dispersive pressure)*. Es uno de los mecanismos de soporte más importantes en flujos granulares (Johnson, 1970; Takahashi, 2007, 2009); se genera cuando

los sólidos fluyen en medios confinados, de forma que las partículas se mueven más fácilmente a lo largo de trayectorias paralelas a los límites del flujo o se alejan de ellos más fácilmente de lo que se acercan. El intento de las partículas para moverse hacia el límite rígido encuentra resistencia debido a las fuerzas ejercidas en las partículas por el límite mismo. La fuerza dispersiva es resistida por el peso de cada una de las partículas, y es proporcional a la masa y al esfuerzo de cizalla. Por lo tanto, cuando las partículas se mueven juntas, una con respecto a otra, las partículas más grandes se mueven hacia la zona de menor cizalla que es hacia la superficie o en la periferia.

La presión dispersiva se atribuye a la repulsión ocasionada por las colisiones entre partículas. Debido a la alta velocidad con que se encuentran se garantiza la dispersión por colisión inelástica. Este mecanismo aparece en un régimen de alta velocidad sin embargo, si la viscosidad y la densidad del fluido intersticial son grandes, aún en un régimen lento, se puede generar suficiente presión dispersiva para suspender las partículas por el “*squeezing flow*”. El “*squeezing flow*” se presenta en fluidos macroviscosos y se genera a partir del fluido que se expelle de los espacios entre las partículas que se aproximan, ya que se origina un flujo alrededor de la partícula, lo que a su vez, genera la presión dispersiva (Savage y Lun, 1988).

- *Inhibición de la sedimentación (hindered settling)*. En concentraciones de sedimento intermedias el proceso de inhibición de la sedimentación cobra importancia dentro de los flujos (Davis, 1986). Este fenómeno se produce cuando el movimiento de las partículas hacia abajo causa que el mismo volumen de fluido intersticial se desplace hacia arriba. A este fenómeno se le denomina “*counterflow*” y puede tener la suficiente fuerza para acarrear sedimentos finos o ligeros hacia la parte superior del flujo.

De acuerdo con Bagnold (1954) y Lowe (1982) la presión dispersiva y el retardo en la sedimentación se vuelven eficientes en concentraciones superiores al 20 o 30%.

- *Fuerza de la matriz (matrix strength)*. Esta propiedad disminuye la segregación de partículas porque los clastos más pequeños de cierto diámetro no se pueden depositar (Vallance y Scott, 1997).
- *Arreglo de las partículas (particle interlocking)*. Este fenómeno suprime la sedimentación y se presenta a altas concentraciones de sedimentos.

**II.6. SEDIMENTACIÓN**

La sedimentación de una partícula está regida por la viscosidad del fluido, por la densidad de la partícula, su forma y la rugosidad de su superficie. El tamaño y la densidad de la partícula determinan el peso que actúa durante el movimiento, mientras que la viscosidad, la forma, tamaño y rugosidad controlan el arrastre.

Los mecanismos de depósito están influenciados por la concentración y composición de las partículas (Figura II.4; Amy et al., 2006). En un fluido con baja concentración de arcilla, las arcillas se depositan individualmente de acuerdo con su tamaño y densidad. Cuando aumenta la concentración de arcilla, las partículas comienzan a interactuar y se forman agregados con mayor velocidad de sedimentación. Cuando el tamaño de los agregados de arcilla es igual a la distancia entre cada uno de ellos, se forma una estructura de arcillas, el esfuerzo en cualquier parte del fluido se transmite a través de esta red y la segregación de partículas gruesas se reduce (Amy et al., 2006).

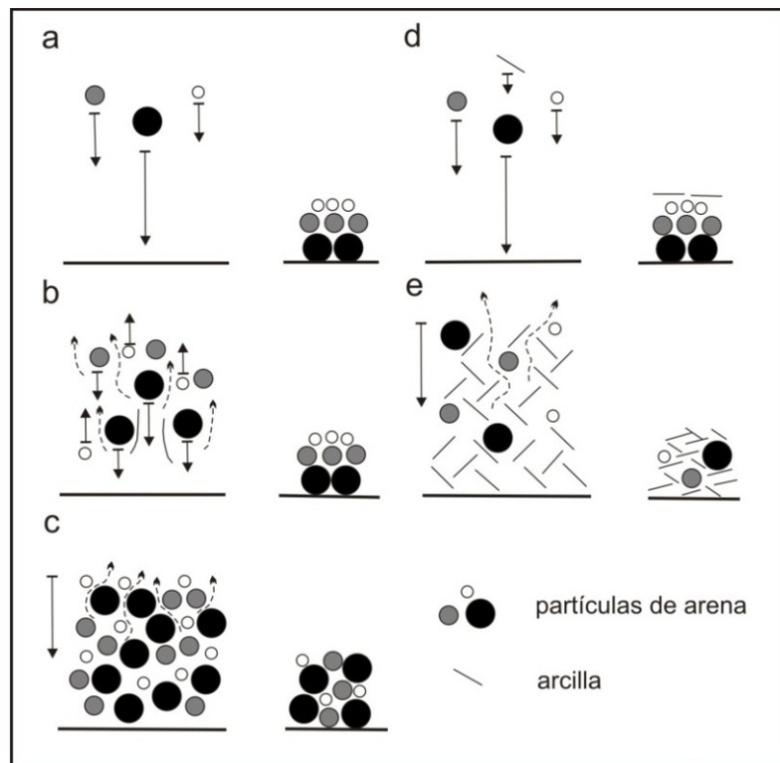


Figura II.4. Tipos de sedimentación de partículas en función de la concentración y el tipo de sedimentos. a) Baja concentración-partículas no cohesivas. b) Concentración intermedia-partículas no cohesivas. c) Alta concentración-partículas no cohesivas. d) Baja concentración-partículas cohesivas. e) Alta concentración-partículas cohesivas (tomado de Amy et al., 2006).

## II.7. MODELOS DE EMPLAZAMIENTO APLICADOS A LOS FLUJOS DE ESCOMBROS

### II.7.1. Flujo granular, modelo dilatante o modelo dispersivo (Bagnold, 1954)

En este modelo existe un gran espacio entre las partículas y la deformación es rápida, los contactos entre las partículas son de muy corto tiempo y la transferencia de momento es principalmente por colisión. El momento transferido por la colisión de partículas es proporcional al cuadrado de la tasa de cizalla (Bagnold, 1954).

$$\tau = \alpha (du/dy)^2$$

$\alpha$ , es un coeficiente que depende de la densidad y el tamaño de las partículas, de la distribución granulométrica, de la concentración de los sólidos y del ángulo de fricción interna de la mezcla.

### II.7.2. Modelo de Johnson (1970)

Considera que los flujos de escombros se mueven como un cuerpo rígido que se deforma cuando el esfuerzo de cizalla aplicado excede el esfuerzo de cedencia de la masa. Cuando se supera este valor, el material fluye como un fluido viscoso con un gradiente vertical de la velocidad homogéneo y cuando el esfuerzo de cizalla cae bajo la resistencia crítica, todo el flujo se detiene en masa. El modelo de Johnson explica varias características estructurales de los depósitos de flujos de escombros como el frente lobular, la formación de levees laterales y la presencia de grandes clastos en suspensión dentro del depósito. Sin embargo, no considera la interacción entre partículas, ni la relación fluido-sedimentos, factores que juegan un papel importante en la transferencia de momento, cambios en la resistencia a la cizalla y la formación de estructuras sedimentarias como gradación e imbricación de clastos.

### II.7.3. Flujo granular inercial (Takahashi, 1978)

Aplica el modelo de Bagnold (1954) y describe a los flujos de escombros como flujos inerciales de partículas dispersas uniformemente donde la transferencia de momento y la disipación de energía ocurre por la colisión inelástica entre los granos. La presión dispersiva se genera por el esfuerzo de cizalla producido entre el lecho del cauce y el flujo, donde existe una fuerte interacción entre partículas, que las mantiene en suspensión dentro del flujo. El flujo se deposita cuando el esfuerzo

de cizalla disminuye y la presión dispersiva se atenúa, lo que resulta en el congelamiento del flujo o “freezing”. La desventaja principal de este modelo es que no toma en cuenta el papel del fluido intersticial que regula la interacción entre partículas en flujos de escombros. Es un régimen colisional como el de Bagnold.

#### II.7.4. Modelo de Lowe (1982)

Lowe (1982) propone que los flujos de escombros se encuentran divididos en dos capas, la basal, denominada carpeta de tracción y un parte superior diluida. La concentración de partículas en la carpeta de tracción aumenta conforme las partículas de la parte superior diluida se sedimentan, por lo tanto, el transporte en la base del flujo está dominado por las colisiones entre partículas, es decir, por la presión dispersiva. Debido al continuo aporte de material de la parte superior, la carpeta de tracción colapsa y se congela dando lugar a una nueva carpeta sobre la nueva superficie. Este congelamiento ocurre en dirección perpendicular al substrato, el depósito de la carpeta inercial se hace más grueso y los clastos localizados en la interface entre las dos capas se desplazan progresivamente a un nivel superior, dando el aspecto de flotar dentro del depósito. Dicho congelamiento ocurre cuando la velocidad del flujo cae por debajo de la velocidad necesaria para mantener la presión dispersiva.

#### II.7.5. Modelo de Postma et al. (1988)

Este modelo fue aplicado a corrientes de turbidez de alta densidad para explicar los grandes bloques contenidos “flotando” dentro de la matriz. Considera que al inicio de los flujos existe una depositación rápida de las partículas, las cuales se concentran en la base formando una capa de movimiento laminar o casi laminar, de alta concentración, llamada *capa inercial*, que se acuña lateralmente al frente del flujo. La parte superior es más diluida e internamente desarrolla turbulencia (Figura II.5). Estas dos capas presentan comportamientos reológicos diferentes ocasionados por la gran diferencia en la concentración de partículas, que resulta en una capa de alta viscosidad en la base, con comportamiento no-Newtoniano de tipo pseudoplástico y una capa superior, con comportamiento Newtoniano. En la base, el soporte de las partículas lo proveen la presión dispersiva, el retardo en la sedimentación y la fuerza de levantamiento debido a la viscosidad del fluido intersticial. En la parte superior, la turbulencia soporta las partículas. La interfase entre estas dos partes forma una discontinuidad física importante, donde las partículas de mayor diámetro se concentran y son sometidas a la fuerza de arrastre, ejercida por la suspensión turbulenta de la parte superior, que evita

el hundimiento de los clastos dentro de la capa inercial. La velocidad que adquieren estos clastos en la capa intermedia, puede hacer que sean acarreados al frente del flujo y rebasen la capa inercial para después ser llevados nuevamente hacia atrás. Si la turbulencia es suficiente se mantienen en suspensión, de lo contrario, se concentran en la base y al frente del flujo, donde son transportados por tracción o pueden ser también depositados. Los clastos en esta zona intermedia pueden adquirir cierta imbricación con el eje a inclinado en dirección contraria al flujo.

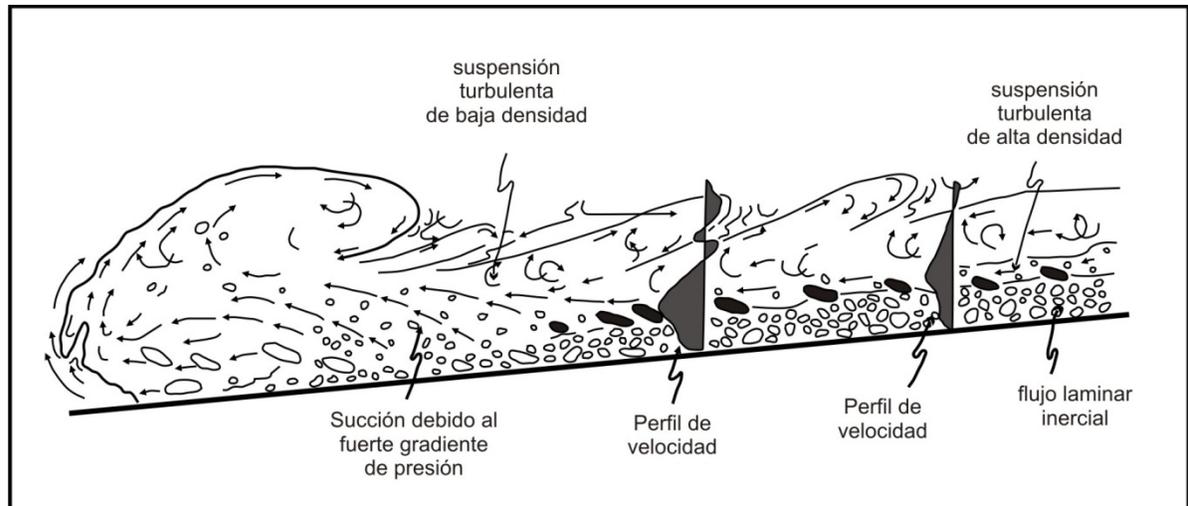


Figura II.5. Modelo propuesto por Postma et al. (1988). El flujo está dividido verticalmente en capas de diferente densidad y concentración con el desarrollo de una zona transicional con imbricación de clastos.

#### II.7.6. Modelo de crecimiento gradual (Vallance y Scott, 1997)

Actualmente, el modelo de crecimiento gradual propuesto para flujos piroclásticos por Branney y Kokelaar (1992) y para flujos de escombros por Vallance y Scott (1997) es el más aceptado como mecanismo de emplazamiento principal y se basa en los modelos de Lowe (1982) y Postma et al. (1988) para corrientes de turbidez. En este se ofrece una explicación alternativa a la depositación en masa para esclarecer el origen de la estructura masiva y de la gradación normal en depósitos de flujos de escombros.

El origen de la estructura masiva lo atribuyen a la formación de una zona de arrastre (*creeping*), localizada entre el substrato del canal, que permanece estático, y la parte superior del flujo, que se mueve rápidamente. Las partículas en la zona de arrastre se depositan unas sobre otras, por lo que la superficie estática aumenta de nivel. En este punto, existe una gran cantidad de esfuerzo de



### II.7.7. Modelo de acumulación gradual (*incremental accretion*; Major, 1997)

Este modelo se aplica sólo para flujos pequeños y rápidos, constituidos por sedimentos de baja cohesión, que se depositan cerca de la fuente. En él, los depósitos de flujos de escombros se forman por la acumulación de una serie de pulsos independientes, pero sucesivos, separados por un breve intervalo de tiempo. Cada pulso empuja hacia adelante y a los lados el depósito formado por el pulso anterior. El resultado es un depósito con un frente lobular, estructura masiva, y levees laterales. La única evidencia de la acumulación gradual se observa en la morfología del depósito y en la granulometría de la superficie, donde existen zonas de acumulación de clastos y horizontes de grava bien seleccionada que marcan los límites de cada pulso. Estas características hacen muy difícil la separación de unidades en depósitos naturales y puede ocasionar una mala interpretación en relación a la frecuencia y magnitud de estos eventos.

### II.7.8. Modificaciones en el modelo de Takahashi (Takahashi, 2007, 2009)

Takahashi concluye que existen tres tipos de flujos de escombros en función de la profundidad relativa del flujo, del número de Reynolds y del número de Bagnold (Figura II.7). El número de Reynolds mide la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, valores bajos indican que dominan las fuerzas viscosas y se relacionan con un flujo laminar, valores altos indican que dominan las fuerzas inerciales y el flujo es turbulento. El número de Bagnold mide la relación entre los esfuerzos producidos por la colisión entre partículas y los esfuerzos viscosos en un flujo granular constituido por partículas sólidas y un fluido Newtoniano. De acuerdo con los tres parámetros antes mencionados, los flujos de escombros que se encuentran dominados por la colisión entre partículas se denominan *flujos de escombros rocosos (stony debris flow)*. Los flujos de escombros en los que dominan los esfuerzos turbulentos son llamados *flujos de escombros lodosos y turbulentos (turbulent muddy debris flow)*. La última categoría la constituyen los flujos en los que dominan los esfuerzos viscoplásticos y se conocen como *flujos de escombros viscosos (viscous debris flow)*.

Los flujos de escombros que se encuentran en el dominio adyacente al lado que representa la profundidad relativa se denominan *flujos de escombros inerciales (inertial debris flow)*, por los esfuerzos que predominan en el flujo. Este tipo de flujos consisten de dos capas. La capa basal donde existe un intenso contacto y colisión de partículas, y la capa superior, donde se encuentra una suspensión turbulenta. La relación de estas dos capas en el flujo depende de la profundidad relativa y de la concentración. Si la profundidad relativa es pequeña y la capa de contactos entre partículas domina el flujo, éste será rocoso. Por el contrario, si la profundidad relativa es grande y la suspensión turbulenta domina, el flujo es lodoso y turbulento.

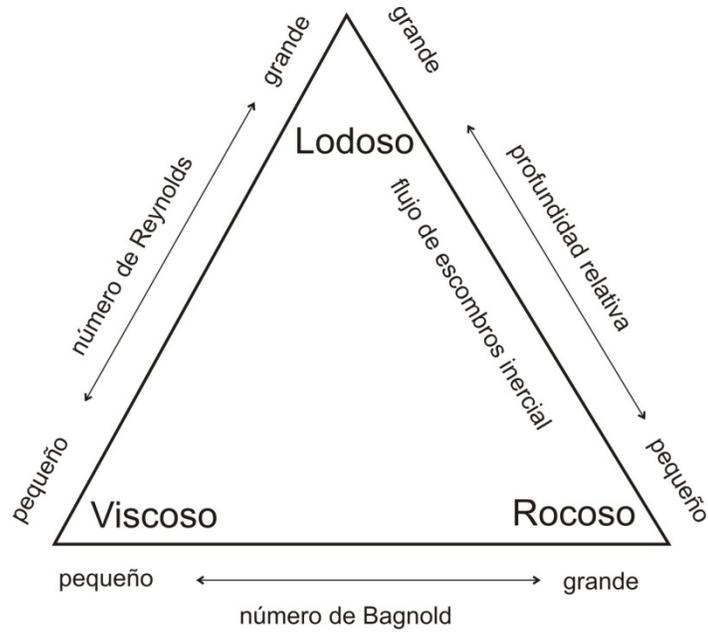


Figura II.7. Clasificación de los flujos de escombros en función del número de Bagnold, número de Reynolds y de la profundidad relativa del flujo (tomado de Takahashi, 2009).

### III. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se realizaron experimentos analógicos relacionados con flujos de escombros, con el objetivo de simular los procesos de interacción entre partículas y la influencia de la composición del fluido intersticial en su dinámica.

Esto se realizó utilizando cuatro mezclas de agua y sedimentos con concentraciones y distribuciones granulométricas comparables con las de flujos de escombros cohesivos y no cohesivos reales. Dichas mezclas fueron introducidas en un tambor rotario conocido como “máquina de Los Ángeles” y dejadas correr a intervalos de tiempo definidos. A cada intervalo de tiempo se tomaron muestras de sedimentos y del fluido para realizar análisis granulométricos, de la morfología de las partículas y la caracterización reológica de la matriz.

#### III.1. PREPARACIÓN DEL MATERIAL Y CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS

Para preparar la fracción sólida de las mezclas, se recolectaron bloques de composición andesítica, pertenecientes a depósitos de flujo de bloques y cenizas recientes del volcán de Colima. Los bloques fueron triturados y tamizados con tiempos de agitación cortos, con el objetivo de que las partículas utilizadas, en las fracciones comprendidas entre  $-6$  y  $8 \phi$ , se encontraran en condiciones de máxima angulosidad y observar de manera clara las variaciones en la forma durante el desarrollo del experimento. Para la fracción arcillosa se utilizó bentonita de tipo sódico de uso comercial. La bentonita consiste principalmente de montmorillonita (grupo de la esmectita) caracterizada por su alta superficie específica, su alto grado de expansión y su gran capacidad de intercambio catiónico. Estas características permitieron observar mejor la influencia de la arcilla en la dinámica de los flujos de escombros.

Una vez obtenido el material se prepararon 4 mezclas denominadas: *Run2*, *Run3*, *Run4* y *Run5*, con un peso aproximado de 9.4 kg. Las mezclas se prepararon con la misma distribución granulométrica en el intervalo comprendido entre  $-6$  y  $4\phi$ . Únicamente se modificó el contenido en las fracciones de limo y arcilla (Tabla III.1; Figura III.1), el cual se estableció con base en la granulometría de depósitos cohesivos y no cohesivos descritos previamente en la literatura (Tabla III.2). La mezcla *Run2* refleja las características de un flujo de escombros no cohesivo, mientras que *Run3*, *Run4* y *Run5* son mezclas que semejan flujos de escombros cohesivos. El contenido de material fino de *Run3* es apenas superior al establecido como división entre un flujo de escombros cohesivo y no cohesivo, *Run4* contiene únicamente limo como material fino y *Run5* contiene únicamente arcilla.

Tabla III.1. Características sedimentológicas de las mezclas utilizadas en los experimentos para simular flujos de escombros.

Mezcla		Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	
		No cohesivo	cohesivo			
Diámetro						
milímetros (mm)	unidades Phi ( $\phi$ )	Peso (%)	Peso (%)	Peso (%)	Peso (%)	
Grava	64	-6	13.66	12.18	11.20	13.08
	32	-5	17.37	14.34	14.57	15.54
	16	-4	15.12	12.40	12.60	13.38
	8	-3	12.79	10.50	10.64	11.29
	4	-2	10.47	8.59	8.71	9.24
	2	-1	8.14	6.68	6.77	7.15
Arena	1	0	5.81	4.77	4.84	5.11
	500 $\mu$ m	1	4.65	3.82	3.87	4.09
	250 $\mu$ m	2	3.49	2.86	2.90	3.06
	123 $\mu$ m	3	2.33	1.91	1.93	2.04
	63 $\mu$ m	4	1.16	0.95	0.97	1.02
Limo	39 - 63 $\mu$ m	5	1.25	3.75	5.25	1.25
		6	1.25	3.75	5.25	1.25
		7	1.25	3.75	5.25	1.25
		8	1.25	3.75	5.25	1.25
Arcilla	<39 $\mu$ m	9	0.00	6.00	0.00	10.00
Total			100.00	100.00	100.00	100.00

Una vez preparada la mezcla de material se añadió un porcentaje de agua correspondiente al 20% en peso, que representa el valor intermedio en el contenido de agua, de acuerdo a los valores definidos por Costa (1984) para flujos de escombros. La mezcla total (agua y sedimentos) tenía un peso total aproximado de 11.8 kg.

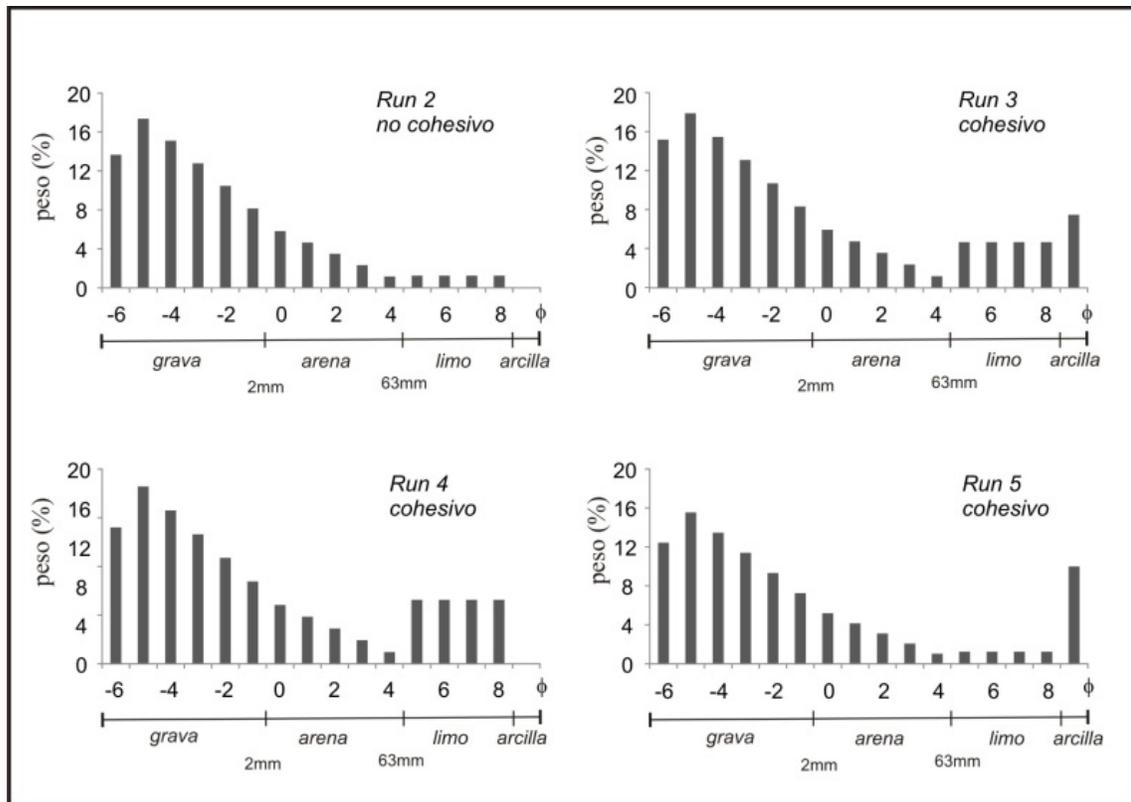


Figura III.1. Histogramas granulométricos de las mezclas utilizadas durante los experimentos.

### III.2. APARATO EXPERIMENTAL

Las mezclas se introdujeron en un tambor rotario, conocido como máquina estándar de “Los Ángeles”, utilizado en ingeniería civil para determinar la resistencia a la abrasión de los materiales. Presenta las siguientes características (Figura III.2):

Consiste de un cilindro hueco de acero, de un diámetro interior de  $711 \pm 5$  mm y una longitud interior de  $508 \pm 5$  mm, cerrado en ambos extremos. Está montado en un par de soportes con baleros que le permite rotar sobre su eje en una posición horizontal. En el interior, el tambor posee un entrepaño de acero de dimensiones  $89 \times 25.4 \times 508$  mm. En el exterior, el tambor tiene una abertura para la introducción de la muestra, cubierta herméticamente para impedir la salida de material durante las revoluciones sobre su propio eje. El cilindro gira a lo largo de su eje horizontal con una velocidad de 30-33 rev/min.

Tabla III.2. Contenido de limo y arcilla en depósitos de flujos de escombros.

<b>Depósito de flujo de escombros</b>	<b>Edad o año de ocurrencia</b>	<b>Limo (peso %)</b>	<b>Arcilla (peso %)</b>	<b>Referencia</b>
North Fork Lahar, Monte Santa Elena (E.E.U.U.)	1980	19 a 28	3 a 5	Scott (1988)
South Fork Lahar, Monte Santa Elena (E.E.U.U.)	1980	11 a 20	2 a 3	Scott (1988)
"La Avalancha" Río Páez, Nevado del Huila (Colombia)	1994	5 a 19	0 a 5	Pulgarín (2000)
Río Huitzilapan, Pico de Orizaba* (México)			5	Scott et al. (2001)
Osceola Mudflow, Mount Rainier (E.E.U.U.)	5600 años A.P.	4 a 13	3 a 14	Scott et al (1995); Vallance y Scott (1997); Scott et al. (2001)
Depósito Pilcaya, Nevado de Toluca (México)	Pleistoceno	5 a 19	2 a 9	Capra y Macías (2000)
Depósito El Mogote, Nevado de Toluca (México)	Pleistoceno	8 a 14	1 a 4	Capra y Macías (2000)
El Naranjo, Nevado de Colima (México)	Pleistoceno	9 a 22	0 a 1.8	Capra y Macías (2002)
Lahar Tetelzingo, Citaltépetl (México)	13000 a 27000 años A.P		10 a 16	Carrasco-Núñez et al. (1993)

Los tambores rotatorios se han utilizado para simular flujos de material granular (Longo y Lamberti, 2002; Kaitna y Rickenmann, 2007; Hsu et al., 2008) porque generan un flujo estacionario y ofrecen la ventaja de aislar procesos como la erosión o depositación y permiten enfocarse en los fenómenos de interacción de partículas y el rol del fluido intersticial.

Experimentos similares muestran una circulación continua de material en la parte inferior de la máquina (Kaitna y Rickenmann, 2007; Hsu et al., 2008), así como movimientos complejos de partículas como rodamiento, colisión y vibración (Lewin y Brewer, 2002), descritos previamente en flujos de escombros. El movimiento de las partículas dentro del tambor rotatorio es similar al de los flujos de escombros, pero la energía involucrada depende de los clastos, la masa de agua y de la velocidad de rotación del tambor.

La velocidad de rotación en la máquina de Los Ángeles (30-33 rev/min) está preestablecida, pero es concordante con otros experimentos para simular la dinámica de los flujos de escombros (ej. 30 rpm; Kaitna y Rickenmann, 2007).

### III.3. DESARROLLO DE LOS EXPERIMENTOS

Las mezclas descritas fueron introducidas en el aparato por 8 intervalos de tiempo (Tabla III.3), que sumaron un tiempo total de 255' (correspondiente a 8542 revoluciones). En cada ciclo o intervalo de tiempo, se tomaron entre 2 y 2.5 kg de muestra para el análisis sedimentológico y el análisis de la forma. De cada fracción o diámetro, se seleccionaron 100 partículas al azar, de las cuales se obtuvo una imagen de alta resolución de las partículas en posición de descanso, con los ejes "a" y "b" paralelos a la superficie de la imagen y el eje "c", el más corto, en posición vertical. Una vez concluido el escaneo de las imágenes, con el fin de no alterar la composición global de la mezcla, la muestra completa se regresó a la máquina de Los Ángeles para ser retrabajada por el intervalo de tiempo subsecuente, hasta concluir el tiempo total.

Adicionalmente, a cada intervalo de tiempo se tomó una muestra del fluido, de aproximadamente 100 ml, para la caracterización reológica.

Los detalles de la metodología empleada para cada uno de los análisis efectuados, sedimentología, morfología y reología, se describirán en los capítulos subsecuentes.

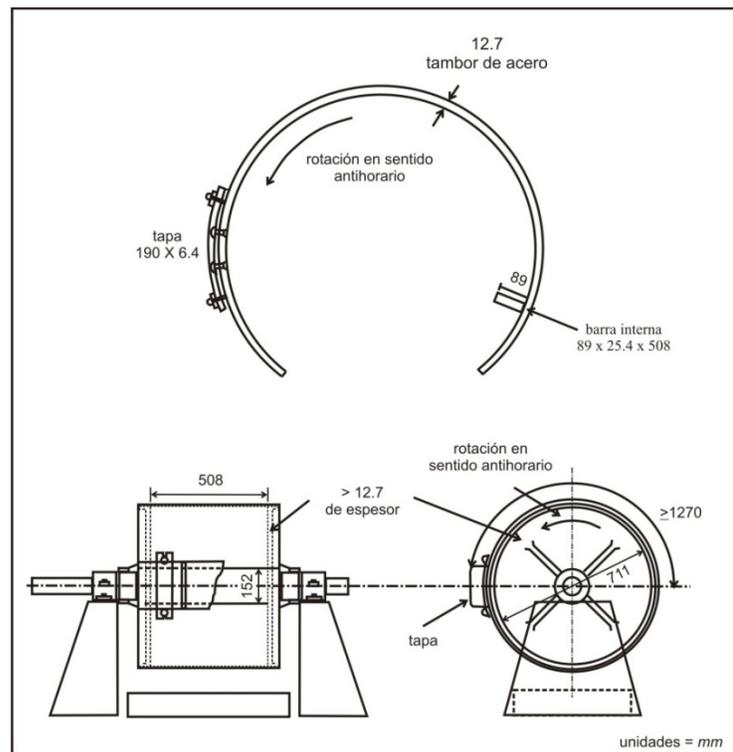


Figura III.2. Características y diseño de la máquina de Los Ángeles.

Tabla III.3. Intervalos de tiempo para la toma de muestras y su equivalencia en número de revoluciones.

<b>Revoluciones</b>	<b>Tiempo (min)</b>
33	1
100	3
234	7
502	15
1038	31
2110	63
4254	127
8542	255

## IV. GRANULOMETRÍA

El estudio de la textura de un depósito es de gran importancia, ya que nos brinda información acerca de las características del medio durante el transporte y la depositación. Uno de los aspectos más importantes relacionados con la textura es la granulometría, que en el caso de los flujos de escombros, arroja información acerca de las condiciones dinámicas del flujo y de la variación de éstas durante el transporte (Scott, 1988). Dichas condiciones comprenden la capacidad de erosión, de transportar bloques en suspensión y/o la incorporación de cuerpos de agua durante el transporte, entre otras.

En este capítulo se expondrán las variaciones granulométricas observadas durante los experimentos realizados en la máquina de Los Ángeles. Dichas variaciones, dado que ocurren en un sistema cerrado, se pueden atribuir solamente a mecanismos internos producidos por la interacción entre partículas y al rol del fluido y no se encuentran influenciadas por la incorporación y/o la depositación selectiva de material, así como por la unión de los flujos de escombros con material de cauces tributarios. Al final del presente capítulo, se presenta una comparación de los resultados de este trabajo con las variaciones sedimentológicas en depósitos reales de flujos de escombros, tanto cohesivos como no cohesivos, y se expondrá una interpretación de los resultados.

### IV.1. METODOLOGÍA

Los análisis granulométricos fueron realizados en etapas diferentes del experimento y con tres diferentes metodologías en función del diámetro del material. Durante los intervalos de tiempo establecidos como intervalos de muestreo (Capítulo 3; Tabla III.3) se recogieron aproximadamente 2.5 a 3 kg de mezcla de la máquina de Los Ángeles. La mezcla se tamizó a intervalos de  $1\phi$  en las fracciones comprendidas entre  $-6\phi$  a  $-1\phi$ , usando adicionalmente la malla de  $63\ \mu\text{m}$  y la base de los tamices para recolectar la arena y la parte más fina por separado. Una vez concluido este proceso, el material recolectado en la base ( $<63\ \mu\text{m}$ ) se regresó a la máquina de Los Ángeles. El material más grueso (gravas y arenas) fue retamizado, esta vez por vía húmeda, en el intervalo de  $-6$  a  $-1\phi$ , con el objetivo de remover la gran cantidad de sedimentos adheridos en la superficie de las partículas. La fracción arenosa ( $0$  a  $4\phi$ ) se lavó, al igual que las partículas más gruesas, y de ella se tomaron aproximadamente 100 gr. para su posterior análisis en seco, también a intervalos de  $1\phi$ . Una vez concluido el proceso de tamizado por vía húmeda la mezcla se regresó a la máquina de Los Ángeles.

Adicionalmente, a cada intervalo de tiempo, se recolectó una muestra del fluido, de aproximadamente 100 ml, para su análisis granulométrico que incluye diámetros entre 3 y 10 $\phi$ . Estos análisis se realizaron por vía húmeda en un sedimentógrafo tipo Fristch Analysette 22, el cual se basa en la velocidad de sedimentación de las partículas. Para dichos análisis se utilizó una solución de 40 gr. de metafosfato de sodio en 1l de agua destilada, conocido como Calgon. A cada muestra de las mezclas Run 3 (arcilla= 6 wt%) y Run 5 (arcilla= 10 wt%), se le agregó 1 ml de dicha solución, posteriormente, la muestra se agitó mecánicamente y se puso en un baño ultrasónico por 30 segundos para evitar la floculación de las arcillas.

Una vez realizados los análisis sedimentológicos se obtuvieron los parámetros estadísticos con el software DECOLOG 4.0.1.(Borselli y Sarocchi, 2012), que utiliza el método Montecarlo para obtener los parámetros sedimentológicos clásicos (Tabla IV.1; Folk y Ward, 1957) que son la media (Mz), la desviación estándar ( $\sigma$ ), la asimetría (Sk) y la curtosis (k) y permite individualizar y caracterizar de forma automática hasta tres de las modas que constituyen las mezclas aproximándolas con curvas log-normales.

Los parámetros estadísticos para la fracción gruesa (rango granulométrico -6 a -1 $\phi$ ) se obtuvieron hasta el intervalo de 63 minutos de revoluciones, después de este tiempo, debido a la conminución y al desgaste progresivo, el número de clases granulométricas disminuye a 2, por lo que los valores de dichos parámetros ya no son representativos.

Es importante señalar que no se pudieron normalizar y juntar los resultados de todas las fracciones para obtener una granulometría total (Sarocchi, 2006; Sarocchi et al., 2011), debido a que el análisis de cada fracción se obtuvo en una etapa diferente de los experimentos y no existió ninguna fracción que se trasladara completamente en los tres análisis para efectuar la normalización. Por lo tanto, los resultados de cada fracción (gruesos, arenas y fluido) se mostrarán por separado. Esto ofrece la ventaja de poder analizar cuales son las variaciones de y entre el material que se considera medio de transporte (matriz) y el material que es transportado (gruesos).

Las tablas con los resultados de la granulometría y de los parámetros estadísticos se muestran en el apéndice A.

Tabla IV.1. Interpretación de los parámetros estadísticos.

<i>Media (Mz)</i>	Determina el diámetro promedio en cada muestra y su valor está en unidades phi ( $\phi$ ).
<i>Desviación estándar (<math>\sigma</math>)</i>	Mide el grado de dispersión de valores en relación a la media y determina el grado de selección de las mezclas, mientras más alto es su valor, peor es el grado de selección. Adimensional.
<i>Asimetría (Sk)</i>	Mide la simetría de la curva, valores positivos indican una “cola” en el lado derecho del histograma o un exceso de material fino, valores negativos se originan cuando existe una “cola” en el lado izquierdo del histograma e implican un exceso de material grueso en las mezclas. Adimensional.
<i>Curtosis (k)</i>	Mide la relación entre el grado de selección en los extremos y la parte central de la curva. Si la porción central está mejor seleccionada que los extremos, los valores son más altos y la curva es leptocúrtica o “picuda”, si los extremos están mejor seleccionados que la parte central, su valor es menor y la curva es platicúrtica o “plana”. La curtosis, al igual que la desviación estándar, es indicativa del grado de selección, ya que entre más pobre sea la selección, más plana es la curva. Adimensional.

## IV.2. RESULTADOS

### IV.2.1. Fracción gruesa

La fracción gruesa comprende los diámetros de  $-6\phi$  (64 mm) a  $-1\phi$  (2 mm). Al inicio de los experimentos, todos los histogramas muestran la misma distribución granulométrica, con una ligera moda en  $-5\phi$ , un grado de selección muy pobre e histogramas con distribución muy platicúrtica (Figura IV.1a).

Las primeras mezclas en mostrar cambios en la granulometría son Run 3 (arcilla= 3 wt%) y Run 4 (limo= 21 wt%), las cuales contienen mayor cantidad de limo en la matriz al inicio de los experimentos. A los 3 minutos (100 revoluciones) de duración del experimento, en estas mezclas existe un aumento en el porcentaje de partículas con diámetro de  $-5\phi$ , evidenciado por un aumento en los valores de la asimetría (Figura IV.2). Esta distribución se mantiene relativamente constante en estas mezclas hasta los 31 minutos.

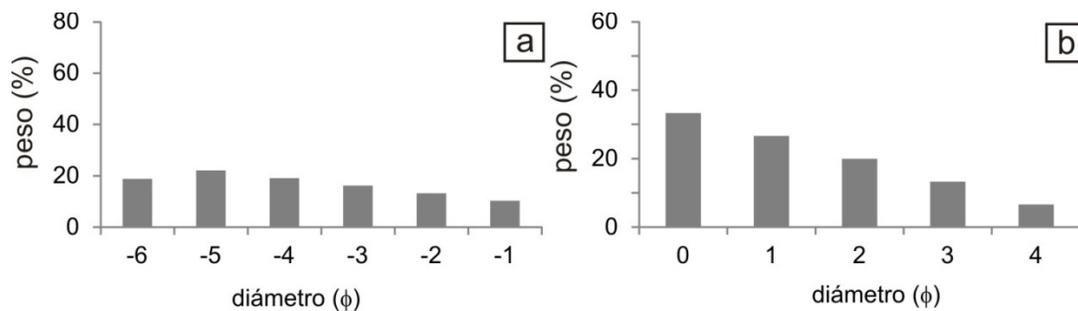


Figura IV.1. Histogramas granulométricos con las características iniciales (a) de la fracción gruesa y (b) de la fracción arenosa para las cuatro mezclas utilizadas en los experimentos.

Las mezclas Run 2 y Run 5, con menor cantidad de limo presente en la matriz al inicio, muestran los primeros cambios en la granulometría a los 7 minutos (234 revoluciones). En este punto existe un decremento en la fracción de  $-6\phi$  y se desarrolla una moda en  $-5/-4\phi$  (Figura IV.2; Apéndice A1). Además, en este punto la clase granulométrica de  $-6\phi$  disminuye a cero en el experimento Run 5.

