



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM**

**ESTUDIO DE FLUJOS GRANULARES CON CLASTOS
DE DIFERENTE DENSIDAD**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**DOCTOR EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(VULCANOLOGÍA)**

P R E S E N T A :

LUIS ÁNGEL RODRIGUEZ SEDANO

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. DAMIANO SAROCCHI
Instituto de Geología, UASLP**

Centro de Geociencias, Juriquilla, Qro. mayo 2017



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.

INDICE	i
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xv
CÁPITULO UNO	1
INTRODUCCIÓN	1
I.1 El Problema	2
I.2 Hipótesis de trabajo	4
I.3 Objetivos	4
I.3.1 Objetivos generales	4
I.3.2 Objetivos específicos	5
CÁPITULO DOS	6
MARCO TEORICO	6
II.1 Materiales granulares	7
II.2 Flujos granulares	10
II.2.1 Oscilaciones de compresión y descompresión en un flujo granular (Stick-Slip motion)	12
II.3 Flujos secos/Flujos piroclásticos	13
II.3.1 Introducción	13
II.3.2 Origen y formación de CPD's	14
II.3.2.1 CPD por Colapso de domo	14
II.3.2.2 CPD por Colapso de columna eruptiva	17
II.3.3 Mecanismos de transporte y sedimentación de CPD	19
II.3.3.1 El concepto de "Flow Boundary Zone"	19
II.3.3.2 Mecanismos de soporte de partículas	22

II.3.3.2 Mecanismos de sedimentación en CPD	25
II.4 Modelado de flujos granulares	27
II.4.1 Canaleta de la USGS (Gran escala)	29
II.4.2 PELE- “The Pyroclastic Flow Generator (Mediana escala)”	30
II.4.3 Canaleta de la Universidad de Roma (Pequeña escala)	31
CÁPITULO TRES	33
MATERIALES Y METODOS	33
III.1 Materiales	34
III.1.1 Pómez	34
III.1.2 Líticos	35
III.1.3 Caracterización de los materiales	37
III.2 GRANFLOW-SIM	39
III.2.1 Contenedor	40
III.2.2 Unidad de aceleración	43
III.2.3 Canaleta con inclinación variable	43
III.2.4 Depósito para la sedimentación	45
III.2.5 Torre de soporte	46
III.2.6 Sensores usados	47
III.2.6.1 Celdas de carga	47
III.2.6.2 Barreras Láser	49
III.2.6.3 Cámaras de alta velocidad	50
III.2.7 Adquisición de los datos	51
III.2.8 Arreglo (“Set up”) experimental	52
III.2.9 Angulo de reposo, coeficiente de restitución y coeficiente de fricción	58
III.2.9.1 Angulo de reposo	58

III.2.9.2 Coeficiente de restitución	59
III.2.9.3 Coeficiente de fricción del piso pirelli	60
III.2.10 Escalamiento: análisis dimensional de los experimentos	60
III.2.11 Limitantes	62
CÁPITULO CUATRO	68
RESULTADOS	68
IV.1 Mezclas monodispersas	69
IV.1.1 Cinemática del flujo	70
IV.1.2 Quiebre de pendiente	77
IV.1.3 Masa vs Alcance	89
IV.1.4 Presión del flujo en el fondo	93
IV.2 Mezclas Polidispersas	97
IV.2.1 Cinemática del flujo	98
IV.2.2 Quiebre de pendiente	101
IV.2.3 Masa vs Alcance	107
IV.2.4 Presión del flujo en el fondo	109
IV.2.5 Distribución longitudinal de pómez en el depósito.	111
CÁPITULO CINCO	113
DISCUSIÓN	113
V.1 Mezclas Monodispersas	114
V.1.1 Influencia del tamaño de grano en la velocidad y alcance.	114
V.1.1.1 Variaciones observadas en la canaleta	115
V.1.1.2 Variaciones observadas en el cambio de pendiente	120
V.1.1.3 Variaciones observadas en el Alcance	120
V.1.2 Influencia de la relación pómez – líticos en la velocidad y alcance.	121

V.1.2.1 Variaciones observadas en la canaleta	121
V.1.2.2 Variaciones observadas después del cambio de pendiente	125
V.1.2.3 Variaciones observadas relacionadas al alcance	126
V.2 Mezclas Polidispersas	128
V.2.1 Influencia del tamaño de grano en la velocidad y alcance.	128
V.2.1.1 Variaciones observadas en la canaleta	128
V.2.1.2 Variaciones observadas en el cambio de pendiente	130
V.2.1.3 Variaciones observadas en relación al alcance	130
V.2.2 Influencia de la relación pómez – líticos en la velocidad y alcance.	130
V.2.2.1 Variaciones observadas en la canaleta	130
V.2.2.2 Variaciones observadas después del cambio de pendiente	132
V.2.2.3 Variaciones observadas relacionadas con el alcance	133
V.2.2 Influencia de la relación pómez – líticos en la Segregación longitudinal en el depósito: Comparación con un caso real.	135
CÁPITULO SEIS	137
CONCLUSIONES	137
VI.1 Conclusiones	138
VI.1.1 Conclusiones flujos MONODISPERSOS:	138
VI.1.2 Conclusiones flujos POLIDISPERSOS:	139
VI.1.3 Conclusiones generales:	140
REFERENCIAS	141

LISTA DE FIGURAS

Capítulo II

Figura II.1. Ilustración de diferentes materiales granulares.

Figura II.2. (a) Flujo piroclástico generado por colapso de domo en el volcán Merapi en Indonesia (14 de mayo, 2006) Fuente: <http://volcanoes.usgs.gov/vdap/images/merapi/>. (b) Generación de flujos piroclásticos por colapso de columna, Volcán Santiaguito (14 de agosto, 2016) Fuente: <https://www.wired.com/2016/08/anatomy-volcanic-blast-guatemalas-santiaguito/>

Figura II.3. Modelo de los procesos que ocurren en un flujo tipo merapi. Cambio de un flujo granular a un flujo fluidizado. Modificado de Takahashi y Tsujimoto (2000).

Figura II.4. Columna eruptiva sostenida durante una erupción moderada en el volcán de colima (4 de febrero, 2015). E esta fotografía resulta muy fácil observar las tres zonas de una columna eruptiva Fuente: http://www.photovolcanica.com/VolcanoInfo/Colima/Colima2015__0283.JPG

Figura II.5. Diagrama que ilustra la localización del FBZ dentro de una corriente piroclastica. Modificado de Sulpizio et al., (2014). Cabe mencionar que en cuanto a la fábrica débil o inexistente mostrada en esta figura, el tema aun actualmente está en controversia y se continúa con la investigación al respecto.

Figura II.6. a) Diagrama de la zona de flow boundary. R_{in} , tasa de reincorporación de partículas en el flujo, R_{el} , tasa de elutriación de partículas desde la zona de flow boundary, R_s , tasa de suministro de partículas desde la parte superior del flujo, R_d , tasa de depositación de partículas; b) esquema de los campos relativos de los cuatro tipos de zonas de flow boundary. (Modificado de Sulpizio et al.,2014)

Figura II.7. Canaleta experimental de Richard Iverson (USGS).

Figura II.8. Boceto de la canaleta experimental PELE de la universidad de Massey en Nueva Zelanda. Modificado de Lube et al. (2015).

Figura II.9. Foto y sketch de la canaleta de Bruno Cagnoli, en la Universidad de Roma. Modificado de Cagnoli y Romano (2010).

Capítulo III

Figura III.1. Imagen de los depósitos de la Pómez Ezequiel Montes y algunas de sus unidades inferiores. Para más información se hace referencia al lector a los trabajos de Aguirre et al., (2001) y Hernandez et al., (2009).

Figura III.2. Esquema que ilustra los diferentes módulos de la canaleta experimental GRANFLOW-SIM. A excepción de la torre de soporte.

Figura III.3. Plano principal de la estructura completa del GRANFOW-SIM en planta, perfil y oblicuo.

Figura III.4. Módulo del contenedor de material del GRANFLOW-SIM, ubicado sobre la parte alta de la canaleta.

Figura III.5. Módulo de depósito para la sedimentación del material del GRANFLOW-SIM.

Figura III.6. Fotografía que muestra las barreras laser activadas y en funcionamiento.

Figura III.7. Para la realización de los experimentos con mezclas polidispersas se usaron dos tipos de distribuciones granulométricas: Una Gaussiana y otra Weibull.

Figura III.8. Fotografía que ilustra lo que en este trabajo es definido como el frente principal (señalado con una línea punteada). Este frente fue el que se tomó en cuenta para medir el alcance de cada flujo.

Figura III.9. Metodología utilizada para calcular el ángulo de reposo de los materiales usados en este trabajo.

Figura III.10. Método por el cual se obtuvo el valor del coeficiente de restitución de los materiales usados en estos experimentos.

Figura III.11. Comparación de los factores de escala geométricos factor H/L (Hayashi y Self, 1992) contra el factor L/A_c (A_c =Ancho del cauce). Se comparan estos factores en los flujos creados en este trabajo de tesis contra flujos reales en el volcán de Colima (Saucedo et al., 2004; Saucedo et al., 2010; Sulpizio et al., 2010; Capra et al., 2016), el volcán Soufriere Hills en Montserrat (Calder et al., 1999) y el volcán Monte Santa Elena en Estados Unidos (de flujos piroclásticos ocurridos dos meses después de la gran erupción y colapso de mayo de 1980) (Hayashi y Self, 1992). Se usó una línea de tendencia potencial, los valores del R^2 y la ecuación se muestran en la figura.

Figura III.12. Comparación de la energía cinética de los flujos contra la energía cinética del bloque o clasto más grande de cada flujo. Se comparan estos factores en los flujos creados en este trabajo de tesis contra flujos reales en el volcán de Colima (Saucedo et al., 2004; Saucedo et al., 2010; Sulpizio et al., 2010; Capra et al., 2016), el volcán Soufriere Hills en Montserrat (Calder et al., 1999) y el volcán Monte Santa Elena en Estados Unidos (de flujos piroclásticos ocurridos dos

meses después de la gran erupción y colapso de mayo de 1980) (Hayashi y Self, 1992). Se usó una línea de tendencia potencial, los valores del R^2 y la ecuación se muestran en la figura.

Figura III.13. Comparación del factor de escala H/L (Hayashi y Self, 1992) contra la energía cinética de los flujos. Se comparan estos factores en los flujos creados en este trabajo de tesis contra flujos reales en el volcán de Colima (Saucedo et al., 2004; Saucedo et al., 2010; Sulpizio et al., 2010; Capra et al., 2016), el volcán Soufriere Hills en Montserrat (Calder et al., 1999) y el volcán Monte Santa Elena en Estados Unidos (de flujos piroclásticos ocurridos dos meses después de la gran erupción y colapso de mayo de 1980) (Hayashi y Self, 1992). Se usó una línea de tendencia potencial, los valores del R^2 y la ecuación se muestran en la figura.

Figura III.14. Comparación de la energía cinética de los flujos contra la velocidad máxima de los flujos. Se comparan estos factores en los flujos creados en este trabajo de tesis contra flujos reales en el volcán de Colima (Saucedo et al., 2004; Saucedo et al., 2010; Sulpizio et al., 2010; Capra et al., 2016), el volcán Soufriere Hills en Montserrat (Calder et al., 1999) y el volcán Monte Santa Elena en Estados Unidos (de flujos piroclásticos ocurridos dos meses después de la gran erupción y colapso de mayo de 1980) (Hayashi y Self, 1992). Se usó una línea de tendencia potencial, los valores del R^2 y la ecuación se muestran en la figura.

Capítulo IV

Figura IV.1. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la clase granulométrica -3 Phi. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

Figura IV.2. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la clase granulométrica -2 Phi. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

Figura IV.3. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la clase granulométrica -1 Phi. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

Figura IV.4. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la clase granulométrica 0 Phi. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

Figura IV.5. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la clase granulométrica 1 Phi. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

Figura IV.6. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la clase granulométrica -3 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

Figura IV.7. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la clase granulométrica -2 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

Figura IV.8. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la clase granulométrica -1 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

Figura IV.9. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la clase granulométrica 0 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

Figura IV.10. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la clase granulométrica 1 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

Figura IV.11. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la clase granulométrica -3 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

Figura IV.12. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la clase granulométrica -2 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente

Figura IV.13. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la clase granulométrica -1 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres

lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente

Figura IV.14. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la clase granulométrica 0 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente

Figura IV.15. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la clase granulométrica 1 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente

Figura I V.16. Comparación de todas las clases granulométricas que muestra el aumento o disminución de la velocidad registrada en el láser 10 en función del contenido de pómez en la mezcla.

Figura IV.17 Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la clase granulométrica -3 Phi.

Figura I V.18. Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la clase granulométrica -2 Phi.

Figura I V.19. Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la clase granulométrica -1 Phi.

Figura I V.20. Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la clase granulométrica 0 Phi.

Figura I V.21. Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la clase granulométrica 1 Phi.

Figura IV.22. Grafica basada en los datos de las celdas de carga. Se usaron los valores máximos registrados en cada celda. Datos correspondientes a -3 Phi.

Figura IV.23. Grafica basada en los datos de las celdas de carga. Se usaron los valores máximos registrados en cada celda. Datos correspondientes a -2 Phi.

Figura IV.24. Grafica basada en los datos de las celdas de carga. Se usaron los valores máximos registrados en cada celda. Datos correspondientes a -1 Phi.

Figura IV.25. Grafica basada en los datos de las celdas de carga. Se usaron los valores máximos registrados en cada celda. Datos correspondientes a 0 Phi.

Figura IV.26. Grafica basada en los datos de las celdas de carga. Se usaron los valores máximos registrados en cada celda. Datos correspondientes a 1 Phi.

Figura IV.27. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la mezcla Weibull. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

Figura IV.28. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la mezcla Gauss. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

Figura IV.29. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la mezcla Weibull. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

Figura IV.30. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la mezcla Gaussiana. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

Figura IV.31. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la mezcla Weibull. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

Figura IV.32. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la mezcla Weibull. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

Figura IV.33. Comparación de las mezclas Weibull y Gauss que muestra el aumento o disminución de la velocidad registrada en el láser 10 en función del contenido de pómez en la mezcla.

Figura IV.34. Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la distribución granulométrica Weibull.

Figura IV.35. Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la distribución granulométrica Gauss.

Figura IV.36. Grafica basada en los datos de las celdas de carga. Se usaron los valores máximos registrados en cada celda. Datos correspondientes a las mezclas Weibull.

Figura IV.37. Grafica basada en los datos de las celdas de carga. Se usaron los valores máximos registrados en cada celda. Datos correspondientes a las mezclas Gaussianas.

Figura IV.38. Variación longitudinal del contenido de pómez (expresado en porcentaje) desde el cambio de pendiente hasta la parte distal del depósito de la mezcla WP50.

Figura IV.39. Variación longitudinal del contenido de pómez (expresado en porcentaje) desde el cambio de pendiente hasta la parte distal del depósito de la mezcla GP50.

Capítulo V

Figura V .1. Gráfico que muestra la velocidad registrada en los primeros nueve láseres de la canaleta (correspondientes solo a la canaleta – plano inclinado). A) muestra la velocidad para las mezclas formadas únicamente por líticos. B) muestra la velocidad para las mezclas únicamente formadas por pómez. Se agregó una línea de tendencia (lineal) para cada clase granulométrica para evidenciar la tendencia general de la velocidad de cada clase.

Figura V .2. A) Muestra la variación (desviación estándar) de los resultados de las velocidades normalizadas medidas en la canaleta y en el módulo de sedimentación tomando en cuenta todas las granulometrías con sus diferentes proporciones de pómez. Se observa que hay mayor variación en las clases granulométricas más grandes. B) Muestra la variación de los alcances medidos para todas las clases granulométricas y sus diferentes mezclas con proporciones de pómez. Se observa que a pesar del diferente contenido de pómez la variación de los alcances se reduce conforme se reduce el tamaño de las partículas.

Figura V .3. Variación de la velocidad de acuerdo al contenido de pómez para las clases granulométricas -3, -2 y -1 Phi (los clastos gruesos).

Figura V .4. Variación de la velocidad de acuerdo al contenido de pómez para las clases granulométricas 0 y 1 Phi (los clastos finos).

Figura V.5 Gráfico que muestra la velocidad registrada en los primeros nueve láseres de la canaleta (correspondientes solo a la canaleta – plano inclinado). Las líneas continuas representan a las mezclas formadas únicamente por líticos, mientras que las líneas curvas formadas por segmentos de líneas gruesas representan las mezclas formadas únicamente por pómez. Se observan también las líneas de tendencia (linear) que representan la tendencia general de la velocidad de estas mezclas.