Entre los 31 minutos (1038 revoluciones) y los 127 minutos (4254 revoluciones) se nota un decremento importante en las fracciones de  $-6$  y en el intervalo de  $-1$  a  $-3\phi$  para todas las mezclas. En contraparte, se incrementan de manera importante las fracciones de  $-5$  y  $-4\phi$ . Dichos cambios ocurren más rápidamente en Run 5, mezcla con mayor contenido de arcilla, seguida de Run 2, con solo 5% de material fino.

A nivel general, las cuatro mezclas utilizadas, al crecer el número de revoluciones, tienen la misma tendencia, un aumento en el contenido del material más grueso ( $-5$  y  $-4\phi$ ) y una fuerte disminución en el porcentaje de  $-6$  y el intervalo de  $-3$  a  $-1\phi$ , hacia el final de los experimentos. Sin embargo, la velocidad a la que ocurren dichos cambios es función del tipo de material fino presente al inicio de los experimentos. Mientras que en Run 3 y Run 4 ocurren de forma lenta pero constante, en Run 2 y Run 5 son más rápidos y a los 63 minutos ya tienen prácticamente la configuración final.

Cabe señalar que cuando se habla de aumento y/o disminución de alguna fracción se habla de variaciones relativas entre los diferentes componentes de la distribución debido a que se refiere a pesos porcentuales.

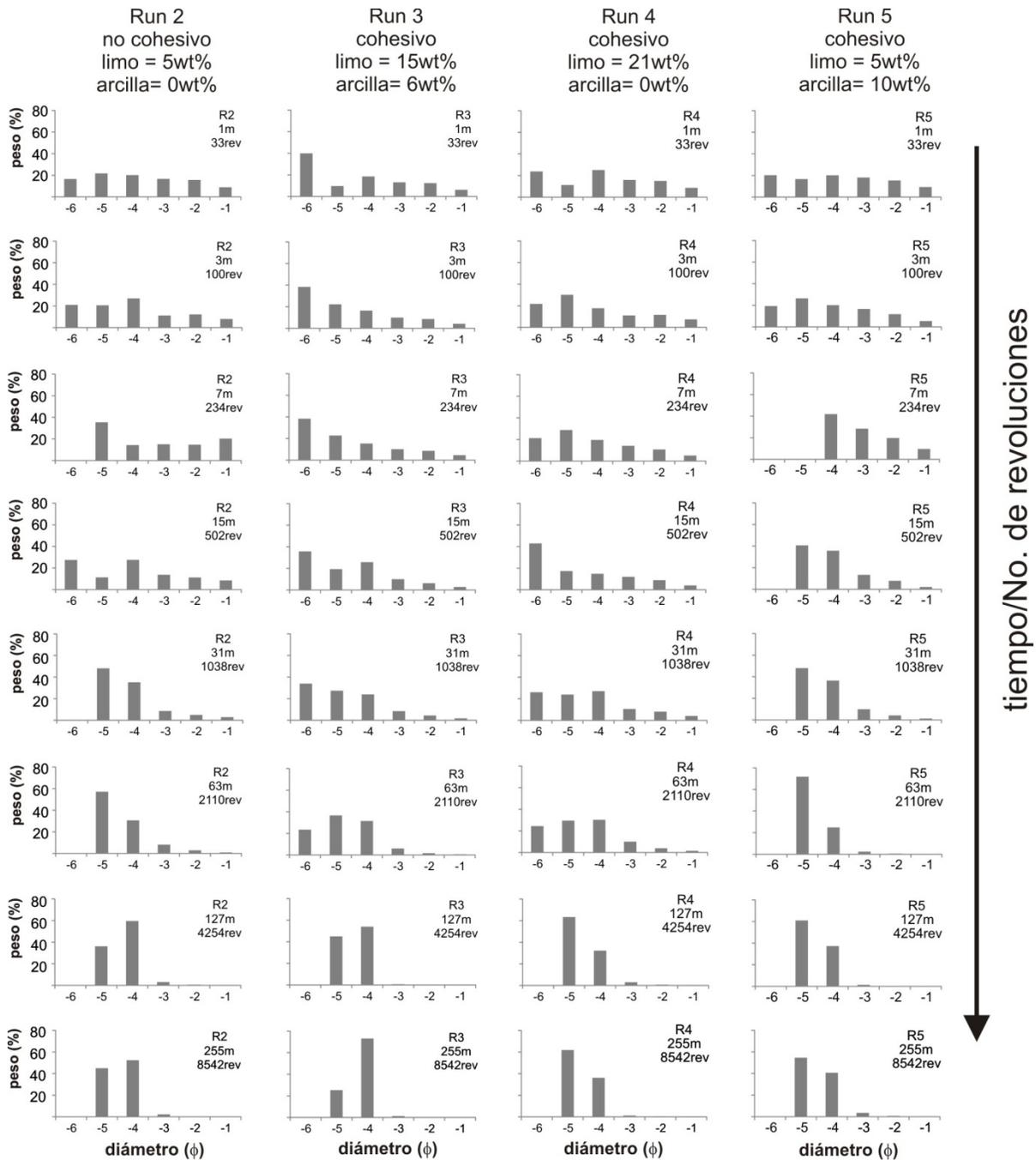
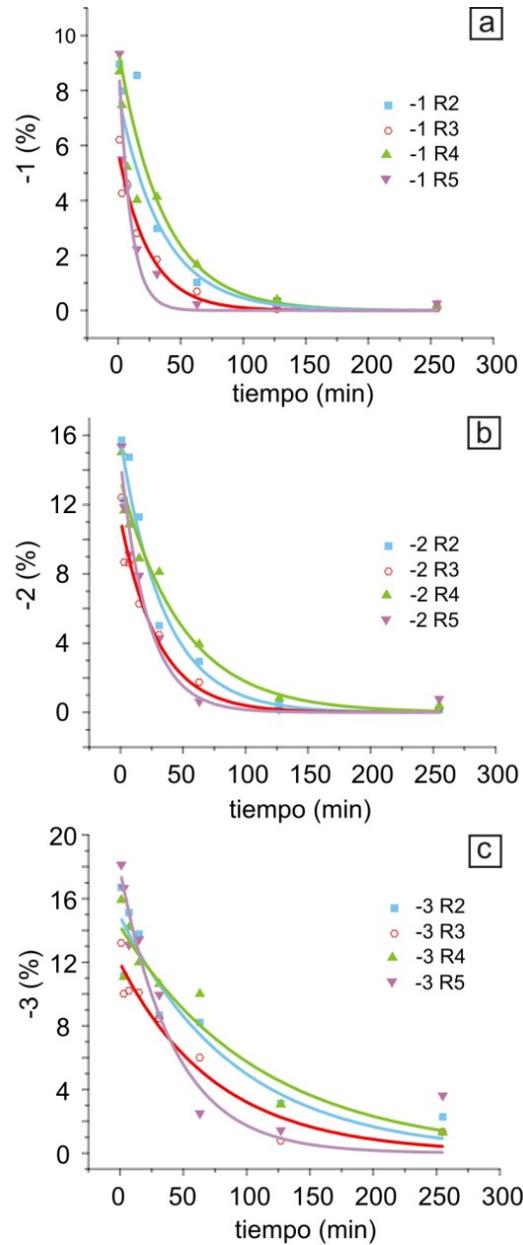


Figura IV.2. Variación de las características granulométricas de la fracción gruesa con el tiempo y número de revoluciones en la máquina de Los Ángeles para las diferentes mezclas ocupadas en los experimentos. En la parte superior se muestran los contenidos iniciales de limo y arcilla.

El decremento con el tiempo de las clases granulométricas de  $-1$  a  $-3\phi$ , es de tipo exponencial para todas las mezclas (Figura IV.3), sin embargo, es más rápido para el diámetro de  $-1\phi$  (Figura IV.3a) y más lento para  $-3\phi$  (Figura IV.3c). La tasa de disminución en estas partículas está relacionada con el

contenido de material fino presente al inicio de los experimentos, ya que Run 5, mezcla con mayor contenido de arcilla, es la que presenta una mayor pendiente, seguida de Run 3. Run 2 y Run 4, sin arcilla, son las mezclas que presentan una tasa menor.



<i>no cohesivo</i>	<i>cohesivo</i>	<i>cohesivo</i>	<i>cohesivo</i>
Run 2	Run 3	Run 4	Run 5
limo = 5wt%	limo = 15wt%	limo = 21wt%	limo = 5wt%
arcilla = 0wt%	arcilla = 6wt%	arcilla = 0wt%	arcilla = 10wt%

Figura IV.3. Disminución de las clases granulométricas con el tiempo de duración de los experimentos. a)  $-1\phi$ , b)  $-2\phi$  y c)  $-3\phi$ . En la parte inferior se muestran las cantidades iniciales de limo y arcilla.

En lo relacionado con los parámetros estadísticos, la media de la fracción gruesa ( $M_z$ ) muestra un ligero aumento en el valor del diámetro promedio con el tiempo para todas las mezclas (Figura IV.4; Apéndice A2). Por esta razón, este parámetro se utilizó para representar el avance del proceso (como análogo del tiempo) y el resto de los parámetros, desviación estándar ( $\sigma$ ), asimetría ( $Sk$ ) y curtosis ( $k$ ), se relacionaron con este valor (Figura IV.5). Se debe tomar en cuenta, que el parámetro de la media aumenta porque las partículas creadas a partir de las clases  $-3$  a  $-1\phi$ , que disminuyen con el tiempo, salen de este rango. Si se toma el espectro granulométrico completo ( $-6$  a  $9\phi$ ) el diámetro medio disminuiría. Sin embargo, este aspecto se toma en cuenta al describir los resultados de la fracción arenosa.

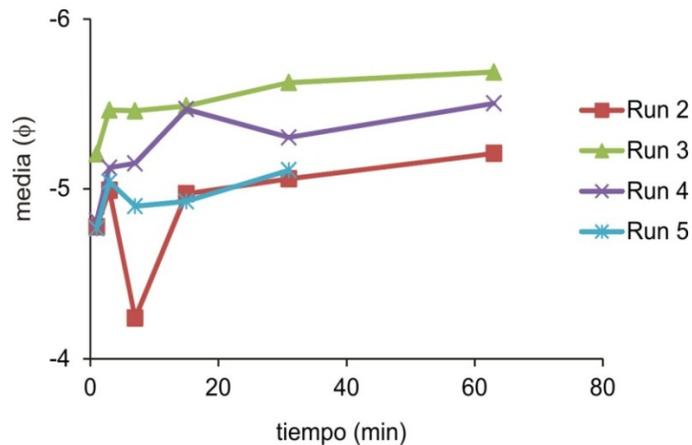


Figura IV.4. Variación de la media ( $M_z$ ) en la fracción gruesa con el tiempo.

Los parámetros estadísticos muestran dos nubes de datos (Figura IV.5a-c; Apéndice A2), la primera constituida por las mezclas Run 3 y Run 4, con limo en la mezcla inicial, la segunda constituida por las mezclas Run 2 y Run 5, sin limo en la mezcla inicial. Run 3 y Run 4 tienen variaciones progresivas en dichos valores con el tiempo. Por otro lado, en Run 5 y Run 2, el cambio es lento hasta los 3 y 15 minutos respectivamente. A partir de este punto, la tasa de cambio aumenta, y finalizan con valores muy diferentes a Run 3 y Run 4.

La figura IV.5a (Apéndice A2) muestra una disminución progresiva en el valor de la desviación estándar, que indica una mejora en el grado de selección para la fracción gruesa, y refleja la concentración del material en las fracciones de  $-4$  a  $-5\phi$  y la disminución de las clases de  $-1$  a  $-3\phi$ . Las mezclas Run 2 y Run 5 tienen un mayor decremento en el valor de la desviación estándar, que indica un mejor grado de selección, en comparación con Run 3 y Run 4. Sin embargo, las primeras tienen una menor variación en el valor de la media.

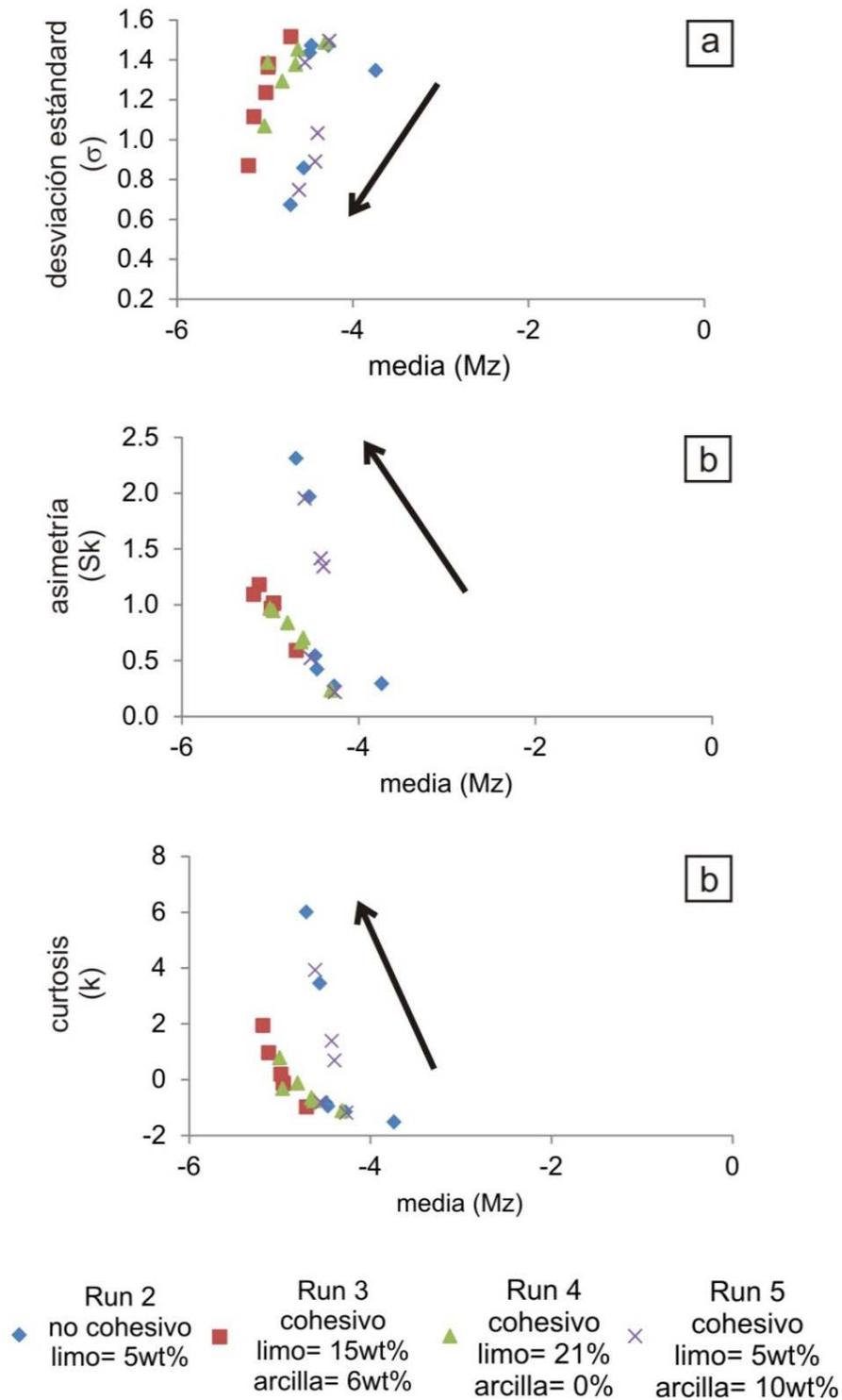


Figura IV.5. Variación de los parámetros estadísticos de la fracción gruesa en función de la media (Mz). La flecha indica la migración de los valores en función del tiempo.

Estas mismas poblaciones se reflejan en los parámetros de la asimetría y la curtosis (Figura IV.5b y c; Apéndice A2). La asimetría muestra un aumento también con el tiempo, lo que indica un exceso de material en la parte derecha del histograma, representada por las clases de  $-3$  a  $-1\phi$ . Esto se observa especialmente en la mezcla Run 2, seguida de Run 5, mezclas sin contenido de limo. La curtosis muestra el mismo fenómeno. Al inicio de los experimentos las gráficas son platicúrticas y evolucionan a leptocúrticas con el tiempo.

En general, los parámetros estadísticos muestran un aumento de la media y una mejora en la desviación estándar, debido a la fuerte disminución en las clases granulométricas de  $-6$ ,  $-3$ ,  $-2$  y  $-1$ . Además, las curvas se vuelven más asimétricas y platicúrticas.

#### IV.2.1. Fracción arenosa

La fracción arenosa incluye los diámetros de  $0$  a  $4\phi$ . Los histogramas granulométricos muestran, al inicio de los experimentos, una clara moda en la fracción de  $0\phi$  (Figura IV.1b). El porcentaje de las demás clases granulométricas disminuye progresivamente hacia las fracciones de menor diámetro. Esto se refleja en un valor positivo de la asimetría de  $0.48$ , que indica un histograma con una cola alargada a la derecha, en las fracciones de  $3$  y  $4\phi$ .

La distribución granulométrica inicial cambia a los 15 minutos (Figura IV.6; Apéndice A3) para las mezclas Run 2, Run 4 y Run 5, en las cuales disminuye la clase de  $0\phi$  y un aumenta el diámetro de  $1\phi$ . La última mezcla en mostrar cambios en este aspecto es Run 3, a los 31 minutos.

Entre los 31 y 63 minutos de duración de los experimentos todas las mezclas tienen una distribución cercana a una curva normal, ocasionada por la disminución en  $0$  y  $1\phi$  y el aumento en las clases  $2$  a  $4\phi$ , lo que se confirma con valores de la asimetría cercanos a  $0$ . Estas tendencias ocasionan que, hacia el final de los experimentos, entre los 127 y 255 minutos, disminuya la desviación estándar, lo que indica una mejora en el grado de selección. La asimetría cambia a valores negativos, reflejo de un exceso de material en la parte izquierda del histograma, representado por las clases granulométricas  $0$  y  $1\phi$ .

La disminución en las clases granulométricas  $0$  y  $1\phi$  sigue un decremento de tipo exponencial con el tiempo (Figura IV.7; Apéndice A3), al igual que las clases  $-1$  a  $-3$  de la fracción gruesa. Las mezclas que muestran un mayor decremento en dichas fracciones son las que contienen arcilla, es decir Run 3 y Run 5, especialmente en la clase granulométrica  $0\phi$  (Figura IV.7b y d).

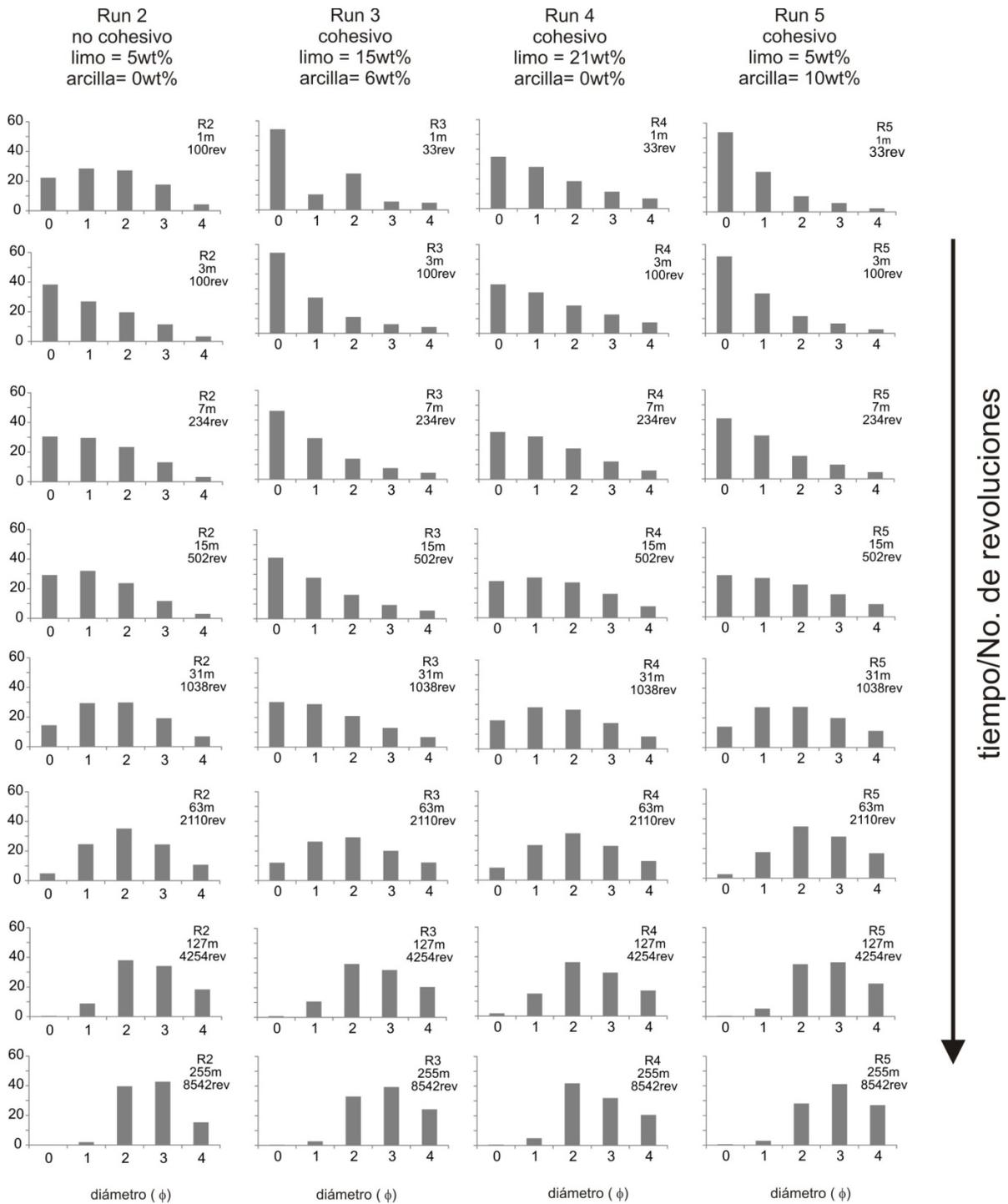


Figura IV.6. Histogramas granulométricos de la fracción arenosa que muestran las variaciones en la granulometría con el tiempo y/o número de revoluciones en la máquina de Los Ángeles.

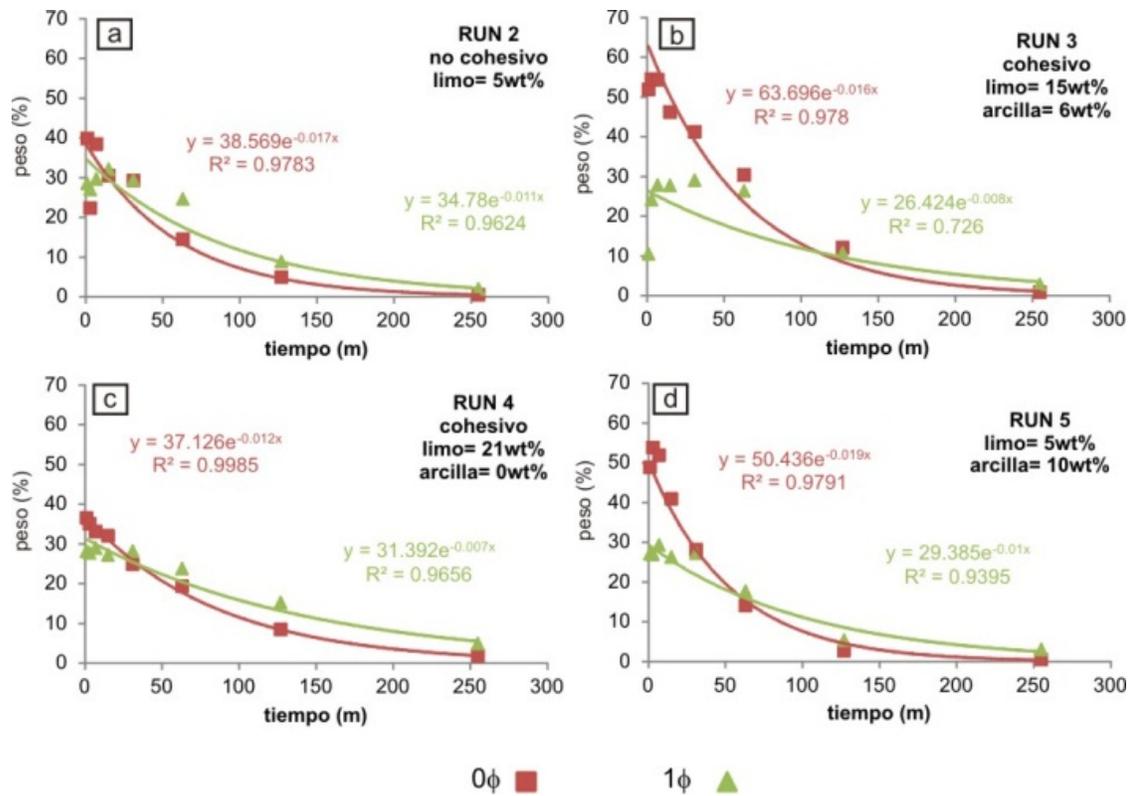


Figura IV.7. Disminución exponencial de clases granulométricas 0 y 1φ con el tiempo.

El aumento observado en las clases 2, 3 y 4φ, mencionado anteriormente, sigue una ley de potencia (Figura IV.8). En particular el diámetro 3φ es la que muestra un incremento mayor. Cabe señalar que Run 2, con menor contenido de material fino, es la que tiene menor nivel de correlación (Figura IV.8a), así como el diámetro 2φ de Run 3 (Figura IV.8b). Por el contrario la mezcla Run 5, con mayor contenido de arcilla, es la que muestra mejores niveles de correlación (Figura IV.8d).

Los parámetros estadísticos de la fracción arenosa (Apéndice A4) indican una disminución en el diámetro medio (aumento en el valor de Mz) desde el inicio hasta el final de los experimentos (Figura IV.9). Las gráficas de los parámetros estadísticos contra la media (Figura IV.10), muestran que la mezcla con menor dispersión en los parámetros estadísticos es la mezcla Run 2, con menor contenido de material fino en la matriz, y las que muestran un mayor rango en los valores de la desviación estándar, la asimetría y la curtosis son las que tienen arcilla en su composición, especialmente Run 5, la de mayor contenido de arcilla.

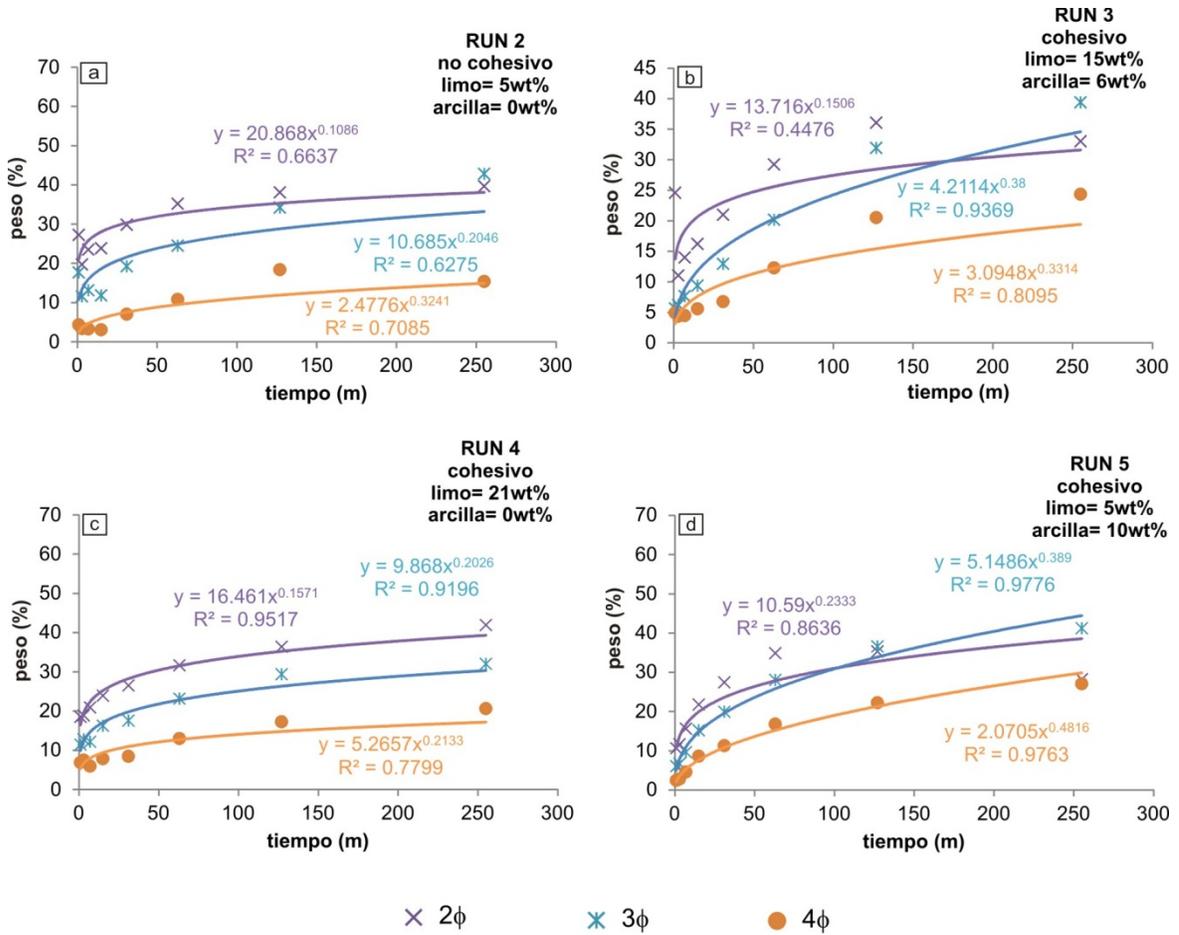


Figura IV.8. Aumento de las fracciones granulométricas 2, 3 y 4 $\phi$ , la cual sigue una ley de potencia.

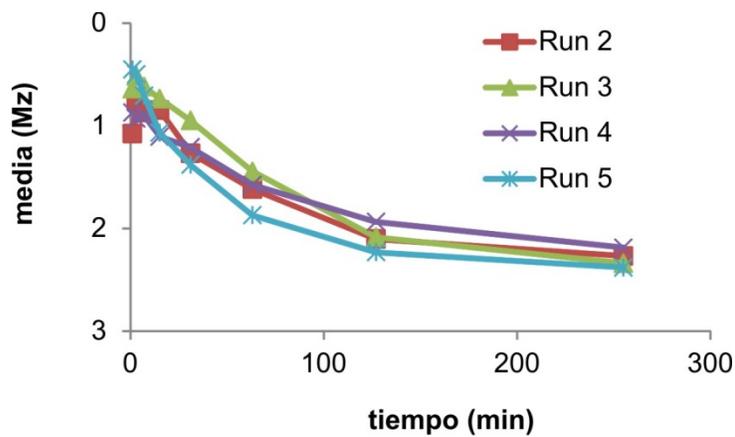


Figura IV.9. Variación de la media (Mz) en la fracción arenosa con el tiempo.

Los valores de la asimetría indican que la fracción arenosa muestra una disminución de este valor. Al inicio, los histogramas presentan valores positivos, por la presencia de material en la parte derecha del histograma, en las fracciones de 3-4 $\phi$ . Con el tiempo evoluciona a una distribución normal entre los 31 y 63 minutos. Posteriormente, los valores de la asimetría se vuelven ligeramente negativos, reflejo de un exceso de material grueso, localizado en las clases 0 y 1 $\phi$ . El cambio de polaridad en este parámetro es de gran importancia ya que refleja las fuertes variaciones en la granulometría de la fracción arenosa.

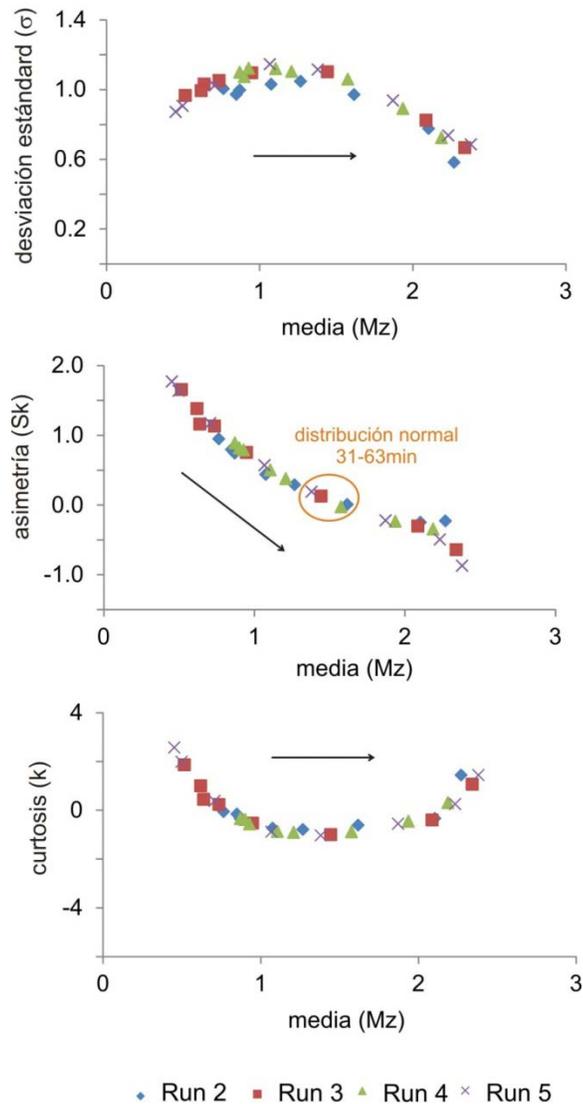


Figura IV.10. Variación de la desviación estándar, asimetría y curtosis en función de la media para la fracción arenosa. Nótese el cambio de polaridad en los valores de la asimetría. La flecha indica la dirección de migración de los valores con el desarrollo del experimento.

*IV.2.2. Fluido*

El fluido abarca un rango granulométrico de 3 a 9 $\phi$ , los clastos del tamaño de la arena que involucra son únicamente los que permanecieron en suspensión al momento de tomar la muestra, después de cada intervalo en la máquina de Los Ángeles.

Los histogramas granulométricos muestran grandes diferencias en todas las mezclas (Figura IV.11; Apéndice A5).

La mezcla Run 2 muestra un rango granulométrico que va de 3 a 8 $\phi$  (Figura IV.11). Los histogramas de las granulometrías muestran una clara moda en 5 $\phi$  al inicio del experimento que disminuye con el tiempo y aumenta la fracción de 4 $\phi$ . Las demás clases granulométricas tienen poca variación.

Los histogramas de Run 3 (Figura IV.11) presentan una moda en 5 $\phi$  que migra a la clase de 4 $\phi$  y va acompañada por el incremento de la fracción 3 $\phi$ . El limo y arcilla se mantienen relativamente constantes durante el transcurso de los experimentos.

Run 4 (Figura IV.11) también exhibe una moda en 5 $\phi$ , la cual disminuye con el tiempo. A partir de los 7 minutos, aumentan de forma significativa las fracciones de 3 $\phi$  y 4 $\phi$ , constituidas por arena fina a muy fina y a los 32 minutos también se incrementa la fracción de 2 $\phi$ .

Los histogramas de Run 5 (Figura IV.11) tienen una distribución bimodal, con modas en 5 $\phi$  y en 9 $\phi$ . Hacia los 31 minutos incrementa la fracción de 4 $\phi$  hasta el final de los experimentos. El resto de las clases granulométricas sufre pocos cambios.

Los parámetros estadísticos (Figura IV.12; Apéndice A6), se graficaron contra el valor de la media, al igual que para la fracción gruesa y arenosa. Las mezclas Run 2, Run 3 y Run 5 siguen un patrón relacionado con el contenido de arcilla, en contraste, Run 4 no muestra una tendencia definida. En la figura IV.12a se observa que la mezcla Run 2 tiene poca variación en los valores de la media y la desviación estándar, e indican un mejor grado de selección en comparación con las demás mezclas. Los valores más altos de la desviación estándar ocurren en Run 3 y Run 5, mezclas con arcilla en la matriz.

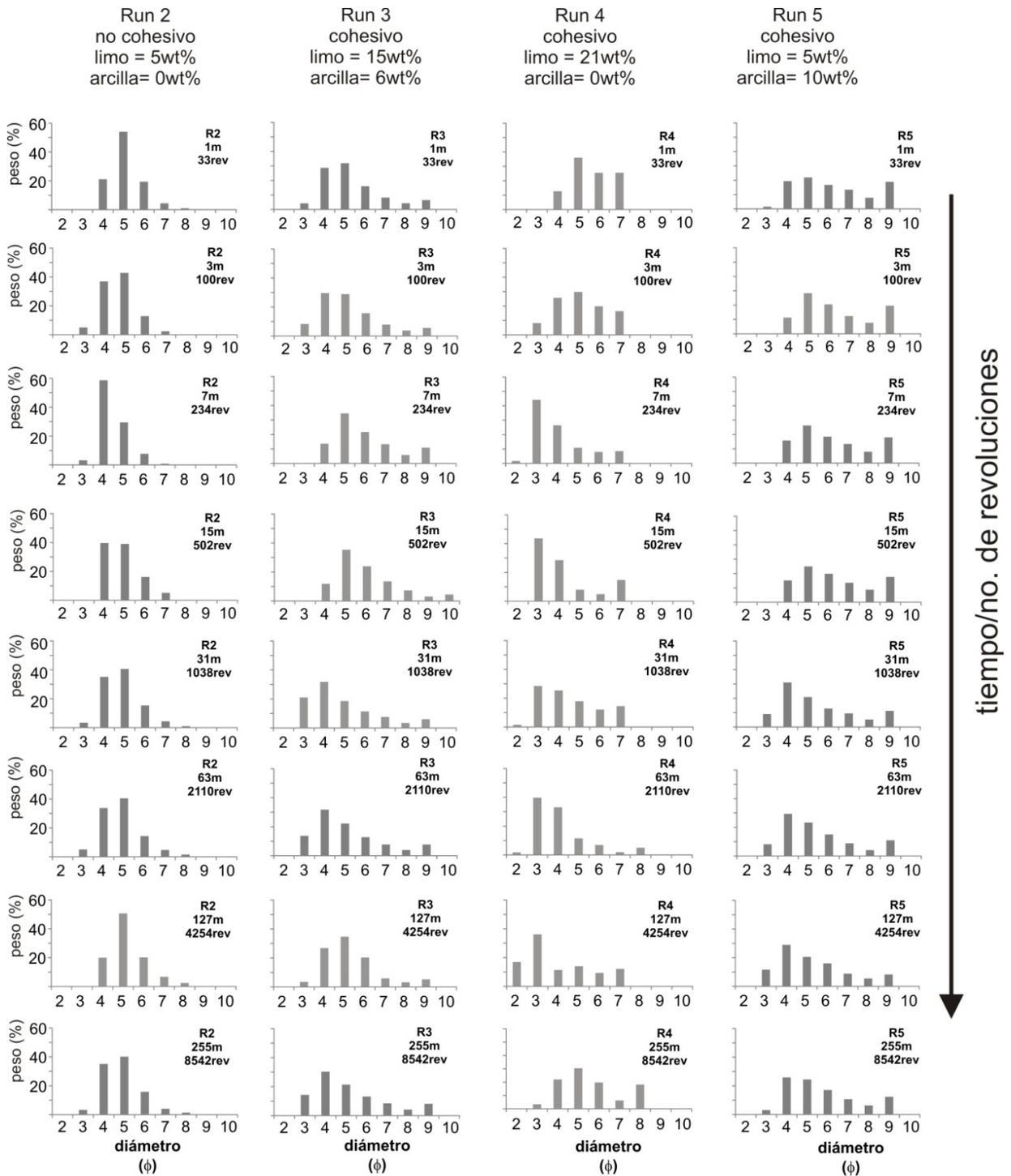


Figura IV.11. Histogramas granulométricos del fluido y su variación con el tiempo.

La asimetría (Figura IV.12b) es mayor en las mezclas sin arcilla (Run 2 y Run 4). La mezcla con menores cambios en este parámetro es Run 3. Run 5 muestra un decremento relacionado con el aumento en el valor de la media. Excluyendo a la mezcla Run 4, la asimetría disminuye en función del contenido de arcilla.

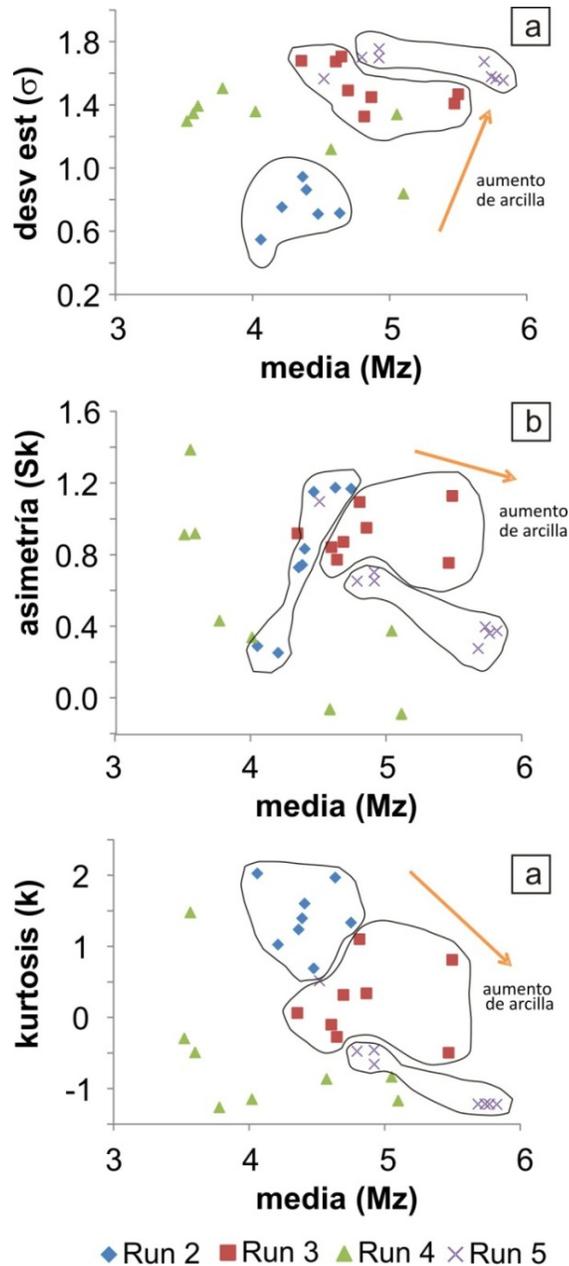


Figura IV.12. Variación de los parámetros estadísticos del fluido en función de la media. La flecha indica el aumento en el contenido de arcilla, sin incluir a Run 4, que no mostró tendencia alguna.

Los valores de la curtosis (Figura IV.12c) son más altos (más leptocúrticos) en la mezcla Run 2, con menor cantidad de limo y arcilla presente en la matriz. Por el contrario, en la mezcla Run 4, con mayor cantidad de limo, son más bajos (curvas más platicúrticas) y con menor variación durante el experimento. Run 3 es la mezcla que presenta un rango más amplio en este parámetro y Run 5 muestra un decremento al aumentar el valor de la media. De la misma forma que la asimetría, sin tomar en cuenta la mezcla Run 4, existe una disminución en los valores de la asimetría en función del contenido de arcilla.

### IV.3. COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES CON DEPÓSITOS REALES

En los resultados de la granulometría se observa una disminución importante en el diámetro de  $-6\phi$ , y en el intervalo de  $-3$  a  $1\phi$ , lo que involucra sedimentos del tamaño de la grava y de la arena. Este decremento, localizado en la parte central del histograma, acompañado por el incremento en el porcentaje de las clases granulométricas  $-5/-4\phi$ , en la parte gruesa, y  $2$  a  $4\phi$ , en la parte arenosa, apunta a una distribución bimodal, de haberse podido integrar el rango granulométrico completo. Dicha bimodalidad en la granulometría, se ha reportado ampliamente en la descripción de flujos de escombros con diferentes orígenes, ya sea por lluvias extraordinarias (Saucedo et al., 2008); la removilización de material piroclástico (Scott, 1988; Phillips y Davies, 1991), o por la transformación de avalanchas de escombros en flujos de escombros cohesivos (Vallance y Scott, 1997; Pulgarín, 2000; Capra et al., 2004), y ha sido interpretada como el resultado de la incorporación progresiva de grava y arena durante el transporte y/o por el depósito selectivo de material grueso (Vallance y Scott, 1997).

La figura IV.13 presenta tres ejemplos de bimodalidad en depósitos de flujos de escombros: El depósito Atenquique (Figura IV.13a; Saucedo et al., 2008), el depósito South Fork (Figura IV.13b; Scott, 1988) y el depósito Osceola Mudflow (Figura IV.13c; Vallance y Scott, 1997). El depósito Atenquique exhibe la bimodalidad en una facies proximal, a los 13.5 km; mientras que los depósitos South Fork y Osceola Mudflow, en una facies distal, a los 35.6 km y 100 km respectivamente.

Esta característica se presenta independientemente de la génesis de estos fenómenos y del contenido de arcilla presente en los depósitos. El depósito Atenquique fue originado por lluvias intensas y representa un flujo de escombros no cohesivo. Los depósitos South Fork y Osceola se originaron a partir de la transformación de una avalancha de escombros y tienen un contenido de arcilla que los clasifica como flujos de escombros cohesivos. Ambos tipos desarrollan una distribución granulométrica bimodal, lo cual es concordante con los resultados obtenidos en este trabajo.

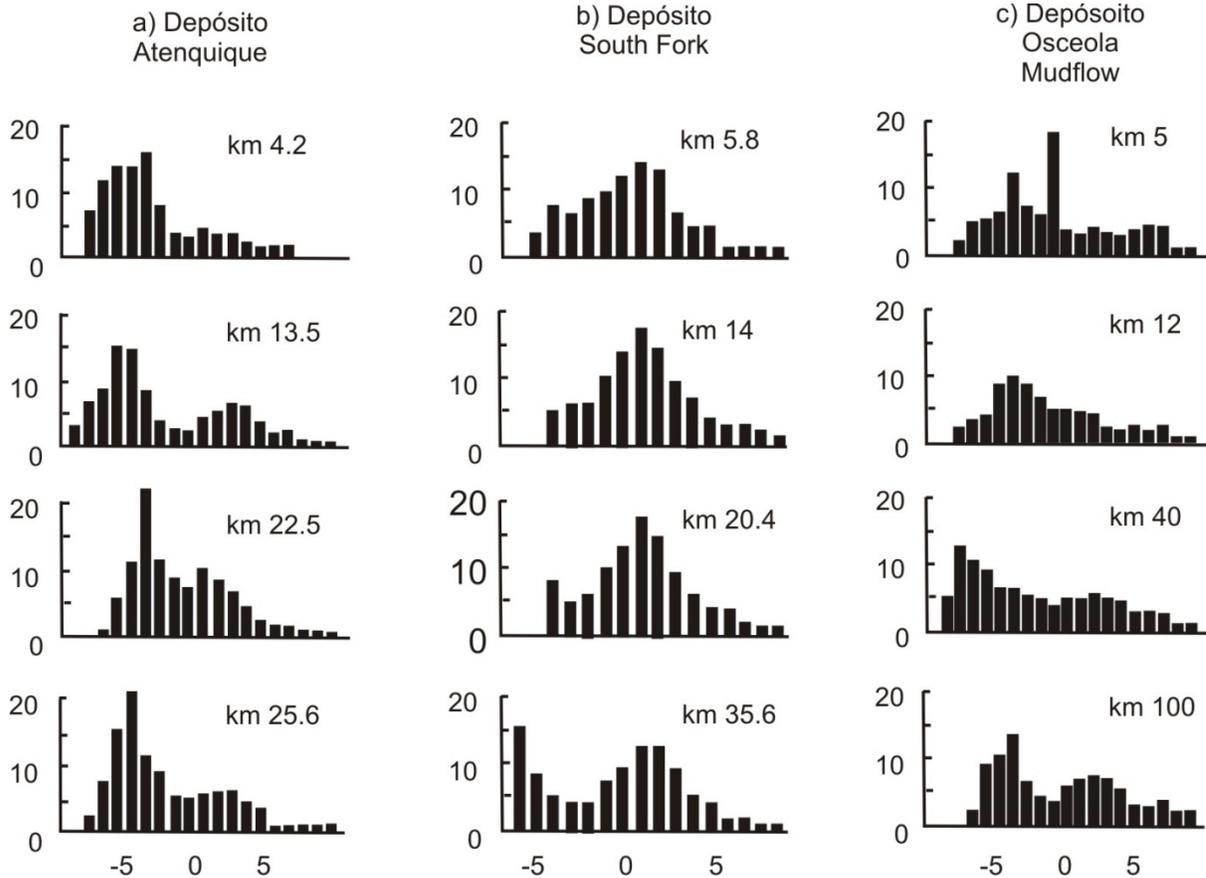


Figura IV.13. Ejemplos de distribuciones bimodales en depósitos de flujos de escombros. a) Depósito Atenquique (Saucedo et al., 2008); b) Depósito South Fork (Scott, 1988); Depósito Osceola Mudflow (Vallance y Scott, 1997).

#### IV.4. DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis granulométricos indican que la granulometría presenta cambios muy significativos durante los experimentos en las fracciones gruesa y arenosa y muy pocos cambios en el fluido. En las poblaciones formadas al graficar los parámetros estadísticos contra la media se observa que en la fracción gruesa, mayor a  $0\phi$  ( $>2$  mm), existe una relación en las variaciones granulométricas con el contenido o ausencia de limo al inicio de los experimentos, mientras que en la fracción arenosa y en el fluido, dependen del contenido de arcilla. En las arenas, los mayores cambios ocurren en presencia de arcilla, especialmente en Run 5. En el fluido, existe una migración en los parámetros estadísticos también relacionado al contenido de arcilla.

Todas las mezclas muestran un decremento de tipo exponencial en la clase de  $-6\phi$  y en el intervalo de  $-3$  a  $1\phi$ . Este decremento se produce por la conminución y fragmentación de dichas clases granulométricas debido a la interacción entre clastos (Figura IV.14). El proceso anterior, produce clastos del tamaño de la arena en las fracciones granulométricas de  $2$  y  $3\phi$  y de forma secundaria en  $4\phi$ , y dicho aumento sigue una ley de potencia. Estos resultados, de forma normalizada, producirían histogramas bimodales con modas en la fracción gruesa ( $-5/-4\phi$ ) y en la fracción arenosa ( $2/3\phi$ ), lo cual es concordante con los depósitos reales de flujos de escombros y es una de las características texturales más distintivas que dan origen a la descripción de “clastos soportados por matriz”. El hecho de que este fenómeno se pueda explicar por la interacción entre clastos es de gran importancia, ya que anteriormente este fenómeno se explicaba únicamente por la depositación selectiva de material grueso y/o por la incorporación de material arenoso del lecho del cauce (Vallance y Scott, 1997), sin mencionar una posible génesis relacionada con la interacción entre partículas.

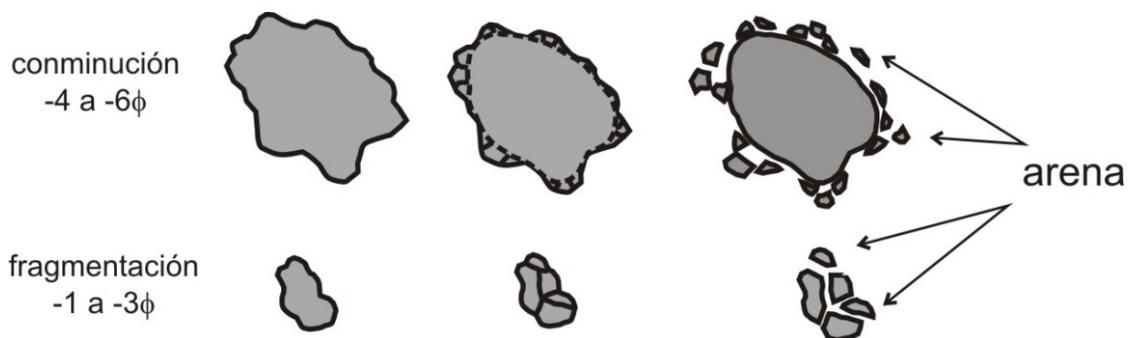


Figura IV.14. Efecto de conminución en las clases granulométricas de  $-6$  a  $-4\phi$  y de fragmentación en las clases de  $-3$  a  $-1\phi$ . Ambos fenómenos producen la disminución de las clases granulométricas de  $-3$  a  $1\phi$  y el aumento exponencial de la fracción arenosa.

El decremento exponencial en estas fracciones indica que del inicio y hasta los 63 minutos, la tasa de abrasión es mucho más rápida y a partir de este punto el porcentaje de estas fracciones se mantiene constante, debido a que ya no existe material disponible para la fragmentación. Además, la fragmentación ocurre más rápidamente en las mezclas con arcilla.

En lo relacionado con los parámetros estadísticos, las diferentes poblaciones indican una clara dependencia en la evolución granulométrica del tipo de material fino (limo y arcilla) presente en la matriz al inicio de los experimentos.

El proceso de conminución se ha descrito en la literatura en flujos piroclásticos y avalanchas de escombros (Imre et al., 2010), así como para grandes deslizamientos (Davies y McSaveney, 2008). Sin embargo, en el caso de los flujos de escombros las referencias son escasas (Scott, 1988). Este hecho puede ser de gran importancia, ya que la fragmentación se ha interpretado en los últimos años como uno de los mecanismos que originan la movilidad de las avalanchas de escombros (Davies y McSaveney, 2009). Estos autores también sugieren que este mecanismo podría ocurrir en flujos saturados.

Davies y McSaveney (2009) sostienen que en un flujo granular los esfuerzos intergranulares se concentran en una red formada por varias partículas orientadas en dirección al esfuerzo de cizalla (Figura IV.15a) y las partículas localizadas alrededor forman otra red de ensambles más débiles. Las redes sometidas a un esfuerzo mayor se denominan “cadenas de fuerza” y los esfuerzos entre ellas se transmiten por cizalla. Estas cadenas implican que ocasionalmente los contactos entre partículas son sometidas a esfuerzos y tasas de deformación mucho mayores del promedio. La fragmentación ocurre en estas cadenas de fuerza cuando alguna de las partículas que las constituyen es sometida a un esfuerzo igual a su esfuerzo de ruptura (Figura IV.15b). La fractura generada se propaga y se libera energía cinética conforme la fractura progresa a través de la partícula. Además, como ocurre en los fluidos, las partículas que se fragmentan no son capaces de resistir el esfuerzo de cizalla y provocan un efecto similar a la presión de poro.

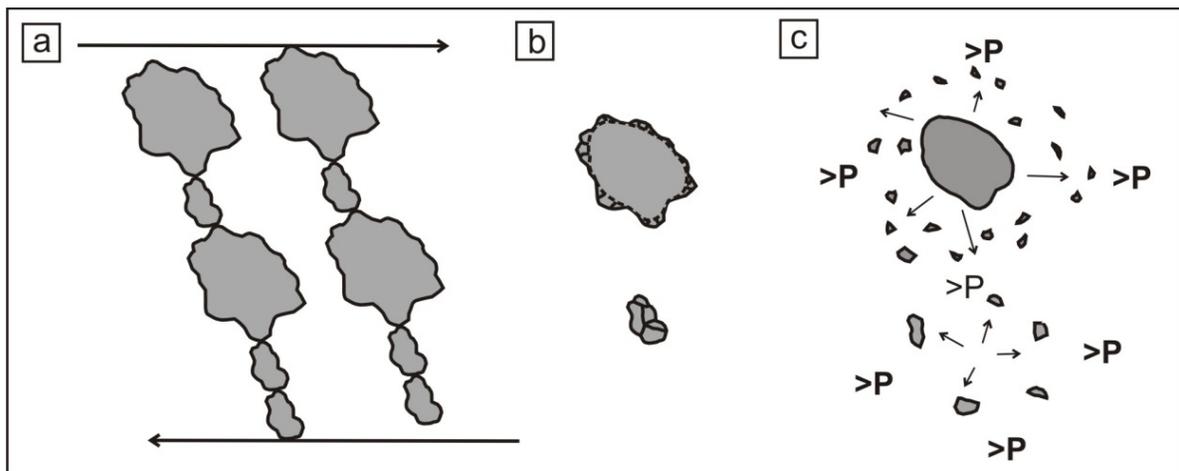


Figura IV.15. Formación de cadenas de fuerza en flujos granulares. a) Orientación de las cadenas en dirección del esfuerzo de cizalla. b) Formación de fracturas en las partículas. c) Propagación de los clastos formados en dirección radial que forma zonas de alta presión (>P) en la zona circundante (Modificado de Davies y Mc Saveney, 2009).

En el caso de flujos saturados, como los flujos de escombros, cuando las partículas se rompen, se alejan de su centro de masa en dirección radial y aumenta la presión de poro en la dirección de propagación, lo que también realza la movilidad (Figura IV.15c). El concepto de zonas con exceso de presión de poro como mecanismo de movilidad y de soporte de partículas había sido propuesto previamente por Pierson (1981). Sin embargo, dicho mecanismo no había sido atribuido a la fragmentación.

## V. ANÁLISIS MORFOLÓGICO

### V.1. INTRODUCCIÓN

La morfología de las partículas presentes en un depósito es importante, ya que es el resultado de su origen y de los diferentes procesos geológicos a los cuales éstas han sido sometidas. Algunos aspectos que se pueden estudiar por medio de esta herramienta, son los mecanismos de transporte y depositación, así como los procesos de interacción entre partículas (Krumbein, 1941; Dellino y La Volpe, 1996). Estos últimos, son determinantes en el comportamiento de los flujos de escombros, ya que afectan su movilidad y la disipación de energía (Major y Pierson, 1992; Iverson, 1997).

Existen numerosos ejemplos de estudios morfológicos utilizados para deducir la historia de transporte, sin embargo, dichos trabajos sólo usan un número limitado de clases granulométricas o estudian diferentes clases de forma conjunta (Diepenbroek et al., 1992; Dellino y Liotino, 2002; Manga et al., 2011). Además, estudios detallados acerca de la morfología de las partículas dentro de los depósitos de flujos de escombros son escasos en la literatura (Scott, 1988; Pierson et al., 1990; Sarocchi, 2006; Dumaisnil et al., 2010; Sarocchi et al., 2011).

En el presente capítulo se utiliza el análisis de Fourier como una herramienta para el análisis cuantitativo de las variaciones morfológicas de las partículas en dos dimensiones (mayores a  $-1\phi$ ), con el objetivo de estudiar los procesos de interacción clasto-clasto y clasto-matriz dentro de los flujos de escombros.

### V.2. TERMINOLOGÍA

En este trabajo se utiliza la terminología utilizada por Barret (1980). Morfología es un término aplicado para describir la expresión externa de una partícula e incluye la forma, la redondez y la textura superficial. La forma describe la relación entre los tres ejes de la partícula. La redondez está relacionada con la curvatura de las esquinas de un perfil y la textura superficial describe la rugosidad a pequeña escala, y es una propiedad de la partícula entre las esquinas (Figura V.1).

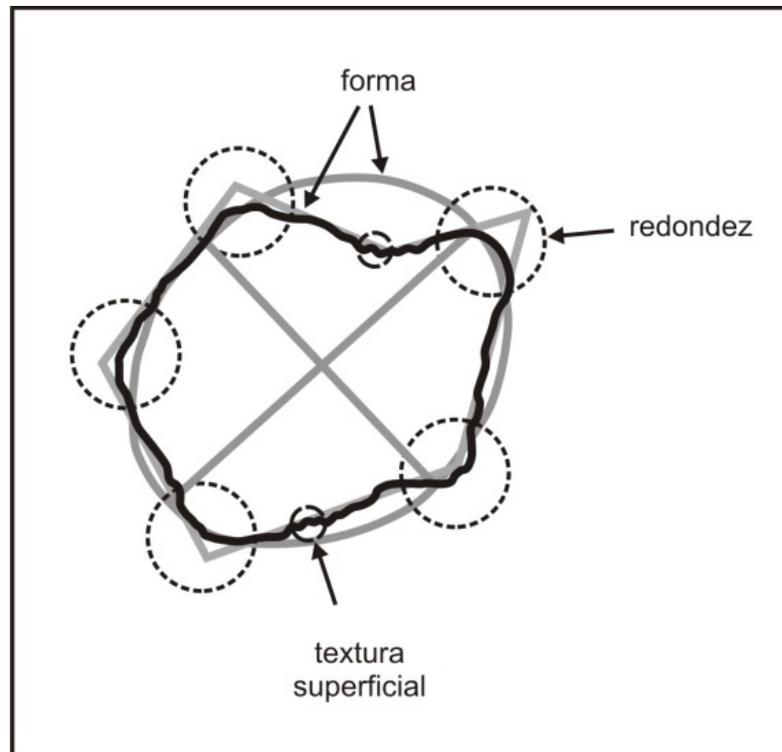


Figura V.1. Aspectos utilizados para describir la morfología de las partículas (Barret, 1980).

### V.3. ANÁLISIS BIDIMENSIONAL DE LA FORMA

#### V.3.1. Análisis de Fourier

El análisis de Fourier consiste en obtener las coordenadas de una línea cerrada, de forma irregular, en forma polar, como si se tratara de una onda periódica. Para ello, se necesita conocer el ángulo de orientación del radio o ángulo del rayo vector " $\theta_i$ " y la distancia del centro al punto de la periferia o longitud del rayo vector " $r_i$ " (Figura V.2).

El análisis de la forma por este método se comenzó a utilizar por Schwarcz y Shane (1969) y por Ehrlich y Weinberg (1970), al descomponer el perímetro de una partícula en una onda periódica, conocida como firma geométrica de la onda o GSW por sus siglas en inglés (Geometric Signature Waveform; Figura V.2) y cuantifica de manera precisa la forma de las partículas a diferentes escalas.

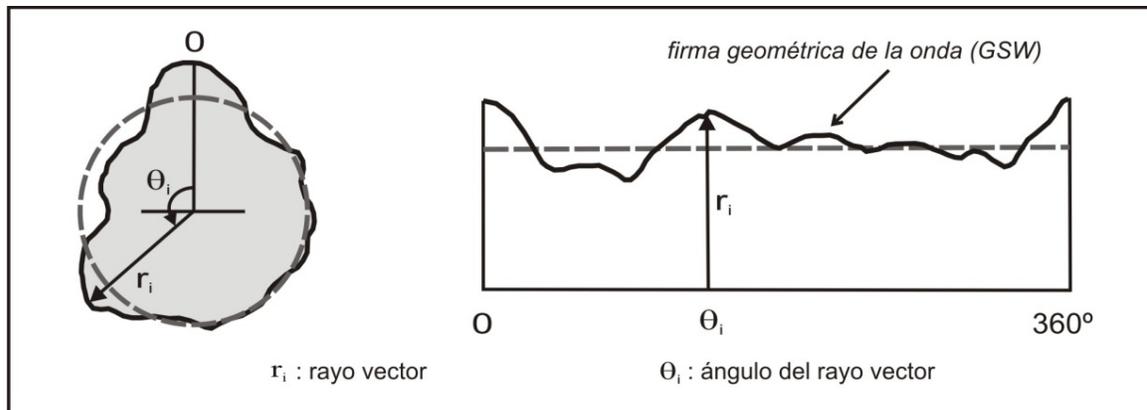


Figura V.2. Descomposición del perímetro de una partícula en coordenadas polares (Davis, 1986).

Para determinar la forma de la partícula se hacen aproximaciones sucesivas, definidas como armónicas, las cuales incrementan el detalle de la forma hasta que se ajusta a la forma digitalizada. La primera armónica produce un círculo, cuyo diámetro es igual al diámetro medio de la periferia original; la segunda, cambia la reconstrucción a un elipsoide; la tercera, añade una componente triangular; la cuarta una componente cuadrática, y así sucesivamente.

La proporción de la variación de las diferentes armónicas produce el espectro de potencia o periodograma y contemporáneamente a la transformación de la firma geométrica se modifica el espectro de potencia (Kaye, 1999).

Las amplitudes obtenidas de las diferentes armónicas se relacionan con una componente de forma. Las armónicas de orden bajo se relacionan con la forma general de la partícula y las de orden más alto, con la redondez y la textura superficial, es decir, con las componentes de la forma que sólo son apreciables a escala más pequeña.

Los problemas principales de este método radican en: 1) Definir el centro del sistema de coordenadas, conocido como baricentro, debido a que las partículas no tienen puntos distintivos que puedan servir como referencia, y 2) que no se puede utilizar, si la forma es muy convolucionada, ya que no puede violar el principio de biyectividad, es decir, el rayo vector sólo debe intersectarse con el perímetro en un sólo punto.

Para resolver el problema en la determinación del baricentro, se utilizan programas de análisis de imágenes para separar y caracterizar el perímetro y, posteriormente, se calcula el baricentro a partir del estudio del primer momento de inercia, donde el eje de referencia se asume como el rayo más largo.

En el presente trabajo se utilizaron tres coeficientes morfológicos,  $MC_2$ ,  $MC_{3-8}$ ,  $MC_{30-34}$ , relacionados con las características de las partículas a diferente escala, desarrollados por Sarocchi (2006, 2007) y

Sarocchi et al. (2011), y son obtenidos a partir de la descomposición de la firma geométrica de la onda en 64 armónicas. El subíndice en cada coeficiente indica el número de armónica o números de armónicas utilizadas.  $MC_2$  utiliza el promedio del valor de la amplitud de la armónica número 2;  $MC_{3-8}$ , el promedio de la amplitud de las armónicas 3 a 8 para cada una de las partículas analizadas y así sucesivamente.

El parámetro  $MC_2$  está relacionado con la elipticidad, mientras más alto sea este valor, mayor es el alargamiento de las partículas y valores menores indican una tendencia a la circularidad. El segundo parámetro  $MC_{3-8}$ , proporciona información acerca de las irregularidades básicas a macro-escala, como la redondez, donde valores altos sugieren perfiles más irregulares y esquinas más angulosas. El tercer parámetro  $MC_{30-34}$ , mide las irregularidades finas, como la textura superficial, valores altos indican mayor cantidad de irregularidades y valores bajos indican superficies más suaves y lisas.

#### V.4. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se realizó el análisis morfológico de las partículas en el rango de  $-6$  (64 mm) a  $-1\phi$  (2 mm). En cada uno de los intervalos de tiempo definidos para realizar el muestreo descrito en el capítulo III, se recolectó una muestra, la cual se tamizó por vía húmeda a intervalos de  $1\phi$ . Una vez realizado el tamizado, las partículas se secaron en una estufa eléctrica y se seleccionaron 100 partículas al azar de cada clase granulométrica. En el caso de que existieran menos partículas en alguna fracción se analizó la fracción completa. Estas partículas fueron escaneadas en formato TIFF, con una resolución de 600 dpi.

##### V.4.1. Preprocesado de las imágenes

El preprocesado de las imágenes se realizó por medio del software Adobe Photoshop CS3, utilizado ampliamente para el tratamiento de imágenes y consistió de las siguientes fases (Figura V.3):

1. Transformación de la imagen a blanco y negro.
2. Elaboración de una máscara con los bordes de las partículas.
3. Eliminación del ruido del fondo de la imagen.
4. Realce de contraste de las partículas.
5. Creación de imagen binaria.

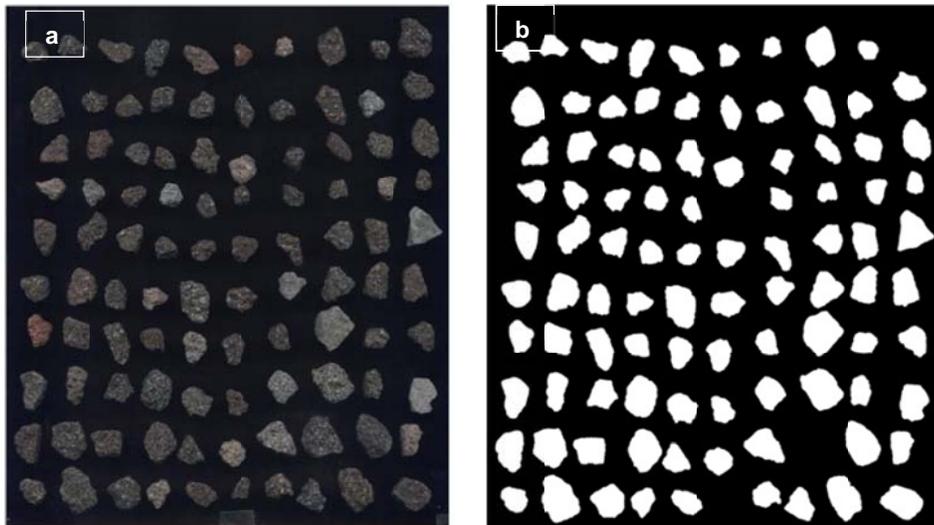


Figura V.3. a) Imagen de las partículas escaneadas después del tamizado y secado. b) Imagen binaria obtenida durante el preprocesado.

V.4.2. *Procesado*

Las imágenes binarias se exportaron en formato JPG y procesaron por medio del software Image Pro Plus, para obtener los perímetros de las partículas. Posteriormente, mediante el módulo morfológico de este software, se obtuvo el perímetro de las partículas en coordenadas polares, que corresponden a la firma geométrica de la onda de la partícula, la cual se descompuso en 64 armónicas, a partir de las cuales se obtuvieron los parámetros morfológicos  $MC_2$ ,  $MC_{3-8}$  y  $MC_{30-34}$ , que sirvieron para efectuar el análisis bidimensional de la forma por medio del análisis de Fourier.

Los parámetros morfológicos se graficaron contra el diámetro de la partícula y se efectuó una regresión lineal con la fórmula:

$$MC = m d + q \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

MC = coeficiente morfológico

m = pendiente

d = diámetro de la partícula ( $\phi$ )

q = ordenada al origen

Los valores de la pendiente  $m$  se graficaron contra el número de revoluciones en escala logarítmica.

Dicha relación fue analizada por medio de la regresión logarítmica:

$$y = a \log_{10} x + q \dots \dots \dots (2)$$

Donde:  
a: pendiente  
x = número de revoluciones  
q = ordenada al origen

En este caso el valor del coeficiente *a* se usó como comparación.

### V.5. RESULTADOS

La forma fue analizada cuantitativamente en las partículas con diámetro entre  $-6\phi$  y  $-1\phi$ . Los valores iniciales de los coeficientes morfológicos fueron similares en todos los experimentos, ya que todo el material se obtuvo a partir de la desintegración de rocas de composición andesítica recolectadas en el mismo afloramiento.

La evolución morfológica muestra diferentes tendencias en función de dos aspectos: El primero relacionado con el tipo y cantidad de material fino, y el segundo, con el diámetro de las partículas. Independientemente del tamaño y composición de la mezcla existe un cambio en la tasa de variación de la morfología entre las 1038 y 2110 revoluciones. Los histogramas granulométricos de la fracción gruesa muestran que este punto corresponde con el fuerte decremento en las fracciones de  $-3\phi$  a  $-1\phi$  en todas las mezclas (Figura V.4 a V.6).

Como se mencionó anteriormente, las gráficas de los coeficientes morfológicos muestran dos tendencias principales en función del diámetro. La primera se observa en partículas de  $-6$  a  $-4\phi$  en las cuales los parámetros morfológicos disminuyen significativamente. El segundo grupo, corresponde con las clases granulométricas de  $-3$  a  $-1\phi$ , en las cuales sólo existen ligeros cambios en las características morfológicas. En las fracciones más pequeñas analizadas ( $-3$  a  $-1\phi$ ), los valores de los coeficientes  $MC_{3-8}$  y  $MC_{30-34}$  se mantienen altos, lo que indica ligeras variaciones en la morfología durante el transcurso de los experimentos (Figura V.4 a V.6; Anexos B1 a B3). Este trend es más notorio en la mezcla Run 2, con menor cantidad de material fino, la cual siempre muestra las menores variaciones en los tres coeficientes (Figura V.4 a V.6).

Las clases granulométricas de  $-6$  a  $-4\phi$  tienen una mayor variación en la morfología, con contornos que varían desde perfiles muy irregulares hasta perfiles más circulares, esquinas más redondeadas y superficies más lisas. Además, estas clases granulométricas son muy sensibles al tipo y contenido de material fino presente en la matriz.  $MC_2$  comienza a decrecer inmediatamente en las mezclas sin arcilla, lo que da como resultado líneas con dos diferentes pendientes (Figura V.4a y c) debido a la evolución diferencial de acuerdo al diámetro de las partículas. En contraste, las mezclas con mayor

contenido de arcilla (Run 3 y Run 5), muestran un decremento más homogéneo para todas las fracciones (-6 a -1 $\phi$ ) lo que se muestra en líneas casi paralelas (Figuras V.4b y d). Aproximadamente entre las 1038 y 2110 revoluciones, la tasa de variación en la morfología incrementa en las mezclas Run 3 y Run 5, y las partículas terminan con contornos más circulares que en las mezclas que no contienen arcilla.

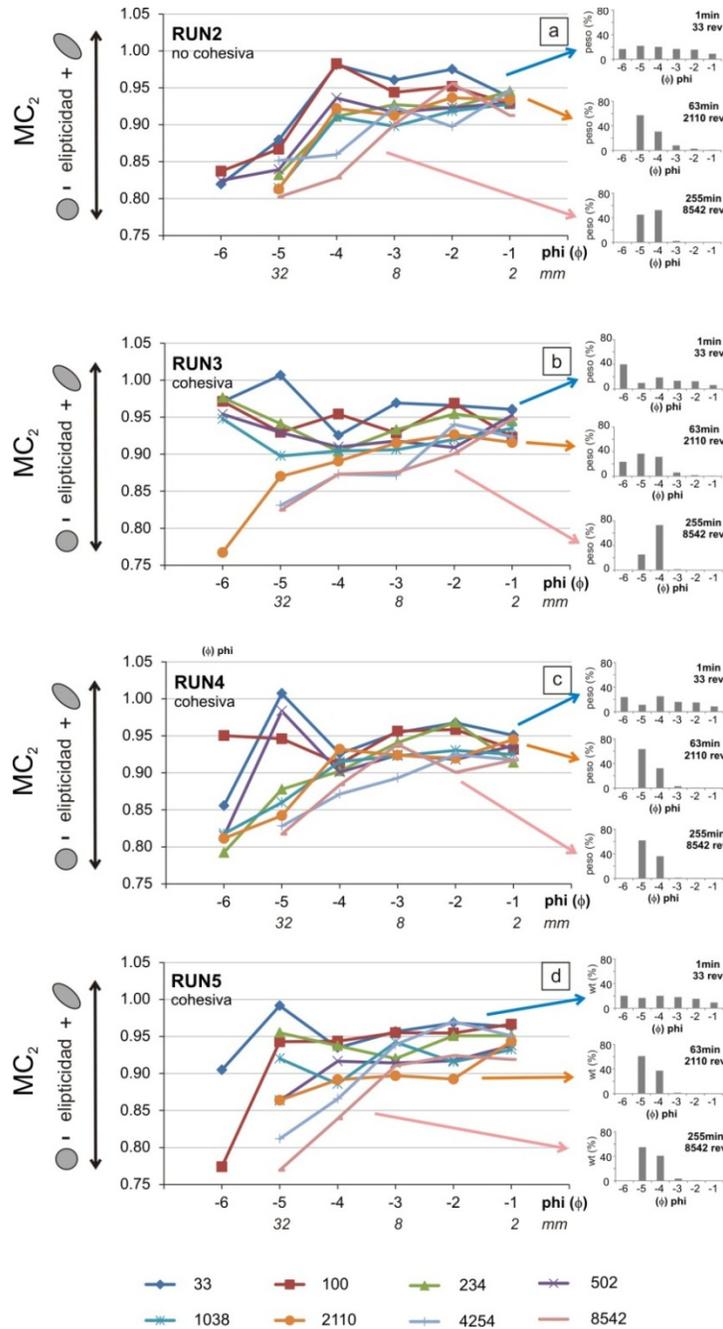


Figura V.4. Variaciones en el coeficiente  $MC_2$  (elipticidad) en función del diámetro de la partícula. A la derecha se observan las variaciones granulométricas de las fracciones mayores a -1 $\phi$  (2 mm) al inicio, parte intermedia y final de los experimentos.

El coeficiente morfológico  $MC_{3-8}$  también muestra que las partículas más gruesas varían a formas más redondeadas en las partículas con diámetros de  $-6$  a  $-3\phi$  (Figura V.5; Anexo B2). Run 2 y Run 5, mezclas con limo, tienen una tendencia similar en todos los tamaños, de  $-6$  a  $-1\phi$ . A las 1038 revoluciones, se observan cambios notables para las fracciones más gruesas analizadas (Figura V.5). En presencia de limo, la redondez incrementa desde el inicio de los experimentos (Figura V.5b y c).

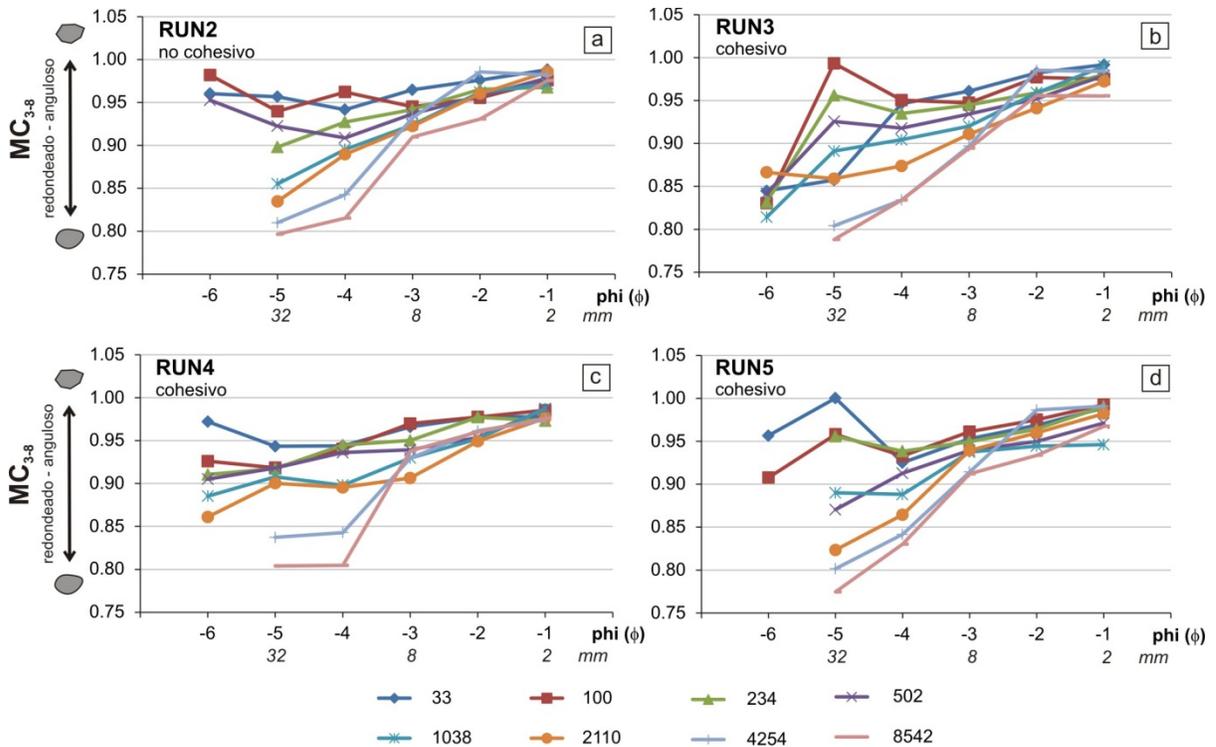


Figura V.5. Variaciones en el coeficiente morfológico  $MC_{3-8}$ , relacionado con la redondez, en función del diámetro de la partícula.

El coeficiente  $MC_{30-34}$  (Figura V.6; Anexo B3) indica que las irregularidades finas se pierden en las mezclas con mayor contenido de finos, especialmente en las que contienen arcilla, en las cuales las partículas terminan con superficies más lisas (Figura V.6b y d). En contraste Run 2, sin limo ni arcilla, presenta una menor disminución en la rugosidad e inclusive un aumento en este coeficiente para la fracción de  $-1\phi$  (Figura V.6a).

La Figura V.7 muestra las variaciones de los coeficientes  $MC_{3-8}$  y  $MC_{30-34}$  en función del diámetro para la mezcla Run 4. A dichos puntos se les efectuó una regresión lineal por medio de la ecuación 1, la cual muestra buenos coeficientes de correlación ( $R^2$ ). El mismo procedimiento se realizó en todas las mezclas. A partir de las ecuaciones de la recta obtenidas, los coeficientes angulares  $m$

(Tabla V.1) se graficaron contra el número de revoluciones en escala logarítmica (ecuación 2; Figura V.8).