Figura V.6. Variación de la velocidad de acuerdo al contenido de pómez para las mezclas Weibull (a) y Gaussianas (b).

Figura V.7. Imagen panorámica de los depósitos GP50 (a) y WP50 (b). Se muestra el conteo hecho con el software Image Pro. Solo se contaron las partículas que se encontraban en la pared lateral del depósito. Las marcas rojas corresponden a partículas de pómez y las verdes a los líticos

LISTA DE TABLAS

Capítulo III

Tabla III.1 Materiales monodispersos.

Tabla III.2 Materiales Polidispersos.

Tabla III.3 Datos adicionales.

Tabla III.4. Parámetros usados para la elaboración de las gráficas de escalamiento.

Capítulo V

Tabla V.1 Alcance medido de todas las granulometrías con sus diferentes proporciones de pómez.

Resumen

Al movimiento de un conjunto de partículas de diferentes tamaños, formas y densidades se conoce como flujo granular. Dentro de estos fenómenos, los flujos granulares de tipo geológico, como flujos piroclásticos, de escombros o avalanchas, tienen comportamientos complejos, controlados por la gravedad, propiedades mecánicas, densidad y granulometría de los materiales constituyentes. Desastres como los ocurridos en el Monte Santa Helena en 1980, Nevado del Ruiz en 1985 o el Monte Pinatubo en 1991, representan claros ejemplos de la peligrosidad que estos procesos geológico pueden llegar a tener y la importancia que su estudio representa. Años de investigación han producido avances significativos en el entendimiento de los mecanismos de transporte y sedimentación de estos flujos, sin embargo, el efecto de la densidad de los clastos y el contrastes de densidad en un flujo granular aún no han sido entendido por completo. En este trabajo se reportan los resultados de 35 experimentos (equivalentes a 105 lanzaamientos) realizados en la canaleta experimental GRANFLOW-SIM (Granular flow simulator o simulador de flujos granulares) del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Estos experimentos se llevaron a cabo usando materiales naturales (Pómez riolíticas y líticos de composición dacítica) con distribuciones granulométricas monodispersos (clases granulométricas -3, -2, -1, 0 y 1 Phi) y polidispersos (distribuciones granulométricas de tipo Weibull y Gauss) con diferentes proporciones en volumen de pómez vs. líticos, con el fin de estudiar el efecto de la pómez sobre las corrientes piroclásticas de densidad. Se logró determinar que al agregar el 25% o más de pómez en volumen a una mezcla monodispersa o el 10% o más en volumen de pómez a una mezcla polidispersa, ésta cambia totalmente su cinemática, su respuesta ante un cambio drástico de pendiente, la segregación que ocurre en su interior y el alcance. De la misma forma se encontró que el tamaño de las partículas puede llegar a condicionar este efecto, de tal manera que a menor tamaño de grano menor resulta el efecto de la presencia de pómez. En un cambio de pendiente la granulometría determina aumentos o disminuciones de velocidad, mientras que la pómez influye en la magnitud de estas variaciones. Materiales monodispersos y polidispersos muestran comportamientos completamente diferentes frente a cambios de pendiente u obstáculos en condiciones similares. Es muy importante tomar esto en consideración cuando se diseñen

experimentos a escala, dado que muchos experimentos analógicos hoy en día se realizan con mezclas monodispersas y/o materiales artificiales mientras que en la naturaleza las avalanchas son polidispersas y compuestas por materiales naturales con propiedades anisótropas, irregulares y de diferente rugosidad. Cabe resaltar que los resultados obtenidos derivan de experimentos de laboratorio realizados con flujos granulares secos a temperatura ambiente. La temperatura de los materiales no fue una variable considerada lo cual significa una limitante a la que se dará una solución en experimentos futuros. Los datos aportados en este trabajo muestran que el efecto de la pómez en la dinámica de los flujos granulares, debería ser tomado en cuenta al momento de evaluar amenazas volcánicas como las corrientes piroclásticas. De la misma forma debería ser tomado en cuenta para modelar cualquier otro tipo de flujo que involucre volúmenes de material de baja densidad en su interior.

Abstract

The movement of a set of particles of different size, shape and densities is known as granular flow. Within these phenomena, geological granular flows such as pyroclastic flows, debris flows, or debris avalanches, have very complex behaviors, controlled by gravity, mechanical properties, density and granulometry of the constituent materials. Disasters like those occurred on Mount Saint Helens in 1980, Nevado del Ruiz in 1985 or Mount Pinatubo in 1991, represent clear examples of the danger that these geological processes could have and the relevance that its study represent. Years of research have produced significant advances in the understanding of the transport and sedimentation processes of these flows. However, the role and effects of clast densities and density contrast in a granular flow are still not fully understood. On this work are reported the results of 35 experiments (equivalent to 105 runs) performed in the GRANFLOW-SIM flume of the Geology Institute of the Universidad Autónoma de San Luis Potosí. These experiments were made using natural materials (riolitic pumice and dacitic lithics) with monodisperse granulometric distributions (-3, -2, -1, 0 y 1 Phi), polydisperse granulometric distributions (Weibull and Gauss distributions) and with different pumice/lithics volumetric proportions in order to study the effect of pumice on pyroclastic density currents.

It was determined that by adding 25% or more of pumice by volume to a monodispersed mixture or 10% or more by volume of pumice to a polydispersed mixture, it completely changes its kinematics, its response to a drastic change in slope, segregation that occurs within the flow and the runout. In the same way, it was found that the size of the particles can condition this effect, in such a way that the smaller the grain size the smaller the effect of the pumice. In a change in slope the granulometry determines increases or decreases of speed, whereas the pumice influences in the magnitude of these variations. Monodisperse and polydisperse materials show completely different behavior against changes in slope or obstacles under similar conditions. It is very important to take this into consideration when designing scale experiments, since many analogical experiments today are performed with monodisperse mixtures and / or artificial materials whereas in nature the avalanches are polydisperse and composed of natural materials with anisotropic properties, Irregular and of different roughness. It should be noted that the results obtained derive from laboratory

experiments performed with dry granular flows at room temperature. The temperature of the materials was not a considered variable which means a limitation to which a solution will be given in further experiments. The data presented in this work show that the effect of pumice on the dynamics of granular flows should be taken into account when evaluating volcanic threats such as pyroclastic currents. In the same way it should be taken into account to model any other type of flow that involves volumes of low density material inside.

CÁPITULO UNO

INTRODUCCIÓN

- EL PROBLEMA
 - HIPÓTESIS
 - OBJETIVOS
 - JUSTIFICACIÓN
-

I.1 El Problema

Los flujos granulares de tipo geológico son fenómenos muy complejos, controlados por la gravedad que, dependiendo de su origen y del tipo de material que los conforma, presentan comportamientos diferentes.

Estudiar las características físicas de un flujo geológico en la naturaleza, tal como un flujo piroclástico, un flujo de escombros o una avalancha de escombros resulta en una tarea sumamente complicada debido a la peligrosidad y riesgo que representa una observación directa de estos fenómenos así como su carácter impredecible. Dada la importancia que tiene el estudio de estos tipos de flujos, se ha vuelto necesario estudiar a fondo sus características físicas, a fin de tener una mejor comprensión de sus comportamientos y mitigar lo más posible los daños que éstos pudieran causar. En las últimas décadas, han sido realizados numerosos estudios con una multitud de objetivos y metodologías (Jaeger, 1996; Kakhar, 1997; Kadanof, 1999; Duran, 1999; Iverson et al., 2004; Cagnoli y Manga, 2005; Cagnoli y Romano, 2010; Cagnoli y Romano, 2012b; Caballero et al., 2012; Cagnoli y Romano, 2013; Sulpizio 2014; Cagnoli y Piersanti, 2015) que han impulsado una proliferación de la literatura sobre el tema. Sin embargo, aún queda mucho por realizar.

En cuanto a la vulcanología grandes avances se han hecho en materia del estudio de flujos granulares (Flujos piroclásticos, flujos de escombros, avalanchas granulares). Sulpizio et al (2014) reseña de manera puntual el estado actual del conocimiento general en cuanto a flujos piroclásticos, sus mecanismos de transporte y depositación en base a estudios en campo y en laboratorio realizados por diversos autores. Sin embargo aún hay aspectos específicos poco estudiados en los que vale la pena realizar análisis profundos y sistemáticos para enriquecer el entendimiento de estos peligrosos fenómenos. Uno de estos es el efecto de la densidad y del contraste de densidad de los componentes de la fracción sólida que constituye estos flujos. En flujos de escombros las partículas que son menos densas que el agua tienden a ascender y a acumularse en la superficie y después migrar hacia los márgenes del flujo (Dolan, 2004; Vallance, 2005). Esto causa por sí mismo cambios en la cinemática del flujo. De acuerdo con el estudio de Capra et al. (2004), el

contenido de material juvenil de baja densidad afecta de manera notable la capacidad de un flujo de escombros no cohesivo de sufrir transformaciones a lo largo de su recorrido. En flujos piroclásticos ocurre algo similar, las partículas con menor densidad tienden a separarse, segregarse hacia la superficie y recorrer mayores distancias a comparación de las partículas más densas dentro del flujo (Calder, 2000). Experimentalmente los trabajos de Bruno Cagnoli (Cagnoli y Manga, 2005; Cagnoli y Romano, 2010; Cagnoli y Romano, 2012b; Cagnoli y Romano, 2013; Cagnoli y Piersanti, 2015) han aportado datos importantes acerca de las interacciones, segregación y redondeamiento de mezclas de partículas artificiales y naturales con clastos de diferente densidad todo esto a través de experimentación a escala.

Existen hasta ahora evidencias que apuntan a que la densidad de los materiales en un flujo granular tiene influencia en su desarrollo, su cinemática y alcance (Calder et al., 1999; 2000; Capra et al., 2004; Cagnoli y Manga, 2005, Pitari et al., 2005), sin embargo, hasta la fecha, son pocos los estudios enfocados sistemáticamente para cuantificar tal efecto durante su recorrido en un plano inclinado o ante un cambio topográfico como un cambio de pendiente. En este trabajo se presentan nuevas evidencias que aportan datos inéditos no sólo sobre el efecto que la pómez puede tener en un flujo granular, sino que se presenta también un umbral a partir del cual este efecto comienza a tener una influencia notable en el desarrollo de los flujos. Todo esto basado en resultados obtenidos mediante experimentos sistemáticos de laboratorio. De la misma forma se comprobó que en estos experimentos a escala se observan comportamientos similares a los observados en campo y reportados en los trabajos de Calder et al. (1999; 2000) En lo concerniente a segregación longitudinal de un flujo piroclástico formado por materiales con diferente densidad. Una limitante en este trabajo ha sido el efecto que la temperatura pueda tener en un flujo granular como un flujo piroclástico. Esta variable no ha sido tomada en cuenta debido a que el aparato experimental no está diseñado para soportar las altas temperaturas del material, sin embargo es considerada a ser tomada en cuenta a futuro, siguiendo las metodologías de los trabajos de Lube et al 2015 quienes pre calientan en un horno el material a ser lanzado.

I.2 Hipótesis de trabajo

El contenido de material juvenil de baja densidad parece tener un efecto en los mecanismos de transporte, emplazamiento, capacidad de soporte de clastos y, en general, en procesos donde la densidad y la gravedad son factores dominantes. Está aceptado que el contenido de arcilla tiene una gran influencia en los procesos físicos, el comportamiento y en las características de los depósitos de flujos de escombros, a tal grado que en base a este parámetro se subdividen categorías con reologías y comportamientos muy diferentes (Kurdin, 1973; Pierson y Scott, 1985). De forma similar, en este trabajo, se plantea la hipótesis de que los procesos físicos y el comportamiento, de los flujos piroclásticos puedan llegar a estar condicionados por la densidad, las propiedades elásticas (relacionadas también con la densidad) y el contraste de densidad de las partículas que los conforman, y si es así debe existir un umbral a partir del cual la cantidad en volumen de pómez comienza a ser factor determinante en la cinemática, procesos de depositación y alcances de estos flujos. Dada la alta peligrosidad de estos fenómenos es importante entender su comportamiento en este tipo de condiciones ya que podría representar cambios importantes en la forma de representar los flujos piroclásticos en los mapas de peligros volcánicos.

I.3 Objetivos

Para poder comprobar dicha hipótesis ha sido necesario realizar un estudio con métodos específicamente diseñados y siguiendo una metodología estándar. Se han individuado dos objetivos generales, fundamentales para esta investigación y tres objetivos específicos.

I.3.1 Objetivos generales

- Detectar y cuantificar la influencia de la densidad de los materiales y la interacción de clastos con diferente densidad en un flujo granular con énfasis en la cinemática y procesos de segregación en flujos piroclásticos (flujos granulares secos). Estos datos representarían una aportación nueva en el entendimiento de este tema en específico.

- Determinar, si existe, un umbral a partir del cual el efecto de la componente de baja densidad comienza a ser determinante para condicionar el comportamiento de los flujos granulares.

I.3.2 Objetivos específicos

Determinar cómo influye la presencia de pómez sobre diversos factores y procesos en flujos granulares (con distribuciones granulométricas monodispersas y polidispersas), tales como:

- Ø Velocidad
- Ø Alcance
- Ø Segregación y Variaciones granulométricas a lo largo del depósito

MARCO TEORICO

- MATERIALES Y FLUJOS GRANULARES
 - FLUJOS SECOS/FLUJOS PIROCLASTICOS
 - MODELADO DE FLUJOS GRANULARES
-

II.1 Materiales granulares

Los materiales granulares o granulados están compuestos por una gran cantidad de partículas sólidas de tamaño macroscópico. El tamaño de las partículas puede variar desde algunas micras (lo suficientemente grandes para ser observados a simple vista) hasta partículas de decenas o cientos de metros (por ejemplo los anillos de Saturno). Esta caracterizado por una pérdida de energía cada vez que las partículas interactúan (comúnmente por fricción cuando colisionan) (Duran, J., 2000).

Los primeros descubrimientos importantes sobre materiales granulares fueron los logrados por Coulomb (1776) en donde en uno de los primeros estudios de mecánica de suelos, introdujo el concepto de resistencia crítica, y los cálculos de lo que después fue llamado el régimen de fricción Mohr-Coulomb. Los primeros trabajos en donde los flujos granulares fueron reconocidos como diferentes de aquellos denominados fluidos newtonianos, fueron realizados por Hagen (1852) y Reynolds (1885). Reynolds descubrió que cuando un esfuerzo de cizalla viene aplicado a una masa granular esta comenzará a fluir. Los estudios sobre materia granular usando esferas, comenzaron con Bagnold (1954). Durante los 60's y 70's se realizó mucha investigación sobre dinámica de fluidos. En los 80's, con el boom de los procesos computacionales y los desarrollos en informática, se lograron realizar las primeras simulaciones y modelados numéricos. En el área de la volcanología, fue hasta después de la erupción del 18 de mayo de 1980 del Monte Santa Elena que el estudio detallado sobre flujos piroclásticos y lahares se hizo prioridad.

Los materiales granulares se encuentran presentes en casi cada ambiente y lugar en el universo, están presentes en varios procesos naturales, y son parte esencial en algunas ramas de la industria, así como en la vida diaria de las personas. A pesar de ser tan comunes, la física de los materiales granulares aún no está totalmente entendida. En las últimas décadas se han realizado avances significativos en el entendimiento de la física de los flujos granulares en general (Campbell, C.S., 1990; Pouliquen, O., 1998; Midi, G.D.R., 2004; Jop, P., et al., 2006), y en el área de las geociencias (Iverson, R. M., 1997; Iverson,

R. M. y Vallance, J. W., 2000). Se sabe que, dependiendo del volumen que ella ocupe y las fuerzas externas que se le apliquen, la materia granular puede actuar como un sólido, un líquido, un gas o combinaciones de esos al mismo tiempo. Por ejemplo, cuando el material es derramado en una superficie extremadamente friccional, o puesto en un contenedor, se quedara inmóvil como un sólido y será capaz de resistir algunas fuerzas externas. Por otro lado, cuando el contenedor es inclinado, el material comenzara a fluir como un líquido. Si se incrementa la fuerza y se sacude enérgicamente el contenedor, las partículas volaran, y rebotaran unas con otras como moléculas de gas que no tiene mucho espacio (Jaeger, 1996; Kadanoff, 1999). Generalmente los espacios entre partículas están ocupados por un fluido ya sea el aire, gas o agua, por lo que técnicamente un flujo granular es un fluido multifase (Campbell, 1990). Sin embargo si las partículas tienen un empaquetamiento muy cerrado o si son mucho más densas que el fluido intersticial, las partículas y sus interacciones entre ellas jugaran un rol mucho más importante en el transporte y transferencia de momentum en el flujo (Campbell, 1990).