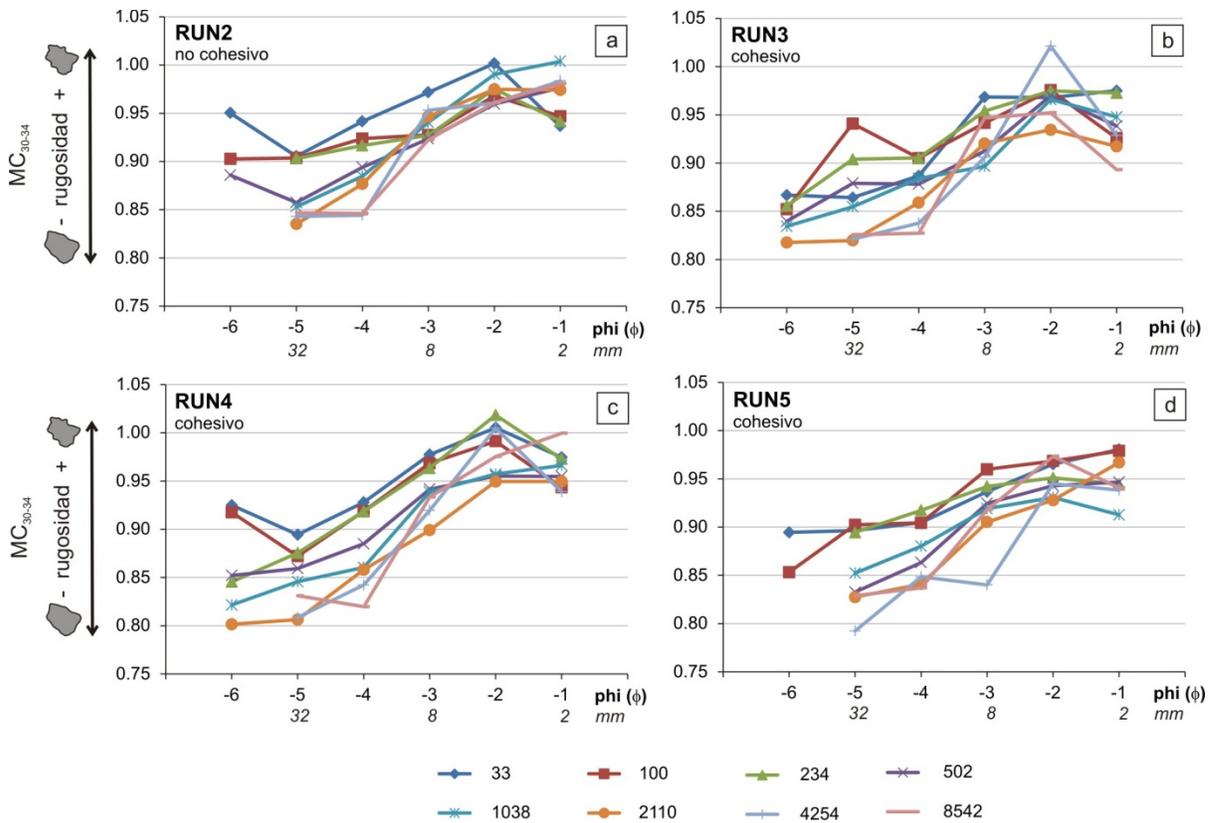


Figura V.6. Valores del coeficiente morfológico MC30-34, relacionado con la textura superficial de las partículas, en función del diámetro.

Tabla V.1. Valores del coeficiente angular ( $m$ ), obtenidos a partir de la ecuación  $MC = md + q$ .

Revoluciones	Tiempo (minutos)	Coeficiente angular $m$ para $MC_{3-8}$				Coeficiente angular $m$ para $MC_{30-34}$			
		Run2	Run3	Run4	Run5	Run2	Run3	Run4	Run5
33	1	0.0063		0.0044	0.0027	0.0072	0.0267	0.0018	0.0191
100	3	0.00002	0.0192	0.0144	0.0144	0.0119		0.0153	0.0252
234	7	0.0177	0.0218	0.0142	0.0095	0.0136	0.0242	0.0317	0.0133
502	15	0.0075	0.0223	0.0147	0.0239	0.0266	0.0229	0.0245	0.0308
1038	31	0.03	0.0314	0.0193	0.0169	0.0407	0.0261	0.0325	
2110	63	0.0372	0.0233	0.0209	0.0413	0.0376	0.0258	0.0378	0.0366
4254	127	0.0487	0.0511	0.0393	0.0524	0.0397	0.0399	0.0423	0.0388
8542	255	0.0473	0.0456	0.0499	0.0489	0.0383	0.0259	0.0493	0.036

Las gráficas de la pendiente ( $m$ ) muestran un comportamiento bien definido (Figura V.8). Las mezclas sin limo (Run 2 y Run 5) muestran líneas paralelas con una pendiente  $a$  de 0.21 (ecuación 2; Figura V.8). Las mezclas con limo (Run 3 y Run 4) forman otro juego de rectas casi paralelas, con pendiente menor y valores de  $a$  de 0.015 y 0.016 respectivamente (Tabla V.2; Figura V.8).

Estos resultados evidencian la relación entre las mezclas con limo y sin limo para el coeficiente  $MC_{3-8}$  (Figura V.8a). A mayor valor del coeficiente  $a$ , más grande es la diferencia entre los valores de redondez de las partículas de  $-6$  a  $-4\phi$  y de  $-3$  a  $-1\phi$ . En otras palabras, cuando no existe limo en las mezclas, los cambios en la morfología son más uniformes para todos los diámetros. El mismo procedimiento fue aplicado para el coeficiente  $MC_{30-34}$  (Tabla V.2; Figura V.8b). La regresión lineal muestra menor pendiente en las muestras con arcilla, lo que corrobora la relación entre la presencia de este material y la variación en la rugosidad de las partículas. Las mezclas con menor pendiente, ricas en arcilla, muestran una relación más homogénea en la rugosidad para todos los diámetros.

Tabla V.2. Valor del coeficiente ( $a$ ) para los coeficientes morfológicos  $MC_{3-8}$  y  $MC_{30-34}$ .

Mezcla	Coeficiente ( $a$ )	
	$MC_{3-8}$	$MC_{30-34}$
Run 2	0.02124	0.01576
Run 3	0.01539	0.00257
Run 4	0.01625	0.01772
Run 5	0.02104	0.00896

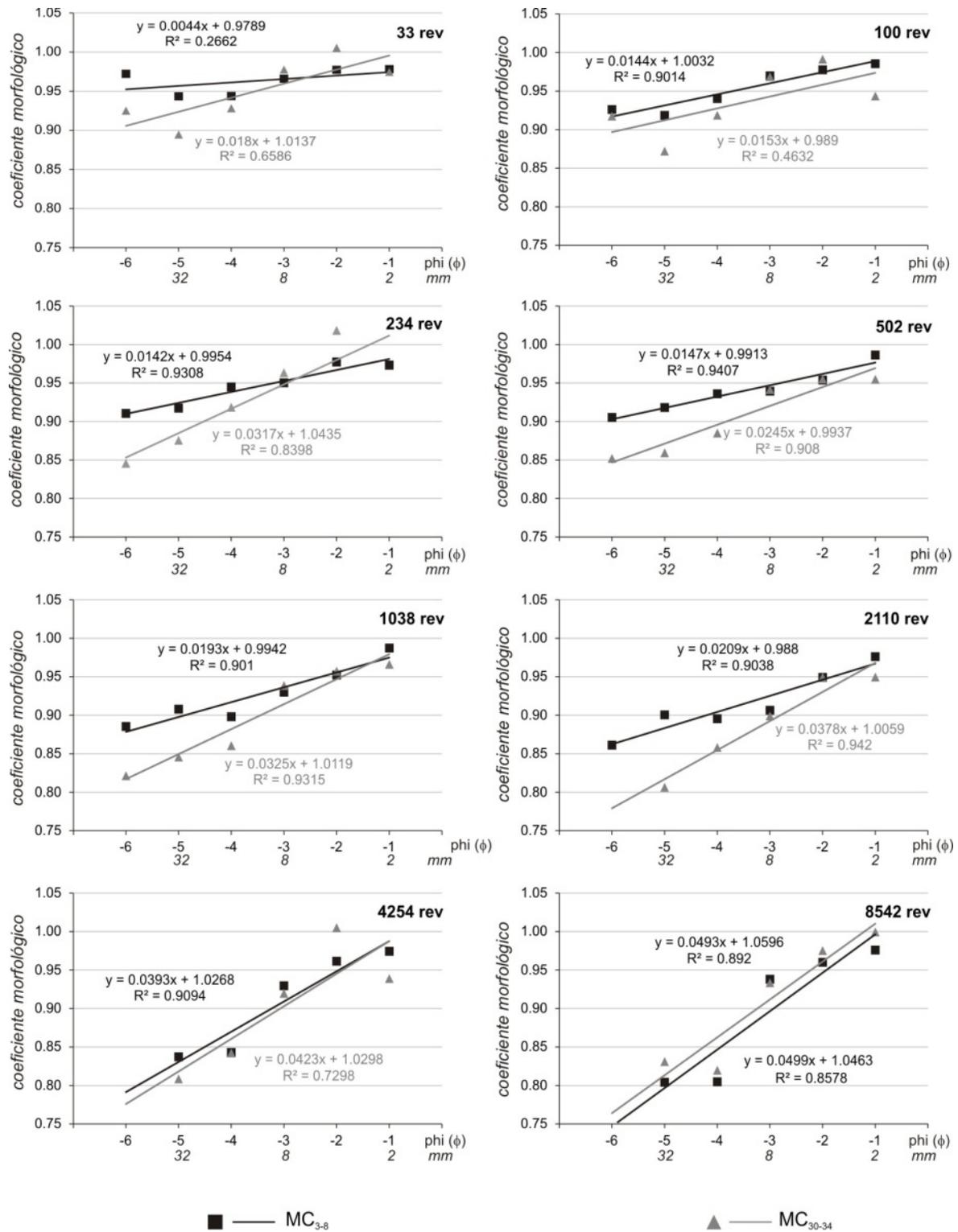


Figura V.7. Ejemplo de la regresión lineal efectuada para Run 4. Se muestra la ecuación utilizada para la regresión, así como el coeficiente de correlación.

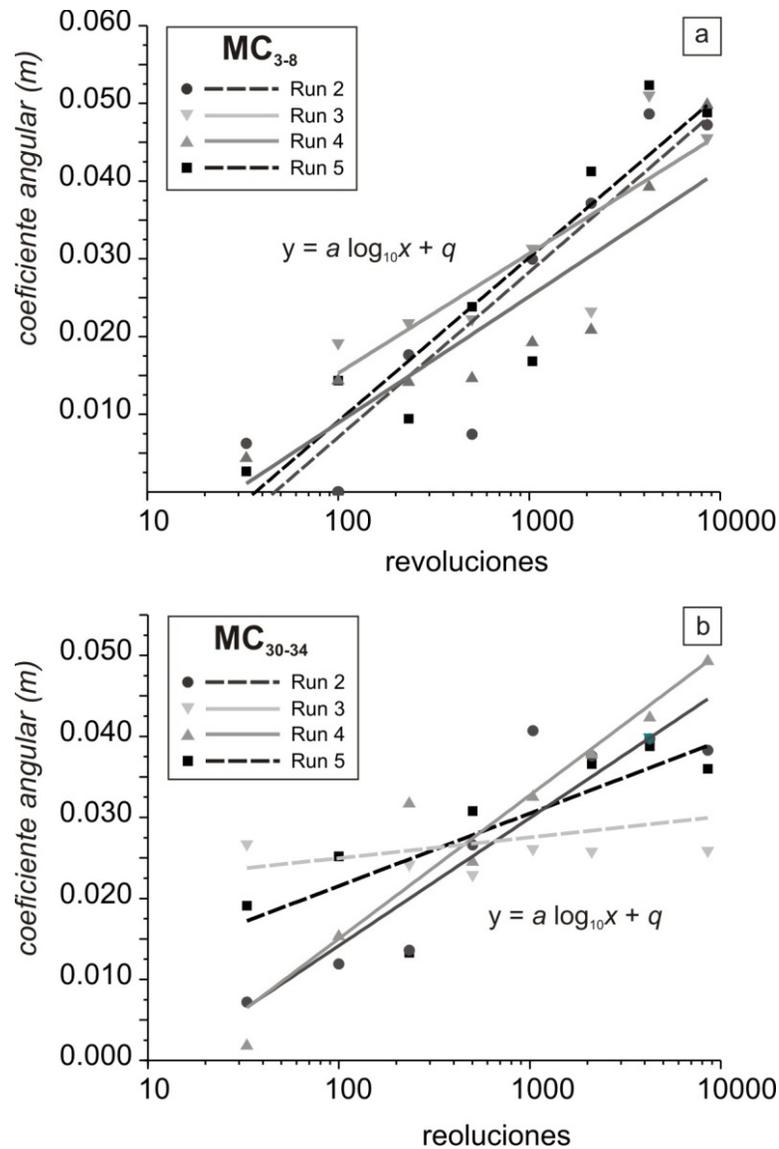


Figura V.8. Coeficientes angulares y su variación con el número de revoluciones en la máquina de Los Ángeles.

### V.6. DISCUSIÓN

En los resultados descritos existe una clara correlación de los coeficientes morfológicos con los procesos de interacción entre partículas, lo que permite entender mejor la dinámica de los flujos de escombros. Los coeficientes morfológicos propuestos por Sarcocchi (2006, 2007) y Sarcocchi et al. (2011), son muy sensibles al tipo de material fino presente en la matriz para mezclas en el rango de concentración de los flujos de escombros. El coeficiente MC<sub>3-8</sub> es sensible a las irregularidades a macroescala como la redondez. Los cambios en este coeficiente, muestran que el contenido de limo juega un rol primario en la pérdida de irregularidades gruesas y en la reducción de la angularidad. La

principal influencia de la arcilla es en la reducción del coeficiente  $MC_{30-34}$ , relacionado con las irregularidades finas o la textura superficial. Estos datos aportan nuevas pistas sobre los procesos de interacción entre partículas que ocurren dentro de los flujos de escombros y el rol de la distribución granulométrica del fluido intersticial. Previamente, los estudios se habían enfocado en el contenido de arcilla, menospreciando el rol del limo.

Una contribución original del presente trabajo consiste en tratar de explicar la diferencia en la evolución de la morfología y su tasa de cambio como una función del diámetro de las partículas. Las partículas con diámetros entre  $-6$  y  $-4\phi$  evolucionan a formas más circulares, redondas y superficies más lisas y la tasa de cambio en cada coeficiente es una función del tipo de material fino presente en la matriz. Entre estas partículas existen colisiones de alta energía que causan su fracturamiento a lo largo de las principales irregularidades (Figura V.9), lo que causa un incremento en la circularidad. Este efecto se refleja en la reducción del coeficiente  $MC_2$ . La mezcla Run 2, sin contenido de material fino, muestra una reducción inmediata en la elipticidad, mientras que las mezclas con mayor contenido de material fino en la matriz, mantienen valores altos en este coeficiente al inicio del experimento. Este fenómeno se atribuye a un efecto de colchón inducido por el limo y la arcilla presente en la matriz que inhibe las colisiones entre partículas y retarda su redondeamiento. En contraste, las partículas con diámetros entre  $-1$  y  $-3\phi$  mantienen altos valores en los tres coeficientes, lo que indica formas menos evolucionadas, que no están influenciadas de la misma forma por la composición de la matriz. El proceso que controla la evolución morfológica en las partículas con diámetros de  $-1$  a  $-3\phi$  es el fracturamiento a lo largo de planos irregulares (Figura V.9). El fracturamiento constante en estas clases granulométricas mantiene altos los valores de la elipticidad y un alto grado de angularidad, especialmente en la mezcla Run 2. La evolución diferencial como una función del tamaño fue descrita por Gaudin (1926) para el vidrio. En esta teoría, las partículas más grandes se vuelven más redondeadas por procesos de fricción mientras que el material más fino sufre fracturamiento masivo y aumenta la angularidad.

Las irregularidades gruesas en los clastos también se modifican por el contenido de limo. Las partículas de limo presentes en la matriz se encuentran en contactos de larga duración con partículas de todas las clases granulométricas analizadas ( $-6$  a  $-1\phi$ ) y el limo actúa como una lija que de forma uniforme reduce las irregularidades e incrementa la redondez. Las mezclas con menor contenido de limo muestran un mayor decremento en la redondez y una mayor tasa de cambio de las irregularidades en las fracciones gruesas ( $-6$  a  $-4\phi$ ) en comparación con las partículas de menores dimensiones en las mismas mezclas ( $-3$  a  $-1\phi$ ). Esto nos lleva a la conclusión de que en ausencia de limo, las colisiones entre partículas sólo afectan las irregularidades a macro-escala en los clastos más grandes, mientras que la forma de las partículas más pequeñas es modificada principalmente por el fracturamiento, por lo que mantienen su angularidad (Figura V.5). Las modificaciones en la textura superficial están en función del contenido de arcilla en la matriz por lo que las mezclas ricas en este material terminan con perfiles más regulares, independientemente del tamaño de las partículas, como se muestra en la figura V.6. En ausencia de arcilla, las partículas mantienen sus

irregularidades, especialmente en la fracción de  $-1\phi$  donde se observa un incremento en la rugosidad.

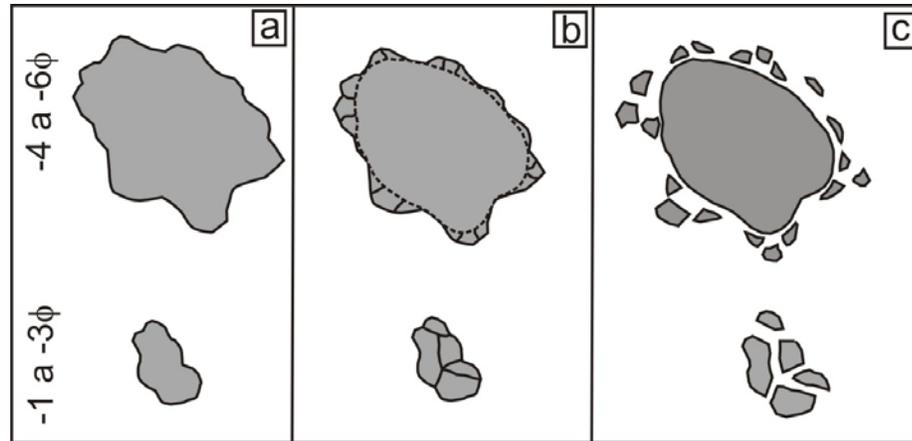


Figura V.9. Modificación de la morfología de las partículas en función de su tamaño. a) Forma inicial. b) Planos de fracturamiento a lo largo de protuberancias o en toda la superficie. c) Forma final. Las partículas más gruesas se vuelven redondeadas y las más pequeñas conservan su forma angulosa.

En todas las mezclas, entre las 1038 y 2110 revoluciones, la circularidad incrementa rápidamente para las mezclas ricas en arcilla (Figura V.4). Estos valores son consistentes con la fuerte disminución en las fracciones de  $-1$  a  $-3\phi$  y la conminución del material mayor a  $-1\phi$  (2 mm).

En flujos de escombros naturales esta fuerte transición podría corresponder con las etapas iniciales del transporte. En experimentos similares de abrasión de clastos dentro de tambores rotatorios, las distancias recorridas se calculan con base en el perímetro del tambor. Wentworth (1919) hace esta equivalencia simplemente multiplicando la circunferencia del tambor por el número de revoluciones. Adams (1978) estipula que sería aproximadamente el 60% de la distancia recorrida. Usando estas equivalencias el valor crítico se podría alcanzar aproximadamente entre los 1.5 y 5 km de transporte y una morfología estable entre los 11.5 y 20 km, lo que corresponde a 8542 revoluciones en estos experimentos.

Los cambios morfológicos descritos anteriormente no son sólo importantes para establecer el modo de transporte de las partículas. La forma también juega un papel importante en la susceptibilidad a la fuerza de arrastre, así como en la tasa de sedimentación. Las partículas de forma irregular se acomodan con su máxima área de proyección orientada en dirección perpendicular a la depositación, así que la sedimentación se retarda cuando las partículas difieren de formas esféricas (Komar y Reimers, 1978; Dietrich, 1982). Las partículas más gruesas en mezclas sin contenido de finos sufren colisiones más energéticas y adquieren formas esféricas más rápidamente, lo que favorece la

sedimentación. Las partículas en mezclas ricas en finos permanecen elongadas por más tiempo y permanecen en suspensión por tiempos más largos. Este hecho es importante ya que el retardo en la sedimentación en flujos de escombros es atribuido a la fuerza de la matriz en mezclas ricas en arcilla (Johnson, 1970; Rodine y Johnson, 1976; Major y Pierson, 1992) y las variaciones en la morfología podrían realzar este efecto. Además, el decremento en las irregularidades gruesas y finas, particularmente en mezclas ricas en material fino, ya sea limo o arcilla, tiene un impacto directo en la reducción de la fricción entre las partículas gruesas lo que realza la movilidad.

Los patrones observados en este estudio ofrecen nuevos descubrimientos en la interacción clasto-clasto, procesos de redondeamiento y de la teoría de conminución, con implicaciones importantes para entender el comportamiento dinámico de los flujos de escombros y sus peligros asociados.

## VI. REOLOGÍA

### VI.1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los esfuerzos que producen el movimiento de los flujos de escombros, su relación con el movimiento de las partículas y la interacción de estas con el fluido circundante, ha sido estudiado ampliamente en la literatura por diversos autores como Hampton (1975), Pierson (1981), Lowe (1982), Pierson y Costa (1987), Major y Pierson (1992), Iverson (1997), Coussot et al. (1998), Hübl y Steinwendtner (2000), Pudasaini et al. (2005), Amy et al. (2006), Kaitna y Rickenmann (2007) Takahashi (2007) entre otros, con el fin de establecer un modelo reológico que explique adecuadamente el comportamiento de los flujos de escombros.

Debido a que, por su composición, presentan comportamiento tanto de sólidos como de líquidos y a la gran variabilidad que presentan estos fenómenos en la naturaleza, en relación al tipo y concentración de material, a la distribución granulométrica y al contenido de agua, además de las condiciones del medio circundante, como son la geometría del canal y las condiciones del substrato, establecer dichos modelos resulta de gran dificultad.

Por esto, es necesario comprender las propiedades de los fluidos y su diverso comportamiento reológico para poder explicar este tipo de fenómenos, así como los procesos físicos que actúan durante su inicio, transporte y depositación.

En este capítulo se presentan los datos obtenidos en la caracterización reológica de las muestras que forman el fluido de las mezclas utilizadas en los experimentos descritos en el capítulo III, con el fin de observar las variaciones en la reología con el tiempo de evolución. Además, se analizan las características reológicas de suspensiones de arcilla y de limo y arcilla, para entender la influencia del tipo de material fino presente en la matriz de los flujos de escombros en la resistencia crítica y en la viscosidad. Finalmente, los datos obtenidos se comparan con datos de flujos de escombros reales y se presenta una interpretación de los flujos de escombros basada en su comportamiento reológico.

## VI.2. REOLOGÍA

La reología estudia el comportamiento de los fluidos bajo un esfuerzo, es decir, el estudio de la deformación con el esfuerzo de cizalla y el flujo de la materia. Se enfoca en los materiales cuyas propiedades varían en función de la rapidez de deformación y muestran características tanto de sólidos como de líquidos.

Existen cuatro tipos básicos de comportamiento: elástico, plástico, viscoso y frágil. En los *cuerpos elásticos* la deformación no es permanente y se rigen según el modelo de Hooke. Los cuerpos con comportamiento *plástico* exhiben una deformación permanente sin ruptura, poseen resistencia crítica y la deformación, una vez que ha comenzado, es continua sin el incremento del esfuerzo. Por otro lado, en los fluidos *Newtonianos* o *Viscosos*, también llamados *fluidos verdaderos*, la relación entre el esfuerzo de cizalla y la tasa de deformación es lineal, y la viscosidad molecular, es constante independientemente de la tasa de cizalla. No poseen esfuerzo de cedencia, por lo que un esfuerzo de cizalla de cualquier magnitud mayor a cero, causa que la sustancia fluya. Sin embargo, la tasa a la que fluye está en función de la magnitud del esfuerzo. Finalmente, en los cuerpos frágiles no existe deformación permanente a menos que el esfuerzo sea igual a la resistencia crítica y a cierta magnitud del esfuerzo la sustancia se rompe.

Existen cierto tipo de fluidos en los cuales el esfuerzo de cizalla y la deformación presentan una relación más compleja, a este tipo de fluidos se les denomina fluidos *no-Newtonianos*, y se clasifican con base en la variación de la viscosidad en función de la magnitud y tiempo de aplicación del esfuerzo de cizalla (Figura VI.1). Algunos fluidos *no-Newtonianos* poseen un esfuerzo de cedencia, definido como el esfuerzo que se requiere para iniciar un flujo, está relacionado con el nivel de la estructura interna del material que se debe de destruir antes de que el flujo ocurra. Cuando estos fluidos presentan resistencia crítica se clasifican en plásticos y viscoplásticos. En los primeros, una vez superado el valor del esfuerzo de cedencia, la magnitud del esfuerzo de cizalla y la tasa de deformación no muestran una relación proporcional, en los segundos, la relación sí es proporcional. Se puede decir que la viscosidad del material varía con la tasa de deformación y se ve afectada por la velocidad a la que fluye el material y por la geometría que confina el flujo.

Desde el punto de vista de la reología, los flujos de escombros muestran en general un comportamiento *no-Newtoniano* el cual varía, principalmente, en función de la concentración de partículas y de la distribución granulométrica.

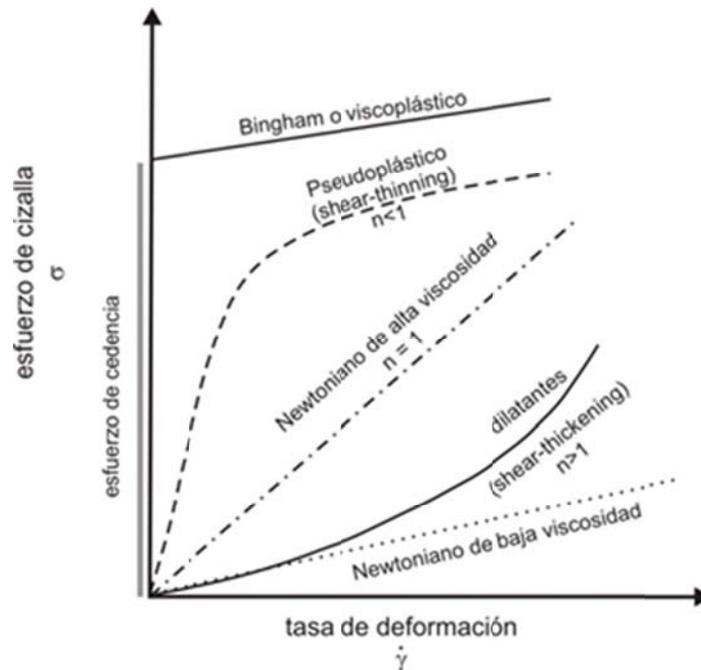


Figura VI.1. Relación entre la tasa de deformación y el esfuerzo de cizalla para los fluidos no-Newtonianos.

### VI.3. MODELOS REOLÓGICOS APLICADOS A LOS FLUJOS DE ESCOMBROS

#### VI.3.1. Modelos viscoplásticos

Para explicar el comportamiento de estos fluidos se utiliza una combinación de los modelos plástico y viscoso. La conceptualización viscoplástica de un flujo de escombros se basa en la idea de que, a altas concentraciones de sedimentos, la viscosidad se incrementa y contribuye a la resistencia crítica del fluido. La resistencia crítica depende del limo y la arcilla que producen cohesión y por las partículas más gruesas que proveen fricción interna (Jan y Shen, 1997).

Debido a que los modelos viscoplásticos simulan la reología de la mezcla de agua y finos, sólo pueden ser aplicados a flujos de escombros cohesivos con un régimen laminar, ya que no toman en consideración la interacción de los sedimentos gruesos con el fluido, lo cual afecta en gran medida su comportamiento (Major y Pierson, 1992; Iverson 1997).

## a) Fluidos tipo Bingham

Los fluidos tipo Bingham poseen esfuerzo de cedencia, debajo de este punto se comportan como materiales plásticos y una vez que se supera este valor, comienzan a fluir y se comportan como fluidos viscosos o Newtonianos, por lo que la tasa de deformación es proporcional al esfuerzo y la viscosidad aparente se mantiene constante (Figura VI.1).

$$\tau = \tau_y + \mu_b (du/dy)$$

donde,

$\tau_y$ , es el esfuerzo de cedencia

$\mu_b$ , es la viscosidad aparente

$du/dy$ , gradiente de velocidad

## b) Fluidos Coulomb-Viscosos (Johnson, 1970)

Johnson (1970) dividió el esfuerzo de cedencia del fluido en cohesión y fricción y encontró que la parte de la fricción de la resistencia crítica en un flujo de escombros es proporcional al esfuerzo normal que actúa en planos de cizalla.

$$\tau = \tau_y + \sigma \tan \phi + \mu_b (du/dy)$$

donde,

$\tau$ , es el esfuerzo de cizalla

$\tau_y$ , es el esfuerzo de cedencia

$\sigma$ , es el esfuerzo normal

$\phi$ , ángulo de fricción interna

$\mu_b$ , es la viscosidad aparente

$du/dy$ , gradiente de velocidad

Los primeros dos términos del lado derecho representan la resistencia crítica,  $\tau_y = \tau_y + \sigma \tan \phi$ , que debe ser excedida antes de que el flujo ocurra. Los valores de  $\tau_y$  y  $\mu_b$  varían ampliamente en función de la concentración de sólidos y su distribución granulométrica, del tipo de arcilla, la forma de las partículas, temperatura y propiedades electroquímicas del líquido que compone la mezcla.

La resistencia crítica depende de la fricción de Coulomb y la viscosidad de la tasa de deformación.

## c) Modelo Visco-plástico-colisional (O'Brien y Julien, 1988)

Este modelo toma en cuenta las interacciones de las partículas más gruesas y la viscosidad del fluido, los cuales pueden jugar papeles muy significativos en el intercambio de momento. O'Brien y Julien (1988) proponen un modelo que incluye las componentes de la resistencia crítica, la viscosidad, la colisión y los esfuerzos turbulentos.

$$\tau = \tau_y + \eta \left( \frac{du}{dy} \right) + (\mu_c + \mu_t) \left( \frac{du}{dy} \right)^2$$

$\tau$ , es el esfuerzo de cizalla

$\tau_y$ , es el esfuerzo de cedencia

$\eta$ , viscosidad dinámica

$du/dy$ , gradiente de velocidad

$\mu_c$ , parámetro dispersivo

$\mu_t$ , parámetro turbulento

## VI.3.2. Fluidos Power-Law (sin resistencia crítica)

En este tipo de fluidos la relación entre el esfuerzo de cizalla y la tasa de deformación no es lineal. Para describir su comportamiento se utiliza generalmente la Ley de Potencia (Power Law), la cual se expresa como sigue:

$$\tau = m \left( \frac{du}{dy} \right)^n$$

$\tau$ , es el esfuerzo de cizalla

$du/dy$ , gradiente de velocidad

$m$ , constante que representa la consistencia del fluido

$n$ , medida de cómo el fluido se desvía de un fluido Newtoniano (índice de fluidez)

Los parámetros  $m$  y  $n$  son calculados a partir de una regresión no-lineal de los datos viscométricos. La forma de la curva depende del valor de  $n$  y la pendiente está definida por la viscosidad aparente ( $\eta_a$ ). Si  $n > 1$ , se denominan fluidos dilatantes (shear-thickening). En ellos, la viscosidad aparente se incrementa con la tasa de cizalla. Cuando  $n < 1$ , se denominan fluidos pseudoplásticos (shear-thinning) y la viscosidad disminuye con el esfuerzo de cizalla. Si  $n = 1$  se denominan fluidos Newtonianos (Figura VI.1).

Una de las limitaciones de la Ley de Potencia es que falla en describir la viscosidad de algunos fluidos, como los flujos de escombros, en regiones de muy baja o muy alta tasa de deformación. Para fluidos con esfuerzo de cedencia se introduce el término llamado límite de fluencia ( $\tau_y$ ). A este modelo se le denomina Herschel-Bulkley (Figura VI.2) y se expresa de la siguiente forma:

$$\tau = [m(\frac{du}{dy})^n] + \tau_y, \quad \text{para } \tau > \tau_y$$

$$\frac{du}{dy} = 0, \quad \text{para } \tau < \tau_y$$

$\tau$ , es el esfuerzo de cizalla  
 $du/dy$ , gradiente de velocidad  
 $m$ , constante que representa la consistencia del fluido  
 $n$ , medida de cómo el fluido se desvía de un fluido Newtoniano  
 $\tau_y$ , límite de fluencia

Autores como Coussot et al. (1998), Major y Pierson (1992), Amy et al, (2006) y Hübl y Steinwendtner (2000) han propuesto modelos basados en Herschel-Bulkley para la dinámica de los flujos de escombros. Sin embargo, difieren en el comportamiento, una vez superado el esfuerzo de cedencia.

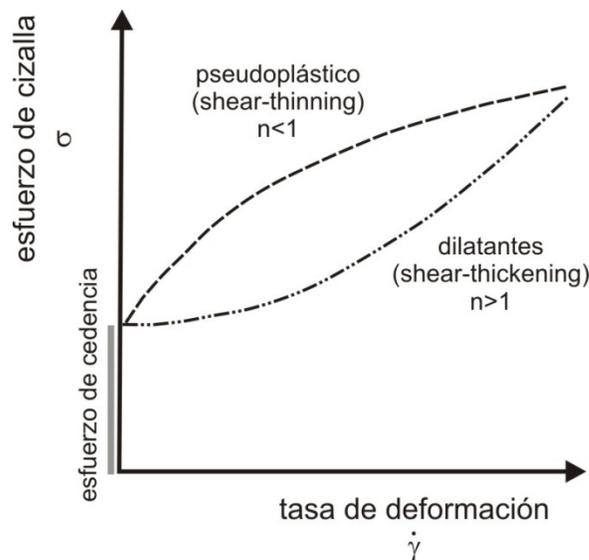


Figura VI.2. Relación entre el esfuerzo de cizalla y la tasa de deformación para las fluidos tipo Herschel-Bulkey.

#### VI.4. METODOLOGÍA

Para la caracterización reológica de las muestras se usó un reómetro Anton Paar modelo Physica MCR 101 (Figura VI.3), con geometría de placas paralelas y con una apertura de 2 a 3 mm en función del tipo de muestra y del tamaño de partícula dentro de las suspensiones.

En este aparato se obtuvieron las curvas de cedencia y de flujo, para determinar el esfuerzo de cedencia y la variación de la viscosidad con la tasa de deformación.



Figura VI.3. Reómetro Physica MCR 101 utilizado para la caracterización reológica de las muestras.

Con base en las curvas de cedencia y las curvas de flujo, se determinó el comportamiento reológico del fluido, que abarca un rango granulométrico de 3 a  $9\phi$ . Aun cuando no se abarca el rango granulométrico completo usado durante los experimentos ( $-6$  a  $9\phi$ ), el tipo de comportamiento mecánico puede ser estudiado únicamente con las propiedades del material fino, como fue expuesto previamente por Dumaisnil et al. (2010) y concuerda con otros estudios reológicos aplicados a flujos de escombros (Major y Pierson, 1992; Coussot et al., 1998).

Es importante señalar que para las muestras pertenecientes a los experimentos Run 2 y Run 4 no fue posible la caracterización reológica, debido a que fueron suspensiones altamente inestables y la sedimentación y segregación de material ocurría rápidamente, por lo que los datos no resultaron confiables.

#### *VI.4.1. Curvas de cedencia*

El esfuerzo de cedencia determinado por una técnica analítica específica es usualmente conocido como esfuerzo de cedencia aparente. Aunque puede no representar el valor teórico correcto, se usa frecuentemente en la comparación y predicción del comportamiento del material.

Existen dos métodos para calcular el esfuerzo de cedencia usando reómetros rotacionales. En el primero, la velocidad (tasa de deformación) es la variable independiente y el torque (esfuerzo de cizalla) es la variable dependiente. En el segundo método, conocido como de esfuerzo controlado, la situación es al revés, se aplica un torque a una placa (esfuerzo de cizalla) y se mide el desplazamiento o velocidad de rotación (tasa de deformación) de la misma placa. El segundo método es mejor para determinar la resistencia crítica aparente porque existe mayor control en el esfuerzo de cizalla, que es la variable de mayor interés. Esto implica un incremento gradual del esfuerzo aplicado al material para detectar el punto en el cual ocurre el primer movimiento.

Para construir las curvas de cedencia, se utilizó el método del esfuerzo controlado por ser el más adecuado y por el tipo de reómetro utilizado. Para ello, se aplicó un esfuerzo de cizalla creciente en rampa lineal, en rangos de 1 a 30 Pa y de 1 a 50 Pa para la serie de muestras Run 3 y de 1 a 100 Pa para la serie de muestras Run 5.

#### *VI.4.2. Curvas de flujo*

Las curvas de flujo representan el esfuerzo de cizalla frente a la velocidad de deformación. En ellas, la variable fue la tasa de deformación establecida en un rango de 0.1 a 200 s<sup>-1</sup>, con un incremento de tipo logarítmico.

#### *VI.4.3. Comparación con suspensiones de arcilla y limo y arcilla*

Los resultados de Run 3 y Run 5 se compararon con suspensiones de arcilla y de limo y arcilla para cuantificar la variación en el esfuerzo de cedencia y la viscosidad en relación al tipo de material fino presente en las mezclas.

Las suspensiones de arcilla mostraban una relación arcilla/agua de 30/70, 20/80 10/90. Se probaron suspensiones cuya relación arcilla/agua fue de 5/95, sin embargo, los datos obtenidos no fueron

representativos de la mezcla ya que, al igual que en las muestras Run 2 y Run 4, se observaron procesos de segregación, aunque en estas últimas, de menor magnitud (Figura VI.4).



Figura VI.4. Segregación de partículas en las suspensiones con una relación arcilla/agua = 5/95.

Las suspensiones de limo y arcilla tienen la misma relación sedimento/agua que las de arcilla, pero en éstas, el porcentaje de sedimentos estuvo constituido por limo y arcilla en partes iguales. Las concentraciones 30/70 contenían 15% de arcilla y 15% de limo; las de 20/80, 10% de limo y 10% de arcilla. En estas suspensiones también se probaron las concentraciones 10/90 y 5/95, cuyos resultados tampoco fueron representativos por los procesos de segregación mencionados anteriormente.

**VI.5. RESULTADOS**

*VI.5.1. Curvas de cedencia*

Las curvas de cedencia muestran la variación en la tasa de deformación conforme aumenta el esfuerzo de cizalla para las muestras correspondientes a los 1, 63, 127 y 255 minutos de duración del experimento. El valor del esfuerzo de cedencia se obtiene en la intersección de las curvas con el eje  $y$ , que representa el esfuerzo de cedencia (Figura VI.5 y Figura VI.6).

En la Figura VI.5a se observan las curvas de cedencia obtenidas para la serie de muestras Run 3. La primera curva corresponde con el valor de la resistencia crítica al primer minuto de duración del experimento en la máquina de Los Ángeles y la curva localizada en la parte más alta, a la resistencia crítica al final (255 minutos). Es claro un incremento en los valores de la resistencia crítica con el desarrollo de los experimentos de 1.19 a 10 Pa, el cual sigue una relación lineal (Figura VI.5b).

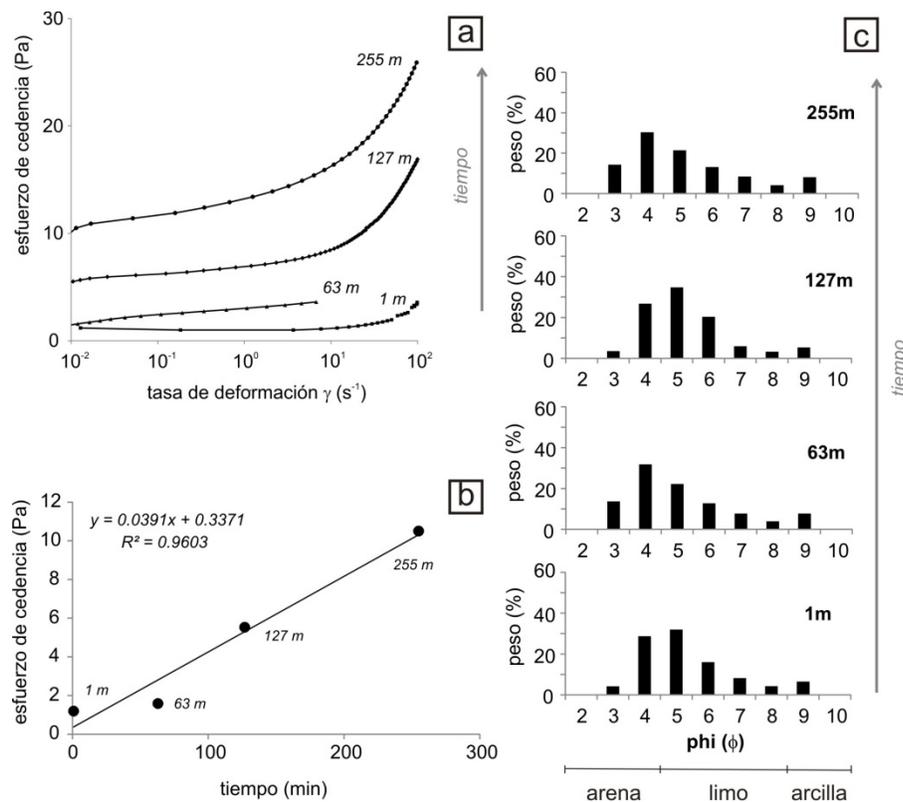


Figura VI.5. a) Curvas de cedencia de las muestras del experimento Run 3. b) Variación del esfuerzo de cedencia con el desarrollo del experimento. c) Características granulométricas de las muestras.

Las muestras del experimento Run 5 muestran al inicio valores de cedencia de 1.99 Pa, similares a los resultados de Run 3. Sin embargo, con el tiempo este valor aumenta hasta 147 Pa, incremento mucho mayor que en el experimento anterior (Figura VI.6a). El aumento en los valores de cedencia también es de tipo lineal (Figura VI.6b).

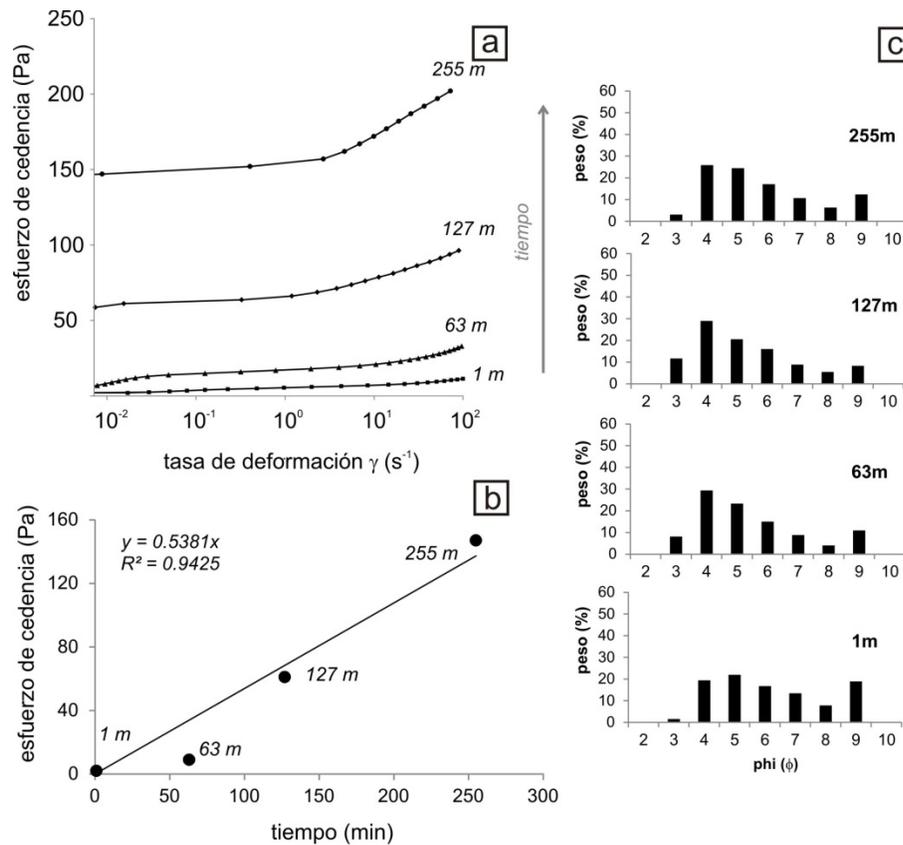


Figura VI.6. a) Curvas de cedencia de las muestras del experimento Run 5. b) Variación del esfuerzo de cedencia con el desarrollo del experimento. c) Características granulométricas de las muestras.

Como se mencionó antes, con el objeto de comparar la influencia en los valores de cedencia del tipo de material fino presente en el fluido, es decir limo y arcilla, se prepararon suspensiones de arcilla y agua y de arcilla y limo, con valores de resistencia crítica similares a los obtenidos durante los experimentos.

Las suspensiones de bentonita muestran un esfuerzo de cedencia similar al de los experimentos a concentraciones tan bajas como el 10% (10/90) y a concentraciones del 30% (30/70) para el final (Figura VI.7a). La figura VI.7b muestra que, a diferencia de Run 3 y Run 5, el aumento es de tipo exponencial. Sin embargo, al agregar limo a las suspensiones, los valores de la resistencia crítica

disminuyen de forma importante en comparación con las suspensiones puras de arcilla (Figura VI.7a) y el incremento en el esfuerzo de cedencia es lineal (Figura VI.7b).

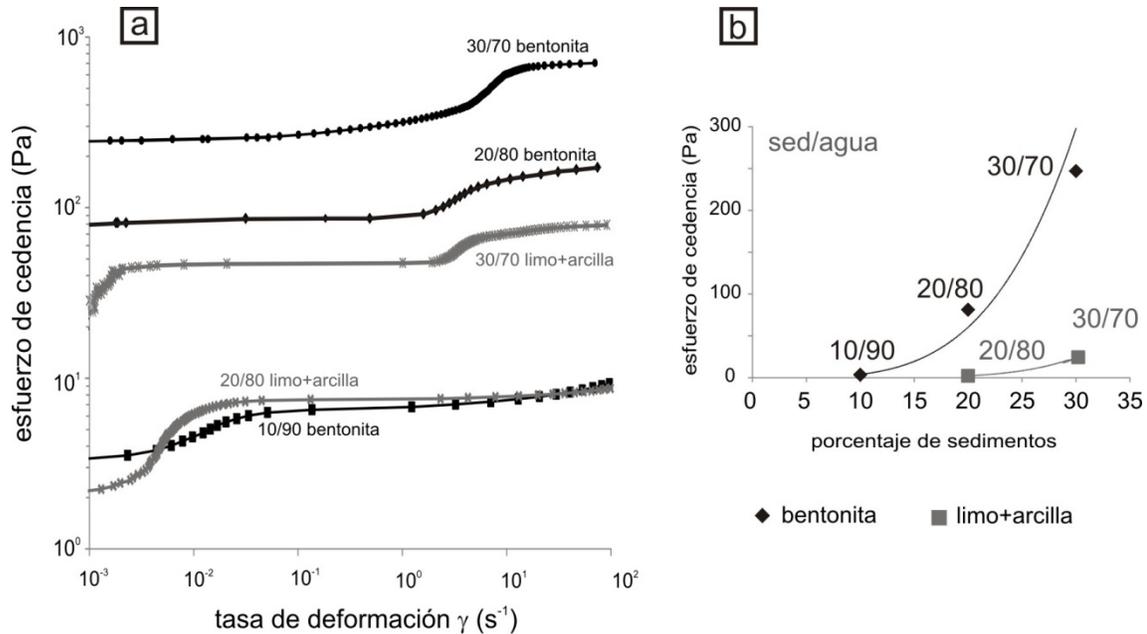


Figura VI.7. a) Curvas de cedencia de las suspensiones de arcilla y de limo y arcilla. b) Variación del esfuerzo de cedencia con la concentración de sedimentos.

### VI.5.2. Curvas de Flujo

En las curvas de flujo de Run 3, el esfuerzo de cizalla aumenta de forma constante con el aumento de la tasa de deformación (Figura VI.8a), de manera particular, la muestra a 1 minuto de duración del experimento, es la que tiene un mayor aumento en este parámetro, especialmente después de los 10 s<sup>-1</sup>. Por otro lado, las curvas de flujo de Run 5 tienen el mismo comportamiento, pero el aumento en la viscosidad y en los valores del esfuerzo de cizalla es mucho más alto en comparación con Run 3 (Figura VI.9).

Las viscosidades aparentes disminuyen con la tasa de deformación (Figura VI.8b y Figura VI.9b) y los valores más bajos se encuentran en el intervalo de 1 minuto y a altas tasas de deformación.

En ambos experimentos, la disminución de la viscosidad con la tasa de deformación, indica que las muestras tienen un comportamiento adelgazante. Sin embargo, aunque cada muestra presenta un comportamiento adelgazante, con el avance del experimento la viscosidad aumenta en más de un orden de magnitud (Figuras VI.8 y VI.9).

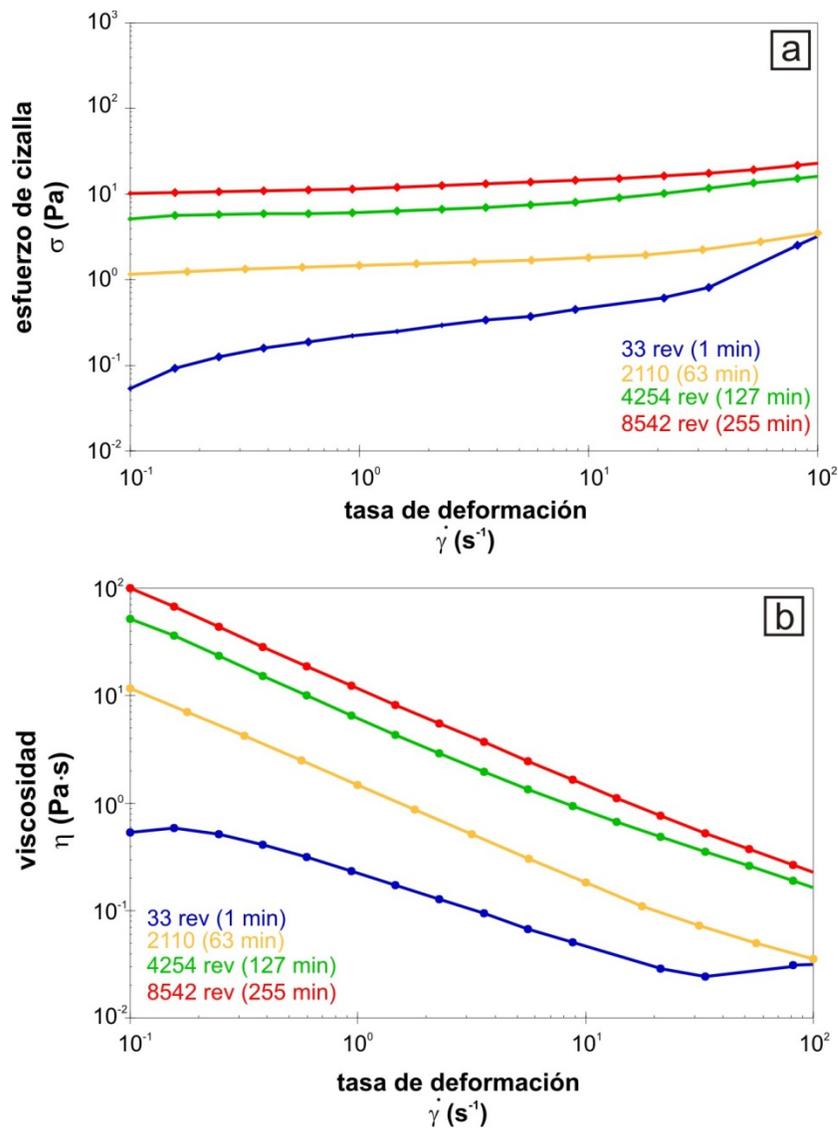


Figura VI.8. a) Curvas de flujo de las muestras del experimento Run 3.  
b) Curvas de viscosidad.

En las suspensiones de arcilla y de limo y arcilla conforme aumenta la cantidad de material fino las fuerzas cohesivas son mayores y por ello, aumenta el esfuerzo de cedencia (Figura VI.7) y la curva de viscosidad vs tasa de deformación (Figura VI.10). En las curvas de flujo, al inicio y antes de 1s<sup>-1</sup>, disminuye el esfuerzo de cizalla conforme aumenta la tasa de deformación, posterior a este punto se observa un aumento en este parámetro. Este comportamiento se enfatiza a menores concentraciones y en las muestras que contienen limo y arcilla (limo +arcilla = 20 y 10%).

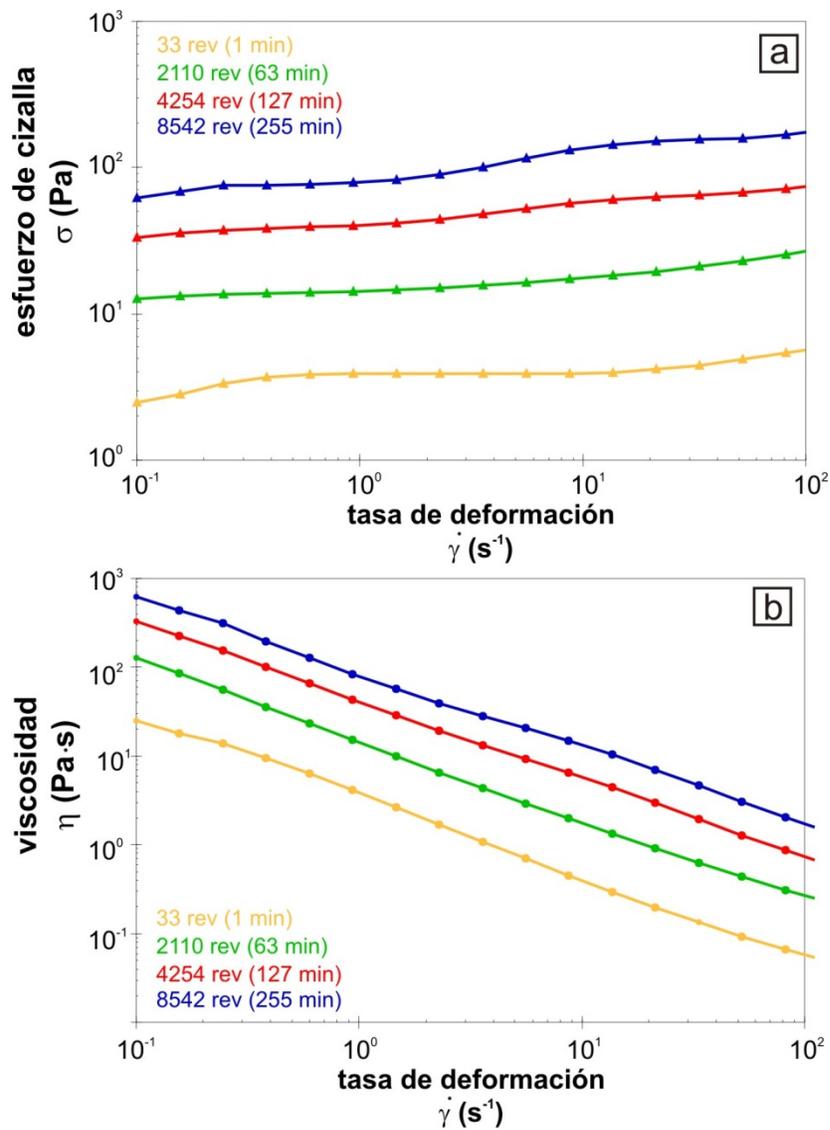


Figura VI.9. a) Curvas de flujos de las muestras del experimento Run 5. b) Curvas de viscosidad.

La viscosidad aparente de estas suspensiones decrece con la tasa de deformación. Sin embargo, entre los 3 y 7s<sup>-1</sup>, existe un aumento en la viscosidad y posterior a este rango comienza a disminuir nuevamente.

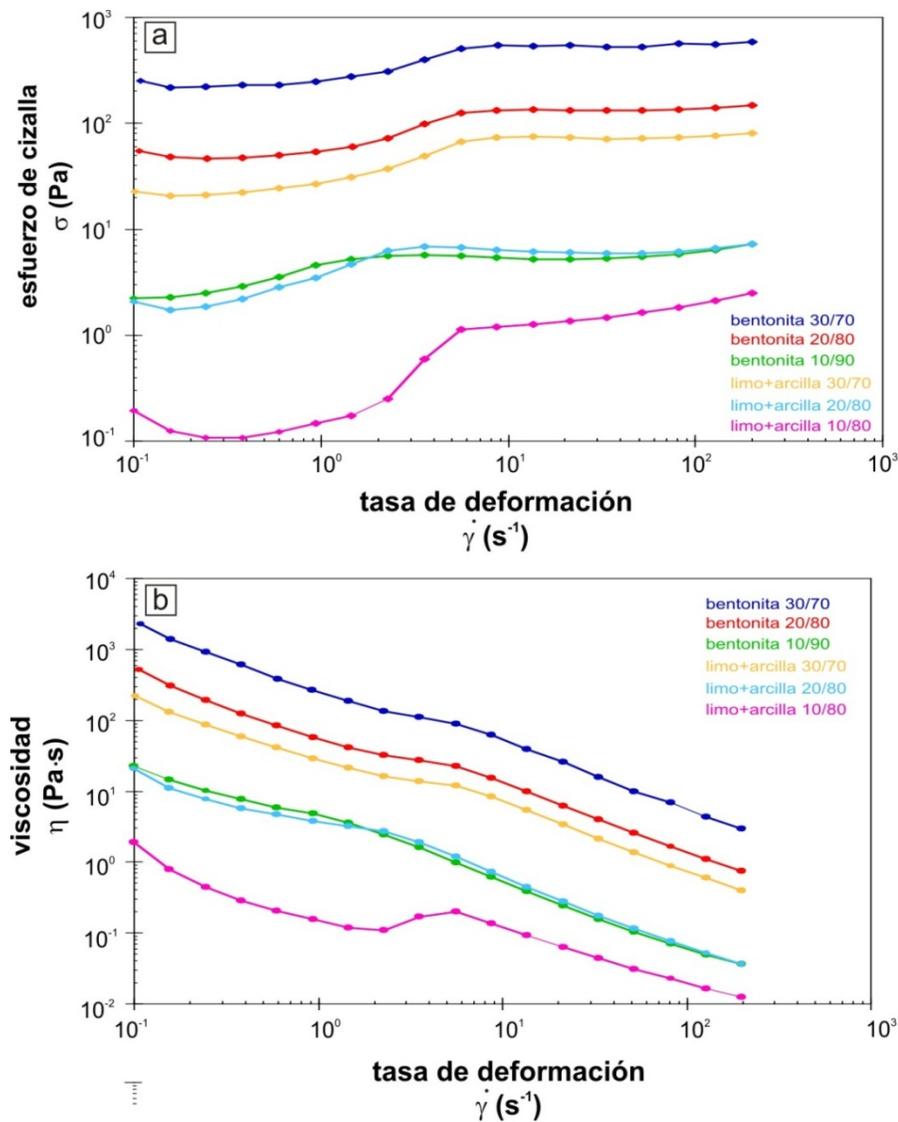


Figura VI.10. a) Curvas de flujo de las suspensiones de arcilla y limo y arcilla. b) Variación de la viscosidad con la tasa de deformación.

## VI.6. DISCUSIÓN

La caracterización reológica indica un aumento en la resistencia crítica y en la viscosidad con el desarrollo de los experimentos. Lo anterior indica que siempre nos encontramos por encima del límite cohesivo en las pruebas y que los arreglos estructurales que se llevan a cabo dentro del fluido son los mismos, independientemente de que el número de interacciones se incremente, es decir, la viscosidad aumente.

Cambios en la reología se han explicado por variaciones en el contenido de agua y en la granulometría, especialmente el contenido de arcilla (Major y Pierson, 1992). En estos experimentos la granulometría del fluido muestra cambios poco significativos, por lo que el aumento en el esfuerzo de cedencia y en la viscosidad se atribuye al aumento en la cantidad de arena y limo en las muestras del fluido, a partir de la fragmentación y conminución de las clases granulométricas más gruesas. Los histogramas granulométricos son similares durante todo el experimento (Figura VI.5c y VI.6c) ya que se crean cantidades proporcionales de arena y limo y al tratar de forma separada cada fracción (fracción gruesa, arena y fluido), no es posible observar la cantidad de material creado en cada clase granulométrica, puesto que se trata de cantidades proporcionales.

Es importante señalar que existe una gran complejidad en la caracterización reológica de las mezclas y suspensiones, inducidas por los efectos del tamaño de las partículas, segregación de material y migración. Adicionalmente a la complejidad, hay una gran variabilidad respecto a la granulometría, a la concentración de agua, así como al tipo de arcilla presente en los flujos de escombros, esta última relacionada con el ambiente sedimentario y los procesos diagenéticos. Dichos factores dificultan establecer un modelo reológico general y si tomamos en cuenta el factor tan importante que juegan las interacciones entre partículas, la complejidad aumenta en un rango mucho mayor. Sin embargo, con los experimentos realizados, es posible plantear una metodología que permita evaluar de manera consistente las propiedades reológicas de las suspensiones.

En general, los datos obtenidos son similares a los obtenidos por otros autores (Figura VI.11), sin embargo, algunos valores están muy por debajo de los reportados para flujos de escombros, especialmente Run 3 a 1 minuto y a 32 minutos (Figura VI.11). Estos valores se atribuyen al proceso de muestreo, ya que la muestra del fluido comprendió únicamente el material en suspensión después de cada intervalo de tiempo en la máquina de Los Ángeles. El hecho de incorporar una fracción más grande de arena o establecer un límite arbitrario en el diámetro, que incluyera toda la fracción arenosa, no hubiera permitido usar esta metodología, debido a que requeriría un aumento de la distancia entre las placas paralelas, que induciría más fácilmente los fenómenos de segregación y cuyo resultado serían lecturas erróneas.

Los valores más altos del esfuerzo de cedencia y de la viscosidad aparente en Run 5, mezcla con mayor contenido de arcilla, en comparación con Run 3, confirman la importancia del material arcilloso en el incremento de ambos parámetros. La influencia de este material también se refleja en el aumento exponencial del esfuerzo de cedencia en las muestras puras de bentonita. En contraste, el aumento en las muestras del fluido y de las suspensiones de limo y arcilla es lineal.

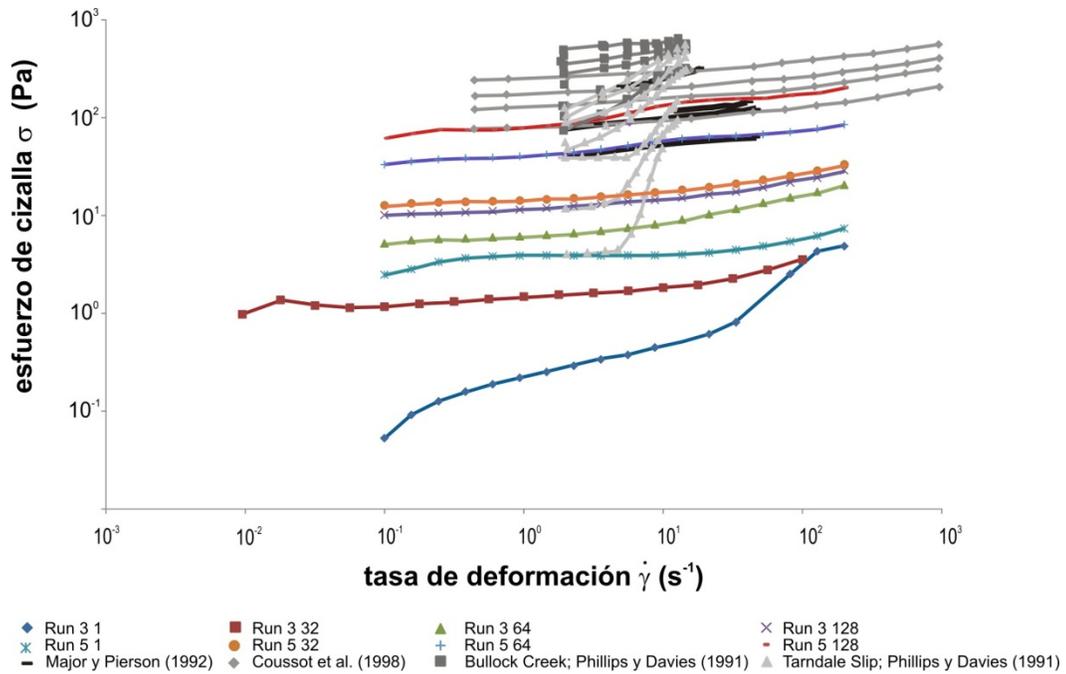


Figura VI.11. Comparación de las curvas de flujo de este trabajo con las de otros autores.

El decremento de la viscosidad con la tasa de deformación observado en intervalos de tiempo definidos indica un comportamiento adelgazante, lo cual es concordante con otros trabajos (Major y Pierson, 1992). Otros autores como Coussot et al. (1998) y Phillips y Davies (1991) describen un comportamiento de tipo dilatante, es decir, que la viscosidad aumenta con la tasa de deformación. Esta diferencia es ocasionada por la distribución granulométrica, por el contenido de agua y/o por el tipo de arcilla.

Por otro lado, el comportamiento que exhiben las suspensiones de arcilla y limo y arcilla ha sido asociado con los cambios estructurales asociados con un flujo macroviscoso (Phillips y Davies, 1991). La arcilla genera cadenas que dan fuerza y cohesión al fluido. Las variaciones en la concentración de las suspensiones utilizadas dan una información cuantitativa de la importancia del contenido de arcilla en el desarrollo de la cedencia y el aumento en la viscosidad aparente.

Las cadenas que forma la arcilla son afectadas por la presencia de arena y limo los cuales, durante la agitación de los clastos, rompen las estructuras formadas por la arcilla y las desvían de este comportamiento. Además, otro factor importante en el comportamiento reológico, es que la arena y el limo también proporcionan un aumento en la cohesión y viscosidad al crear contactos grano a grano, los cuales se incrementan con el tiempo debido a la conminución de las clases granulométricas más gruesas, fenómeno descrito en el capítulo IV.

Este comportamiento, así como el amplio rango de valores observados para la resistencia crítica y la viscosidad son evidencia de que la gran variabilidad observada en estos fenómenos está relacionada con la granulometría y el tipo y contenido de material fino.

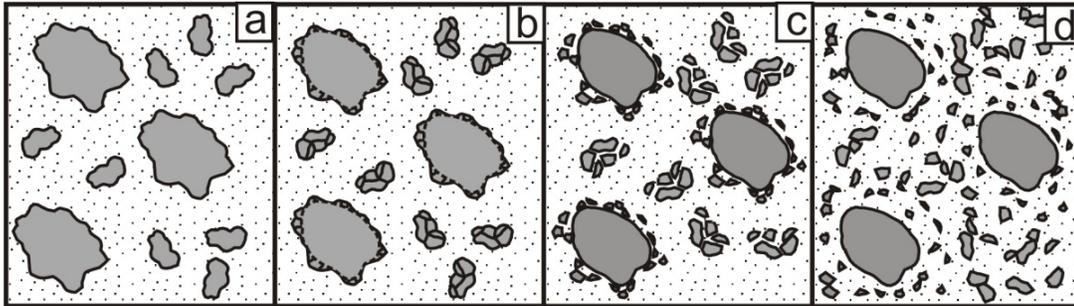


Figura VI.12. Explicación del incremento en la viscosidad aparente y en el esfuerzo de cedencia con el tiempo. a) Granulometría inicial. b) Fracturamiento y conminución de las clases con diámetro  $>2\phi$ . c) Formación de arena y limo. d) Disgregación de los clastos producidos y aumento en los contactos grano a grano que ocasiona un aumento en la cedencia y viscosidad.

Los resultados de este trabajo muestran un comportamiento muy complejo. Mientras en un momento en particular del fluido existe una disminución en la cedencia y en la viscosidad con la tasa de deformación, en general, con el transcurso del tiempo aumenta la viscosidad. Estos resultados aplicados al transporte de flujos de escombros indican que, en las etapas tempranas del transporte, donde ocurren las mayores tasas de deformación, por ser zonas de mayor pendiente, la viscosidad aparente y por lo tanto la movilidad serían realizadas. Conforme disminuye la pendiente, disminuye el esfuerzo de cizalla y la tasa de deformación, lo que produciría un comportamiento más viscoso realzado por la fragmentación, que favorecería la depositación del flujo.

Finalmente, las muestras del fluido obtenidas para Run 2 y Run 4, muestran un comportamiento demasiado inestable para ser evaluado por esta metodología, lo cual es indicativo de que en ausencia de material arcilloso los procesos de segregación son de gran importancia. Por lo tanto, la aplicación generalizada de los modelos reológicos para explicar el comportamiento de flujos de escombros, incluyendo los no cohesivos, requiere ser reevaluada. Además, la reología incluye la condición de tratar con fluidos homogéneos cuya condición en ausencia de arcilla, no se cumple ya que las fases se encuentran siempre separadas (Coussot y Meunier, 1996).

## VII. DISCUSIÓN GENERAL

### VII.1. RECAPITULACIÓN

Los datos presentados acerca de la granulometría, la evolución morfológica y la caracterización reológica arrojan nueva información acerca de la evolución de ciertas características que determinan el comportamiento de los flujos de escombros.

Los cambios más importantes en la granulometría y la morfología tienen lugar en la primera mitad del experimento, antes de los 63 minutos, mientras que en el esfuerzo de cedencia y en la viscosidad ocurren posterior a este punto.

En lo relacionado a la granulometría las modificaciones más importantes son en las fracciones gruesas y arenosas y, en menor magnitud, en el fluido.

Las fracciones gruesas (-6 a  $-4\phi$ ) sufren procesos de conminución, mientras que las partículas comprendidas entre -3 a  $1\phi$ , que forman la parte intermedia del espectro granulométrico total (-6 a  $9\phi$ ), se fragmentan a lo largo de toda su superficie.

La variación en la fracción arenosa también muestra cambios importantes durante el desarrollo de los experimentos. Al inicio, la distribución granulométrica de las arenas muestra una asimetría positiva, posteriormente cambia a una distribución normal y finaliza con una curva de distribución ligeramente negativa (cola a la izquierda). Estos cambios van acompañados de una disminución en el diámetro medio que evidencia el fuerte incremento de arena media a muy fina.

Tanto el proceso de conminución como el de fracturamiento comienzan a actuar desde el inicio del experimento y dan origen a una distribución bimodal, la cual se encuentra completamente desarrollada a los 63 minutos.

Las diferentes características en el porcentaje y tipo de material fino en las mezclas se reflejan en los análisis del fluido, sin embargo, esta fracción es la que muestra menores cambios en la distribución granulométrica durante el transcurso del experimento. Las características de Run 3 y Run 5 indican un aumento considerable en la concentración de sedimentos, que ocasiona el incremento del esfuerzo de cedencia y de la viscosidad.

Distribuciones granulométricas bimodales como las desarrolladas en los experimentos, se han descrito en flujos de escombros reales con contenidos variables de limo y arcilla, especialmente aquellos que recorren grandes distancias. Esta característica ha sido interpretada como el resultado

de procesos de depositación del material más grueso por la pérdida de competencia del flujo, por la erosión de material arenoso del lecho del cauce y por colapsos locales de las paredes y, en algunos casos, por la influencia de material proveniente de cauces tributarios. Los resultados de este estudio experimental pueden dar lugar a otra posible y nueva interpretación de este fenómeno, aunque siempre se deben de considerar los procesos antes mencionados.

El análisis morfológico de la fracción gruesa (partículas mayores a  $-1\phi$  ó 2mm) complementa de forma importante los datos de la granulometría. Los coeficientes morfológicos muestran dos tendencias en función del diámetro. La conminución de las clases granulométricas más gruesas, con diámetros entre  $-6$  y  $4\phi$ , destruye las irregularidades presentes en la superficie de estas partículas y produce clastos con superficies más evolucionadas, es decir, formas más circulares, esquinas más redondeadas y superficies más lisas, como lo demuestran la disminución en los valores de los coeficientes morfológicos  $MC_2$ ,  $MC_{3-8}$ ,  $MC_{30-34}$ , relacionados con la elipticidad, la redondez y las irregularidades a microescala respectivamente. En contraparte, las partículas de las clases de  $-3$  a  $-1\phi$  mantienen valores altos en estos coeficientes, y permanecen elongadas, angulares y con irregularidades en su superficie a lo largo de todo el experimento, resultado del fracturamiento masivo que produce la pérdida de estas fracciones.

Los cambios en la morfología son de gran importancia en los flujos de escombros, ya que mientras más irregulares sean las partículas, menor es su velocidad de sedimentación. La evolución morfológica en las diferentes mezclas indica que, aunque en las mezclas ricas en material fino, las irregularidades disminuyen en mayor proporción, dichos cambios ocurren principalmente entre los 31 y 63 minutos, por lo que en las primeras etapas del experimento se mantienen elongadas. Este fenómeno podría ser un factor importante en la capacidad de los flujos para mantener grandes bloques en suspensión durante el transporte.

Los procesos de conminución y fracturamiento son producto de la intensa interacción entre clastos que ocurre en las mezclas, y son independientes del tipo de material fino presente. Las modificaciones en la granulometría de la fracción gruesa ( $\geq -1\phi$  ó 2 mm) ocurren más rápidamente en Run 2 y Run 5, mezclas con menor contenido de material fino y con mayor contenido de arcilla, respectivamente. En contraste, en los experimentos Run 3 y Run 4, donde se utilizaron mezclas con mayor contenido de limo en la etapa inicial de los experimentos, las modificaciones de la forma ocurren lenta y gradualmente.

Otro resultado importante en los experimentos es que entre los 31 y 63 minutos se observan cambios abruptos tanto en los parámetros estadísticos como en la morfología, relacionados con la pérdida de las fracciones intermedias, lo que indica un cambio en los procesos de interacción debido a la saturación de arena y limo.

En la caracterización reológica de las mezclas con arcilla (Run 3 y Run 5), el esfuerzo de cedencia y la viscosidad aparente aumentan con el tiempo. A diferencia de los resultados de la granulometría y la morfología, dichos cambios ocurren en la segunda mitad del experimento, posterior a los 31-63 minutos de duración. Los valores del esfuerzo de cedencia y de la viscosidad aparente se atribuyen a la presencia de arcilla en las mezclas pero, adicionalmente, están influenciados por la cantidad de arena y limo.

Por el contrario, las mezclas sin arcilla, Run 2 y Run 4, son altamente inestables y en ellas ocurren procesos de segregación, por lo que no fue posible su caracterización reológica.

## VII.2. REVISIÓN DE LOS MODELOS ACTUALES DE FLUJOS DE ESCOMBROS

Los modelos de transporte y depositación de los flujos de escombros existentes en la actualidad no explican todas las características de los depósitos producidos por estos fenómenos. Por un lado, están los modelos que tratan con flujos relativamente uniformes y establecen como mecanismo dominante en la dinámica del flujo las propiedades del material fino (Johnson, 1970). En el otro extremo, se encuentran los modelos que toman en cuenta únicamente las colisiones entre partículas como el medio principal para la transferencia de energía cinética (Bagnold, 1954; Takahashi, 1978) (Figura VII.1). El modelo “plug flow” no toma en cuenta las interacciones entre partículas, por lo que el grado de agitación interna está limitado y los clastos tienen poca movilidad dentro del flujo. En contraste, en el modelo de flujo granular inercial, la dinámica completa recae en el intenso grado de agitación. El modelo Coulomb-viscoso toma en cuenta ambos aspectos en la dinámica y explica de mejor manera el transporte de este tipo de fenómenos (Iverson, 1997).

En el otro lado del espectro, están los modelos que tratan con flujos no homogéneos, vertical y/o lateralmente. Los modelos que dividen a los flujos de escombros a nivel vertical postulan la existencia de una carpeta de tracción en la base y una suspensión más diluida en la parte superior (Lowe, 1982; Postma et al, 1988) y en sentido horizontal distinguen cabeza, cuerpo y cola (Vallance y Scott, 1997). Todos estos modelos difieren en el perfil de velocidad y en la forma en que la energía cinética se transforma, o se disipa, para producir el transporte y depositación del flujo (Figura VII.1).

Cualquier modelo que se aplique debe explicar las características más importantes de los flujos en movimiento y las características de sus depósitos como lo son el frente lobular, la presencia de grandes bloques en suspensión dentro de los depósitos y su gran movilidad. Además, muchos depósitos presentan gradación normal (Vallance y Scott, 1997) o inversa (Postma et al, 1988), y se observa en el depósito la presencia de una carpeta de tracción que sugeriría un flujo estratificado o el emplazamiento en partes.

Cada uno de los diversos modelos de transporte y depositación presenta ciertas debilidades en explicar algunos fenómenos y esto se debe también a la gran diversidad que presentan en las características del material y la concentración de agua, aunado al ambiente de generación y las características morfológicas del terreno por donde se desplazan.

Los resultados de este trabajo apuntan a que los procesos de interacción entre partículas son un mecanismo dominante dentro de los flujos de escombros, aún en el caso de la presencia de material limo-arcilloso en la matriz. Sin embargo, la transición entre un flujo granular inercial y un flujo tipo *plug flow* podría darse, no sólo por el aumento en el contenido de material fino en la matriz, sino también por el tiempo. Además, los procesos de segregación que dan lugar a la formación de flujos estratificados, ya sea horizontal o verticalmente, están influenciados por el tipo de fluido intersticial presente y son favorecidos en ausencia de material fino, especialmente la arcilla.

Existen numerosas descripciones de los flujos de escombros en la literatura que definen a estos fenómenos con base en la concentración de sedimentos (Costa, 1984; Vallance y Scott, 1997; Zanuttigh y Lamberti, 2007; Dumaisnil et al., 2010; ver tabla II.1). Esta característica es de gran importancia porque determina las características reológicas de los flujos de escombros, sin embargo, estas definiciones deben de revisarse ya que a la misma concentración, los valores de la resistencia crítica pueden variar en más de un orden de magnitud durante el transporte, debido a las modificaciones en la granulometría, especialmente en flujos ricos en arcilla, como lo demuestran los datos de la caracterización reológica.

En consecuencia, los modelos “estáticos” descritos anteriormente pueden resultar insuficientes, ya que no consideran la mutabilidad de los flujos de escombros. Los resultados de este trabajo indican que el efecto de la conminución y la fragmentación es similar al aumento de concentración de sedimentos, como lo demuestran los cambios en el esfuerzo de cedencia y en la viscosidad aparente. Esta conclusión es importante pues nunca se había documentado de forma cuantitativa el aumento en estos parámetros por el cambio en la distribución granulométrica debido a procesos internos dentro de los flujos.

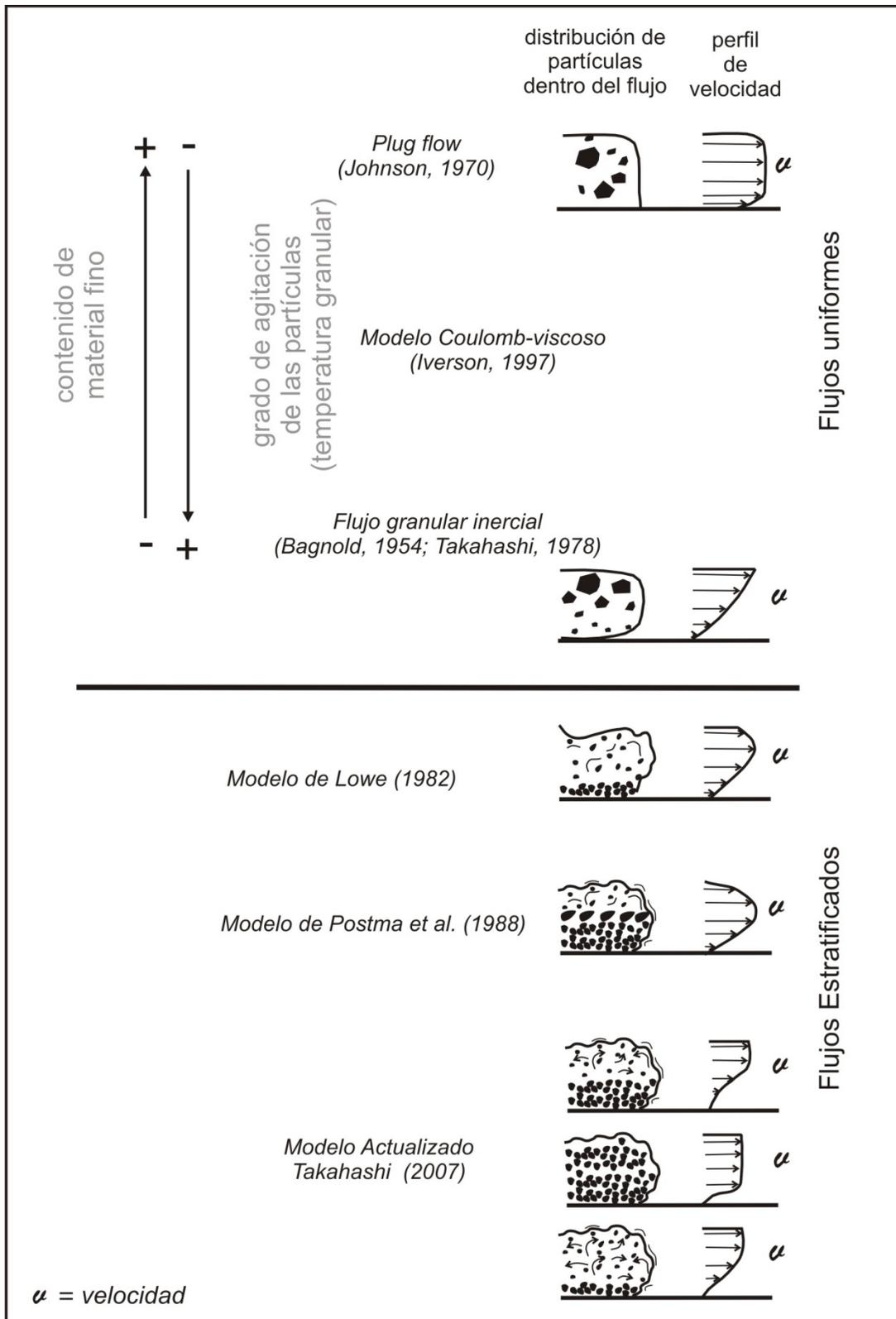


Figura VII.1. Modelos de transporte más importantes aplicados a flujos de escombros.