Al llenar un contenedor con materiales granulares se nota que su densidad es variable. [Rogers en 1958](#) definió el empaquetamiento como “un sistema de partículas dispuestas en el espacio de tal manera que no hay dos partículas que tengan algún punto interno en común y cada partícula está en contacto con al menos otra más”. Inicialmente el empaquetamiento de las partículas es relativamente suelto y para hacer más espacio para más material granular usualmente se agita el contenedor. La variación de la densidad viene de la fricción entre las partículas y la aleatoriedad en el empaquetamiento. Las partículas pueden reacomodarse en una multitud de etapas meta-estables dependiendo de las condiciones iniciales y las fuerzas aplicadas. Existen diversos tipos de empaquetamiento de partículas. Uno de ellos es el empaquetamiento casual, el cual puede ser denso o suelto. El empaquetamiento denso se logra sacudiendo o haciendo vibrar un conjunto de partículas ([J.L. Finney, 1970a](#)). El empaquetamiento suelto puede lograrse lanzando las partículas en una avalancha o lanzándolas a un contenedor ([Leva y Grummer, 1947](#)). Este tipo de empaquetamiento es el más cercano al que se observa en partículas reales. Existen numerosos modelos y estudios que analizan este tipo de empaquetamiento y las variaciones en sus concentraciones y coordinaciones ([Rutgers, 1962](#); [Scott y Kilgour, 1969](#); [Gotoh y](#)

Finney 1974; Allen, 1974a). Probablemente la capacidad de las partículas para agruparse muy cerca unas de otras es inhibida por las altas rugosidades superficiales de las partículas (Macrae y Gray, 1961; Ayer y Soppett 1966, Scott y Kilgour, 1969) las cuales aumentan con el fracturamiento de las partículas. Los granos de arena son generalmente más suaves y más redondeados que aquellas partículas frescas y recién fracturadas, pero no tan “resbaladizas” como las esferas rodantes de prueba nuevas. Sin embargo poseen concentraciones similares (Kolbuszewski, 1948a, 1948b, 1950a; Gaither, 1953; Walker y Whitaker, 1967; Sohn y Moreland, 1968). Los polvos tienden a tener empaquetamientos más sueltos (Heywood, 1946; Neumann, 1953). Finalmente el empaquetamiento de máxima densidad se alcanza cuando esferas de igual tamaño se colocan en patrones regulares como el empaquetamiento cerrado hexagonal o cubico. En estos casos se alcanzan valores de hasta 0.74. Ahora bien, en un conjunto de partículas polidispersas, las partículas pueden reacomodarse de tal manera que los espacios entre ellas son reducidos al máximo. El empaquetamiento alcanzado de esta manera se denomina empaquetamiento de Apolonio o de Leibniz (Kasner y Supnick, 1943 Bartali, 2012).

Una consecuencia de la aleatoriedad en las posiciones de las partículas es la estructura desordenada y amorfa que pueden adoptar. De tal manera que la transmisión de los esfuerzos entre las partículas no se propaga en todas direcciones, sino a través de una serie de cadenas de esfuerzos que se forman y desaparecen aleatoriamente en donde solo algunas partículas del conjunto están involucradas.

Las partículas que no forman parte de las cadenas, no tienen efecto estructural alguno y podrían ser eliminadas, sin embargo cualquier cambio en la configuración del conjunto podría modificar la configuración estable, provocando el colapso del conjunto hasta que se logre una nueva configuración estable. Esta es la razón por la cual los granos de sal (o cualquier otro material granular) no fluyen libremente por un pequeño orificio, a menos que se cambie constantemente la configuración de atascamiento, por ejemplo sacudiendo el salero.

II.2 Flujos granulares

En la literatura científica se define a un material granular (Figura II.1) como aquel que está



compuesto por un conjunto de partículas (por ejemplo grava, arena, maíz) de diferente tamaño, densidad y forma que se pueden mover independientemente e interactuar entre ellas (Kadanoff, 1999). Por consiguiente, los flujos granulares se pueden definir como el movimiento y la interacción de grandes cantidades de partículas de diferente tamaño, forma y densidad que se desplazan en un medio seco, líquido o gaseoso y los podemos encontrar en muchos procesos industriales, agrícolas

y de la vida cotidiana.

Figura II.1. Ilustración de diferentes materiales granulares.

En ocasiones estos flujos en movimiento pueden adoptar comportamientos semejantes a un fluido o actuar como un gas, o emular un sólido, pero la mayor parte de las veces, presentan una compleja combinación de todos (Jaeger, et al., 1996).

Existe una extensa literatura que trata de los flujos granulares, con distintos enfoques, y métodos analíticos (Drake, 1990; Ippolito et al 1995; 1995; Gray et al., 1999; Linares-Guerrero et al., 2007; Scott et al., 2009). La gran cantidad de estudios realizados responde a la importancia que estos flujos tienen, tanto para la industria como para la investigación científica.

Los flujos granulares en la naturaleza son siempre mezclas de una fase solida suelta, un líquido y/o un gas. Si el fluido intersticial juega un rol despreciable en la transferencia de momentum entre partículas, entonces esos tipos de flujos pueden ser considerados como flujos dispersos de una sola fase (Pudasaini y Hutter, 2003), por ejemplo pequeños derrumbes de rocas sin la presencia de agua. Por otro lado, cuando la masa del fluido intersticial es comparable a aquella de los sólidos, la interacción entre el fluido y la parte

solida se hace importante. El movimiento del fluido puede entonces llegar a influenciar el movimiento de la parte sólida, por ejemplo los flujos de escombros (o lahares), flujos piroclásticos, corrientes turbidífticas, etc. A este tipo de flujos se les puede considerar como flujos de dos fases (de una fase de aire y/o agua con una fase solida) (Pudasaini y Hutter, 2003).

El entendimiento de este tipo de flujos es de vital importancia, en especial para las personas que viven en áreas vulnerables a este tipo de fenómenos. Sin embargo, el estudio de esta clase flujos posee una gran limitante. Cuando se trata de realizar análisis detallados de estos fenómenos resulta muy complicado hacerlos en tiempo real y de cerca. Esto debido a que se trata de eventos impredecibles y peligrosos, por lo que acercarse a ellos no es una opción. A pesar de que la tecnología de percepción remota ha tenido grandes avances en los últimos años, la gran cantidad de polvo que se desprende de estos flujos conforma una de las mayores limitantes para el estudio del comportamiento de las partículas dentro del mismo. Es por ello que muchos investigadores han optado por el uso de simuladores de flujos granulares en laboratorio (por ejemplo Cagnoli, 2010). Sin embargo, la problemática envuelta en este tipo de prácticas radica en que las energías que se observan en las canaletas experimentales (que son a pequeña escala) son muy diferentes a las naturales, estando muchos órdenes de magnitud por debajo de las del mundo real. El uso de aparatos experimentales a mediana y gran escala representa una opción muy viable para realizar experimentos que se acerquen un poco más a la realidad (Iverson 2004, Bartali, 2012).

Los experimentos en laboratorio tienen la ventaja de que casi todos los aspectos y variables son controlables y el error, por consiguiente, puede ser estimado de manera más fácil. Y aún más, si se puede comprobar que el flujo granular simulado en el laboratorio puede ser escalado de acuerdo a reglas bien definidas, entonces los resultados obtenidos en campo y los obtenidos en laboratorio podrán ser comparables y por tanto, esto permite hacer inferencias sobre los flujos granulares naturales.

II.2.1 Oscilaciones de compresión y de descompresión en un flujo granular (Stick-Slip motion)

El comportamiento de un flujo granular depende de cómo disipa su energía debido a las interacciones partícula-partícula, los cuales a su vez, son dominados por la fricción, forma, densidad, tamaño y redondez de las partículas. Otros factores importantes incluyen la geometría de los canales por donde fluyen, rugosidad de la superficie, pendiente y topografía (Forterre y Pouliquen, 2008; Pouliquen et al., 2006). La presencia de fluidos intersticiales (gas, agua), procesos de segregación (Davies et al., 1999) o la presencia de obstáculos también influyen en el comportamiento de un flujo granular (Amarouchene et al., 2001).

La fricción de Coulomb, la cual es responsable de grandes pérdidas de energía, establece que la fuerza de rozamiento máxima que puede existir entre dos cuerpos en contacto es directamente proporcional al valor de la fuerza normal de contacto entre ellos. La constante de proporcionalidad es el coeficiente de rozamiento al deslizamiento. La fricción de Coulomb entre dos granos presionando y empujándose uno a otro produce una deformación elástica de las partículas (acumulando energía potencial en el proceso), hasta que un nivel de deformación crítico es alcanzado, la fricción estática es vencida y se produce deslizamiento. De esta manera, la energía potencial es liberada como energía cinética, la cual a su vez será disipada debido a la fricción dinámica que frenará el flujo y producirá un movimiento intermitente cuando este ciclo comience de nuevo. Este comportamiento producido cuando dos partes internas de un sistema interactúan el uno con el otro, frenando y acelerando, se le conoce como oscilaciones de compresión y descompresión (Stick-Slip motion) y puede ser encontrado en el chirrido de la bisagra de una puerta (alta frecuencia) o a gran escala en un terremoto (baja frecuencia), cuando dos placas tectónicas se deslizan una sobre otra (Scholz, 2002). Oscilaciones de compresión y descompresión en flujos granulares han sido observadas y analizadas sistemáticamente en los trabajos de Bartali et al., (2015), demostrando su existencia en este tipo de fenómenos experimentalmente.

II.3 Flujos secos/Flujos piroclásticos

II.3.1 Introducción

Los flujos piroclásticos o corrientes piroclásticas de densidad (CPD), son uno de los más asombrosos y peligrosos fenómenos volcánicos que existen. Se trata de una mezcla heterogénea de partículas volcánicas y gas que fluyen en las laderas de los volcanes debido a la acción de la gravedad (Branney y Kokelaar, 2002). Pueden generarse por el colapso gravitacional de domos de lava (Figura II.2a) o de columnas eruptivas (Figura II.2b) (Cas y Wright, 1987). Las CPD pueden llegar a presentar temperaturas de hasta $\sim 300\text{-}800^\circ\text{C}$. Generalmente son muy móviles, pueden llegar a desplazarse en pendientes ligeras por algunos kilómetros o algunas decenas de kilómetros a velocidades entre $\sim 110\text{-}200\text{ km/h}$ (Fisher y Schminke, 1984; Cas y Wright, 1987, Francis, 1993) lo cual los hace más móviles que algunas avalanchas de rocas de volúmenes semejantes (Roche, et al., 2013).

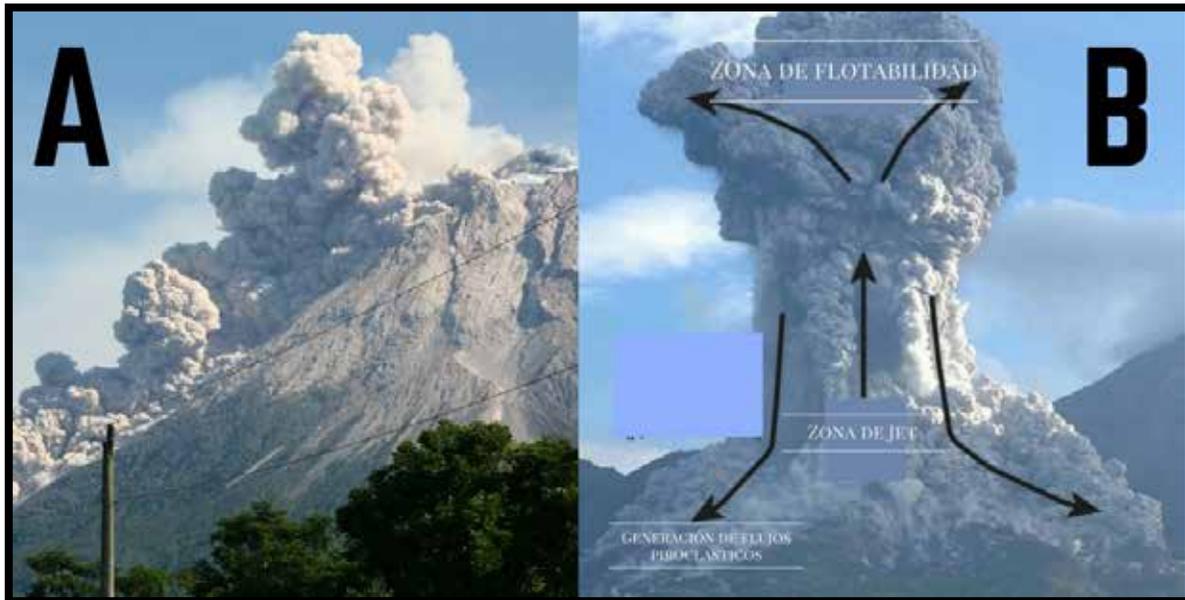


Figura II.2. (a) Flujo piroclástico generado por colapso de domo en el volcán Merapi en Indonesia (14 de mayo, 2006) Fuente: <http://volcanoes.usgs.gov/vdap/images/merapi/>. (b) Generación de flujos piroclásticos por colapso de columna, Volcán Santiaguito (14 de agosto, 2016) Fuente: <https://www.wired.com/2016/08/anatomy-volcanic-blast-guatemalas-santiaguito/>

Están formados por partículas que varían en tamaño desde ceniza volcánica (menores a 2 mm) hasta algunos bloques de tamaño de metros.

De acuerdo a su origen y forma de transporte existen dos tipos de CPD (Wilson y Houghton, 2000): Las corrientes diluidas (oleadas piroclásticas) y las corrientes concentradas (flujos piroclásticos), siendo ambos miembros finales de un espectro continuo.

La movilidad de las CPD está en gran parte controlada por su masa, la altura a la cual fueron generadas (energía potencial) y la eficiencia al transformar la energía potencial en cinética. Dado que la masa y los procesos friccionales están relacionados a las partículas sólidas que los componen, la concentración de partículas en una CPD es un factor determinante en parámetros físicos como velocidad, densidad, y mecanismos de soporte de clastos (Sparks, 1976; Branney y Kokelaar, 2002; Sulpizio et al., 2007; Sulpizio y Delino, 2008). La concentración de clastos en CPD generados por colapsos gravitacionales (por ejemplo colapso de domo) se relaciona con la cantidad de gas en la mezcla y la tasa de fragmentación de los bloques durante el transporte (Sulpizio y Delino, 2008).

La dificultad y peligrosidad asociada a la observación directa de las CPD, aunado a la gran complejidad de los mecanismos de transporte y depositación hacen de este campo uno de los más desafiantes de la vulcanología moderna. En este capítulo se presenta una breve descripción de las CPD, sus orígenes, mecanismos de transporte y depositación. Se hace referencia a los trabajos de Cas y Wright (1987), Sato et al., (1992), Para una revisión clásica sobre flujos piroclásticos en general y de Branney y Kokelaar (2002), Sulpizio y Delino (2008), Roche et al (2013) y Sulpizio et al (2014) para una revisión más detallada sobre el tema.

II.3.2 Origen y formación de CPD's

II.3.2.1 CPD por Colapso de domo

Este mecanismo opera principalmente en conos volcánicos con caras muy empinadas. Sucede principalmente cuando partes de un domo o fragmentos de un flujo de lava

parcialmente solidificada colapsan desde la cima o partes altas de alguno de los flancos del volcán. El colapso puede ser simplemente gravitacional o debido a alguna actividad explosiva del volcán. Aunque en algunos casos el colapso de partes del domo produce algunas explosiones debidas a una descompensación en la presión de sistema, por lo que en algunos casos es posible tener ambos procesos durante un mismo evento. A este tipo de flujo piroclástico se le conoce como de tipo Merapi (Boudon et al., 1993) y es uno de los más comunes en estratovolcanes con largos periodos de crecimiento y destrucción de domos y cortas etapas explosivas.

Muchas de las CPD originadas de esta manera generan pequeños flujos llamados flujos de bloques y ceniza. Estos, son flujos en los cuales la mayoría de los componentes juveniles son bloques densos y lapilli no vesiculados o pobremente vesiculados, así como por ceniza sin pómez de composición homogénea. Sus depósitos son generalmente de volumen pequeño y difieren de las ignimbritas por no contener pómez, aunque en muchos aspectos de su sedimentación son similares (Branney y Kokelaar, 2002). En la literatura se reportan volúmenes de este tipo de flujos variables entre 1×10^3 y $1 \times 10^8 \text{m}^3$ y con más frecuencia de orden de $1 \times 10^5 - 1 \times 10^6 \text{m}^3$ (Mellors et al., 1988; Rodriguez-Elizarrarás et al., 1991; Hayashi y Self, 1992; Boudon et al., 1993; Carrasco, 1999; Freundt, 2000; Cole et al., 2002; Saucedo et al, 2004; Schwarzkopf et al., 2005)

De acuerdo a Takahashi y Tsujimoto (2000), la estructura de estos flujos piroclásticos (lo cual ocurre después de que el flujo se comporta como una avalancha de fragmentos del domo o lava) está compuesta por tres partes: cuerpo principal (el cual está en la parte inferior), una capa relativamente diluida de nube de ceniza encima de la parte inferior y una violenta y ondulante nube ascendente levantándose de la nube de ceniza inferior.

Un modelo para el desarrollo de este tipo de flujos y los procesos que ocurren en su descenso es el propuesto por Takahashi y Tsujimoto (2000) (Figura II.3). En el que se afirma que el flujo pasa de un régimen granular a uno fluidizado debido a la fragmentación de bloques. Yamasato (1997) detectó un cambio similar en el comportamiento de este tipo

de flujos en el volcán Unzen en Japón usando sismógrafos e infrasonido. Los mecanismos de transporte y sedimentación de las CPD serán discutidos a detalle en párrafos siguientes.

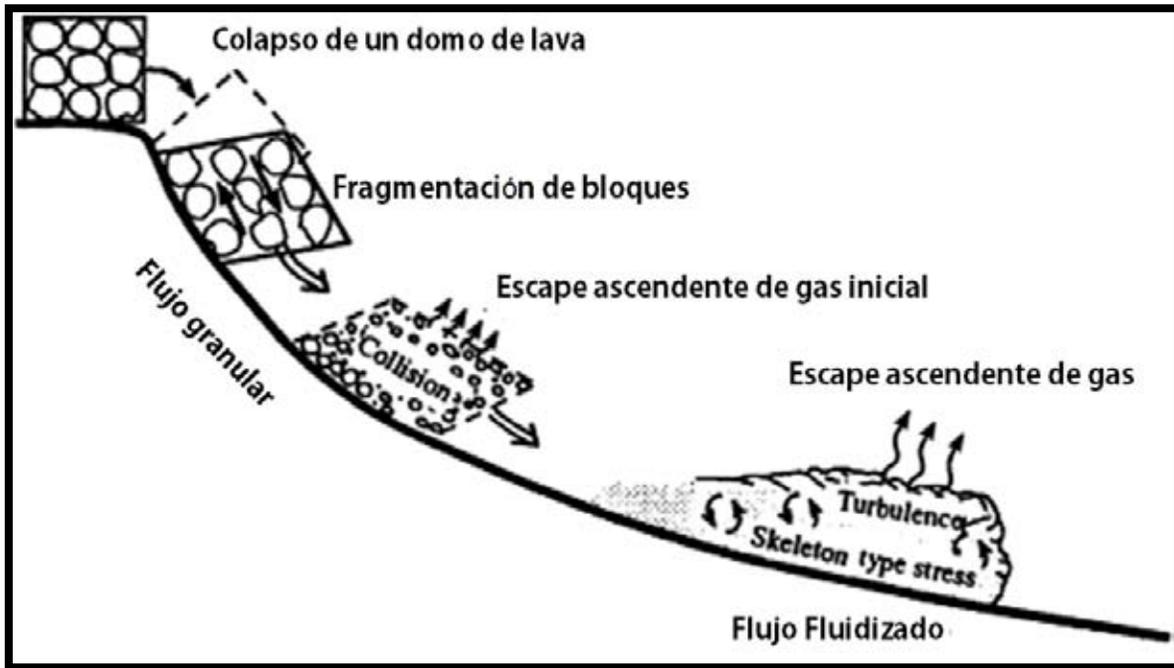


Figura II.3. Modelo de los procesos que ocurren en un flujo tipo Merapi. Cambio de un flujo granular a un flujo fluidizado. Modificado de [Takahashi y Tsujimoto \(2000\)](#).

Sato et al., (1992) Propuso un esquema genético para la clasificación de este tipo de CPD's en función de la relación entre la presión de poro en exceso (P_e) y la resistencia interna del magma (T_s). De esta manera Sato afirmó que se producen flujos de tipo Merapi cuando la P_e es menor a T_s y la explosión es disparada exclusivamente por la caída por gravedad de porciones del domo. Las erupciones de tipo Pelée, ocurren cuando P_e es menor o igual a T_s . En este caso si localmente P_e es mayor a T_s ocurren explosiones dirigidas. Por otro lado cuando P_e es mayor a T_s en todo el domo o conducto magmático ocurrirán erupciones de tipo Sufriere dando lugar a la fragmentación del magma en el conducto.

II.3.2.2 CPD por Colapso de columna eruptiva

Este mecanismo de generación de CPD funciona cuando la densidad efectiva de una columna eruptiva de ceniza es mayor que la presente en la atmósfera, lo cual genera un flujo piroclástico por colapso gravitacional.

Al igual que todos los procesos naturales, el colapso de una columna eruptiva es un proceso complejo, en el cual intervienen una serie de factores para su realización. Entre éstos se encuentra la altura de la columna, la cual está en función del diámetro del conducto, la velocidad de salida del gas y la cantidad de gas en los productos eruptivos (Wilson et al., 1978). El estilo eruptivo también tiene gran influencia en la generación de columnas eruptivas. Pequeñas explosiones aisladas producen columnas transitorias, mientras que expulsiones prolongadas de magma fragmentado durante erupciones estables forman columnas mantenidas por tiempos mayores (Cas y Wright, 1987).

Una columna eruptiva puede dividirse en tres partes (Sparks y Wilson, 1976) (Figura II.4):

- 1) La región de empuje o “*jet*” en la que la rápida descompresión del gas en el sistema es la principal fuente de alimentación para que ascienda de manera violenta el material fragmentado.
- 2) Una columna convectiva la cual está impulsada por la liberación de energía térmica proveniente de las partículas juveniles. En esta región, la flotabilidad (*buoyancy*) es dominante y la parte superior está situada en el nivel en que la flotabilidad se hace neutra, es decir, donde la densidad de la columna es igual a la de la atmósfera circundante. En otras palabras, con el empuje correcto, la columna se elevará hasta encontrar un punto en la atmósfera con la misma densidad.
- 3) La región de sombrilla, donde la columna se expande radialmente o en la dirección del viento o en ambos para formar una nube con forma de sombrilla.

Estas columnas pueden llegar a tener alturas desde algunas decenas o cientos de metros hasta decenas de kilómetros y pueden llegar a colapsar. Cas y Wright (1987) señalan que

algunas causas para pequeños colapsos son, por ejemplo, cuando pequeñas explosiones eyectan una densa cantidad de materiales piroclásticos a unos cuantos cientos de metros y parte de éstos caen pesadamente a la superficie, o cuando partes sobrecargadas de una

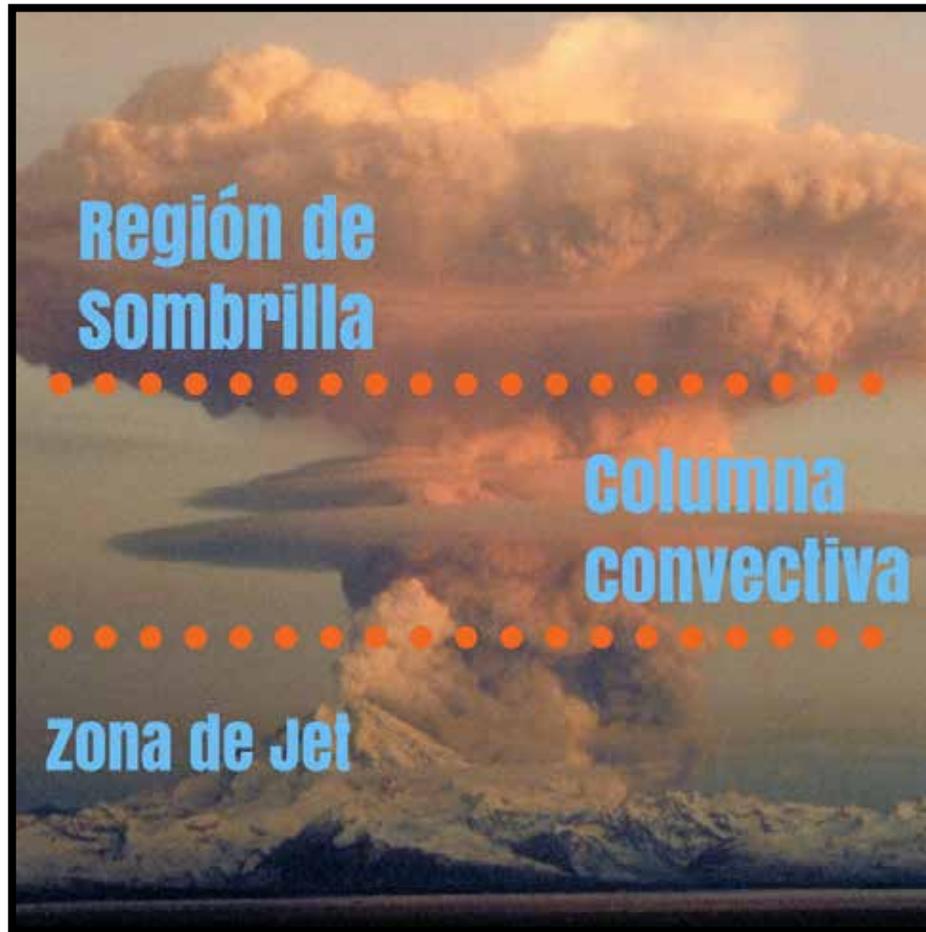


Figura II.4. Columna eruptiva sostenida durante una erupción en el volcán Redoubt (Alaska, USA). En esta fotografía resulta muy fácil observar las tres zonas de una columna eruptiva.

columna eruptiva pierden flotabilidad y caen. Otros estudios (Sparks et al., 1978; Malin y Sheridan, 1982; Wholetz et al., 1984; Valentine y Wholetz, 1989; Neri y Macedonio, 1996; Neri et al 2003; Esposti Ongaro et al., 2007) han tratado de analizar mediante simulaciones numéricas y de laboratorio el colapso de una columna eruptiva con fines de análisis del riesgo asociado este tipo de fenómenos.

Esposti Ongaro et al., (2008) realizaron simulaciones numéricas en 3D de colapso de una columna eruptiva sub-pliniana en el Volcán Vesubio (Italia). Sus simulaciones fueron

diseñadas para caracterizar diferentes estilos e intensidades de colapsos para entender la transición entre un régimen convectivo y uno de colapso y sus implicaciones en la generación y alcance de CPD.

De acuerdo a sus datos existe un régimen transicional entre el régimen convectivo en una columna eruptiva y el de colapso total o parcial. Este régimen transicional se caracteriza por la presencia de manera contemporánea de una pluma convectiva flotante y partes colapsando las cuales alimentan CPD. Si bien la idea de este régimen no es algo nuevo y se había postulado ya basada en experimentos de laboratorio (Carey et al., 1988; Dellino et al., 2007a), en evidencia estratigráfica (Wilson y Hildreth, 1997; Di Muro et al., 2004) y modelos numéricos (Neri y Dorban, 1994; Neri et al., 1998; Clarke et al., 2002; Susuki et al., 2005), Esposti Ongaro et al (2008) lograron reproducir este fenómeno por primera vez en un modelo de flujo multifase en 3D. De acuerdo a estas simulaciones este régimen puede presentar diferentes grados de colapso (de incipiente a parcial o total) en función de la cantidad relativa de material que tiende a colapsar o que cae a la superficie. Sin embargo, según los datos de las simulaciones, del total del material que colapsa solo una parte alcanzará la superficie debido a que parte del material será recirculado a la columna por el impulso del *jet*. Según esta hipótesis el alcance y peligrosidad de las CPD generados por colapsos de columna están en función de la cantidad de material que logre llegar a la superficie y no por la altura de la columna.

II.3.3 Mecanismos de transporte y sedimentación de CPD

II.3.3.1 El concepto de “Flow Boundary Zone”

Cuando se habla de transporte y sedimentación de partículas en las CPD uno de los conceptos claves para un mejor entendimiento de estos procesos es sin duda el del “*Flow-boundary zone*” o zona de límite de flujo (Branney and Kokelaar, 2002). La *flow-boundary zone* (en adelante se hará referencia como FBZ) puede definirse como aquella zona, difusa, que incluye la porción inferior de la corriente piroclástica y la porción superior del depósito en desarrollo (Sulpizio y Dellino, 2008) (Figura II.5).

Esta zona es importante debido a:

- Cualquier partícula que se deposita desde una corriente piroclástica pasa por la *FBZ*.
- Cualquier tipo de *FBZ* tiene un gradiente de velocidad y concentración determinado, por lo que, cualquier partícula que pase a través del *FBZ* sufre un cambio debido a estas variaciones.
- Los mecanismos deposicionales y el tipo de litofacies están en función de los perfiles de velocidad y concentración de la *FBZ*.

El espesor de la *FBZ* puede variar durante el recorrido de una CPD y depende de la relación entre la tasa de suministro de partículas (R_s) y la tasa de deposición de partículas (R_d) reducido por la tasa de elutriación (R_{el}). La deposición en la zona de la *FBZ* puede ocurrir progresiva o paso a paso (Branney y Kokelaar, 1992).

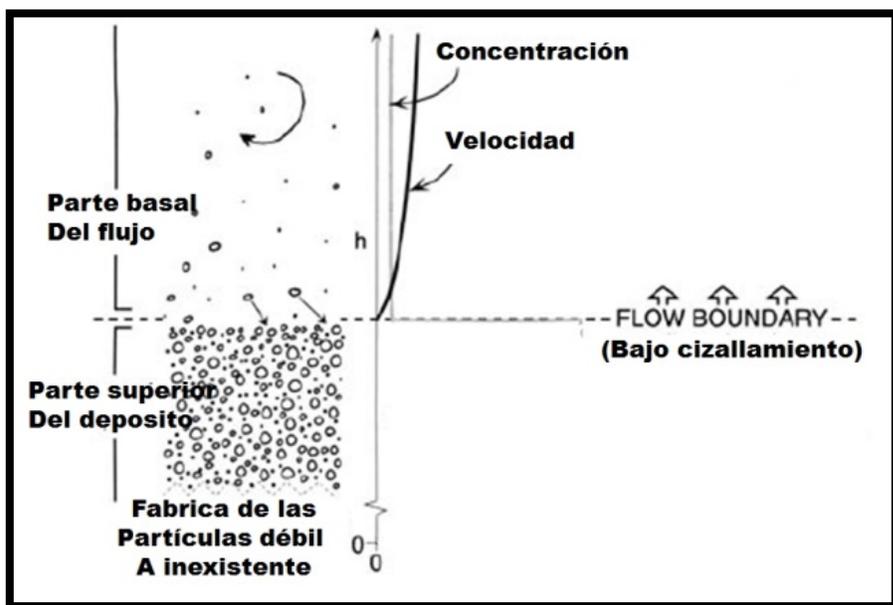
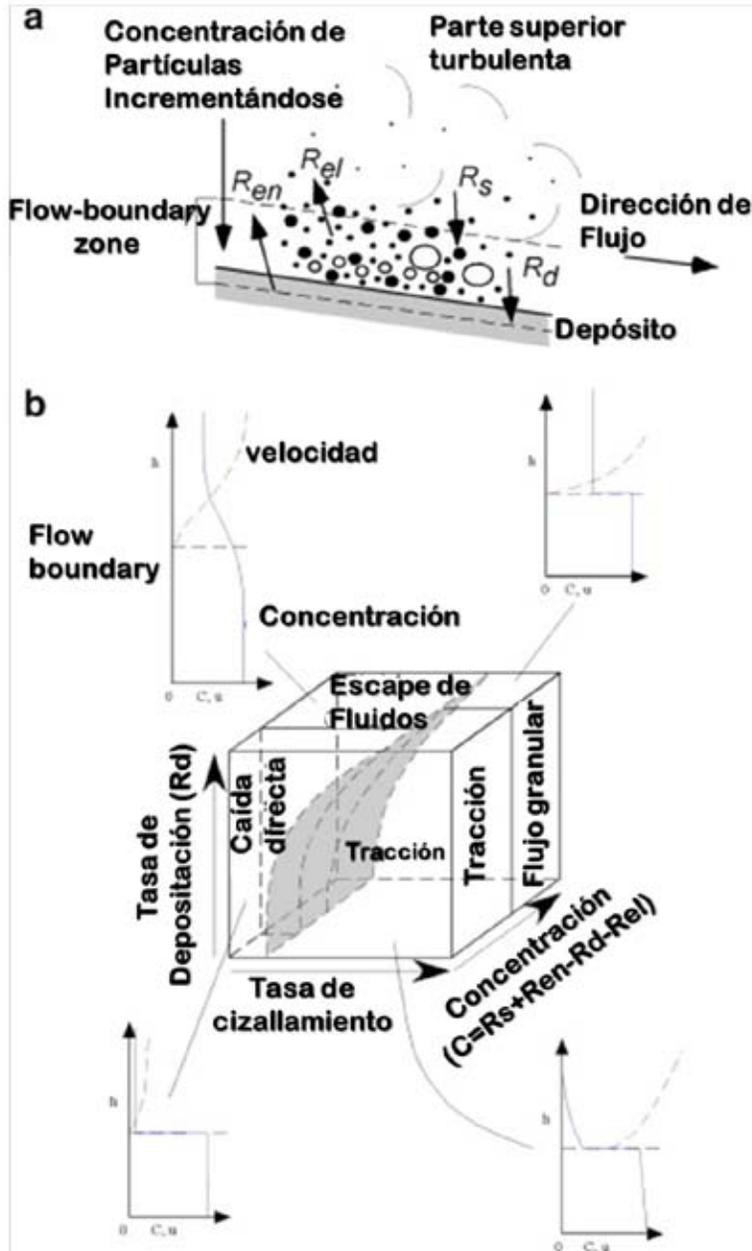


Figura II.5. Diagrama que ilustra la localización del *FBZ* dentro de una corriente piroclástica. Modificado de Branney y Kokelaar, 2002; Sulpizio et al., 2014). Cabe mencionar que en cuanto a la fábrica débil o inexistente mostrada en esta figura, el tema aun actualmente está en controversia y se continúa con la investigación al respecto.