### VII.3. IMPORTANCIA DEL LIMO Y DE LA ARCILLA

La importancia del material fino en los flujos de escombros está ampliamente documentada (Scott et al., 1995; Vallance y Scott, 1997) y recae principalmente en la arcilla como inhibidor de los procesos de depositación de los clastos gruesos, en la colisión entre partículas, en la dilución de estos flujos con cuerpos de agua y en el realce de la movilidad por su efecto lubricante.

Cuando un flujo de escombros contiene gran cantidad de material arcilloso se asume que se encuentra en un régimen macroviscoso que impide los procesos de interacción entre partículas, los cuales en ausencia de material fino, dominan la dinámica del flujo.

Los experimentos en la máquina de Los Ángeles indican que, sin duda, la arcilla juega un papel importante en el desarrollo del esfuerzo de cedencia y en el aumento de la viscosidad aparente, así como en la desaparición de irregularidades a microescala en la superficie de las partículas.

Sin embargo, con base en los resultados de este trabajo, el limo también desempeña un rol primario en otros aspectos dentro del flujo como por ejemplo, en las variaciones en la distribución granulométrica y en la evolución morfológica de las partículas, los cuales influyen en la dinámica y en las condiciones de sedimentación. En el primer aspecto, los cambios en las fracciones gruesas y arenosas son más graduales en las mezclas Run 3 y Run 4, que contienen mayor cantidad de limo al inicio de los experimentos, mientras que en las mezclas con menor cantidad material limoso al inicio, Run 2 y Run 5, los cambios se presentan más rápidamente, independientemente del alto contenido de arcilla presente en Run 5. En lo relacionado con la morfolología, el limo es importante en la evolución morfológica de los sedimentos y su influencia se ve claramente en la disminución uniforme de las irregularidades gruesas, relacionadas con la redondez de las partículas, que como se explicó en el capítulo V, puede retardar la velocidad de sedimentación.

Por lo tanto, el origen de la cohesión en flujos de escombros debe ser reevaluado, ya que el limo puede aportar propiedades similares en estos flujos. Un ejemplo de esto, lo constituye el depósito El Naranjo (Nevado de Toluca, México; Capra y Macías, 2002), con alto contenido de material limoso y características de flujo de escombros cohesivo, tanto en la distancia recorrida como en sus características texturales.

Por lo tanto, la clasificación de los flujos de escombros, las interpretaciones de su dinámica y sobre todo las implicaciones del peligro asociado a estos fenómenos, basadas únicamente en la arcilla presente en los depósitos, debe ser reevaluada, como lo demuestran los resultados de estos experimentos y las características observadas en flujos de escombros reales.

Finalmente, cualquier modelo que sea propuesto para explicar la dinámica de flujos de escombros debe considerar las modificaciones en la granulometría durante el transporte y la influencia del material limoso.

#### VII.4. MODELO PROPUESTO

Con base en los datos anteriores se propone el siguiente modelo para el transporte y depositación de los flujos de escombros, definido en cuatro etapas (Figura VII.2):

**Etapa 1 ( $E_1$ ) - Agitación.** En un instante  $t_0$  la masa es puesta en movimiento. Para flujos de escombros originados por la erosión progresiva de material, este instante corresponde al momento en que el fluido presenta la concentración de sedimentos adecuada para clasificarse como flujo de escombros.

En un inicio los flujos de escombros se mueven como pulsos agitados. Este grado de agitación es el resultado de su desplazamiento sobre mayores pendientes que ocasiona una mayor velocidad y altos esfuerzos de cizalla, lo que trae como consecuencia la disminución del efecto de la viscosidad, ya que como se mencionó en el capítulo de la reología, a mayor esfuerzo de cizalla, la viscosidad aparente es menor ( $\mu_1$ ). El alto grado de agitación produce una fuerte interacción entre partículas, ya sea por colisión o por fricción y probablemente se tendría el desarrollo de cierto grado de turbulencia a nivel local dentro del flujo, pero esto dependerá de la velocidad inicial, de la concentración de sedimentos y de la cantidad de material fino presente.

**Etapa 2 ( $E_2$ ) - Fracturamiento.** La interacción por colisión o por fricción ocasiona la aparición de fracturas principalmente sobre las irregularidades presentes en las partículas gruesas ( $-6$  a  $-4\phi$ ) y a lo largo de la superficie de las partículas de  $-1$  a  $-3\phi$ . La velocidad a la que se desarrollan estará en función del tipo de material al inicio del movimiento, desarrollándose más rápido en flujos pobres en material limoso y más lento en presencia abundante de este material.

El alto grado de agitación produce una fuerte interacción entre partículas. Esta interacción probablemente genera cadenas de fuerza como las descritas por Davies y McSaveney (2009) que al momento de destruirse aumentan la fluidez de los flujos y favorecen su desplazamiento.

En esta etapa tienen lugar los principales cambios en la granulometría y en la morfología.

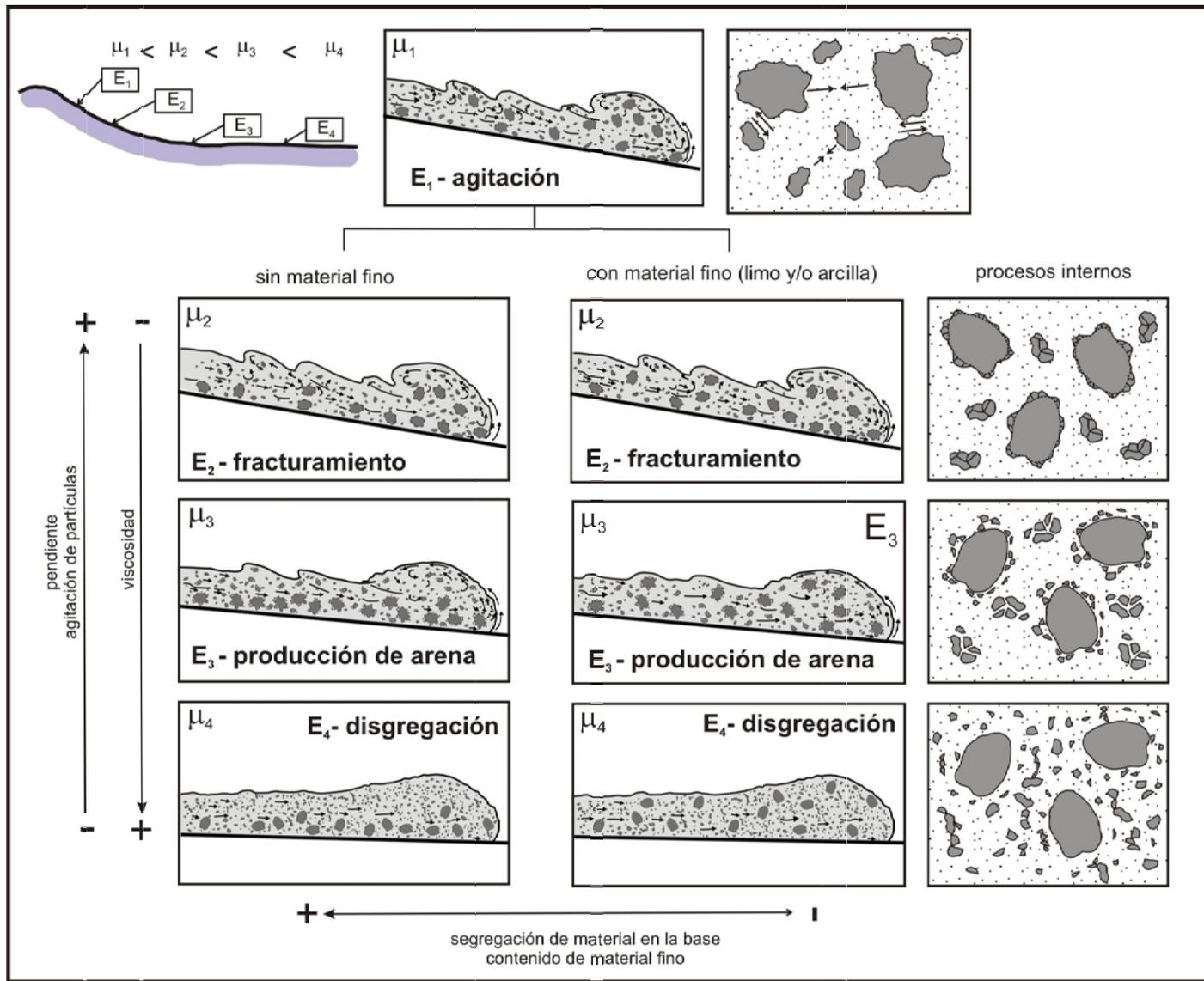


Figura VII.2. Modelo de transporte y deposición para flujos de escombros con contenido variable de material fino.

**Etapa 3 ( $E_3$ ) – Producción de arena.** Se alcanza el grado máximo de producción de arena, que da lugar a la bimodalidad en la distribución granulométrica. En flujos de escombros con gran cantidad de arcilla en la matriz, iría acompañada de un incremento en el esfuerzo de cedencia y en la viscosidad aparente ( $\mu_3$ ).

Este periodo concluye cuando ya no existe material disponible para continuar el proceso de fracturamiento y las partículas más grandes ya no presentan más irregularidades que puedan ser rotas y se detiene el proceso de conminución.

En el caso de estos experimentos las mezclas se mantuvieron en rotación en la máquina de Los Ángeles hasta que este fenómeno estuviera completo y las partículas gruesas alcanzaran un alto grado de redondeamiento. En flujos de escombros naturales la eficiencia de este proceso dependerá del grado de agitación en las primeras etapas del flujo y de la distancia recorrida. Pero en flujos de escombros, con poco material limoso al inicio de su movimiento, sería más rápido. En el caso de flujos ricos en limo este proceso actúa de forma mucho más lenta y progresiva.

Los histogramas granulométricos reportados para el caso de flujos de escombros reales indican que este fenómeno se puede presentar tan pronto como a los 13 km de distancia, como en el depósito de Atenquique (Saucedo et al., 2008) o a distancias mayores a los 30 km, como en los depósitos South Fork (Scott, 1988) y Osceola Mudflow (Vallance y Scott, 1997). La aparición temprana o tardía de dicha bimodalidad podría estar en función del contenido de material fino presente en la matriz, que es menor en el depósito Atenquique, lo cual está apoyado por datos de nuestros experimentos donde Run 2 es la mezcla que presenta cambios más rápidos pero nuestros datos no son concluyentes en este aspecto. Además, en el desarrollo de la bimodalidad también influyen factores como la depositación y la incorporación de sedimentos.

**Etapa 4 ( $E_4$ ) - Disgregación.** La gran cantidad de arena y limo formada se distribuye a lo largo del flujo. La disminución de la pendiente, de la velocidad y por tanto del esfuerzo de cizalla, genera una mayor influencia de la viscosidad aparente ( $\mu_4$ ) y un aumento de más de un orden de magnitud en el esfuerzo de cedencia. Además, el aumento en proporción de material disminuye el espacio existente entre cada una de las partículas dentro del flujo, que inhibe la agitación de los clastos y ocasiona la disminución de la temperatura granular del fluido y la pérdida de movilidad. Las nuevas condiciones dentro del flujo favorecerían su depósito con el desarrollo de un frente abrupto, con forma lobular, características distintivas de los depósitos de flujos de escombros.

*Procesos de segregación*

En el caso de flujos de escombros pobres en material arcilloso tendrían lugar procesos de segregación vertical, como lo indican los resultados de la caracterización reológica, que probablemente producirían el desarrollo de una carpeta de tracción y una parte superior diluida, lo cual es descrito ampliamente en la literatura (Lowe, 1982; Postma et al., 1988; Vallance y Scott, 1997; Takahashi, 2007). Los procesos observados de segregación que ocurrieron durante la caracterización reológica, aunque a diferente escala, podrían ser un reflejo de los procesos en escala real, por lo que el grado de segregación vertical (en carpeta de tracción y suspensión diluida) y horizontal (cabeza, cuerpo y cola) dependerá de las propiedades del material, del grado de concentración, así como de los cambios en la granulometría y en la forma de las partículas. Esta última influye en la velocidad de sedimentación, pero la magnitud de esa influencia es difícil de estimar en flujos en el rango de concentración de los flujos de escombros.

*Consideraciones generales acerca del modelo propuesto*

El modelo propuesto toma en cuenta la importancia de cada uno de los integrantes del material fino por separado, la eficiencia de los procesos de interacción entre clastos, características dominantes en los flujos de escombros y hace una revisión de los modelos por flujos homogéneos y por procesos de segregación.

En el caso de pequeños flujos de escombros en ambientes continentales formados por el deslizamiento de suelos, este fenómeno podría desarrollarse de forma incipiente debido a que éstos recorren pequeñas distancias desde su centro de formación (Ellen y Fleming, 1987).

En los flujos de escombros en ambientes volcánicos y submarinos los procesos descritos que actúan en la dinámica, así como el modelo propuesto podría ser fácilmente aplicable, ya que este tipo flujos son los que recorren mayores distancias desde su fuente y la evolución de sus características granulométricas, así como los valores del esfuerzo de cedencia y de las viscosidades aparentes muestran buena correlación con los resultados de este trabajo.

Por lo tanto, este estudio puede constituir una nueva aproximación al estudio de los flujos de escombros, ya que su dinámica no debe ser evaluada únicamente por los depósitos, también debe incluir el estudio de estos fenómenos cuando estos flujos se encuentran bajo un régimen de erosión

o no depositación. Asimismo, aplica un nuevo concepto desarrollado por Davies y McSaveney (2009) utilizado hasta ahora para avalanchas o flujos granulares secos a los flujos de escombros.

Otro aspecto importante es que aun cuando los procesos de interacción entre partículas y la cataclasis (Scott, 1988; Major, 1997) son ampliamente aceptados como procesos dominantes en la dinámica de los flujos de escombros, el hecho de que dichos procesos sean capaces de modificar completamente las características granulométricas iniciales, los hace de gran importancia.

Este tipo de experimentos analógicos permitieron observar dicho fenómeno y medirlo de forma cuantitativa, lo cual no hubiera sido posible en el caso de flujos naturales por los procesos de erosión y sedimentación. Sin embargo, se debe de tomar en cuenta que se realizaron en un sistema cerrado y no incluyen fenómenos que ocurren comúnmente en flujos de escombros reales, como la erosión de una gran cantidad de material del lecho del cauce, la unión con material proveniente de cauces tributarios, los cambios en la geometría del canal o la disminución de la pendiente.

### VIII. CONCLUSIONES

- El presente trabajo, basado en trabajo experimental, arroja nuevos datos acerca de los procesos internos que actúan dentro de mezclas que simulan flujos de escombros con diferente composición de material fino. Los resultados de dichos experimentos muestran buena concordancia con las características granulométricas, morfológicas y reológicas observadas en flujos de escombros naturales.
- Los resultados de la granulometría indican que las partículas con diámetro superior a  $-1\phi$  sufren procesos de conminución y fracturamiento que producen un alto contenido de arena en la matriz y son capaces de modificar completamente la granulometría de las mezclas, lo que produce histogramas granulométricos bimodales, característicos de depósitos de flujos de escombros cohesivos y no cohesivos, y ofrecen una nueva teoría para su formación basada en los procesos de interacción entre partículas.
- La evolución morfológica en partículas que semejan flujos de escombros muestra tendencias diferentes en función del diámetro de las partículas. Las partículas más grandes muestran mayores cambios en la elipticidad, redondez y rugosidad de sus superficies y se vuelven más redondeadas y con perfiles más suaves. Los clastos más pequeños se mantienen con forma irregular. El cambio de forma entre estas clases granulométricas es gradual y sigue una ley de potencia. Este fenómeno, es el resultado de los procesos de interacción entre partículas.
- La caracterización reológica de las muestras con arcilla indica un aumento en el esfuerzo de cedencia y en la viscosidad aparente con el tiempo, el cual está relacionado principalmente con la cantidad de arcilla presente en las mezclas y, de forma secundaria, por la arena y el limo generados por conminución y fragmentación. En contraste, las muestras sin arcilla se mantienen inestables y desarrollan procesos de segregación de partículas durante todo el experimento, por lo que no se deben aplicar modelos reológicos para explicar el comportamiento de flujos de escombros con bajo contenido de este material.
- El limo desempeña un rol primario en las variaciones de la distribución granulométrica y en la evolución morfológica de las partículas, los cuales influyen en la dinámica interna y en las condiciones de sedimentación.
- La clasificación de los flujos de escombros, las interpretaciones de su dinámica y sobre todo las implicaciones del peligro asociadas con estos fenómenos, basadas únicamente en la arcilla presente en los depósitos debe ser reevaluada, como lo demuestran los resultados de estos experimentos y las características observadas en flujos de escombros reales.
- El modelo de transporte y emplazamiento propuesto toma en cuenta, tanto las características de la matriz como la interacción de partículas, y está basado en los cambios

- granulométricos, morfológicos y reológicos con el tiempo. Además, toma en cuenta la importancia de cada uno de los integrantes del material fino por separado, la eficiencia de los procesos de interacción entre clastos, características dominantes en los flujos de escombros y hace una revisión de los modelos por flujos homogéneos y por procesos de segregación.
- El estudio de los flujos de escombros basado en esta nueva aplicación de la máquina de Los Ángeles es una poderosa herramienta para entender la dinámica de los procesos que operan dentro de ellos.

## REFERENCIAS

- Adams, J., 1978. Data for New Zealand pebble abrasion studies. *New Zealand Journal of Science*, 21: 607-610.
- Aguilera, E., Pareschi, M.T., Rosi, M. y Zanchetta, G., 2004. Risk from lahars in the Northern Valleys of Cotopaxi Volcano (Ecuador). *Natural Hazards* 33: 161-189.
- Amy, L.A., Talling, P.J., Edmonds, V.O., Sumner, E.J. y Lesueur, A., 2006. An experimental investigation of sand-mud suspension settling behaviour: implications for bimodal mud contents of submarine flow deposits. *Sedimentology*, 53: 1411-1434.
- Bagnold, R.A., 1954. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings of the Royal Society of London*, A225: 49-63.
- Barrett, P.J., 1980. The shape of rock particles, a critical review. *Sedimentology*, 27: 291-303.
- Borselli, L. y Sarocchi, D., 2004, 2012. DECOLOG.
- Branney, M.J. y Kokelaar, P., 1992. A reappraisal of ignimbrite emplacement: progressive aggradation and changes from particulate to non-particulate flow during emplacement of high grade ignimbrite. *Bulletin of Volcanology*, 54: 504-520.
- Capra, L. y Macías, J.L., 2000. Pleistocene cohesive debris flows at Nevado de Toluca Volcano, central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102: 149-168.
- Capra, L. y Macías, J.L., 2002. The cohesive Naranjo debris-flow deposit (10km<sup>3</sup>): A dam breakout flow derived from the Pleistocene debris-avalanche deposit of Nevado de Colima Volcano (México). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 117: 213-235.
- Capra, L., Poblete, M.A. y Alvarado, R., 2004. The 1997 and 2001 lahars of Popocatepetl volcano (Central Mexico): textural and sedimentological constraints on their origin and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131: 351-369.
- Carrasco-Núñez, G., Vallance, J.W. y Rose, W.I., 1993. A voluminous avalanche-induced lahar from Citlaltépetl volcano, Mexico: Implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59: 35-46.
- Carreras, L., 2008. Criterios de discriminación en base al análisis de la textura de los depósitos volcanoclásticos del volcán Nevado de Toluca, México. Tesis Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, 154 pp.
- Costa, J.E., 1984. Physical geomorphology of debris flows. In: J.E. Costa and P.J. Fleisher (Editors), *Developments and applications of Geomorphology*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 269-317.
- Cousot, P., Laigle, D., Arattano, M., Deganutti, A. y Marchi, L., 1998. Direct determination of rheological characteristics of debris flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(8): 865-868.
- Cousot, P. y Meunier, M., 1996. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth Science Reviews* 40: 209-227.
- Cousot, P. y Piau, J.M., 1994. On the behavior of fine mud suspensions. *Rheologica Acta*, 33: 175-184.
- Davies, T.R. y McSaveney, M.J., 2009. The role of rock fragmentation in the motion of large landslides. *Engineering Geology*, 109: 67-79.
- Davis, J.C., 1986. *Statistics and data analysis in Geology*. John Wiley & Sons New York, 646 pp.
- Dellino, P. y La Volpe, L., 1996. Image processing analysis in reconstructing fragmentation and transportation mechanisms of pyroclastic deposits. The case of Monte Pilato-Rocche Rosse eruptions, Lipari (Aeolian islands, Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 71: 13-29.
- Dellino, P. y Liotino, G., 2002. The fractal and multifractal dimension of volcanic ash particles contour: a test study on the utility and volcanological relevance. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113: 1-18.
- Diepenbroek, M., Bartholomä, A. y Ibbeken, H., 1992. How round is round? A new approach to the topic 'roundness' by Fourier grain shape analysis. *Sedimentology*, 39(3): 411-422.

- Dietrich, W.E., 1982. Settling velocity of natural particles. *Water Resources Research*, 18(6): 1615-1626.
- Dumaisnil, C., Thouret, J.C., Chambon, G., Doyle, E.E., Cronin, S.J. y Surono, 2010. Hydraulic, physical and rheological characteristics of rain-triggered lahars at Semeru volcano, Indonesia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35: 1573-1590.
- Ehrlich, R. y Weinberg, B., 1970. An exact method for characterization of grain shape. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40(1): 205-212.
- Ellen, S.D. y Fleming, R.W., 1987. Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay region, California. In: J.E. Costa and G.F. Wieczorek (Editors), *Debris flows/Avalanches: Process, recognition, and mitigation*. Geological Society of America, Boulder, Colorado, pp. 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, Washinton. *Geophysical Research Letters*, 8(1): 43-46.
- Fisher, R.V., 1971. Features of coarse-grained, high-concentration fluids and their deposits. *Journal of Sedimentary Petrology*, 41: 916-927.
- Folk, R. y Ward, W., 1957. Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1): 3-26.
- Gaudin, A.M., 1926. An investigation of crushing phenomena. *Transactions AIME*, 73: 253-316.
- Goldsmith, H.L. y Mason, S.G., 1967. The microrheology of dispersions. In: F.R. Eirich (Editor), *Rheology: Theory and applications*. Academic Press., pp. 87-205.
- Goossens, D., 2008. Techniques to measure grain-size distributions of loamy sediments: a comparative study of ten instruments for wet analysis. *Sedimentology*, 55: 65-96.
- Hampton, M.A., 1975. Competence of fine-grained debris flows. *Journal of Sedimentary Petrology*, 45(4): 834-844.
- Hübl, J. y Steinwendtner, H., 2000. Estimation of rheological properties of viscous debris flow using a belt conveyor. *Physics and Chemistry of the Earth; Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(9): 751-755.
- Hsu, L., Dietrich, W.E. y Sklar, L.S., 2008. Experimental study of bedrock erosion by granular flows. *Journal of Geophysical Research*, 113(F02001): 1-21.
- Imre, B., Laue, J. y Springman, S.M., 2010. Fractal fragmentation of rocks within sturzstroms: Insight derived from physical experiments within the ETH geotechnical drum centrifuge. *Granular Matter*, 12: 267-285.
- Iverson, R.M., 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3): 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*, 25: 85-138.
- Iverson, R.M. y Vallance, J.W., 2001. New views of granular mass flows. *Geology*, 29(2): 115-118.
- Jan, C. D. y Shen, H.W., 1997. Review dynamic modelling of debris flows In: A. Armanini and M. Michiue (Editors), *Recent developments on Debris Flows*. Lecture Notes in Earth Sciences. Springer, pp. 93-116.
- Johnson, A.M., 1970. *Physical processes in Geology: a method for interpretation of natural phenomena; intrusions in igneous rocks, fractures, and folds, flows of debris and ice*. Freeman, Cooper, and Company, San Francisco, 577 pp.
- Kaitna, R. y Rickenmann, D., 2007. A new experimental facility for laboratory debris flow investigation. *Journal of Hydraulic Research*, 45(6): 797-810.
- Kaye, B.H., 1999. *Characterization of Powder and Aerosol*, 1. Wiley-VCH, New York, 312 pp.
- Komar, P.D. y Reimers, C.E., 1978. Grain shape effects on settling rates. *Journal of Geology*, 86(2): 193-209.
- Konert, M. y Vandenberghe, J., 1997. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, 44: 523-535.
- Krumbein, W.C., 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 11(2): 64-72.
- Lewin, J. y Brewer, P.A., 2002. Laboratory simulation of clast abrasion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27: 145-164.

- Longo, S. y Lamberti, A., 2002. Grain shear flow in a rotating drum. *Experiments in fluids*, 32: 313-325.
- Lowe, D.R., 1982. Sediment Gravity Flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52(1): 279-297.
- Major, J.J., 1997. Depositional processes in large-scale debris flow experiments. *Journal of Geology*, 105: 345-366.
- Major, J.J. y Pierson, T.C., 1992. Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resources Research*, 28(3): 841-857.
- Manga, M., Patel, A. y Dufek, J., 2011. Rounding of pumice clasts during transport: field measurements and laboratory studies. *Bulletin of Volcanology*, 73(3): 321-333.
- Middleton, G.V. y Hampton, M.A., 1976. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows In: D.J. Stanley and D.J.P. Swift (Editors), *Marine sediment transport and environmental management*. Wiley and Sons, New York, pp. 197-218.
- O'Brien, J. y Julien, P., 1988. Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8): 877-887.
- Phillips, C.J. y Davies, T.R.H., 1991. Determining rheological parameters of debris flow material. *Geomorphology*, 4: 101-110.
- Pierson, T.C., 1981. Dominant particle support mechanisms in debris flows at Mt Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility. *Sedimentology*, 28: 49-60.
- Pierson, T.C., 1986. Flow behaviour of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. In: A.D. Abrahams (Editor), *Hillslope processes*. Allen & Unwin, Boston, pp. 269-296.
- Pierson, T.C., 1995. Flow characteristics of large eruption-triggered debris flow at snow-clad volcanoes: constraints for debris-flow models. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 66: 283-294.
- Pierson, T.C., 1998. An empirical method for estimating travel times for wet volcanic mass flows. *Bulletin of Volcanology*, 60: 98-109.
- Pierson, T.C. y Scott, K., 1998. Surficial hydrologic hazards at volcanoes, USGS Open File Report-1998.
- Pierson, T.C. y Costa, J.C., 1987. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. In: J.E. Costa and G.F. Wieczorek (Editors), *Debris Flows/Avalanches: Process; recognition, and mitigation*. GSA Reviews in Engineering Geology, pp. 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*, 41: 17-66.
- Pierson, T.C. y Scott, K.M., 1985. Downstream dilution of a lahar: Transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Resources Research*, 21(10): 1511-1524.
- Postma, G., Nemeč, W. y Kleinspehn, K.L., 1988. Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement. *Sedimentary Geology*, 58: 47-61.
- Pudasaini, S.P., Wang, Y. y Hutter, K., 2005. Modelling debris flows down general channels. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5: 799-819.
- Pulgarín, B.A., 2000. Depósitos masivos del Pleistoceno Tardío asociados al colapso del flanco sur del volcán Nevado del Huila (Colombia). Tesis Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 135 pp.
- Rodine, J.D. y Johnson, A.M., 1976. The ability of debris, heavily freighted with coarse clastic materials to flow on gentle slopes. *Sedimentology*, 23: 213-224.
- Sarocchi, D., 2006. Análisis textural del depósito de flujo de bloques y ceniza del 17 de julio de 1999 en el volcán de Colima. Tesis Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 222 pp.
- Sarocchi, D., 2007. Estudio sedimentológico del depósito de flujo de bloques y ceniza del 17 de julio de 1999 en el volcán de Colima. *Monografías del Instituto de Geofísica*, 11. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 92 pp.
- Sarocchi, D., Sulpizio, R., Macías, J.L. y Saucedo, R., 2011. The 17 July 1999 block-and-ash flow (BAF) at Colima Volcano: New insights on volcanic granular flows from textural analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 204: 40-56.

- Sassa, K. y Wang, G., 2005. Mechanism of landslide-triggered debris flows: Liquefaction phenomena due to the undrained loading of torrent deposits. In: M. Jakob and O. Hungr (Editors), *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer-Praxis, Chichester, UK, pp. 81-104.
- Saucedo, R., Macías, J.L., Sarocchi, D., Bursik, M. y Rupp, B., 2008. The rain-triggered Atenquique volcanoclastic debris flow of October 16, 1955 at Nevado de Colima Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 173: 69-83.
- Savage, S.B. y Lun, C.K.K., 1988. Particle size segregation in inclined chute flow of dry cohesionless granular solids. *Journal of Fluid Mechanics*, 189: 311-335.
- Schwarcz, H.P. y Shane, K.C., 1969. Measurement of particle shape by Fourier analysis. *Sedimentology*, 13: 213-231.
- Scott, K., Macías, J.L., Naranjo, J.A., Rodríguez, S. y McGeehin, J.P., 2001. Catastrophic debris flows transformed from landslides in volcanic terrains: Mobility, hazard assessment, and mitigation strategies. *U.S.G.S Professional Paper(1630)*: 59.
- Scott, K.M., 1988. Origin, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz river system. *USGS Professional Paper*, 1447-A: 72.
- Scott, K.M., Vallance, J.W. y Pringle, P.T., 1995. Sedimentology, behavior, and hazards of debris flows at Mount Rainier, Washington. *USGS Professional Paper*, 1547: 56pp.
- Sohn, Y.K., 2003. Transformation of cohesive and noncohesive debris flows in subaerial and subaqueous settings. *Geophysical Research Abstracts*, 5(02030).
- Takahashi, T., 1978. Mechanical characteristics of debris flow, *Proceedings ASCE. Journal of Hydraulic Division*, pp. 1153-1169.
- Takahashi, T., 1991. *Debris flow*. A. A. Balkema, Brookfield, 165 pp.
- Takahashi, T., 2007. *Debris flow: Mechanics, prediction and countermeasures*. Taylor & Francis, Leiden, 448 pp.
- Takahashi, T., 2009. A review of japanese debris flow research. *International Journal of Erosion Control Engineering* 2(1).
- 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*, 109(2): 143-163.
- Wentworth, C.K., 1919. A laboratory and field study of cobble abrasion. *Journal of Geology*, 27: 507-521.
- Wieczorek, G.F., Larsen, M.C., Eaton, L.S., Morgan, B.A. y Blair, J.L., 2001. Debris-flow and flooding hazards associated with the December 1999 storm in coastal Venezuela and strategies for mitigation. *U. S. Geological Survey Open file report* 01-0144.
- Xu, R. y Di Guida, O.A., 2003. Comparison of sizing small particles using different technologies. *Powder Technology*, 132: 145-153.
- Zanuttigh, B. y Lamberti, A., 2007. Instability and surge development in debris flows. *Reviews of Geophysics*, 45(RG3006): 1-45.

## **APÉNDICES**

## **A. GRANULOMETRÍA**

A 1. Granulometría de la fracción gruesa (-6 a -1 $\phi$ ) de las cuatro mezclas utilizadas en los experimentos y sus variaciones con el tiempo y número de revoluciones en la máquina de Los Angeles.

<b>Run 2</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Diámetro ( $\phi$ )	peso (%)							
-6	16.64	21.00	0.00	27.47	0.00	0.00	0.00	0.00
-5	21.79	20.64	35.45	11.37	48.13	57.20	36.23	45.05
-4	20.17	26.99	14.36	27.55	35.20	30.63	59.67	52.41
-3	16.71	11.16	15.12	13.78	8.67	8.22	3.11	2.27
-2	15.73	12.24	14.74	11.29	5.02	2.94	0.66	0.13
-1	8.96	7.98	20.33	8.55	2.98	1.01	0.33	0.13

<b>Run 3</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Diámetro ( $\phi$ )	peso (%)							
-6	39.96	38.33	38.39	35.71	33.97	23.44	0.00	0.00
-5	9.70	22.27	22.80	19.36	27.37	36.68	45.04	25.31
-4	18.55	16.47	15.38	25.78	23.88	31.48	53.99	73.08
-3	13.20	10.01	10.20	10.08	8.45	5.99	0.76	1.32
-2	12.40	8.67	8.63	6.27	4.47	1.73	0.15	0.22
-1	6.20	4.26	4.60	2.81	1.85	0.68	0.05	0.07

<b>Run 4</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Diámetro ( $\phi$ )	peso (%)							
-6	23.85	21.80	21.28	42.94	26.11	24.51	0.00	0.00
-5	11.32	30.21	28.85	17.34	23.89	29.59	63.42	61.91
-4	25.19	17.77	19.61	14.81	27.11	30.27	32.31	36.19
-3	15.92	11.08	14.19	12.00	10.64	10.02	3.06	1.30
-2	15.03	11.67	10.85	8.90	8.12	3.95	0.81	0.40
-1	8.70	7.46	5.22	4.02	4.13	1.67	0.40	0.20

Run 5								
tiempo	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Diámetro ( $\phi$ )	peso (%)							
-6	20.30	19.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-5	16.69	26.43	54.00	40.68	47.97	71.78	61.00	54.66
-4	20.18	20.19	19.32	35.76	36.46	24.86	37.30	40.67
-3	18.13	16.66	13.10	13.44	9.95	2.49	1.43	3.63
-2	15.36	11.86	9.13	7.89	4.28	0.62	0.18	0.78
-1	9.34	5.49	4.46	2.23	1.33	0.23	0.09	0.26

A 2. Parámetros estadísticos de la fracción gruesa (-6 a  $-1\phi$ ) obtenidos mediante el software DECOLOG 4.0.4 (Borselli y Sarocchi, 2012).

<b>Run 2</b>						
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110
Mz ( $\phi$ )	-4.28	-4.49	-3.74	-4.47	-4.56	-4.71
$\sigma$	1.47	1.44	1.35	1.47	0.86	0.67
Sk	0.27	0.54	0.29	0.42	1.97	2.31
k	-1.15	-0.83	-1.51	-0.95	3.45	6.01

<b>Run 3</b>						
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110
Mz ( $\phi$ )	-4.71	-4.96	-4.96	-4.99	-5.13	-5.19
$\sigma$	1.52	1.36	1.38	1.24	1.12	0.87
Sk	0.59	1.01	1.01	0.97	1.18	1.09
k	-0.98	-0.12	-0.14	0.20	0.96	1.94

<b>Run 4</b>						
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110
Mz ( $\phi$ )	-4.31	-4.62	-4.65	-4.97	-4.80	-5.00
$\sigma$	1.49	1.45	1.38	1.39	1.29	1.07
Sk	0.24	0.70	0.67	0.95	0.84	0.97
k	-1.12	-0.76	-0.65	-0.32	-0.12	0.77

<b>Run 5</b>						
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110
Mz ( $\phi$ )	-4.27	-4.54	-4.40	-4.43	-4.61	
$\sigma$	1.50	1.39	1.03	0.89	0.75	
Sk	0.22	0.52	1.34	1.41	1.95	
k	-1.19	-0.82	0.69	1.38	3.93	

A 3. Granulometría de la fracción arenosa (0 a 4 $\phi$ ) de las cuatro mezclas utilizadas en los experimentos y sus variaciones con el tiempo y número de revoluciones en la máquina de Los Ángeles.

<b>Run 2</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Diámetro ( $\phi$ )	peso (%)							
0	22.31	38.38	30.52	29.26	14.52	4.97	0.49	0.23
1	28.51	27.00	29.64	32.10	29.42	24.60	8.89	1.96
2	27.23	19.69	23.45	23.78	29.82	35.15	38.03	39.65
3	17.64	11.56	13.13	11.79	19.23	24.48	34.21	42.78
4	4.30	3.37	3.25	3.07	7.00	10.80	18.38	15.38

<b>Run 3</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Diámetro ( $\phi$ )	peso (%)							
0	54.43	54.32	46.18	41.21	30.37	12.11	0.88	0.46
1	10.48	24.12	27.79	27.68	29.00	26.29	10.68	2.80
2	24.55	11.03	13.96	16.20	20.96	29.19	36.02	33.01
3	5.62	6.19	7.61	9.35	12.92	20.15	31.91	39.38
4	4.91	4.34	4.46	5.56	6.75	12.26	20.51	24.34

<b>Run 4</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Diámetro ( $\phi$ )	peso (%)							
0	35.05	33.14	32.02	24.86	19.35	8.47	1.85	0.56
1	28.14	27.73	28.96	27.19	28.16	23.73	15.21	4.90
2	18.52	18.88	20.91	23.90	26.50	31.66	36.36	41.94
3	11.44	12.79	12.13	16.22	17.54	23.16	29.34	32.01
4	6.85	7.46	5.97	7.83	8.45	12.98	17.24	20.59

<b>Run 5</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Diámetro (φ)	peso (%)							
0	53.81	51.89	40.89	28.12	14.10	2.68	0.54	0.63
1	27.07	26.94	29.31	26.27	27.25	17.63	5.35	2.98
2	10.63	11.65	15.59	21.79	27.42	34.85	35.33	28.16
3	6.04	6.73	9.65	15.21	19.92	28.03	36.55	41.19
4	2.46	2.79	4.56	8.62	11.31	16.81	22.24	27.04

A 4. Parámetros estadísticos de la fracción arenosa (0 a  $4\phi$ ) y su variación con el tiempo de duración de los experimentos.

<b>Run 2</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Mz ( $\phi$ )	1.08	0.76	0.87	0.85	1.27	1.62	2.10	2.27
$\sigma$	1.03	1.01	1.00	0.97	1.05	0.97	0.78	0.58
Sk	0.44	0.95	0.74	0.79	0.29	0.01	-0.25	-0.23
k	-0.73	-0.05	-0.34	-0.15	-0.79	-0.61	-0.34	1.44

<b>Run 3</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Mz ( $\phi$ )	0.64	0.52	0.62	0.74	0.95	1.44	2.09	2.34
$\sigma$	1.03	0.97	0.99	1.05	1.10	1.10	0.82	0.67
Sk	1.16	1.66	1.38	1.13	0.75	0.13	-0.30	-0.64
k	0.45	1.86	1.00	0.24	-0.53	-1.00	-0.40	1.07

<b>Run 4</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Mz ( $\phi$ )	0.87	0.93	0.90	1.11	1.21	1.58	1.94	2.19
$\sigma$	1.10	1.12	1.08	1.12	1.10	1.06	0.89	0.72
Sk	0.89	0.79	0.82	0.50	0.38	-0.03	-0.23	-0.34
k	-0.34	-0.56	-0.38	-0.87	-0.91	-0.89	-0.46	0.31

<b>Run 5</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Mz ( $\phi$ )	0.45	0.50	0.71	1.07	1.38	1.87	2.23	2.38
$\sigma$	0.87	0.91	1.02	1.14	1.11	0.94	0.74	0.69
Sk	1.77	1.64	1.17	0.57	0.19	-0.22	-0.50	-0.87
k	2.57	1.98	0.39	-0.88	-1.03	-0.56	0.25	1.44

A 5. Granulometría del fluido (3 a 9 $\phi$ ) de las cuatro mezclas utilizadas en los experimentos y sus variaciones con el tiempo y número de revoluciones en la máquina de Los Ángeles.

<b>Run 2</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Diámetro ( $\phi$ )	peso (%)							
3	0.00	5.00	3.27	0.03	3.43	5.10	0.00	3.30
4	21.13	36.91	58.61	39.63	35.16	33.75	19.96	35.12
5	53.97	42.83	29.50	39.06	40.63	40.49	50.59	40.16
6	19.45	12.87	7.73	16.16	15.35	14.33	20.19	15.86
7	4.45	2.40	0.89	5.12	4.40	4.74	6.77	4.12
8	1.00	0.00	0.00	0.00	1.03	1.58	2.50	1.45
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

<b>Run 3</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Diámetro ( $\phi$ )	peso (%)							
3	4.23	8.33	0.00	0.00	21.06	13.72	3.57	14.30
4	28.71	29.60	13.66	11.93	31.79	31.79	26.81	30.33
5	31.95	28.91	34.53	35.41	18.55	22.24	34.72	21.42
6	16.04	15.77	21.68	23.99	11.42	12.79	20.36	13.14
7	8.25	7.93	13.32	13.62	7.62	7.76	5.96	8.46
8	4.30	3.84	5.87	7.43	3.47	3.93	3.25	4.19
9	6.52	5.61	10.93	7.62	6.09	7.76	5.32	8.16

<b>Run 4</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Diámetro ( $\phi$ )	peso (%)							
3	0.00	8.21	44.14	43.59	28.51	39.76	36.16	3.34
4	12.75	25.75	26.51	28.58	25.41	33.07	11.38	22.09
5	36.10	29.81	10.92	8.05	17.86	11.54	13.98	30.38
6	25.52	19.82	8.01	4.93	12.13	6.88	9.36	19.78
7	25.63	16.47	8.57	14.78	14.53	1.94	12.18	6.24
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.05	0.00	18.17
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

<b>Run 5</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Diámetro ( $\phi$ )	peso (%)							
3	1.59	0.00	0.00	0.00	9.03	8.17	11.70	3.09
4	19.42	11.34	15.85	15.21	31.09	29.40	29.00	25.90
5	21.97	28.34	26.30	24.98	20.93	23.36	20.57	24.50
6	16.78	20.57	18.49	19.83	12.92	15.09	16.07	17.12
7	13.44	12.40	13.39	13.58	9.50	8.91	8.85	10.69
8	7.85	7.70	7.94	8.75	5.22	4.11	5.51	6.32
9	18.95	19.65	18.03	17.65	11.30	10.97	8.31	12.38

A 6. Parámetros estadísticos del fluido (3 a 9 $\phi$ ) y su variación con el tiempo de duración de los experimentos.

<b>Run 2</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Mz ( $\phi$ )	4.64	4.22	4.06	4.48	4.39	4.37	4.75	4.41
$\sigma$	0.71	0.75	0.55	0.71	0.86	0.94	0.84	0.88
Sk	1.17	0.25	0.29	1.15	0.74	0.73	1.17	0.83
k	1.97	1.02	2.03	0.69	1.39	1.24	1.34	1.60

<b>Run 3</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Mz ( $\phi$ )	4.87	4.70	5.47	5.50	4.36	4.61	4.82	4.65
$\sigma$	1.45	1.49	1.41	1.47	1.68	1.67	1.33	1.71
Sk	0.95	0.87	0.75	1.13	0.92	0.84	1.09	0.77
k	0.34	0.32	-0.50	0.81	0.06	-0.10	1.10	-0.27

<b>Run 4</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Mz ( $\phi$ )	5.10	4.57	3.52	3.60	4.02	3.57	3.78	5.05
$\sigma$	0.84	1.12	1.30	1.39	1.36	1.35	1.50	1.34
Sk	-0.10	-0.07	0.91	0.92	0.34	1.39	0.43	0.37
k	-1.17	-0.87	-0.30	-0.49	-1.15	1.48	-1.27	-0.83

<b>Run 5</b>								
tiempo (min)	1	3	7	15	31	63	127	255
revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Mz ( $\phi$ )	5.69	5.83	5.74	5.77	4.92	4.92	4.80	4.52
$\sigma$	1.67	1.55	1.58	1.56	1.75	1.70	1.70	1.57
Sk	0.28	0.37	0.40	0.36	0.65	0.70	0.65	1.10
k	-1.22	-1.22	-1.22	-1.22	-0.66	-0.46	-0.48	0.52

## **B. ANÁLISIS MORFOLÓGICO**

B 1. Valores del coeficiente morfológico MC<sub>2</sub> y su variación con el tiempo y número de revoluciones.

Número de revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542	
tiempo (minutos)	1	3	7	15	31	63	127	255	
Mezcla	Diámetro (φ)	Coeficiente MC <sub>2</sub>							
Run 2	-1	0.9372	0.9284	0.9454	0.9300	0.9280	0.9334	0.9458	0.9125
	-2	0.9751	0.9519	0.9228	0.9231	0.9185	0.9366	0.8976	0.9559
	-3	0.9605	0.9440	0.9273	0.9170	0.8980	0.9125	0.9240	0.9006
	-4	0.9812	0.9828	0.9112	0.9361	0.9106	0.9220	0.8598	0.8277
	-5	0.8793	0.8669	0.8320	0.8392	0.8140	0.8128	0.8514	0.8021
	-6	0.8195	0.8371		0.8245				
Run 3	-1	0.9605	0.9229	0.9446	0.9525	0.9349	0.9158	0.9236	0.9475
	-2	0.9658	0.9688	0.9544	0.9089	0.9200	0.9265	0.9403	0.9007
	-3	0.9692	0.9287	0.9331	0.9179	0.9061	0.9151	0.8715	0.8753
	-4	0.9252	0.9542	0.9036	0.9098	0.9044	0.8907	0.8730	0.8731
	-5	1.0065	0.9295	0.9412	0.9292	0.8976	0.8700	0.8308	0.8244
	-6	0.9711	0.9715	0.9765	0.9541	0.9477	0.7672		
Run 4	-1	0.9508	0.9317	0.9139	0.9365	0.9248	0.9451	0.9177	0.9171
	-2	0.9676	0.9585	0.9680	0.9180	0.9303	0.9197	0.9248	0.9007
	-3	0.9544	0.9564	0.9409	0.9242	0.9229	0.9238	0.8930	0.9385
	-4	0.9259	0.9122	0.9024	0.9008	0.9151	0.9318	0.8713	0.8837
	-5	1.0072	0.9461	0.8777	0.9834	0.8598	0.8421	0.8280	0.8172
	-6	0.8554	0.9503	0.7923	0.8145	0.8177	0.8115		
Run 5	-1	0.9632	0.9666	0.9511	0.9377	0.9323	0.9434	0.9509	0.9189
	-2	0.9684	0.9547	0.9509	0.9173	0.9155	0.8924	0.9700	0.9242
	-3	0.9566	0.9551	0.9202	0.9141	0.9423	0.8970	0.9391	0.9106
	-4	0.9348	0.9437	0.9376	0.9165	0.8859	0.8916	0.8656	0.8388
	-5	0.9915	0.9429	0.9551	0.8634	0.9202	0.8639	0.8117	0.7692
	-6	0.9047	0.7739						

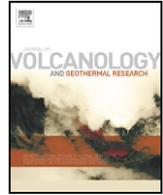
B 2. Valores del coeficiente morfológico  $MC_{3-8}$  y su variación con el tiempo y número de revoluciones.

Número de revoluciones	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542	
tiempo (minutos)	1	3	7	15	31	63	127	255	
Mezcla	Diámetro ( $\phi$ )	Coeficiente $MC_{3-8}$							
Run 2	-1	0.9882	0.9759	0.9675	0.9786	0.9717	0.9857	0.9820	0.9756
	-2	0.9761	0.9553	0.9652	0.9573	0.9619	0.9601	0.9857	0.9306
	-3	0.9648	0.9450	0.9419	0.9367	0.9241	0.9225	0.9323	0.9099
	-4	0.9417	0.9622	0.9272	0.9088	0.8954	0.8896	0.8426	0.8153
	-5	0.9567	0.9397	0.8981	0.9224	0.8552	0.8348	0.8099	0.7966
	-6	0.9603	0.9819		0.9527				
Run 3	-1	0.9918	0.9749	0.9805	0.9790	0.9900	0.9724	0.9840	0.9554
	-2	0.9821	0.9770	0.9591	0.9521	0.9590	0.9411	0.9851	0.9558
	-3	0.9609	0.9474	0.9448	0.9342	0.9201	0.9108	0.8969	0.8944
	-4	0.9465	0.9505	0.9350	0.9178	0.9043	0.8737	0.8342	0.8341
	-5	0.8574	0.9933	0.9561	0.9257	0.8911	0.8589	0.8041	0.7880
	-6	0.8448	0.8304	0.8315	0.8418	0.8141	0.8663		
Run 4	-1	0.9782	0.9853	0.9732	0.9863	0.9873	0.9761	0.9743	0.9759
	-2	0.9773	0.9774	0.9772	0.9537	0.9521	0.9491	0.9614	0.9601
	-3	0.9660	0.9698	0.9502	0.9393	0.9298	0.9063	0.9295	0.9379
	-4	0.9439	0.9402	0.9448	0.9360	0.8981	0.8954	0.8429	0.8046
	-5	0.9434	0.9184	0.9173	0.9180	0.9077	0.9004	0.8372	0.8040
	-6	0.9721	0.9260	0.9105	0.9052	0.8853	0.8610		
Run 5	-1	0.9888	0.9927	0.9903	0.9712	0.9461	0.9823	0.9910	0.9675
	-2	0.9688	0.9752	0.9643	0.9498	0.9444	0.9599	0.9865	0.9337
	-3	0.9530	0.9611	0.9497	0.9395	0.9374	0.9394	0.9142	0.9121
	-4	0.9252	0.9328	0.9385	0.9128	0.8882	0.8644	0.8416	0.8302
	-5	1.0003	0.9580	0.9558	0.8704	0.8899	0.8234	0.8015	0.7745
	-6	0.9566	0.9076						

B 3. Valores del coeficiente morfológico  $MC_{30-34}$  y su variación con el tiempo y número de revoluciones.

Número de revoluciones		33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
tiempo (minutos)		1	3	7	15	31	63	127	255
Mezcla	Diámetro ( $\phi$ )	Coeficiente $MC_{30-34}$							
Run 2	-1	0.9366	0.9468	0.9417	0.9765	1.0037	0.9741	0.9836	0.9809
	-2	1.0016	0.9678	0.9753	0.9595	0.9903	0.9748	0.9608	0.9610
	-3	0.9716	0.9275	0.9271	0.9235	0.9405	0.9466	0.9531	0.9225
	-4	0.9415	0.9237	0.9165	0.8940	0.8848	0.8767	0.8443	0.8462
	-5	0.9053	0.9037	0.9030	0.8574	0.8529	0.8352	0.8431	0.8468
	-6	0.9501	0.9027		0.8857				
Run 3	-1	0.9751	0.9258	0.9727	0.9385	0.9479	0.9173	0.9288	0.8931
	-2	0.9679	0.9755	0.9750	0.9699	0.9658	0.9345	1.0213	0.9521
	-3	0.9685	0.9416	0.9540	0.9127	0.8967	0.9203	0.9060	0.9469
	-4	0.8868	0.9052	0.9054	0.8783	0.8840	0.8590	0.8378	0.8274
	-5	0.8642	0.9409	0.9039	0.8791	0.8548	0.8198	0.8212	0.8257
	-6	0.8668	0.8522	0.8557	0.8397	0.8345	0.8177		
Run 4	-1	0.9745	0.9434	0.9729	0.9547	0.9662	0.9495	0.9389	0.9995
	-2	1.0053	0.9914	1.0184	0.9552	0.9572	0.9495	1.0049	0.9753
	-3	0.9774	0.9685	0.9634	0.9416	0.9384	0.8991	0.9196	0.9334
	-4	0.9279	0.9187	0.9186	0.8849	0.8604	0.8580	0.8422	0.8197
	-5	0.8943	0.8721	0.8755	0.8593	0.8456	0.8063	0.8085	0.8310
	-6	0.9249	0.9175	0.8455	0.8521	0.8214	0.8016		
Run 5	-1	0.9805	0.9789	0.9444	0.9467	0.9128	0.9670	0.9383	0.9408
	-2	0.9653	0.9685	0.9510	0.9429	0.9308	0.9279	0.9449	0.9733
	-3	0.9367	0.9599	0.9422	0.9246	0.9191	0.9053	0.8402	0.9181
	-4	0.9047	0.9043	0.9174	0.8633	0.8803	0.8409	0.8484	0.8371
	-5	0.8965	0.9023	0.8945	0.8327	0.8523	0.8274	0.7924	0.8289
	-6	0.8946	0.8533						

## **C. ARTÍCULOS RELACIONADOS**



## Particle interaction inside debris flows: Evidence through experimental data and quantitative clast shape analysis

Lizeth Caballero <sup>a,\*</sup>, Damiano Sarocchi <sup>b</sup>, Lorenzo Borselli <sup>b</sup>, Angel I. Cárdenas <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, 04510, Mexico City, Mexico

<sup>b</sup> Instituto de Geología/Fac. Ingeniería UASLP, Dr. M. Nava No 5, Zona Universitaria 78240, San Luis Potosí, Mexico

<sup>c</sup> Fac. Ingeniería UASLP, Área de Ingeniería Civil, Dr. M. Nava No 8, Zona Universitaria 78240, San Luis Potosí, Mexico

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 4 January 2012

Accepted 2 April 2012

Available online 10 April 2012

#### Keywords:

Los Angeles test  
Clast–clast interaction  
Clast-shape analysis  
Fourier analysis  
Clast comminution  
Sedimentation

### ABSTRACT

Results of analytical experiments related to the dynamic behavior of debris flows are presented. Particle interaction and the amount and type of fines content present in the matrix, aspects that govern debris flow behavior, are studied via the morphological evolution of constituent particles. Four different mixtures of water and sediment with compositions resembling debris flows were prepared and put into a rotating drum, known as a Los Angeles standard abrasion machine, and studied at different time intervals. For each sampling time, quantitative shape analysis was performed using three morphological coefficients,  $MC_2$ ,  $MC_{3-8}$ , and  $MC_{30-34}$ . Coefficient  $MC_2$  gives information about particle ellipticity.  $MC_{3-8}$  is related to basic irregularities at a macro scale, such as roundness.  $MC_{30-34}$  is related to microscale irregularities like surface texture. Coefficient  $MC_{3-8}$  was shown to be very sensitive to silt content in the matrix, and coefficient  $MC_{30-34}$  to the presence of clay. All three coefficients point to the fact that changes in shape between granulometric classes are gradual and follow a power law. Coarse granulometric classes acquire more circular and smooth profiles while small particles maintain their irregular profiles. This phenomenon is the result of clast interaction processes within mixtures. Clast collisions between particles produce comminution of the coarsest fractions, while finer particles fracture along their entire surface. The rate at which these changes occur is related to the type of fine sediment present in the matrix. Changes in particle shape are an important tool for revealing internal dynamics because they are related to clast interaction and affect sedimentation processes inside these flows. This type of experiment, although not on a real scale, provides important physical information for understanding the phenomena that occur inside debris flows, enabling the study of a variety of textural parameters and their changes at regular time intervals. The experimental patterns observed offer new insights into clast–clast interaction, rounding and comminuting theory, with important implications for understanding rheological behavior and kinematics of flows and related hazards.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

### 1. Introduction

Debris flows are highly concentrated mixtures of water and sediments characterized by their high mobility and their capacity to carry large boulders along on the top of the flow. Their occurrence in subaerial and submarine environments has enabled them to be studied from different points of view. Granular flow theory (Iverson and Vallance, 2001) and rheological models (Fink et al., 1981; Major and Pierson, 1992; Coussot et al., 1998), together with experimental data and detailed studies of deposit characteristics have been applied to explain their internal dynamics. All of these models coincide in that debris flow behavior is governed by two main aspects; particle interactions and interstitial fluid.

Interstitial fluid is made up of water, sand, silt and clay. Special emphasis has been placed by several authors on the clay fraction (Scott, 1988; Scott et al., 1995; Vallance and Scott, 1997), classifying volcanic debris flows only in function of the proportion of clay. This approach divides debris flow into cohesive (>3 wt.% clay in the whole deposit, or >5 wt.% in the clay/sand + silt + clay matrix) and non-cohesive debris flows. This classification has the inconvenience of being based, as mentioned above, essentially on clay content, paying little attention to the important properties of fine silt. In addition, it does not take into account analytic accuracy in the measurement of the clay fraction (Konert and Vandenberghe, 1997; Xu and Di Guida, 2003; Goossens, 2008).

Particle interaction processes, either by collision or friction, strongly influence both debris flow mobility and energy dissipation (Major and Pierson, 1992; Iverson, 1997). It is well known that transport history and clast interaction can be inferred from particle morphology (Krumbein, 1941; Dellino and La Volpe, 1996). Numerous morphological studies have elucidated transport history, but they

\* Corresponding author. Tel.: +52 55 56224301x125.

E-mail address: [lizethcaballero@yahoo.com.mx](mailto:lizethcaballero@yahoo.com.mx) (L. Caballero).

**Table 1**  
Initial granulometric distributions of the four mixtures used in the experiments.

Mixture	Run 2		Run 3	Run 4	Run 5	
	Non cohesive		Cohesive			
	Diameter	Weight (%)	Weight (%)	Weight (%)	Weight (%)	
Millimeters (mm)	Phi units ( $\phi$ )					
Gravel	64	-6	13.66	12.18	11.20	13.08
	32	-5	17.37	14.34	14.57	15.54
	16	-4	15.12	12.40	12.60	13.38
	8	-3	12.79	10.50	10.64	11.29
	4	-2	10.47	8.59	8.71	9.24
	2	-1	8.14	6.68	6.77	7.15
Sand	1	0	5.81	4.77	4.84	5.11
	500 $\mu\text{m}$	1	4.65	3.82	3.87	4.09
	250 $\mu\text{m}$	2	3.49	2.86	2.90	3.06
	123 $\mu\text{m}$	3	2.33	1.91	1.93	2.04
Silt	63 $\mu\text{m}$	4	1.16	0.95	0.97	1.02
	39–63 $\mu\text{m}$	5	1.25	3.75	5.25	1.25
		6	1.25	3.75	5.25	1.25
		7	1.25	3.75	5.25	1.25
Clay	<39 $\mu\text{m}$	8	1.25	3.75	5.25	1.25
		9	0.00	6.00	0.00	10.00
Total		100.00	100.00	100.00	100.00	

used only limited size classes or studied different particle sizes together (Diepenbroek et al., 1992; Dellino and Liotino, 2002; Manga et al., 2011). Moreover, detailed particle shape studies on debris flows are scarce in the literature (Scott, 1988; Pierson et al., 1990; Sarocchi, 2006; Dumaisnil et al., 2010; Sarocchi et al., 2011).

In this work, new data on clast morphology in four mixtures equivalent to debris flows are presented. The mixtures studied have different

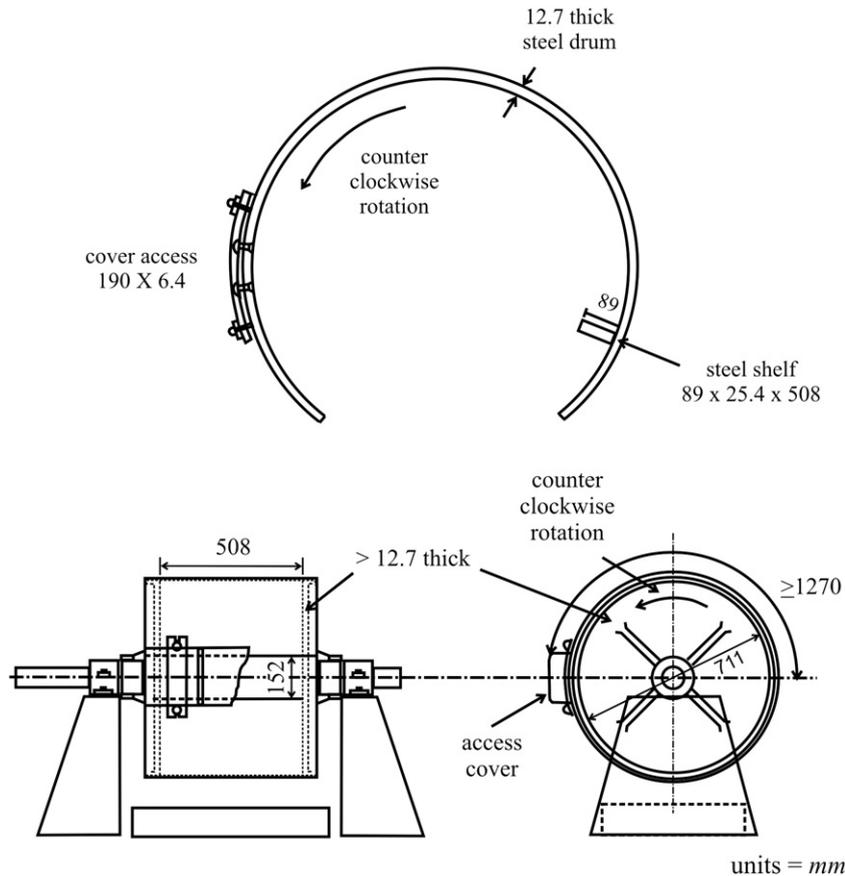
amounts of silt and clay so that the influence of both silt and clay can be observed independently in particle shape evolution during reworking. Our findings are based on experimental data using three quantitative morphological coefficients that give information about shape at different scales (Sarocchi et al., 2011). Coefficient  $MC_2$  gives information about particle ellipticity.  $MC_{3-8}$  is related to basic irregularities at a macro scale, such as roundness. Finally,  $MC_{30-34}$  is related to microscale irregularities like surface texture.  $MC_{3-8}$  and  $MC_{30-34}$  are especially sensitive to interstitial fluid composition and show variations in evolutionary trends in particle morphology. Such changes give information about internal dynamics such as clast interaction processes, and throw light on some processes that occur during transport of debris flows that had previously been unclear. Furthermore, morphology variations affect the susceptibility of particles to certain types of support mechanisms that affect sedimentation rates (Komar and Reimers, 1978; Dietrich, 1982) and consequently runout distances.

The aims of this work are to study clast interaction and the influence of the type of fine sediment present in the matrix (silt or clay), observing clast-shape evolution at different times within mixtures with debris flow characteristics using a new methodology and a Los Angeles standard rotating drum.

**2. Terminology**

In this paper, the term debris flow is applied to a mixture of water and sediments in which the solid fraction makes up 70 and 90 wt.% (Costa, 1984) or more than 80 wt.% according to Vallance and Scott (1997).

Shape is used in the sense proposed by Barrett (1980); the expression of external morphology. This term includes form, roundness, and surface texture. Form describes the relation between the three axes of



**Fig. 1.** Schematic illustration of the Los Angeles abrasion machine.

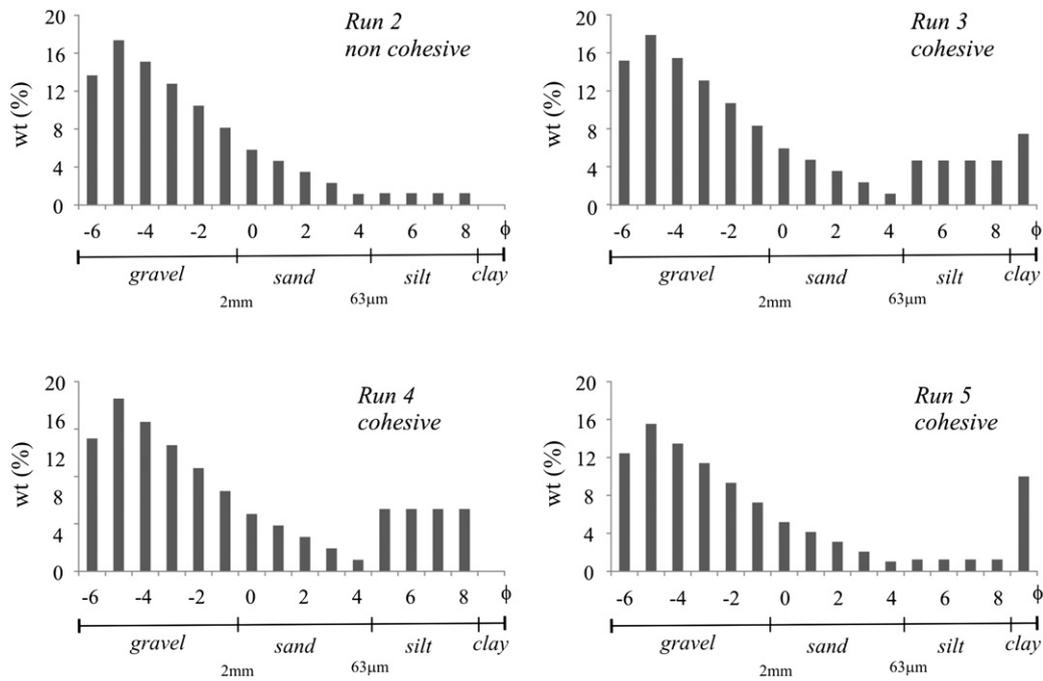


Fig. 2. Granulometric histograms of initial mixtures used in the experiments. Run 2 represents a non-cohesive debris flow and, Run 3, Run 4 and Run 5 represent cohesive debris flows.

the particle, in other words, coarse variation in the particle proportions. Roundness is superimposed to form and refers to the smoothness of the outer perimeter of the particles. Surface texture refers to the finer irregularities (surface pits and crests) and is superimposed to roundness and general form. Form, roundness and texture are essentially independent properties of shape, because one can vary without affecting the other two.

### 3. Methodology

Clast quantitative morphological analysis is used to evaluate particle abrasion during transport in debris flows occasioned by particle–particle and fluid–particle interactions. To evaluate this, four mixtures of water and sediments with known concentration and granulometric distributions, comparable with those of cohesive and non-cohesive debris flows were used (Table 1). The mixtures were placed in a standard rotating drum known as a Los Angeles abrasion machine (LAAM; Fig. 1) for specific time intervals in order to simulate debris flow transport and its impact on particle abrasion. Bi-dimensional shape variations were measured quantitatively by Fourier analysis (Schwarcz and Shane, 1969; Ehrlich and Weinberg, 1970; Sarocchi et al., 2011).

Similar rotating drums have been used to simulate the flow of granular material (Longo and Lamberti, 2002; Kaitna and Rickenmann, 2005;

Hsu et al., 2008). They allow the observation of a continuous stationary flow and offer the advantage of isolating erosion and selective deposition of material, and enable us to focus on transport phenomena and its effects.

Previous experiments have shown a continuous circulation of the material in the lower half of the device (Kaitna and Rickenmann, 2005; Hsu et al., 2008), as well as complex movements of particles like rolling, overpassing abrasion, comminution and vibratory action (Lewin and Brewer, 2002), that have been described previously in

Table 3

Time intervals and their equivalence in number of revolutions used to sample mixtures and perform shape analysis.

Revolutions	Time (min)
33	1
100	3
234	7
502	15
1038	31
2110	63
4254	127
8542	255

Table 2

Silt and clay weight percentages of debris flow deposits reported previously in literature which are used to establish fines content in the mixtures.

Debris flow deposit	Age or year	Silt (wt.%)	Clay (wt.%)	Reference
North Fork Lahar, Mount St. Helens (USA)	1980	19 to 28	3 to 5	Scott (1988)
South Fork Lahar, Mount St. Helens (USA)	1980	11 to 20	2 to 3	Scott (1988)
"La Avalancha" Río Páez, Nevado del Huila (Colombia)	1994	5 to 19	0 to 5	Pulgarín (2000)
Río Huitzilapan, Pico de Orizaba (Mexico)			5	Scott et al. (2001)
Osceola Mudflow, Mount Rainier (USA)	5600 yr B.P.	4 to 13	3 to 14	Crandell (1971), Scott et al. (1995), Vallance and Scott (1997), Scott et al. (2001)
Pilcaya, Nevado de Toluca (Mexico)	Pleistocene	5 to 19	2 to 9	Capra and Macías (2000)
El Mogote, Nevado de Toluca (Mexico)	Pleistocene	8 to 14	1 to 4	Capra and Macías (2000)
El Naranjo, Nevado de Colima (Mexico)	Pleistocene	9 to 22	0 to 1.8	Capra and Macías (2002)
Teteltzingo Lahar, Citaltépētī (Mexico)	13 000 to 27 000 yr B.P.		10 to 16	Carrasco-Núñez et al. (1993)

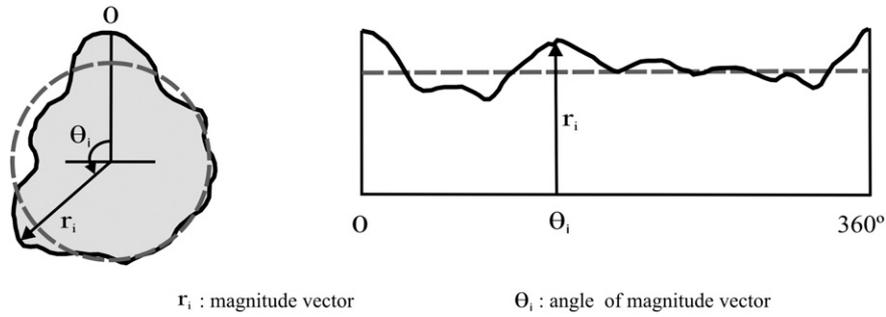


Fig. 3. Expression of the particle perimeter in polar coordinates known as geometric signature waveform. GSW; modified from Davis (1986).

debris flows. The movement of particles inside the rotating drums appears quite equivalent to natural flows, but the energy involved depends on the clasts and water mass, and on the rotational speed of the drum.

3.1. Mixture characteristics

The solid fraction was prepared from natural blocks of andesitic composition collected from block and ash flow deposits at the Colima Volcano, Mexico. The blocks were triturated and sieved at 1  $\phi$  intervals, but only granulometric classes between -6 and 8  $\phi$  were used. Triturated material was used to establish similar initial conditions of maximum angularity for all the experiments. In this way, observed clast-shape variations would be those produced during the course of the experiment.

For the clay fraction, sodium bentonite was used. Bentonite consists mostly of montmorillonite (smectite group), a type of clay characterized by its high specific surface, swelling properties and cation-exchange capacity. Such extreme characteristics allowed better observation of the influence of clay in the matrix.

Once the material was obtained, four mixtures designated as Run 2, Run 3, Run 4, and Run 5 were prepared. They had almost the same granulometric distributions in the interval between -6 and 4

$\phi$ , differing only in their silt and clay fractions (Table 1; Fig. 2). Clay and silt percentages were determined based on granulometric characteristics of real cohesive debris flows described previously in the literature (Table 2), and are referred to the whole sample. Run 2 reflected characteristics of a non-cohesive debris flow, while Run 3, Run 4, and Run 5 were similar to cohesive debris flows. The clay content of Run 3 was barely greater than the fines content established for the distinction between cohesive and non-cohesive debris flows (silt 16 wt.%; clay 6 wt.%). Run 4 contained only silt as the fine fraction (21 wt.%), based on silt content reported for the El Naranjo debris flow deposit (Nevado de Colima, Mexico; Capra and Macías, 2002), and North and South Fork Lahar deposits (Mount St. Helens, US; Scott, 1988). Run 5 had a 10 wt.% clay fraction, based on the Teteltzingo Lahar deposit (Pico de Orizaba Volcano, Mexico; Carrasco-Núñez et al., 1993), and Osceola Mudflow deposit (Mount Rainier, US; Crandell, 1971; Scott et al., 1995; Vallance and Scott, 1997). The reason for using only silt and clay, respectively, in Run 4 and Run 5 was to observe the influence of each type of fine sediment in clast-morphology evolution produced by particle interaction.

When the mixtures had been prepared, 20 wt.% of the total weight of water was added to the material; this amount represents mean water content established by Costa (1984) for debris flows.

Table 4  
Values of MC<sub>2</sub> coefficient for mixtures.

Number of revolutions	33	100	234	502	1038	2110	4254	8542	
Time (min)	1	3	7	15	31	63	127	255	
Mixture	Particle diameter ( $\phi$ )	Coefficient MC <sub>2</sub>							
Run 2	-1	0.9372	0.9284	0.9454	0.9300	0.9280	0.9334	0.9458	0.9125
	-2	0.9751	0.9519	0.9228	0.9231	0.9185	0.9366	0.8976	0.9559
	-3	0.9605	0.9440	0.9273	0.9170	0.8980	0.9125	0.9240	0.9006
	-4	0.9812	0.9828	0.9112	0.9361	0.9106	0.9220	0.8598	0.8277
	-5	0.8793	0.8669	0.8320	0.8392	0.8140	0.8128	0.8514	0.8021
	-6	0.8195	0.8371		0.8245				
Run 3	-1	0.9605	0.9229	0.9446	0.9525	0.9349	0.9158	0.9236	0.9475
	-2	0.9658	0.9688	0.9544	0.9089	0.9200	0.9265	0.9403	0.9007
	-3	0.9692	0.9287	0.9331	0.9179	0.9061	0.9151	0.8715	0.8753
	-4	0.9252	0.9542	0.9036	0.9098	0.9044	0.8907	0.8730	0.8731
	-5	1.0065	0.9295	0.9412	0.9292	0.8976	0.8700	0.8308	0.8244
	-6	0.9711	0.9715	0.9765	0.9541	0.9477	0.7672		
Run 4	-1	0.9508	0.9317	0.9139	0.9365	0.9248	0.9451	0.9177	0.9171
	-2	0.9676	0.9585	0.9680	0.9180	0.9303	0.9197	0.9248	0.9007
	-3	0.9544	0.9564	0.9409	0.9242	0.9229	0.9238	0.8930	0.9385
	-4	0.9259	0.9122	0.9024	0.9008	0.9151	0.9318	0.8713	0.8837
	-5	1.0072	0.9461	0.8777	0.9834	0.8598	0.8421	0.8280	0.8172
	-6	0.8554	0.9503	0.7923	0.8145	0.8177	0.8115		
Run 5	-1	0.9632	0.9666	0.9511	0.9377	0.9323	0.9434	0.9509	0.9189
	-2	0.9684	0.9547	0.9509	0.9173	0.9155	0.8924	0.9700	0.9242
	-3	0.9566	0.9551	0.9202	0.9141	0.9423	0.8970	0.9391	0.9106
	-4	0.9348	0.9437	0.9376	0.9165	0.8859	0.8916	0.8656	0.8388
	-5	0.9915	0.9429	0.9551	0.8634	0.9202	0.8639	0.8117	0.7692
	-6	0.9047	0.7739						

**Table 5**  
Coefficient  $MC_{3-8}$  for mixtures.

Number of revolutions		33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Time (min)		1	3	7	15	31	63	127	255
Mixture	Particle diameter ( $\phi$ )	Coefficient $MC_{3-8}$							
Run 2	–1	0.9882	0.9759	0.9675	0.9786	0.9717	0.9857	0.9820	0.9756
	–2	0.9761	0.9553	0.9652	0.9573	0.9619	0.9601	0.9857	0.9306
	–3	0.9648	0.9450	0.9419	0.9367	0.9241	0.9225	0.9323	0.9099
	–4	0.9417	0.9622	0.9272	0.9088	0.8954	0.8896	0.8426	0.8153
	–5	0.9567	0.9397	0.8981	0.9224	0.8552	0.8348	0.8099	0.7966
	–6	0.9603	0.9819		0.9527				
Run 3	–1	0.9918	0.9749	0.9805	0.9790	0.9900	0.9724	0.9840	0.9554
	–2	0.9821	0.9770	0.9591	0.9521	0.9590	0.9411	0.9851	0.9558
	–3	0.9609	0.9474	0.9448	0.9342	0.9201	0.9108	0.8969	0.8944
	–4	0.9465	0.9505	0.9350	0.9178	0.9043	0.8737	0.8342	0.8341
	–5	0.8574	0.9933	0.9561	0.9257	0.8911	0.8589	0.8041	0.7880
	–6	0.8448	0.8304	0.8315	0.8418	0.8141	0.8663		
Run 4	–1	0.9782	0.9853	0.9732	0.9863	0.9873	0.9761	0.9743	0.9759
	–2	0.9773	0.9774	0.9772	0.9537	0.9521	0.9491	0.9614	0.9601
	–3	0.9660	0.9698	0.9502	0.9393	0.9298	0.9063	0.9295	0.9379
	–4	0.9439	0.9402	0.9448	0.9360	0.8981	0.8954	0.8429	0.8046
	–5	0.9434	0.9184	0.9173	0.9180	0.9077	0.9004	0.8372	0.8040
	–6	0.9721	0.9260	0.9105	0.9052	0.8853	0.8610		
Run 5	–1	0.9888	0.9927	0.9903	0.9712	0.9461	0.9823	0.9910	0.9675
	–2	0.9688	0.9752	0.9643	0.9498	0.9444	0.9599	0.9865	0.9337
	–3	0.9530	0.9611	0.9497	0.9395	0.9374	0.9394	0.9142	0.9121
	–4	0.9252	0.9328	0.9385	0.9128	0.8882	0.8644	0.8416	0.8302
	–5	1.0003	0.9580	0.9558	0.8704	0.8899	0.8234	0.8015	0.7745
	–6	0.9566	0.9076						

### 3.2. Experimental device and performance of the experiments

The experiments were carried out in a rotating drum known as the Los Angeles abrasion machine (LAAM), used in civil engineering to determine abrasion resistance of materials.

This device (Fig. 1) consists of a hollow steel cylinder with an inner diameter of  $711 \pm 5$  mm and a length of  $508 \pm 5$ . It is closed at both ends and mounted on stub shafts, which allows it to rotate in a

horizontal position. Inside, the rotating drum has a horizontal shelf that is  $89 \pm 2$  mm wide. On the outside, it has an opening by which the sample can be inserted, and sealed to prevent leakage of the sample during testing. The cylinder rotates along its horizontal axis at 31 to 33 rpm. This velocity is pre-established in all LAAM, but is in agreement with other experiments in rotating drums used to simulate debris flow dynamics (e.g. 30 rpm; Kaitna and Rickenmann, 2005).

**Table 6**  
Values of  $MC_{30-34}$  coefficient for particles.

Number of revolutions		33	100	234	502	1038	2110	4254	8542
Time (min)		1	3	7	15	31	63	127	255
Mixture	Particle diameter ( $\phi$ )	Coefficient $MC_{30-34}$							
Run 2	–1	0.9366	0.9468	0.9417	0.9765	1.0037	0.9741	0.9836	0.9809
	–2	1.0016	0.9678	0.9753	0.9595	0.9903	0.9748	0.9608	0.9610
	–3	0.9716	0.9275	0.9271	0.9235	0.9405	0.9466	0.9531	0.9225
	–4	0.9415	0.9237	0.9165	0.8940	0.8848	0.8767	0.8443	0.8462
	–5	0.9053	0.9037	0.9030	0.8574	0.8529	0.8352	0.8431	0.8468
	–6	0.9501	0.9027		0.8857				
Run 3	–1	0.9751	0.9258	0.9727	0.9385	0.9479	0.9173	0.9288	0.8931
	–2	0.9679	0.9755	0.9750	0.9699	0.9658	0.9345	1.0213	0.9521
	–3	0.9685	0.9416	0.9540	0.9127	0.8967	0.9203	0.9060	0.9469
	–4	0.8868	0.9052	0.9054	0.8783	0.8840	0.8590	0.8378	0.8274
	–5	0.8642	0.9409	0.9039	0.8791	0.8548	0.8198	0.8212	0.8257
	–6	0.8668	0.8522	0.8557	0.8397	0.8345	0.8177		
Run 4	–1	0.9745	0.9434	0.9729	0.9547	0.9662	0.9495	0.9389	0.9995
	–2	1.0053	0.9914	1.0184	0.9552	0.9572	0.9495	1.0049	0.9753
	–3	0.9774	0.9685	0.9634	0.9416	0.9384	0.8991	0.9196	0.9334
	–4	0.9279	0.9187	0.9186	0.8849	0.8604	0.8580	0.8422	0.8197
	–5	0.8943	0.8721	0.8755	0.8593	0.8456	0.8063	0.8085	0.8310
	–6	0.9249	0.9175	0.8455	0.8521	0.8214	0.8016		
Run 5	–1	0.9805	0.9789	0.9444	0.9467	0.9128	0.9670	0.9383	0.9408
	–2	0.9653	0.9685	0.9510	0.9429	0.9308	0.9279	0.9449	0.9733
	–3	0.9367	0.9599	0.9422	0.9246	0.9191	0.9053	0.8402	0.9181
	–4	0.9047	0.9043	0.9174	0.8633	0.8803	0.8409	0.8484	0.8371
	–5	0.8965	0.9023	0.8945	0.8327	0.8523	0.8274	0.7924	0.8289
	–6	0.8946	0.8533						

**Table 7**  
Angular coefficients for linear regression of roundness and roughness values.

Revolutions	Time (min)	Angular coefficient ( <i>m</i> ) for MC <sub>3–8</sub>				Angular coefficient ( <i>m</i> ) for MC <sub>30–34</sub>			
		Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5
33	1	0.0063		0.0044	0.0027	0.0072	0.0267	0.0018	0.0191
100	3	0.00002	0.0192	0.0144	0.0144	0.0119		0.0153	0.0252
234	7	0.0177	0.0218	0.0142	0.0095	0.0136	0.0242	0.0317	0.0133
502	15	0.0075	0.0223	0.0147	0.0239	0.0266	0.0229	0.0245	0.0308
1038	31	0.03	0.0314	0.0193	0.0169	0.0407	0.0261	0.0325	
2110	63	0.0372	0.0233	0.0209	0.0413	0.0376	0.0258	0.0378	0.0366
4254	127	0.0487	0.0511	0.0393	0.0524	0.0397	0.0399	0.0423	0.0388
8542	255	0.0473	0.0456	0.0499	0.0489	0.0383	0.0259	0.0493	0.036

The mixtures described above were each placed in turn into the LAAM. Each mixture occupied about 1/4 of the total volume of the device, and the total time of the experiment was 255 min (equivalent to 8542 revolutions).