Existen cuatro tipos principales de FBZ (Figura II.6b), definidas en función de la concentración de las partículas, la velocidad de éstas y la tasa de deposición de las partículas. El primero es dominado por la caída directa de las partículas, está caracterizado



por una baja velocidad de la corriente piroclástica y una baja concentración, la tasa de deposición es poco importante en este tipo de FBZ, puede ser alta o baja sin afectar de manera significativa.

El segundo tipo de FBZ es el que es dominado por la fluidización. En este tipo de FBZ la concentración de partículas es un poco más alta que la anterior, pero todavía conserva una velocidad muy baja. El tercer tipo de FBZ es el dominado por flujos granulares. En este caso la FBZ está dominada por una concentración y una velocidad que es mucho más alta con respecto a las dos FBZ anteriores.

Figura II.6. a) Diagrama de la zona de flow boundary. R_{en} , tasa de reincorporación de partículas en el flujo, R_{el} , tasa de elutriación de partículas desde la zona de flow boundary, R_s , tasa de suministro de partículas desde la parte superior del flujo, R_d , tasa de deposición de partículas; b) esquema de los campos relativos de los cuatro tipos de zonas de flow boundary. (Modificado de Branney y Kokelaar, 2002; Sulpizio et al., 2014)

Y por último el cuarto tipo de FBZ es el dominado por tracción. Este tipo de FBZ está caracterizado por una baja concentración de partículas pero una alta velocidad del flujo, este tipo de FBZ es típico de las corrientes piroclásticas diluidas.

Los depósitos de las CPD pueden variar de estratificados a masivos. Estos dos extremos de depósitos motivaron la generación de dos modelos de CPD (ej. [Walker, 1983](#); [Cas y Whright, 1987](#)). Se propuso entonces que los depósitos estratificados (o que presentan estructuras sedimentarias) pudieran ser generados por suspensiones diluidas conocidas como oleadas piroclásticas, donde el transporte de las partículas estaba controlado por suspensión en turbulencia. Y para los depósitos masivos se propuso que fueran el resultado de mezclas muy concentradas, flujos piroclásticos, donde el transporte es dominado por interacciones partícula-partícula.

Estudios más recientes ([Burgissier y Bergantz, 2002](#); [Branney y Kokelaar, 2002](#); [Sulpizio et al, 2007](#)) han demostrado que estos dos casos son solo los dos extremos opuestos en una amplia gama de tipos de CPD, cuyas características sedimentológicas dependen de la interacción entre la concentración de las partículas, la tasa de cizallamiento y la de depositación a través del tiempo y el espacio. Sin embargo, los términos oleada piroclástica y flujo piroclástico como características de un depósito han ido siendo reemplazados por términos más adecuados a las diferentes tipologías de CPD como diluidos o concentrados, basados en información sedimentológica proporcionada por códigos y arquitecturas de litofacies.

II.3.3.2 Mecanismos de soporte de partículas

Las CPD pueden ser mezclas homogéneas o heterogéneas de materiales en fase sólida y fluida. La fase fluida es capaz de soportar partículas sólidas a través de diferentes mecanismos, los cuales pueden ser: suspensión debido a turbulencia en el fluido, saltación y tracción. Otros mecanismos pueden ser colisiones entre partículas y soporte por matriz. El mecanismo de soporte de partículas puede variar en el tiempo y es posible encontrar combinaciones o fases intermedias entre los mecanismos de transporte. Los mecanismos de

transporte de partículas tienen gran influencia en los procesos de segregación y determinan la velocidad a la cual una partícula se deposita.

Los términos sedimentación y depositación algunas veces son confundidos o usados inapropiadamente para describir algunos procesos que afectan a las CPD. [Sulpizio y Dellino \(2008\)](#) explican de manera clara esta diferencia. El termino sedimentación describe todos los procesos que acompañan al movimiento de una partícula a través del espesor de la corriente hacia abajo hasta la FBZ. Mientras que el término depositación describe todos los procesos que afectan a una partícula a través de la FBZ hasta su posición final en el depósito.

II.3.3.2.1 Soporte por suspensión debido a turbulencia en el fluido

Este mecanismo funciona mediante fuerzas de arrastre y elevación. Si la concentración de partículas en una CPD es muy baja, las interacciones entre partículas son casi nulas y la turbulencia es el principal mecanismo de transporte ([Sulpizio y Dellino, 2008](#)).

Los clastos en una corriente turbulenta tienden a segregarse verticalmente. Dependiendo de las propiedades hidráulicas de cada clasto éstos se acomodaran en tres niveles verticales dentro de la corriente de acuerdo al modo dominante de transporte ([Middelton y Southard, 1984](#)). De la población inicial de clastos el soporte por turbulencia en el fluido transportara a las partículas más pequeñas y/o menos densas (ceniza fina), a menos que la corriente sea muy energética. Esta constituye la población suspendida y puede situarse en cualquier nivel dentro de la corriente

Partículas más grandes y/o más densas son transportadas de manera parcial y/o intermitente por turbulencia, y pasan la mayor parte del tiempo del transporte en la parte baja de la corriente, donde constituyen la población suspendida intermitente. Las partículas más grandes y densas son transportadas sobre la superficie del depósito por arrastre y son conocidas como la población de tracción.

Estas formas de transporte pueden cambiar durante el flujo, y aun en corrientes constantes y uniformes no hay una distinción clara entre las poblaciones (Allen, 1984).

II.3.3.2.2 Saltación intermitente

En corrientes en las que no existe una depositación neta, una importante cantidad de la carga de partículas son depositadas temporalmente para después ser atrapadas en flujo nuevamente por arrastre y/o por impactos de otras partículas. Una vez atrapadas nuevamente en la corriente las partículas pueden ser suspendidas alto en la corriente por turbulencia o regresar rápidamente a la FBZ (Branney y Kokelaar, 2002). Este mecanismo incluye cualquier movimiento de “salto” de una partícula sobre una superficie. La zona donde la población en saltación es transportada se denomina zona de saltación. Si la concentración de partículas en la corriente es muy baja, los clastos son capaces de saltar por distancias más grandes. En concentraciones mayores la zona de saltación podría evolucionar a una zona de flujos granulares modificada (Meddelton y Southhard, 1984).

De acuerdo con Denlinger (1987) en algunas CPD algunas partículas son transportadas por saltación por encima de una capa transportada como flujo granular. La concentración de partículas disminuye de manera gradacional de abajo hacia arriba, de esta manera el flujo puede presentar en la parte inferior un transporte por flujos granulares, una zona intermedia por saltación y una parte superior por una nube de cenizas turbulenta.

II.3.3.2.3 Soporte por interacciones de partículas

La teoría de flujos granulares (Campbell, 1990; Iverson y Vallance, 2001) es importante en el entendimiento de las características sedimentológicas de las CPD. En una corriente rápida, las fuerzas de repulsión originadas por colisiones entre partículas hacen que estas se muevan en todas direcciones y no necesariamente en la dirección principal del flujo. Estas vibraciones entre las partículas pueden ser consideradas como un modelo análogo al movimiento térmico de las moléculas en la teoría de los gases, y en flujos granulares se le conoce como temperatura granular (Savage, 1983; 1984; Iverson, 1997). Al igual que la temperatura termodinámica, la temperatura granular genera presión y gobierna las

transferencias de masa y momento. Sin embargo, la temperatura granular no puede auto-sustentarse debido a que las colisiones al ser inelásticas, favorecen la disipación de energía mecánica en energía térmica.

La presión asociada con la temperatura granular es llamada presión dispersiva (Bagnold, 1954), y causa una inflación o expansión en la masa granular. Cuando la temperatura granular es alta, esta expansión puede ser mantenida por determinado tiempo y esto favorece los procesos de segregación debidos al *Kinetic Sieving* (Tamizado cinético). El *Kinetic Sieving* es un proceso de segregación de materiales en donde debido al movimiento, las partículas más pequeñas migran hacia las partes bajas del flujo, llenando los vacíos existentes entre las partículas de mayor tamaño. Al mismo tiempo, éstas, aparentemente migran hacia la parte superior (Savage y Lun, 1988; Sohn y Chough, 1993).

Corrientes dominadas por este tipo de mecanismos pueden ser clasificados como (Postma, 1986):

- Verdaderos flujos granulares: en los que el fluido intersticial tiene poco o ningún efecto en las características físicas del flujo granular, y
- Flujos granulares modificados: en los que las características físicas del flujo granular son modificadas por el fluido intergranular (Iverson y Vallance, 2001).

Este último es más común en las CPD debido al abundante contenido de gas en la mezcla, sin embargo es posible encontrar ambos casos.

II.3.3.2 Mecanismos de sedimentación en CPD

Los mecanismos de depositación afectan a todas las partículas en la FBZ hasta que finalmente llegan a detenerse por completo y así formar el depósito. La depositación puede ocurrir grano por grano o en masa. Puede ser continua, discontinua o un proceso paso a paso (Branney y Kokelaar, 2002). La depositación continua es un fenómeno en el cual el espesor del depósito aumenta a una velocidad constante en el tiempo. La depositación paso

a paso (Branney y Kokelaar, 2002) define un aumento en el espesor de un depósito con una alternancia de periodos de depósito y de no depósito de partículas. El espesor del depósito puede variar en el tiempo debido a alternancias de estos dos modelos de depositación así como periodos de erosión.

Históricamente se han aceptado dos modelos para la depositación de CPD: congelamiento en masa (Sparks, 1976; Wright y Walker, 1981; Carey, 1991) y por agradación progresiva (Fisher, 1966; Branney y Kokelaar, 2002). En el congelamiento en masa el flujo llega a un abrupto alto total en todos los niveles, mientras que en la agradación progresiva el depósito se va construyendo de manera gradual siendo alimentado a través del material que va cayendo y pasando por la FBZ.

De acuerdo a Sulpizio y Dellino (2008) es posible encontrar evidencias de ambos modelos en la naturaleza, desde grandes depósitos de ignimbritas (congelamiento masivo) hasta depósitos de CPD de poco volumen (Agradación progresiva). Sulpizio et al (2007) propuso un modelo para CPD de pequeña escala en donde juntaba ambos modelos. Este modelo explica de manera satisfactoria las características de algunas CPD de menor escala generadas en una erupción subpliniana del Vesubio.

El modelo asume que muchos de los depósitos de CPD se originan por flujos estratificados, en los cuales la segregación de partículas puede desarrollar una zona de alta concentración en las partes más bajas del flujo (Valentine, 1987; Branney y Kokelaar, 2002; Dellino et al., 2004; Sulpizio et al., 2014). Esta porción basal del flujo se mueve como una sucesión de pulsos de alta concentración de partículas cuyo espesor varía en función de la cinemática y turbulencia de las diferentes ondas (Sulpizio et al., 2007). Esto podría sugerir que cada pulso podría tener una FBZ en la cual las interacciones entre la velocidad, tasa de depositación y concentración de partículas determinan sus regímenes de depositación (Sulpizio et al., 2007; 2008). Los pulsos se detienen en masa cuando las fuerzas que se resisten al movimiento sobrepasan a las que lo promueven. Es posible encontrar los cuatro tipos de FBZ (Branney y Kokelaar, 2002) o mezclas de ellos (Sulpizio et al., 2007; 2008; 2014).

Esto implica que, a pesar de que el depósito de la nube de cenizas pudiera generar una apariencia de un depósito generado por una corriente estable, en realidad, el cuerpo principal del flujo fue segmentado en diferentes pulsos que se depositaron uno después del otro en periodos de tiempo muy cortos. La idea de múltiples pulsos en un mismo flujo ya había sido observada antes en experimentos en canaletas grandes (Major, 1997; Iverson, 1997; Sulpizio et al., 2014), pequeñas (Savage, 1979; Brennen et al., 1983; Huppert et al., 1986) y en CPD reales basándose en evidencias encontradas en los depósitos (Chough y Sohn, 1990; Calder, et al., 1999; Calder et al., 2000; Schwarzkopf et al., 2005; Sulpizio et al., 2006, 2007).

II.4 Modelado de flujos granulares

El estudio de procesos volcánicos en la actualidad requiere de un análisis cuantitativo y sistemático cada vez más riguroso. Esto debido a la creciente necesidad de datos confiables en los cuales basarse para tomar decisiones acerca del manejo de riesgos y peligros durante una crisis volcánica.

Una consecuencia de esto es que la experimentación en laboratorio se ha convertido en una necesidad básica en la vulcanología moderna. La experimentación en laboratorio puede ser usada para cuatro funciones principales:

- Como una herramienta para explorar fenómenos nuevos y proveer observaciones sistemáticas y en condiciones ideales de los procesos.
- Determinar los parámetros claves del fenómeno.
- Probar hipótesis y modelos teóricos.
- Validar modelos computacionales.

Experimentos en laboratorio diseñados para recrear fenómenos naturales a menor escala se han incrementado constantemente. La mayoría de ellos han sido utilizados para comprender mejor algunos de los procesos más complejos que existen en la naturaleza (ej.

CPD, flujos de escombros, colapsos de columnas eruptivas, etc.). Sin modelos experimentales, numéricos o teóricos nuestro conocimiento se vería limitado a interpretaciones cualitativas basadas en observaciones en campo.

Los datos de campo proporcionan información valiosa, sin embargo, existen razones por las cuales un estudio completo sobre algún fenómeno volcánico no puede ser hecho únicamente con este tipo de información. Por ejemplo, las observaciones directas en campo sobre los procesos que ocurren durante una erupción están limitadas debido a la peligrosidad de los fenómenos y porque muchas veces estos no son accesibles a la observación o debido a las dificultades logísticas relacionadas con el acercamiento. Esto hace que solo se obtengan datos parciales o superficiales, sin saber lo que ocurre en el interior (ej. Columnas eruptivas, CPD, etc.).

Fenómenos como caída de ceniza o pómez, CPD (diluidas o concentradas) o lahares, son fenómenos con un alto potencial destructivo y acercarse demasiado a ellos representa poner en riesgo la propia vida. Una importante fuente de información en campo suelen ser los depósitos asociados a una erupción volcánica. En principio, se pueden inferir procesos de transporte y sedimentación a través de las características texturales que presente un depósito. Sin embargo, estas interpretaciones permanecen como hipótesis que necesitan ser validadas a través de la observación directa de los procesos ya sea a escala real como reducida.

Cuando se trata de experimentación de procesos volcánicos en laboratorio los problemas y restricciones antes mencionados son casi inexistentes. Los procesos estudiados se pueden repetir de manera sistemática y en condiciones controladas. Y se obtienen además interpretaciones rigurosas basadas en datos cuantitativos. Finalmente estos datos se verifican y combinan con los datos obtenidos en campo para de esta manera tener un estudio completo y fiable sobre algún fenómeno natural.

En el caso de los flujos granulares, la forma más común de hacer estudios en laboratorio es a través de canaletas experimentales. Existen en el mundo una gran cantidad de laboratorios

que cuentan con esta clase de equipos. Desde los que usan canaletas de grandes dimensiones (Iverson et al, 1992; Iverson 2003; Iverson et al, 2004; Bartali et al., 2012; Sulpizio, et al., 2014; Bartali et al., 2015), hasta aquellas de pequeñas dimensiones (Cagnoli y Romano, 2010; Cagnoli y Romano, 2012). Sin embargo, independientemente de la escala del equipo, los experimentos que involucren canaletas experimentales, cuando se haya hecho el intento de escalarlos lo mejor posible, arrojaran datos certeros, obtenidos bajo condiciones controladas. A pesar de las inevitables diferencias con la realidad, los experimentos a escala permitirán entender mejor, o hacerse una idea más certera, de los procesos que ocurren en los flujos granulares. A continuación se presenta un breve recuento de algunos de los laboratorios y canaletas más reconocidos a nivel mundial que usan material natural, como es el caso de los experimentos presentados en este trabajo..

II.4.1 Canaleta de la USGS (Gran escala)



En 1991 el servicio Geológico de Los Estados Unidos (USGS) en conjunto con el servicio Forestal del mismo país (USFS) construyeron una canaleta para llevar a cabo experimentos controlados sobre flujos de escombros (figura II.7). Se encuentra localizada a 72.5 km al este de la ciudad de Eugene, Oregón, en Los Estados Unidos de América (Iverson, 1997).

Figura II.7. Canaleta experimental de Richard Iverson (USGS).

Esta canaleta está hecha de concreto reforzado, tiene un canal de 95 metros de largo por dos metros de ancho y 1.2 metros de profundidad. Tiene una inclinación fija de 31°, un ángulo muy común en el que los flujos de escombros tienden a generarse. Doce grandes pernos

cementados en perforaciones profundas y tensados a plataformas de concreto adyacentes al canal ayudan como anclaje de la estructura. Posee sensores en la base que permiten medir fuerzas provocadas debido al deslizamiento de las partículas o el choque de las mismas en la base del flujo. Cuenta con paredes de vidrio para poder observar los procesos internos.

Para crear un flujo de escombros se usan alrededor de 20 m³ (Cerca de 40 Toneladas) de material, el cual se coloca en un contenedor cerrado por una puerta de acero en la parte alta de la canaleta, el material puede ser seco o húmedo. Para saturar el material se usan tuberías subterráneas, y aspersores en la superficie y después es liberado. El material continúa hasta depositarse en una superficie casi plana. En esta canaleta es posible realizar estudios de flujos de escombros en cualquiera de sus fases, desde el inicio hasta el depósito final. Para recoger el material una vez terminado el experimento es necesaria una retroexcavadora la cual coloca el material en un camión y es llevado al contenedor nuevamente.

II.4.2 PELE- “The Pyroclastic Flow Generator (Mediana escala)”

Esta canaleta ubicada en la Universidad de Massey en Nueva Zelanda creada por el Dr. Gert Lube y su equipo, es capaz de simular flujos piroclásticos emulando condiciones de temperatura similares a las existentes en estos tipos de flujos ya que es capaz de realizar experimentos con materiales con temperaturas de hasta 300°C, soportar un flujo de más de 4 toneladas con pendientes de hasta 25° (Lube, et al., 2015) (figura II.8).

La canaleta PELE se encuentra dentro de una sala de calderas de 25 x 18 m y de 16 m de alto. Está formada por cuatro secciones principales:

1. Torre. Una estructura de 13 metros que soporta un sistema de alimentadores y dispensadores que son los que se encargan de liberar el material el cual cae en caída libre a la canaleta.
2. Conducto. Una estructura de 9 metros en donde el material cae y es conducido a la canaleta.
3. Canaleta. Una sección de 12 metros, con inclinación variable entre 5° y 25°.

4. Unidad de sedimentación. Una sección plana y suave de 25 metros de largo el cual se extiende hacia afuera de la sala de calderas y sirve para que el flujo sedimente.

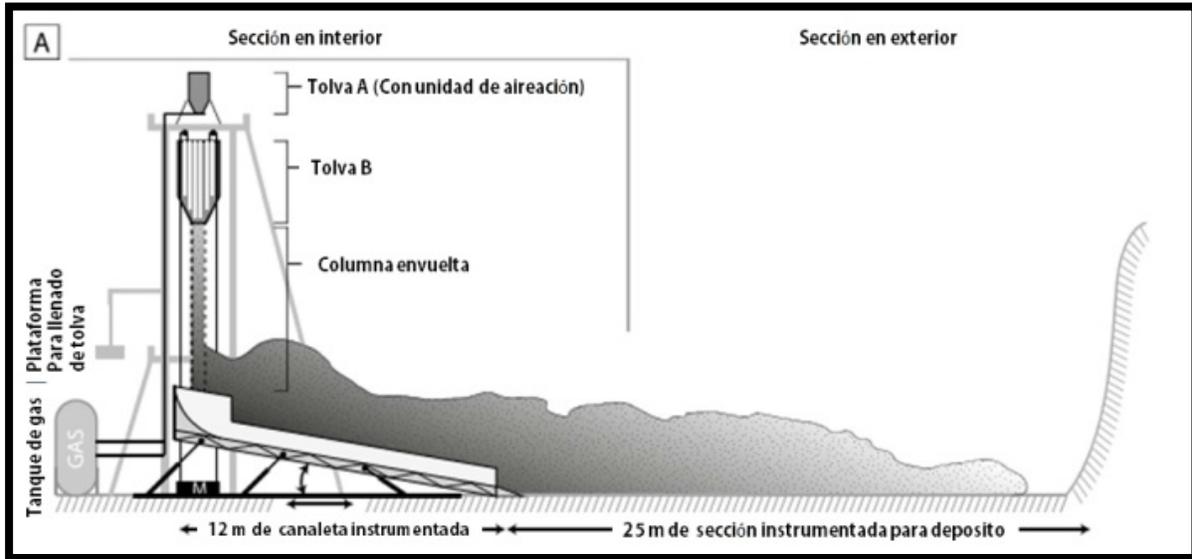


Figura II.8. Boceto de la canaleta experimental PELE de la universidad de Massey en Nueva Zelanda. Modificado de [Lube et al. \(2015\)](#).

Es posible hacer experimentos con una gran cantidad de variables y arreglos iniciales. Los índices de variabilidad de acuerdo a estudios hechos por los mismos autores rondan entre el 5 y el 10%. La canaleta cuenta con amplia gama de sensores que van desde cámaras de alta velocidad hasta celdas de carga.

II.4.3 Canaleta de la Universidad de Roma (Pequeña escala)

Es una canaleta con una rampa metálica recta y una sección curvada de mármol, muy pesada para evitar las vibraciones (figura II.9). El material granular es colocado sobre la rampa y es liberado, manualmente, por una barrera. La rampa y la canaleta tienen una sección trapezoidal, simulando la forma de las barrancas naturales. La curvatura del sistema es hiperbólica, el ancho es de 5.4 cm y la longitud es de 1.4 m. La rugosidad de la superficie es menor que el diámetro de la menor partícula utilizada en los experimentos.

Los autores utilizan materiales naturales entre 0.5 y 3 mm de diámetro en cantidades de 30 a 60 g. La figura II.9 muestra el equipo (Cagnoli y Romano, 2010; Cagnoli y Romano, 2012).

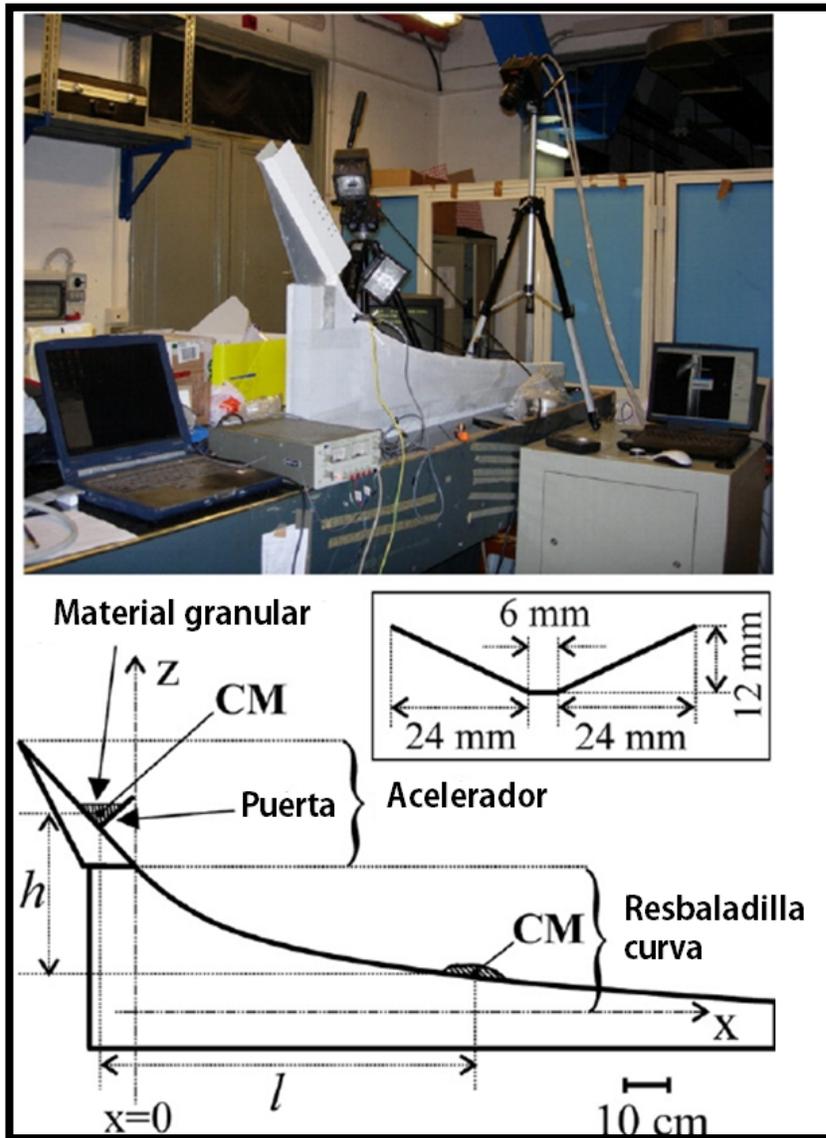


Figura II.9. Foto y sketch de la canaleta de Bruno Cagnoli, en la Universidad de Roma. Modificado de Cagnoli y Romano (2010).

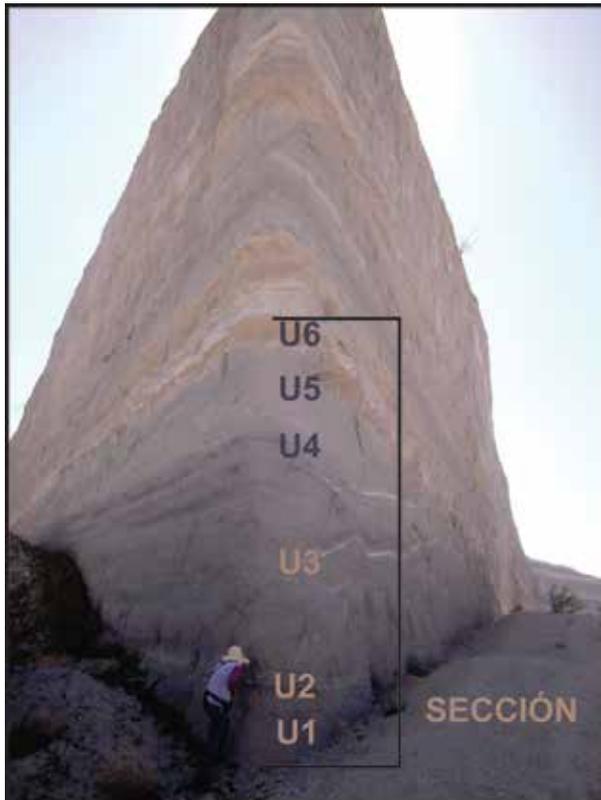
CÁPITULO TRES

MATERIALES Y METODOS

- MATERIALES
 - CANALETA EXPERIMENTAL GRANFLOW-SIM
 - METODOLOGIA USADA
-

III.1 Materiales

III.1.1 Pómez



La pómez utilizada para este trabajo forma parte de los productos de la caldera de Amazcala que se encuentra ubicada en el sector central del Cinturón Volcánico Trans-mexicano. La caldera se ubica a 30 km al NE de la ciudad de Querétaro. Se trata de una estructura de forma elíptica con un diámetro de 11 x 14 km. Con el eje mayor con una orientación preferencial NE. Tiene una edad entre 7.3 y 6.6 Ma. Los productos atribuidos a esta caldera han sido divididos en varias unidades y van desde ignimbritas, derrames de lava, domos, y depósitos de caída (Aguirre et al., 2001; Hernández et al., 2009).

Figura III.1. Imagen de los depósitos de la Pómez Ezequiel Montes y algunas de sus unidades inferiores. Para más información se hace referencia al lector a los trabajos de Aguirre et al., (2001) y Hernández et al., (2009).

Entre estos productos se encuentran los depósitos de caída de pómez de Ezequiel Montes, que es de donde el material usado para estos experimentos fue extraído.

Se trata de un depósito localizado en un banco de material (Figura III.1). El depósito es de color gris pardo, está estatificado y se aprecian intercalaciones de capas que van desde algunos centímetros hasta varios metros de espesor. Se observan capas que presentan algunas gradaciones de tipo simétrica y capas de ceniza fina con estratificación cruzada. El material que compone los estratos es principalmente pómez de color gris claro y algunos

líticos de color café anaranjado. La pómez presenta una textura porfírica es posible observar algunos pequeños pero visibles cristales de cuarzo y sanidino en una matriz vítrea.

Las secuencias que conforman estos depósitos son en su gran mayoría caídas de pómez que varían en espesor, tamaño de las partículas y arreglo de las mismas. Algunas se presentan sin algún orden en específico, mientras que otras presentan gradaciones inversas, simétricas y normales. Existen intercalaciones de capas con pómez gruesa y fina. Se observan en esta misma secuencia un par de capas de menos de 20 cm de espesor que presentan estratificación cruzada, con pómez angulosa y algunos fragmentos líticos, en una matriz de ceniza. Estas capas pertenecen a depósitos de oleadas piroclásticas entre los depósitos de caída. No se observan capas de suelo o paleosuelo que indiquen intervalos de tiempo entre las capas, por lo que se asume que todo es una secuencia perteneciente a un mismo evento. Así que estas oleadas ocurrieron durante la formación de los depósitos de caída, fenómenos que se conocen como “oleadas piroclásticas intraplinianas”. Comúnmente asociadas a estas capas encontramos delgadas capas de ceniza fina con algunos fragmentos de pómez y líticos. Estas capas pueden pertenecer a cambios en el estilo eruptivo.

Se decidió usar este material debido a que, a pesar de su edad, esta pómez se encuentra prácticamente sin alteración y por la facilidad con la que se pueden recolectar grandes cantidades de material gracias a un afloramiento localizado dentro de una cantera. Además para ser depósitos de caída, la forma general de los clastos no es tan redondeada lo cual es mejor para nuestros experimentos.

III.1.2 Líticos

El material lítico utilizado para este trabajo fue recolectado en el flujo de bloques y cenizas (FBC) denominado el Refugio, por el nombre de la localidad donde aflora la secuencia tipo en el volcán Nevado de Toluca.

El FBC *Él Refugio*, fue emplazado hacia el NE del volcán hace aproximadamente 13 Ka (D'antonio et al., 2008). La distancia máxima alcanzada por este flujo fue de 15 km,

cubriendo un área de 150 Km². Mientras que los depósitos más proximales se encuentran a no menos de 6-7 km del cráter.

El depósito consta de dos facies diferentes: Una facies central (de donde el material fue extraído) que presenta granulometrías gruesas y espesores considerables, y una facies lateral, que presenta clastos más finos y espesores menores.