The effect of clast interaction among particles was measured at eight exponentially separated time intervals (Table 3). After each rotation period was concluded, a sample of between 2 and 2.5 kg of material was removed and wet sieved in the interval between  $-6 \phi$  (64 mm) and  $-1 \phi$  (2 mm) in order to observe granulometric variations and shape changes in these fractions during the experiment.

All fractions obtained by sieving were dried in an electric oven and images were made for subsequent processing. From each fraction, 100 particles, if available, were selected randomly and scanned in the maximum area position, with “a” and “b” axes parallel to the scanner bed and recorded with a resolution of 600 dpi. After this, the complete sample was returned to the Los Angeles machine for the next rotation period. Only a sample equivalent to 100 ml of interstitial fluid, composed by sand, silt and clay plus water, was taken on each time interval and not returned back, for a subsequent grain size analysis. For each run the extracted volume corresponds to 0.3% of the total sample volume.

### 3.3. Clast shape analysis

Changes in morphology during processing were evaluated by Fourier analysis (Schwartz and Shane, 1969; Ehrlich and Weinberg, 1970). The analysis was based on expressing the bi-dimensional perimeter of a particle, known as the geometric signature waveform (GSW), in polar coordinates (Fig. 3). The GSW can be analyzed using the fast Fourier transform (Cooley and Tukey, 1965; Davis, 1986) and gives information about phase and harmonic amplitude of the periodic wave (Schwartz and Shane, 1969). Each harmonic yields data about irregularities at a different scale. Low order harmonics are related to coarse irregularities (low frequency variations in the form of the particle). High order harmonics are related to high frequency variations; such fine irregularities are only observable at a small scale.

In the present work, the GSW was decomposed into 64 harmonics, from which three morphologic coefficients (MCs) were derived related to particle outline characteristics. Morphologic coefficients were calculated using the mean value of the normalized harmonic amplitude with respect to zero harmonic. Zero harmonic is equivalent to the particle diameter so scale dependent values are avoided. Subscript numbers indicate the harmonics used (Sarocchi, 2006, 2007; Sarocchi et al., 2011). Coefficient MC<sub>2</sub> gives information about particle ellipticity. Higher values of this coefficient indicate more elongated shapes while lower values suggest more equidimensional axes and a tendency to circularity. MC<sub>3–8</sub> is related to basic irregularities at a macro scale, such as roundness, and higher values suggest more irregular profiles. MC<sub>30–34</sub> is related to microscale irregularities; in other words, variations in surface texture of the particles. Its value is proportional to roughness.

To obtain the morphological coefficients, the images captured during the experiments were processed in stages according to the methodology proposed by Sarocchi (2006, 2007) and Sarocchi et al. (2011). First, they

were enhanced by histogram stretching and a median filter was applied using a  $3 \times 3$  matrix. The images were transformed into binary with perfectly delimited borders. They were then processed using Image Pro Plus software (Media Cybernetics, Inc.) by a morphologic module that applies the fast Fourier transform to each particle, obtaining the GSW. MC<sub>2</sub>, MC<sub>3–8</sub>, and MC<sub>30–34</sub> were derived using the known amplitudes of the harmonics (Sarocchi, 2006, 2007; Sarocchi et al., 2011).

The morphological coefficients were graphed against particle diameter and a linear regression was performed using the following formula:

$$Mc = mPHI + q. \quad (1)$$

The correlation between the type of mixture used and slope *m* vs. the number of revolutions was analyzed using a logarithmic regression:

$$y = a \log_{10} x + q. \quad (2)$$

In this case the value of the slope coefficient *a* is used for comparison.

## 4. Results

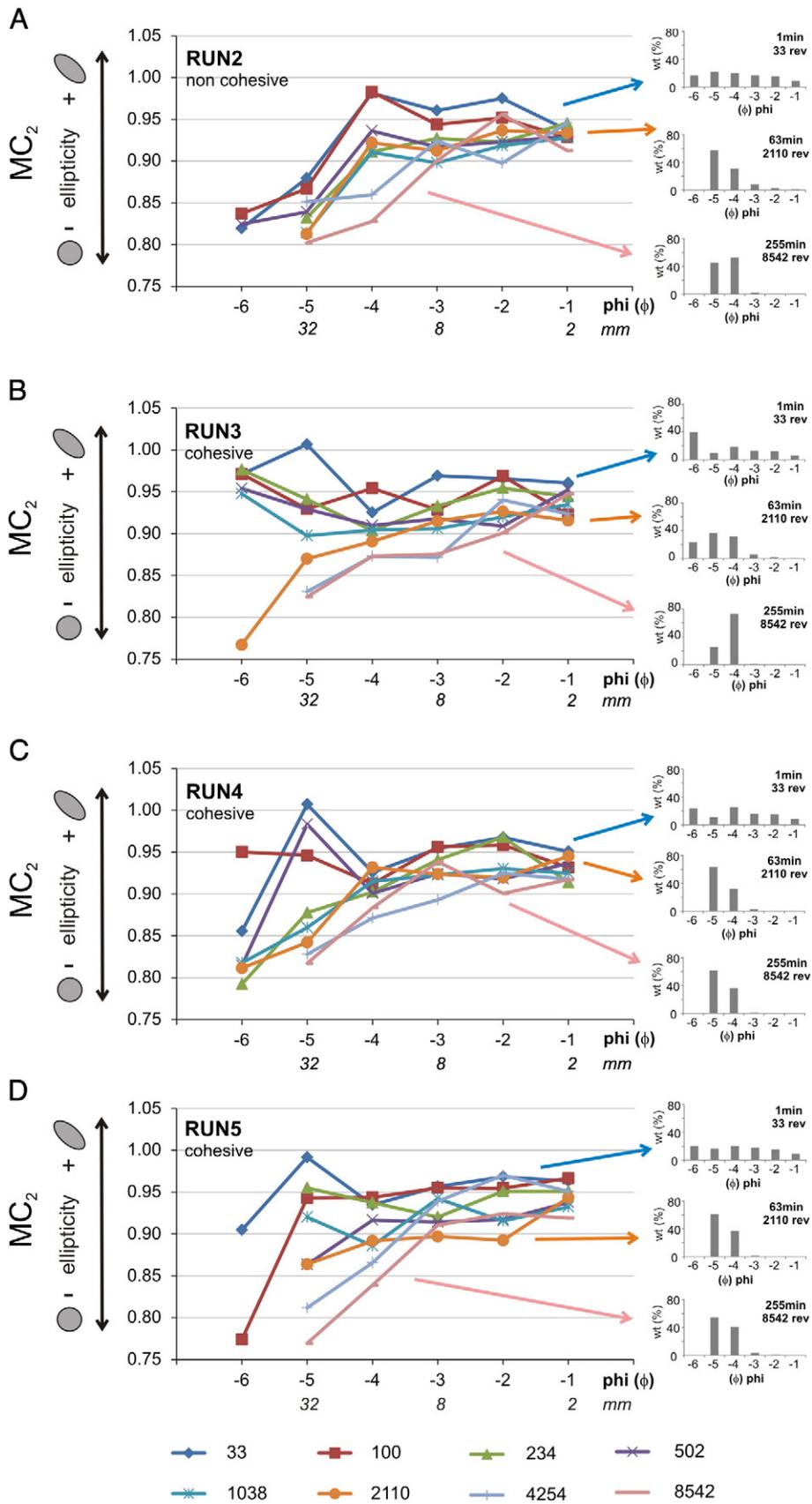
Shape was analyzed quantitatively in particles belonging to granulometric classes between  $-6$  and  $-1 \phi$ . Initial values of the MCs in the same granulometric classes are similar in all experiments because all the materials were obtained by mechanical disintegration of monolithologic rocks, andesitic in composition, and collected on the same outcrop.

Morphological evolution shows different trends as a function of two aspects; the first is related to the type and amount of fines content of the sample, and the second to the diameter of the particles (Tables 4–8, Figs. 4–8). Independently of size and composition of the mixture, a change in the rate of morphological evolution, reflected in all three MCs, occurred at 1038 or 2110 revolutions. Granulometric histograms (Fig. 4) show that this point corresponds to the strong decrease in the  $-1$  to  $-3 \phi$  fractions in all mixtures.

As mentioned above, graphs of morphological coefficients show two main tendencies as a function of particle diameter. The first is seen in particles from  $-6$  to  $-4 \phi$ , in which the morphological coefficients decrease significantly. The second group corresponds to granulometric classes of  $-3$  to  $-1 \phi$ , in which only slight changes in shape characteristics occur. In these finer fractions, high values of MC<sub>2</sub>, MC<sub>3–8</sub>, and MC<sub>30–34</sub> are maintained, which indicates little variation in shape

**Table 8**  
Slope coefficient (*a*) for MC<sub>3–8</sub> and MC<sub>30–34</sub> coefficients.

Mixture	Slope coefficient ( <i>a</i> )	
	MC <sub>3–8</sub>	MC <sub>30–34</sub>
Run 2	0.02124	0.01576
Run 3	0.01539	0.00257
Run 4	0.01625	0.01772
Run 5	0.02104	0.00896



**Fig. 4.** Variation in MC<sub>2</sub> coefficient as a function of particle diameter in the four mixtures used in the experiments. The right side of each graph shows granulometric histograms at 33 revolutions (beginning of the experiment), at 2110 revolutions, and 8542 revolutions (end of the experiment). Each series represents the number of revolutions in the Los Angeles abrasion machine.

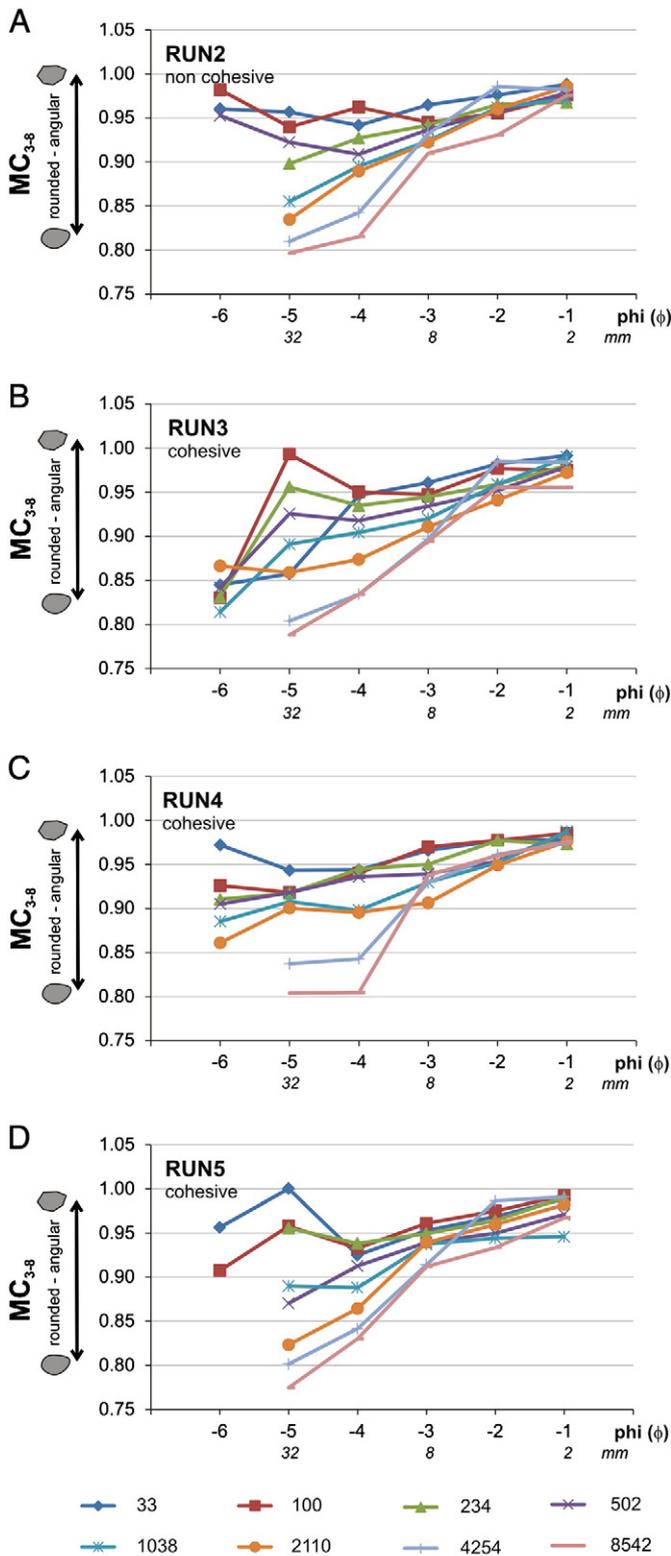


Fig. 5. Coefficient  $MC_{3-8}$  vs. particle diameter for the mixtures used in the experiments. Each series represents the number of revolutions in the Los Angeles abrasion machine.

(Figs. 4–6). This trend is most notable in Run 2 (without fines content), which consistently shows minor variations in clast morphology descriptors (Figs. 4A, 5A and 6A).

Granulometric classes from  $-6$  to  $-4 \phi$  have higher rates of variation, with contours that change from very irregular profiles to more circular, rounded, and polished surfaces (Tables 4–6, Fig. 4). In addition,

these granulometric classes are very sensitive to the type and amount of fines content present in the matrix.  $MC_2$  starts to decrease immediately in mixtures with no clay, giving lines with two different slopes (Fig. 4A and C) because of differential evolution according to particle size. In contrast, clay-rich mixtures (Run 3 and Run 5; Fig. 4B and D) display a more homogeneous decrease for all fractions (from  $-1$  to  $-6 \phi$ ), as shown by the almost parallel lines. Between approximately 1038 and 2110 revolutions, the rate of variation increases in mixtures of Run 3 and Run 5, and the particles finish with more circular contours than in the clay-depleted mixtures (Fig. 4).

Coefficient  $MC_{3-8}$  (Fig. 5) also shows changes toward more rounded shapes for the coarsest particles. Run 2 and Run 5, without silt content, have a similar decreasing trend in all sizes (from  $-1$  to  $-6 \phi$ ). At 1038 revolutions, notable changes occur for the coarsest clast analyzed (Fig. 5A and D). In the presence of silt, roundness increases from the beginning of the experiments (Fig. 5B and C).

Coefficient  $MC_{30-34}$  indicates that fine irregularities are lost in mixtures with fines content, especially in clay-rich ones, in which the particles finish with smoother surfaces (Fig. 6B and D). In contrast, Run 2, without fines content, has less decrease in roughness and even increases in this coefficient for the  $-1 \phi$  fraction (Fig. 6A).

In the graph of changes in the  $MC_{3-8}$  and  $MC_{30-34}$  coefficients by diameter at each time interval and performing a linear regression (Eq. (1)), a high correlation coefficient ( $R^2$ ) can be observed. Fig. 7 is an example of this procedure used for Run 4. From the equations of the lines for all mixtures (Table 7), angular coefficients ( $m$ ) were graphed against the number of revolutions on a logarithmic scale (Eq. (2); Fig. 8; Table 8).

Graphs of the slope coefficients ( $a$ ) display a well-defined behavior (Table 8; Fig. 8). Mixtures without silt (Run 2 and Run 5) show parallel lines with an  $a$  coefficient value of 0.21. Mixtures with silt (Run 3 and Run 4) form another set of almost parallel lines, with a smaller slope and  $a$  values of 0.015 and 0.016 respectively (Fig. 8A).

These new results shed light on the relationship between mixtures with and without silt for the coefficient  $MC_{3-8}$ . The significance of this coefficient is that the greater the value of the angular coefficient, the greater the difference in roundness between the  $-6$  to  $-4 \phi$  and  $-3$  to  $-1 \phi$  granulometric classes. In other words, when no silt is present, the difference in the rate of shape modification between fine and coarse fractions is accentuated. In the presence of silt, a more uniform change in all fractions is observed.

The same analysis was applied for the coefficient  $MC_{30-34}$ . The regression lines show lower slopes when the mixture includes clay (Fig. 8B; Table 8) corroborating the relation of the presence of this material to changes in particle roughness. Mixtures that produce lower slopes, clay-rich ones, exhibit a more homogeneous reduction of roughness for all particle sizes.

## 5. Discussion

A correlation between clast-shape parameters was observed in the processes of interactions between particles, giving a better understanding of the internal dynamics of debris flows. The morphological coefficients used for this purpose, first proposed by Sarocchi (2006, 2007) and Sarocchi et al. (2011), proved to be very sensitive to the type of fines content present in the matrix for mixtures in the range of debris flow concentration. The coefficient  $MC_{3-8}$  is sensitive to macro-scale irregularities such as roundness. Changes in this coefficient show that silt content plays a major role in the loss of coarse irregularities and reduction of angularity. The main influence of clay is in reduction of the coefficient  $MC_{30-34}$ , related to fine irregularities or surface texture. These data give new insights into clast interactions that occur inside debris flows and the role of matrix grain size composition, which until now has focused on clay content in the matrix and neglected the role of silt.

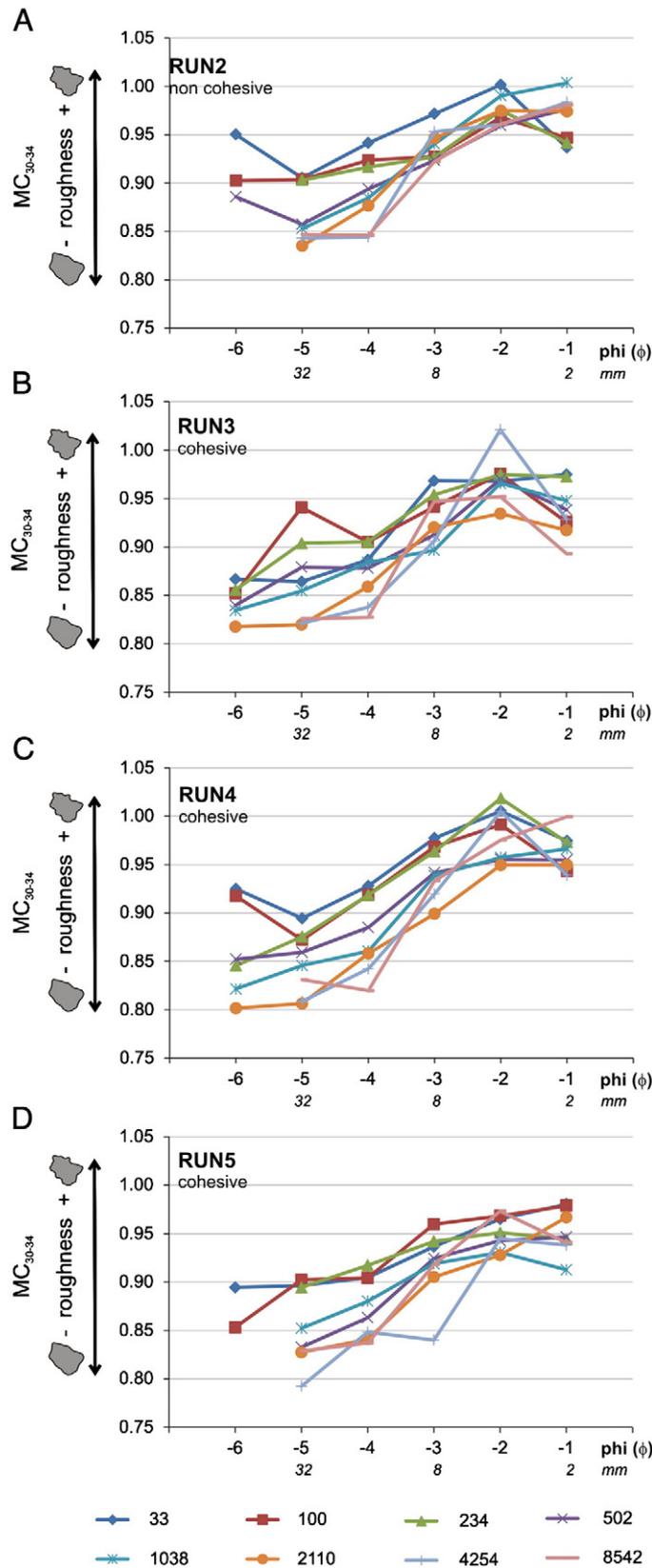


Fig. 6. Graphs showing the values of coefficient  $MC_{30-34}$  as a function of particle diameter in mixtures analyzed. Each series represents the number of revolutions in the Los Angeles abrasion machine.

The original contribution of this work is the elucidation of the difference in clast shape evolution and the rate at which these changes occur as a function of particle size. Our results indicate that particles in granulometric classes from  $-4$  to  $-6 \phi$  evolve to more circular,

rounded, smooth surfaces and the rate of change in each coefficient is a function of the type of fines content present in the matrix. We believe that high energy clast collisions between particles in these granulometric classes induce breakage of along main surface irregularities,

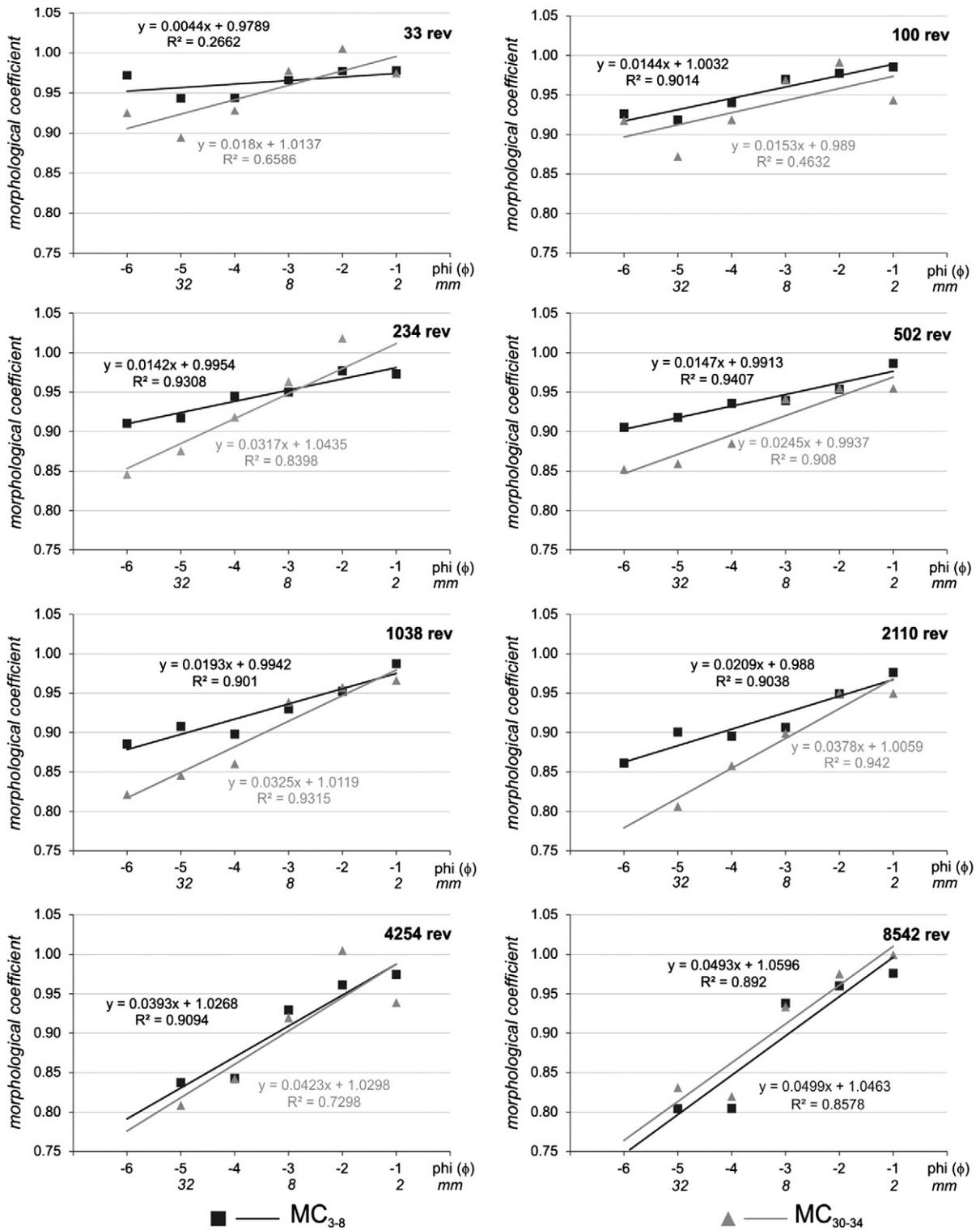
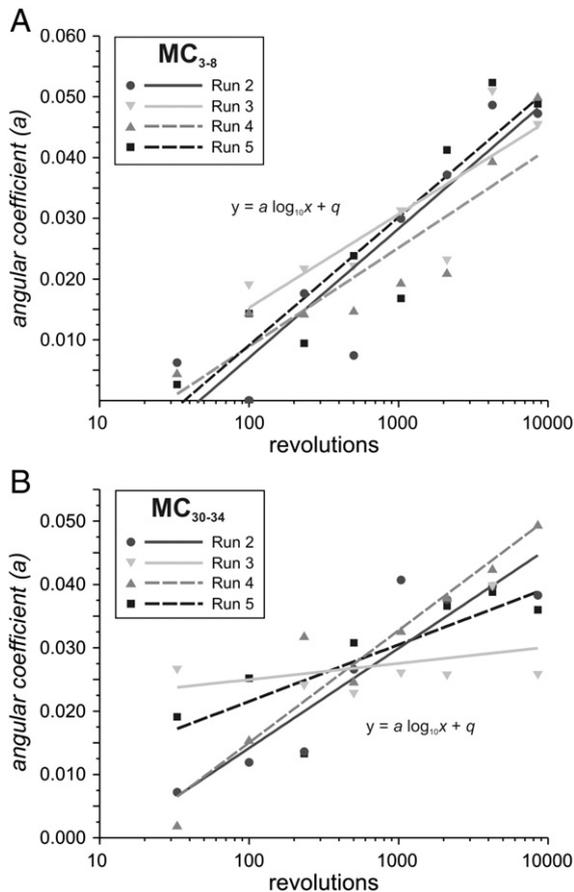


Fig. 7. Linear regression performed on MC<sub>3-8</sub> and MC<sub>30-34</sub> for the Run 4 mixture. Equation of the line and correlation coefficient is shown in each case.

causing an increase in circularity. This effect is reflected in the reduction of the ellipticity coefficient MC<sub>2</sub>. The Run 2 mixture, with no fines content, shows an immediate reduction in ellipticity while mixtures with more fine particles in the matrix maintain higher values of this coefficient at the beginning of the experiment. This phenomenon is attributed to a “cushion effect” induced by silt, but particularly by clay present in the matrix, which dampens collisions between clasts, delaying particle rounding.

In contrast, particles in granulometric classes –1 to –3 φ maintain high values in the three coefficients, indicating less evolved shapes, and are not influenced to the same degree by the matrix composition. The process that controls shape evolution in the finer classes (–1 to –3 φ) is irregular breakage of particles. Constant fracturing in these granulometric classes maintains high values of ellipticity and a high degree of angularity, especially in the Run 2 mixture. Differential evolution as a function of size was described by Gaudin (1926) for



**Fig. 8.** Angular coefficients ( $a$ ) obtained by linear regression of changes in morphological coefficient. The X axis represents the number of revolutions in LAAM on logarithmic scale. A) Coefficient  $MC_{3-8}$ . Note that silt-rich mixtures (Run 3 and Run 4) have lower slope than low-silt mixtures (Run 2 and Run 5). B) Coefficient  $MC_{30-34}$  in which lower slopes are observed in clay-rich mixtures (Run 3 and Run 5).

crushed glass. He stated that large particles become rounded by friction processes while finer material undergoes massive fracturing which enhances angularity, supporting our conclusions.

Coarse irregularities in clasts are also modified by silt content. Silt particles present in the matrix remain in long-term contact with particles in all granulometric classes analyzed ( $-6$  to  $-1 \phi$ ) acting like “sandpaper” to uniformly reduce coarse irregularities and increase roundness. Mixtures with low silt content showed more decrease in roundness and higher rates of clast irregularities in the coarser fractions ( $-6$  to  $-4 \phi$ ) compared to smaller particles in the same mixture ( $-3$  to  $-1 \phi$ ). This leads us to conclude that in the absence of silt, clast collisions only affect macro scale roughness in larger clasts, while small particles are modified mainly by fracturing, thus maintaining their angularity (Fig. 8A). Surface texture modifications are strongly dependent on the clay content of the matrix so mixtures rich in this fraction end up with more regular profiles independent of clast size as seen in Fig. 8B. In the absence of clay, particles retain more irregularities, especially in the  $-1 \phi$  fraction where an increase in roughness is observed.

In all mixtures it was observed that at a certain critical point, between 1038 and 2110 revolutions, circularity increases rapidly for mixtures rich in clay. These critical values are consistent with the vanishing of the  $-1$  to  $-3 \phi$  fractions and comminution of gravel-sized particles (Fig. 4). The strong diminution of  $-1$  to  $-3 \phi$  particles with the subsequent development of bimodal distributions has been previously described in deposits, especially those that have moved long distances; like Osceola Mudflow deposit (Mount Rainier, USA;

Vallance and Scott, 1997), South Fork Lahar deposit (Mount St. Helens, USA; Scott, 1988), and Atenquique debris flow deposit (Colima, Mexico; Saucedo et al., 2008).

In natural debris flows the sharp transition described above could correspond to the initial stages of movement. In similar experiments on pebble abrasion inside rotating drums, travel distances are calculated based on the perimeter of the drum. Wentworth (1919) made this equivalence by simply multiplying barrel circumference by the number of rotations; Adams (1978) claimed that it would correspond to 60% of that value. Using their equivalences, the critical value could be reached between approximately 1.5 and 5 km of transport. Stable morphologies could be reached between 11.5 and 20 km, which correspond to 8542 revolutions in our experiments.

The morphological changes described above are not only important for elucidating the mode of transport of particles. Shape also plays an important role in particle susceptibility to drag force as well as in sedimentation rates. Irregular particles become arranged with their maximum projected area oriented normal to the direction of downward motion, so settling is impeded when grains depart from spherical shapes (Komar and Reimers, 1978; Dietrich, 1982). Coarse particles in mixtures without fines content suffer more energetic collisions and acquire spherical shapes faster, which favor settling. Particles in fine-rich mixtures remain elongated or flattened longer and sedimentation is retarded, thus they remain suspended. This fact is important because impeded settling in debris flows is attributed to matrix strength in clay-rich mixtures (Johnson, 1970; Rodine and Johnson, 1976; Major and Pierson, 1992) and morphology variations enhance this effect. In addition, the decrease in coarse and fine irregularities, particularly in fine-rich mixtures, either silt or clay, has a direct impact on the reduction of friction between coarse particles, enhancing mobility.

The patterns observed in this study offer new insights into the clast-clast interaction, rounding and comminuting theory, with important implications for understanding rheological behavior, kinematics of the flows and related hazards.

## 6. Conclusions

Morphological evolution in mixtures resembling debris flows showed different behavior trends according to particle size. Large particles displayed major changes in shape, including ellipticity, roundness and roughness of their surfaces and became more rounded and polished. Finer clasts remained irregular. The change in shape between classes was gradual and follows a power law. This phenomenon is the result of clast interaction processes within mixtures. Clast collisions between particles produced comminution of the coarsest fractions while finer particles fractured along their entire surface.

The rate of shape modification in these granulometric classes is a function of matrix composition. Silt causes macroscale irregularities, such as roundness, to be modified more easily. Clay affects particle roughness, causing more polished surfaces. But in spite of the type of fine material present in the matrix, marked modifications occur in the presence of either silt or clay, and more evolved forms are seen. Small particles were less susceptible to morphologic changes and retained more irregular contours up to the end of the experiment. This is an extremely important conclusion because high mobility in fines-rich debris flows was previously attributed entirely to the lubricant effects of the clay fraction, disregarding the effect of morphology changes on the modification of sedimentation rates that could affect runout distances.

The study of shape evolution, by means of this new application of Los Angeles abrasion machine, is a powerful tool for a better understanding of the dynamics of processes that operate inside debris flows.

## Acknowledgments

The authors are grateful to Lucia Capra, Lia Carreras, Karoly Nemeth and an anonymous reviewer who provided detailed reviews of the manuscript. This work was partially supported by DGAPA-UNAM, CONACyT (SEP-83301) and PROMEP (Project UASLP-PTC-241).

## References

- Adams, J., 1978. Data for New Zealand pebble abrasion studies. *New Zealand Journal of Science* 21, 607–610.
- Barrett, P.J., 1980. The shape of rock particles, a critical review. *Sedimentology* 27, 291–303.
- Capra, L., Macías, J.L., 2000. Pleistocene cohesive debris flows at Nevado de Toluca Volcano; central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 102, 149–168.
- Capra, L., Macías, J.L., 2002. The cohesive Naranjo debris-flow deposit (10 km<sup>3</sup>): a dam breakout flow derived from the Pleistocene debris-avalanche deposit of Nevado de Colima Volcano (México). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 117, 213–235.
- Carrasco-Núñez, G., Vallance, J.W., Rose, W.I., 1993. A voluminous avalanche-induced lahar from Citlaltépetl volcano, Mexico: implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 59, 35–46.
- Cooley, J.W., Tukey, J.W., 1965. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation* 19, 297–301.
- Costa, J.E., 1984. The physical geomorphology of debris flows. In: Costa, J.E., Fleisher, P.J. (Eds.), *Developments and Applications of Geomorphology*. Springer-Verlag, Berlin and New York, pp. 268–317.
- Coussot, P., Laigle, D., Arattano, M., Deganutti, A., Marchi, L., 1998. Direct determination of rheological characteristics of debris flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 124, 865–868.
- Crandell, D.R., 1971. Postglacial lahars from Mount Rainier volcano, Washington. USGS Professional Paper 677. 75 pp.
- Davis, J.C., 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons, New York, p. 646.
- Dellino, P., La Volpe, L., 1996. Image processing analysis in reconstructing fragmentation and transportation mechanisms of pyroclastic deposits. The case of Monte Pilato-Rocche Rosse eruptions, Lipari (Aeolian islands, Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 71, 13–29.
- Dellino, P., Liotino, G., 2002. The fractal and multifractal dimension of volcanic ash particles contour: a test study on the utility and volcanological relevance. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 113, 1–18.
- Diepenbroek, M., Bartholomä, A., Ibbeken, H., 1992. How round is round? A new approach to the topic 'roundness' by Fourier grain shape analysis. *Sedimentology* 39, 411–422.
- Dietrich, W.E., 1982. Settling velocity of natural particles. *Water Resources Research* 18, 1615–1626.
- Dumaisnil, C., Thouret, J.-C., Chambon, G., Doyle, E.E., Cronin, S.J., Surono, 2010. Hydraulic, physical and rheological characteristics of rain-triggered lahars at Semeru volcano, Indonesia. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 1573–1590.
- Ehrlich, R., Weinberg, B., 1970. An exact method for characterization of grain shape. *Journal of Sedimentary Petrology* 40, 205–212.
- Fink, J.H., Malin, M.C., D'Alli, R.E., Greeley, R., 1981. Rheological properties of mudflows associated with the spring 1980 eruptions of Mount St. Helens Volcano, Washington. *Geophysical Research Letters* 8, 43–46.
- Gaudin, A.M., 1926. An investigation of crushing phenomena. *Transactions AIME* 73, 253–316.
- Goossens, D., 2008. Techniques to measure grain-size distributions of loamy sediments: a comparative study of ten instruments for wet analysis. *Sedimentology* 55, 65–96.
- Hsu, L., Dietrich, W.E., Sklar, L.S., 2008. Experimental study of bedrock erosion by granular flows. *Journal of Geophysical Research* 113, F02001. doi:10.1029/2007JF000778.
- Iverson, R.M., 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics* 35, 245–296.
- Iverson, R.M., Vallance, J.W., 2001. New views of granular mass flows. *Geology* 29, 115–118.
- Johnson, A.M., 1970. *Physical Processes in Geology: a Method for Interpretation of Natural Phenomena; Intrusions in Igneous Rocks, Fractures, and Folds, Flows of Debris and Ice*. Freeman, Cooper, and Company, San Francisco, p. 577.
- Kaitna, R., Rickenmann, D., 2005. Debris flow experiments in a vertically rotating drum. *Geophysical Research Abstracts* 7, 07959.
- Komar, P.D., Reimers, C.E., 1978. Grain shape effects on settling rates. *Journal of Geology* 86, 193–209.
- Konert, M., Vandenberghe, J., 1997. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology* 44, 523–535.
- Krumbein, W.C., 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology* 11, 64–72.
- Lewin, J., Brewer, P.A., 2002. Laboratory simulation of clast abrasion. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 145–164.
- Longo, S., Lamberti, A., 2002. Grain shear flow in a rotating drum. *Experiments in Fluids* 32, 313–325.
- Major, J.J., Pierson, T.C., 1992. Debris flow rheology: experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resources Research* 28, 841–857.
- Manga, M., Patel, A., Dufek, J., 2011. Rounding of pumice clasts during transport: field measurements and laboratory studies. *Bulletin of Volcanology* 73, 321–333.
- Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.C., 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* 41, 17–66.
- Pulgarín, B.A., 2000. Depósitos masivos del Pleistoceno tardío asociados al colapso del flanco sur del volcán Nevado del Huila (Colombia). Ph D Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico, 135 pp.
- Rodine, J.D., Johnson, A.M., 1976. The ability of debris, heavily freighted with coarse clastic materials, to flow on gentle slopes. *Sedimentology* 23, 213–224.
- Sarocchi, D., 2006. Análisis textural del depósito de flujo de bloques y ceniza del 17 de julio de 1999 en el volcán de Colima. Ph D Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico, 222 pp.
- Sarocchi, D., 2007. Estudio sedimentológico del depósito de flujo de bloques y ceniza del 17 de julio de 1999 en el volcán de Colima. Monografías del Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 92 pp.
- Sarocchi, D., Sulpizio, R., Macías, J.L., Saucedo, R., 2011. The 17 July 1999 block-and-ash flow (BAF) at Colima Volcano: new insights on volcanic granular flows from textural analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 204, 40–56.
- Saucedo, R., Macías, J.L., Sarocchi, D., Bursik, M., Rupp, B., 2008. The rain-triggered Atenuique volcanoclastic debris flow of October 16, 1955 at Nevado de Colima Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 173, 69–83.
- Schwarz, H.P., Shane, K.C., 1969. Measurement of particle shape by Fourier analysis. *Sedimentology* 13, 213–231.
- Scott, K., 1988. Origin, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz river system. USGS Professional Paper 1447-A. 74 pp.
- Scott, K., Vallance, J.W., Pringle, P.T., 1995. Sedimentology, behavior, and hazards of debris flows at Mount Rainier, Washington. USGS Professional Paper 1547. 56 pp.
- Scott, K.M., Macías, J.L., Naranjo, J.A., Rodríguez, S., McGeehin, J.P., 2001. Catastrophic debris flows transformed from landslides in volcanic terrains: mobility, hazard assessment, and mitigation strategies. USGS Professional Paper 1630. 59 pp.
- Vallance, J.W., Scott, K., 1997. The Osceola mudflow from Mount Rainier: sedimentology and hazard implications of a huge clay-rich debris flow. *Geological Society of America Bulletin* 109, 143–163.
- Wentworth, C.K., 1919. A laboratory and field study of cobble abrasion. *Journal of Geology* 27, 507–521.
- Xu, R., Di Guida, O.A., 2003. Comparison of sizing small particles using different technologies. *Powder Technology* 132, 145–153.