La facies central se encuentra distribuida hacia el NE, y se encuentra principalmente en la región del Refugio (de ahí su nombre). Según datos de D'Antonio et al., 2008, el espesor de estos depósitos aumenta a la distancia llegando hasta 10 m al SO de la localidad de El Refugio. El depósito presenta hasta 5 sub unidades deposicionales. Estas unidades son de color gris brillante que puede pasar a rosa en su parte superior. Son masivas, soportadas por matriz de ceniza gruesa a fina. Por otra parte la fracción gruesa del depósito está constituida por clastos líticos mono litológicos de color gris oscuro y claro de composición dacítica, líticos bandeados y un 2-5% de líticos oxidados de color rojo. También es posible encontrar, aunque en menores cantidades, pómez centimétricas juveniles de color gris claro y pómez accidentales de color amarillento subredondeadas a redondeadas.

Los líticos de este flujo son en general de forma angulosa a sub angulosa, aunque se registró que algunos de los líticos gris claro presentaban formas subredondeadas.

En el FBC El Refugio es posible encontrar bloques de hasta -10 phi, sin embargo, el tamaño promedio de los clastos es de -6 phi.

Este material fue seleccionado debido a su uniformidad (carácter mono-litológico) y que al formar parte de una cantera de material es relativamente sencillo extraer grandes cantidades de material con las granulometrías necesarias para esta serie de experimentos.

Los materiales utilizados en nuestros experimentos se tuvieron que recolectar en dos depósitos diferentes dado que no se localizó un lugar en donde se pudieran encontrar al mismo tiempo depósitos de caída de pómez bien conservadas con diferentes granulometrías y depósitos de líticos con características uniformes y con los tamaños requeridos.

III.1.3 Caracterización de los materiales

Para la realización de estos experimentos se decidió usar material natural, para recrear condiciones que fueran lo más parecidas, dentro de las posibilidades del equipo experimental, a los flujos piroclásticos en la naturaleza. Para llevar a cabo los experimentos se decidió utilizar dos tipos de mezclas de materiales. Monodispersas, es decir, mezclas de clastos de un mismo tamaño de grano (usando la escala de Phi por ser la que más se usa en la vulcanología) y mezclas polidispersas, es decir, mezclas de materiales con diferentes tamaños. A continuación se presentan algunas características de los materiales usados en esta serie de experimentos.

Tabla III.1. Materiales Monodispersos

	Mezcla	AR*	DA** (gr/cm ³)
-3 Phi	P0	33°	1.01
	P25	34°	0.85
	P50	33°	0.68
	P75	30.7°	0.52
	P100	30°	0.36
-2 Phi	P0	31°	1.10
	P25	29.6°	0.91
	P50	28.8°	0.73
	P75	29°	0.55
	P100	30°	0.36
-1 Phi	P0	28°	1.10
	P25	29°	0.93
	P50	28°	0.77
	P75	27°	0.60
	P100	26°	0.44
0 Phi	P0	28°	1.15
	P25	25.8°	1.02
	P50	24.2°	0.90
	P75	25.4°	0.77
	P100	25°	0.65
1 Phi	P0	26°	1.15

P25	23.7°	1.02
P50	25.4°	0.90
P75	23.5°	0.77
P100	24.5°	0.65

* Ángulo de reposo

** Densidad Aparente

Tabla III.2. Materiales polidispersos

	Mezcla	AR*	DA** (gr/cm ³)
Weibull	P0	31°	1.36
	P10	30°	1.18
	P50	28°	0.94
	P90	30°	0.68
	P100	31°	0.61
Gauss	P0	29°	1.44
	P10	28°	1.23
	P50	32°	0.97
	P90	30°	0.86
	P100	28°	0.69

* Ángulo de reposo

** Densidad Aparente

Tabla III.3. Datos adicionales

	Densidad (gr/cm ³)	CR*	CF**
Pómez	0.4 - 0.9	0.27	
Líticos	2.5 - 2.8	0.48	
Piso Pirelli			0.45

* Coeficiente de restitución

** Coeficiente de fricción

III.2 GRANFLOW-SIM

El GRANFLOW-SIM (Simulador de Flujos Granulares por sus siglas en inglés) (Figura III.2) en la versión utilizada para esta tesis fue construido en 2013. Es una canaleta experimental modular inédita diseñada y construida en su totalidad en el laboratorio de análisis de imágenes y modelado analógico (LAIMA) del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (Bartali et al., 2012). Se compone de cinco secciones independientes cada una de las cuales está equipada con varios tipos de sensores. La configuración del sistema puede ser modificada parcialmente, dependiendo de las características del experimento y de los parámetros que sea necesario medir. Cada sección es impermeable y permite realizar experimentos con flujos granulares secos y húmedos. El equipo completo pesa más de 2 toneladas y ocupa una superficie total de 10 m de largo, 5 m de ancho y 7 m de altura (Figura III.3). El diseño y fabricación de todos los módulos y partes electrónicas del aparato experimental es completamente inédito y todo esto fue construido en el laboratorio LAIMA. El ángulo de la canaleta elegido para los experimentos realizados en este trabajo fue de 38° , un ángulo que con frecuencia puede ser encontrado en laderas de volcanes, y un ángulo que está por encima del ángulo natural de reposo de los materiales elegidos. El ángulo para el módulo de sedimentación es de 4° para hacer que el material al llegar a este módulo se deposite pero pueda ser capaz de seguir fluyendo y desarrollar algunas estructuras sedimentarias que puedan ser observadas (cámaras de alta velocidad) y medidas (análisis de fotografías). Se escogió una relación de inclinación (slope ratio) elevado con el fin de observar acentuados los fenómenos que ocurren en el cambio de pendiente.

La canaleta experimental GRANFLOW-SIM está compuesta por los siguientes módulos:

- 1) contenedor del material
- 2) unidad de aceleración
- 3) canaleta con inclinación variable
- 4) depósito para la sedimentación con inclinación variable
- 5) torre de soporte

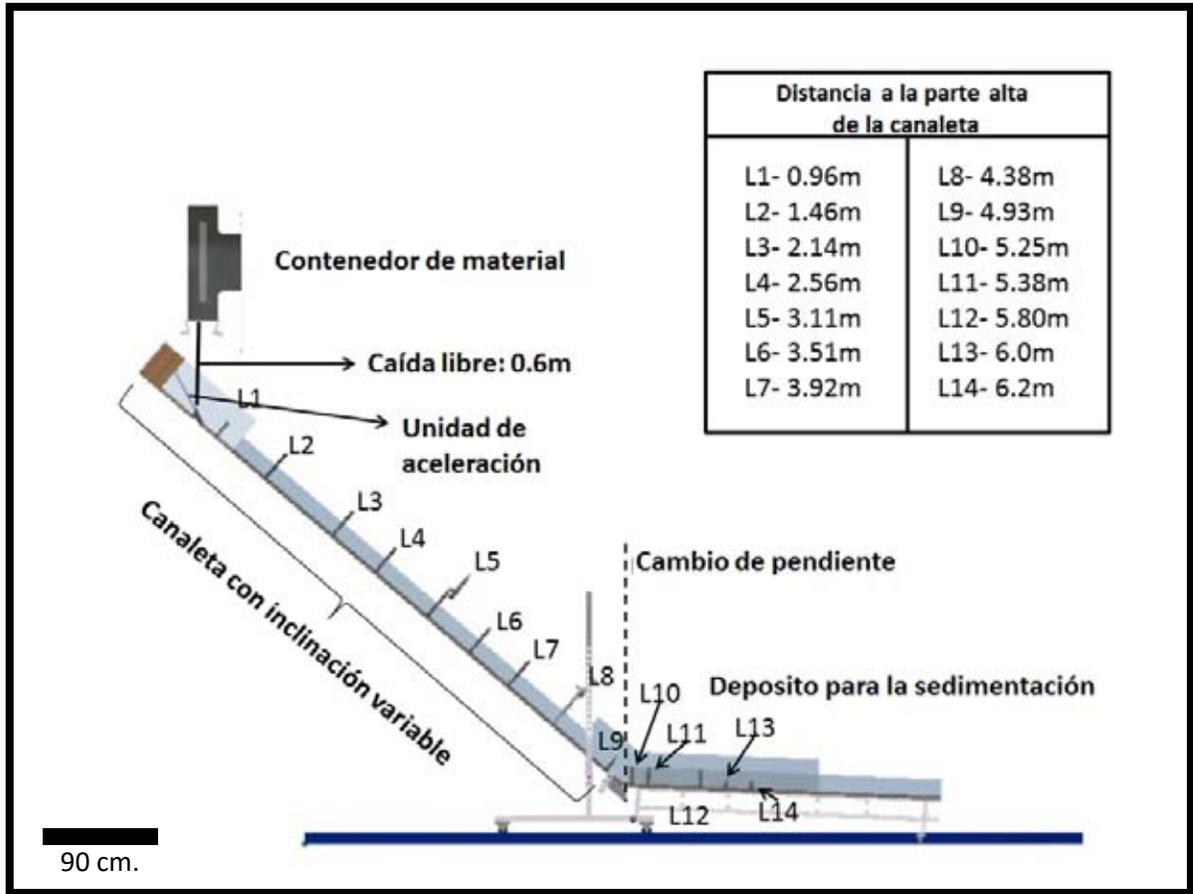


Figura III.2. Esquema que ilustra los diferentes módulos de la canaleta experimental GRANFLOW-SIM. A excepción de la torre de soporte.

III.2.1 Contenedor

El módulo del contenedor (Figura III.4) es un recipiente en forma de paralelepípedo cuyas dimensiones son 20 cm de lado y 90 cm de altura, y tiene un volumen de 36 dm³. Es capaz de almacenar hasta 50 kg de líticos. Está hecho de PVC para soportar mejor la presión del material, garantizar la impermeabilidad y la durabilidad ante condiciones climáticas adversas. En uno de sus lados cuenta con una ventana vertical transparente para permitir observar el volumen del material y el acomodo inicial de las partículas. Está sujeto a la torre por medio de una estructura de PVC que permite mantenerlo a 30 cm de distancia de las barras de guía.

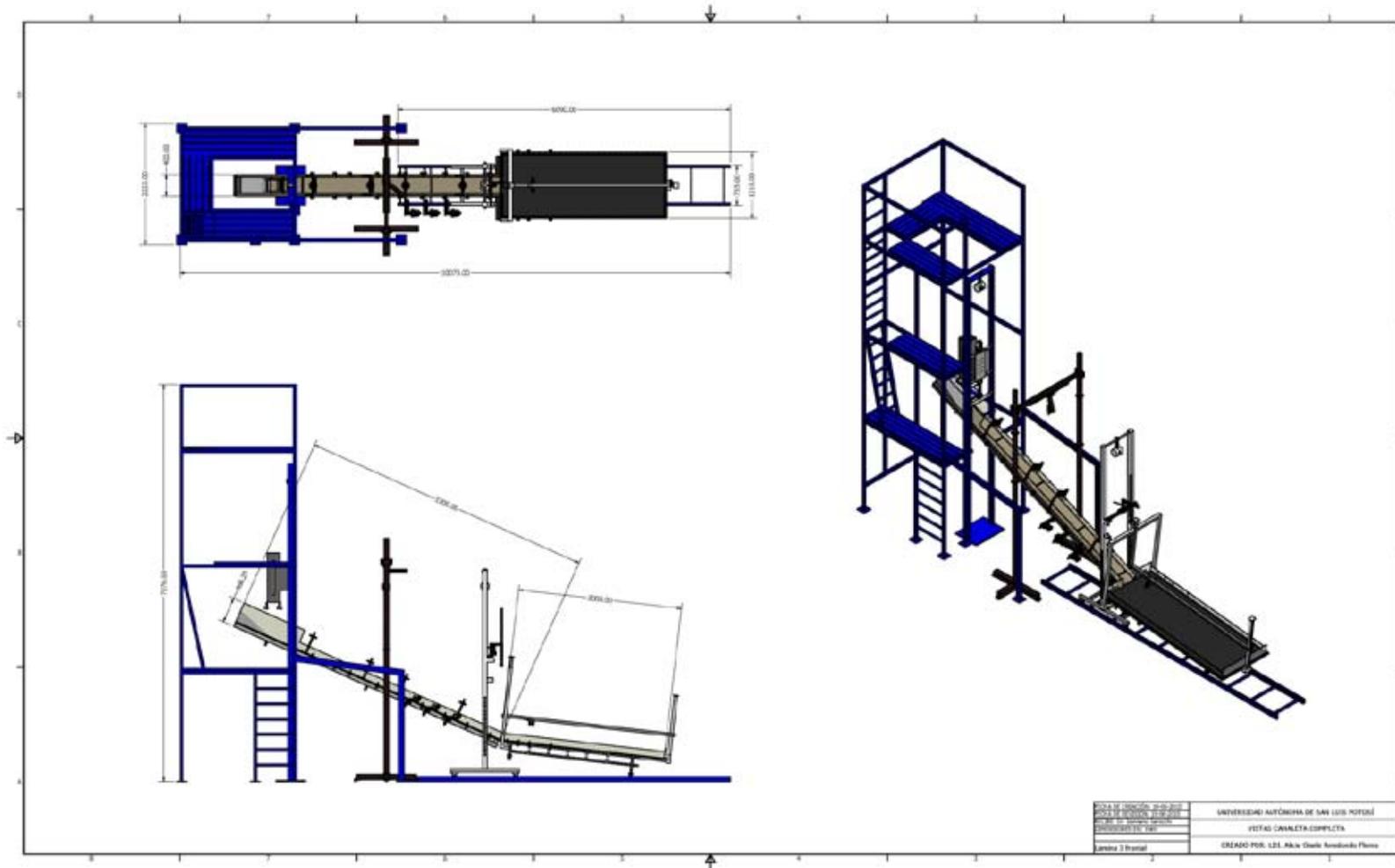


Figura III.3. Plano principal de la estructura completa del GRANFOW-SIM en planta, perfil y oblicuo.

La placa, a la cual está sujetado el contenedor, es de acero y se desliza por las guías de la torre por medio de 4 rodillos de nylon de 10 cm de diámetro.

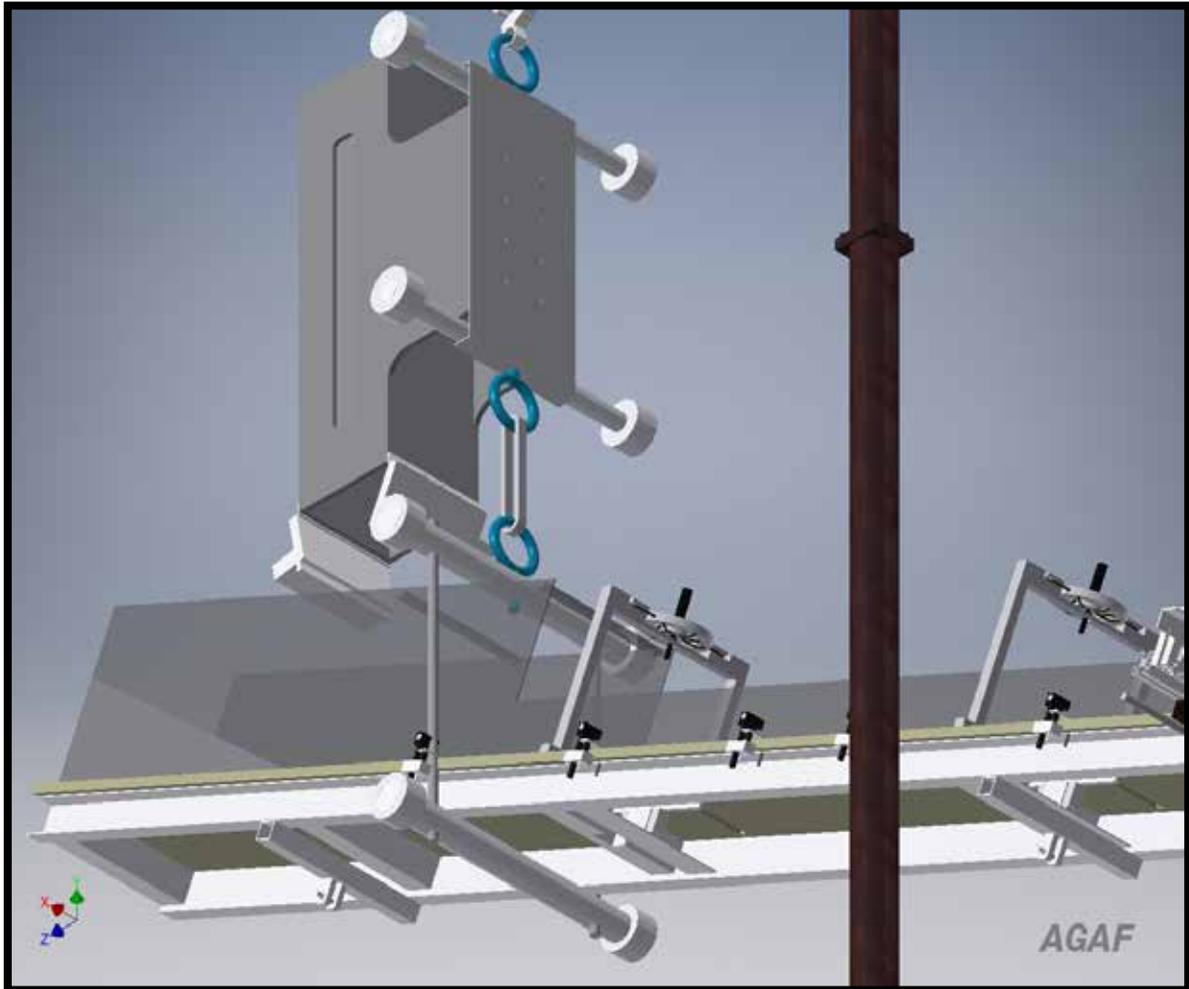


Figura III.4. Modulo del contenedor de material del GRANFLOW-SIM, ubicado sobre la parte alta de la canaleta.

El contenedor y la canaleta están unidos por una cadena que permite modificar la distancia entre los dos, desde un mínimo de 40 cm hasta un máximo de 1 m, está distancia determinada por la altura total de la torre y de la inclinación de la canaleta. La parte superior del contenedor es abierta para permitir la carga del material granular, mientras que la parte de abajo se sella por medio de dos puertas mantenidas cerradas por un electroimán que ejerce una fuerza de 300 kg. Este electroimán es alimentado por el sistema de control electrónico. Cuando se liberan la puertas, la presión del material empuja lateralmente las

puertas, una de las cuales posee una placa de acero inoxidable que es atrapada por un imán de Neodimio, garantizando que se mantenga abierta durante todo el tiempo que el material fluye fuera del contenedor. La otra puerta se mantiene abierta por un resorte conectado a la placa que sostiene el contenedor. El contenedor se desplaza verticalmente junto con la canaleta por medio de una garrucha con capacidad de 1000 Kg, cuya cadena tiene un recorrido máximo de tres metros y está fijada en la parte superior de la torre.

III.2.2 Unidad de aceleración

Una vez que el material ha salido del contenedor cae directamente sobre la canaleta. Para evitar que el material pierda demasiada energía por la colisión se ha colocado una rampa en la parte inicial de la canaleta con una inclinación de 20° con respecto a la inclinación de la canaleta (Figura III.2). Esta rampa se une y se mantiene fija a la canaleta por medio de una serie de tornillos, por lo que puede ser colocada a una diferente inclinación, cuando sea necesario.

III.2.3 Canaleta con inclinación variable

La canaleta experimental del GRANFLOW-SIM tiene un ancho de 30 cm y una longitud de 4.9 m. (Figura III.2) Está sostenida por una estructura metálica y cuenta con dos soleras en ángulo de 3 m de longitud, 2.5 cm de ancho y 6 mm de espesor que le dan un mayor soporte y ayudan a evitar la propagación de vibraciones producidas por el impacto del material al momento de caer sobre la canaleta. También ayudan a reducir la flexión. Cuenta también con dos postes de soporte en los puntos más críticos (parte central y alta la parte donde el material cae), de esta manera se logró la máxima estabilidad de la canaleta. Cuenta con paredes de vidrio templado. En la parte alta y en la parte baja de la canaleta estos vidrios tienen una altura de 25 cm mientras que en el resto de la canaleta las paredes de vidrio son de 15 cm. Se usaron paredes de vidrio para permitir una observación óptima de los procesos que puedan ocurrir dentro del flujo a través del uso de cámaras fotográficas o de vídeo.

La base de la canaleta es de madera de 15 mm de espesor. Encima se ha colocado una tira de hule corrugado (Piso Pirelli estándar) para incrementar el coeficiente de fricción y simular un ambiente más apegado a las condiciones naturales.

La estructura metálica de la canaleta está anclada a un rodillo el cual se desplaza verticalmente por la torre por medio de dos anillos, los que permite mantenerla en su lugar y al mismo tiempo rotar, cuando se modifica la inclinación. La inclinación puede variar entre 10 grados y 40 grados, gracias a la garrucha con capacidad de una tonelada colocada en la parte superior de la torre. La cadena de la garrucha tiene una longitud de 8 m, permitiendo un recorrido de casi 3 metros. Esta se conecta a la placa que sostiene el depósito del material granular y, a su vez, este se sujeta a la canaleta por medio de otra cadena, que se puede sustituir por una segunda garrucha, la que permite cambiar la distancia entre la canaleta y el contenedor del material granular. La placa que funge como base de la canaleta, tiene un ancho de 42 cm para permitir colocar y sujetar las barras de los interruptores ópticos o cualquier otro tipo de sensores.

La canaleta se conecta con el depósito de sedimentación por medio de una bisagra de acero soldada en ambas partes. La bisagra, con una rotación de 270 grados, permite que la canaleta se incline manteniéndose siempre alineada con el depósito, además permite que también el depósito pueda ser inclinado a diferentes ángulos (de 4° a 20°).

La canaleta cuenta con una amplia gama de sensores. Varios de los cuales, como las celdas de carga, se tienen que colocar por debajo de la canaleta. La cantidad de sensores colocados por debajo de la canaleta son: 4 celdas de carga.

A lo largo de la canaleta se han colocado 9 barras de PVC a cada lado. Por un lado, la barra contiene el emisor láser por el otro un fotodiodo, formando en conjunto, 9 interruptores ópticos. Posteriormente se detallará más a profundidad sobre los sensores con los que cuenta la canaleta.

III.2.4 Depósito para la sedimentación

El depósito es un área de 1.2 m de ancho y 2.44 m de largo, con una base de madera, sobre la cual se ha colocado una superficie de piso Pirelli, igual que en la canaleta (figura III.5). Cuenta con paredes de vidrio templado de 15 cm de altura, con excepción de las zonas cercanas al punto de quiebre, en las que se colocaron vidrios de 30 cm de altura, dado que el material que al no alcanzar a fluir, se acumula en el punto de quiebre formando una pila. El depósito se encuentra soportado por una estructura metálica en forma de paralelepípedo de 1 m de ancho, 1.8 m de largo y 15 cm de altura, es una estructura abierta, reforzada con 2 travesaños dobles a lo largo y 6 a lo ancho. Esta estructura está soldada a la bisagra que la une a la canaleta. Todo el depósito descansa sobre 4 ruedas de hule, las cuales se desplazan sobre dos rieles de acero alineados y nivelados.

De esta forma, cuando se cambia la inclinación de la canaleta, el depósito se desplaza, manteniéndose siempre alineado. Para la nivelación de los rieles se tuvieron que fabricar 12 soportes especiales y colocar patas con tornillo nivelador en cada uno. Para incrementar la flexibilidad del equipo y permitir realizar experimentos en los cuales se simula una doble pendiente, se construyó un puente de acero de 60 cm de ancho y 1.8 m de altura que permite levantar el depósito para darle una inclinación variable, con respecto a la canaleta y a la horizontal, esta inclinación puede ser de hasta 20 grados. El puente está soldado a un carro con 4 ruedas que se desplaza sobre los mismos rieles, cuando el depósito se encuentra inclinado, las dos llantas delanteras del depósito no están en contacto con los rieles, por lo que todo el sistema descansa sobre este carro. La parte superior del puente es utilizada también para colocar cámaras de video y grabar el flujo desde otra perspectiva.

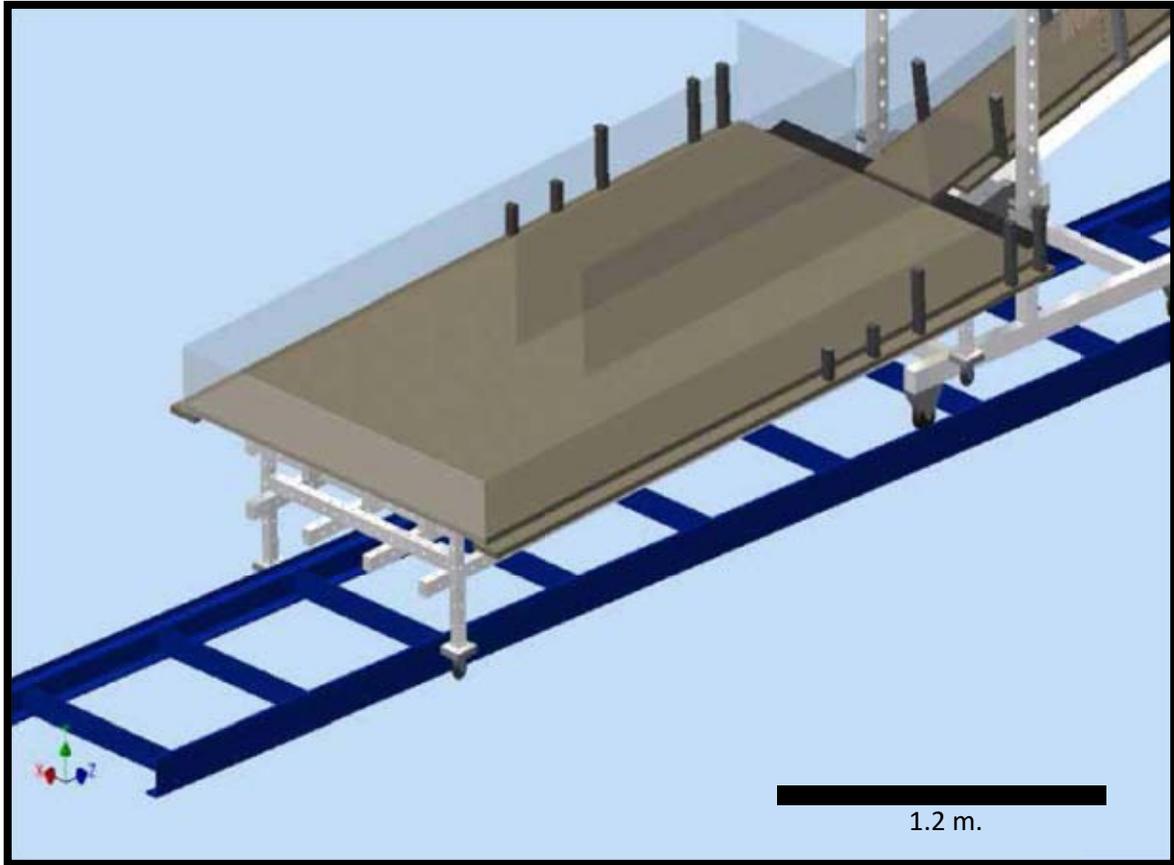


Figura III.5. Módulo de depósito para la sedimentación del material del GRANFLOW-SIM.

III.2.5 Torre de soporte

Es una estructura metálica con base cuadrada de 2 m de lado y 7 m de altura construida con tramos de PTR de 5 cm. La función de la torre es la de sostener la canaleta y el depósito del material granular (Figura III.3).

La torre tiene 3 pisos distanciados 2 m entre si, unidos por escaleras que permiten el fácil acceso al contenedor del material para su carga y mantenimiento. Para garantizar la estabilidad y la seguridad, está sujeta al piso y a una de las paredes por medio de placas atornilladas con taquetes expansivos (más de 50 puntos de fijación),. Además posee 4 cables de acero que ejercen tracción por los 4 lados y están fijados a placas de acero empotradas en las paredes. La construcción se llevó a cabo en secciones, las cuales fueron

acomodadas en su posición de manera manual debido a la imposibilidad de utilizar grúas o montacargas.

Para proteger la canaleta del sol y de la lluvia, se ha colocado una lona que tapa aproximadamente el 50% del equipo. Debido a que en San Luis Potosí los vientos son bastante fuertes, esta lona actúa como una vela, lo que obligó a agregar puntos de fijación a la base de la torre para evitar las oscilaciones de la canaleta.

III.2.6 Sensores usados

En orden de medir y cuantificar los procesos que ocurren y/o se relacionan con los flujos granulares desarrollados en el GRANFLOW-SIM se han colocado una serie de sensores electrónicos tanto en la canaleta como en la unidad de sedimentación. Estos sensores permiten registrar cuantitativamente importantes parámetros físicos como velocidad, distribución de la masa, comportamiento durante el transporte y sedimentación.

Los sensores con los que cuenta el GRANFLOW-SIM son:

- Celdas de carga
- Barreras láser
- Cámaras de alta velocidad

III.2.6.1 Celdas de carga

Las celdas de carga son dispositivos que se utilizan para medir todos los tipos de deformación que puede sufrir un material. Estas deformaciones pueden ser flexiones, torsiones, estiramiento o compresión; variables que son medidas dependiendo de la posición en la que se colocan los elementos sensitivos sobre el material que se desea medir. Esto debido a que una deformación es el resultado de la aplicación de una fuerza o presión que puede ser originada por factores como vibraciones, sonido, ondas de choque, movimiento, etc.

En el GRANFLOW-SIM se han colocado cinco celdas de carga de acero inoxidable con una capacidad máxima de 30 kg y una resolución de fábrica de 6 g.

Se han fijado sobre la estructura metálica de la canaleta para poder medir la componente normal del peso del flujo, independientemente de la inclinación que ésta tenga. Cada una de las celdas cuenta con una barra de acero de 246 mm x 15 mm posicionada transversalmente a la dirección del flujo. La barra de acero sobresale 1.5 mm por encima de la canaleta, lo que le permite transmitir la fuerza (hacia el punto débil de la celda que contiene las galgas extensiométricas). La sensibilidad de la celda de carga es de 2mV/V, que se traduce en una señal de salida de $\pm 10\text{mV}$ cuando se aplica la máxima carga (30 kg).

En el depósito para la sedimentación se ha colocado una celda de carga en aluminio, con un perfil mucho más bajo que el de las anteriormente descritas porque se adapta mejor a la estructura mecánica. Esta celda también tiene una barra de acero que actúa como “plato” de dimensiones iguales a las que se encuentran a lo largo de la canaleta. Esto es para tener uniformidad en cada uno de los cinco puntos de medición.

Gracias a las celdas de carga es posible medir la distribución de la masa de un flujo granular en un tiempo determinado y en un lugar determinado. De la misma manera las celdas dan indicadores de procesos internos que puedan estar sucediendo en un flujo granular (Ej. temperatura granular, dilución y compactación del flujo, formación de ondas secundarias, etc)

III.2.6.2 Barreras láser



Figura III.6. Fotografía que muestra las barreras láser activadas y en funcionamiento.

Técnicamente un láser es un dispositivo electrónico que, basado en la emisión estimulada de radiación de las moléculas de gas que contiene, genera o amplifica un haz de luz monocromática y coherente de extraordinaria intensidad. El nombre proviene de las siglas en inglés de “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations”.

Cuando se habla de “coherencia” se hace referencia a que cada uno de los fotones emitidos se encuentra en fase con los otros, por lo que cada una de las ondas electromagnéticas interfieren constructivamente aumentando su amplitud y por lo tanto su potencia.

En lo que se refiere al término “monocromático”, esto se refiere a que todos los fotones emitidos poseen la misma cantidad de energía y que la luz es de una sola longitud de onda. Los fotones de un láser salen al exterior por un solo lugar y hacia una dirección preferencial, lo que significa que su ángulo de divergencia es muy bajo, a diferencia de lo que sucede con una lámpara de uso cotidiano. Esto permite que el haz de un láser pueda recorrer grandes distancias y ser aun visible.

El simulador GRANFLOW-SIM cuenta con 14 barreras láser distribuidas a lo largo de la canaleta (9 barreras láser) y de la unidad de sedimentación (5 barreras) (figura III.6).

En el caso de las barreras láser colocadas en la canaleta, estas son estructuras de PVC que están atornilladas a la canaleta, que de un lado tienen colocado un pequeño dispositivo láser el cual emite un haz de luz coherente y monocromático que es dirigido al otro extremo donde es detectado por un fotodiodo. Cuando el material pasa por uno de estos puentes, interrumpe el paso del láser hacia el fotodiodo lo que es registrado en por el sistema de control tomando el láser y el tiempo exacto en el que esto sucedió.

En la unidad de sedimentación las barreras láser están formadas por dos barras de PVC colocadas a cada extremo de la mesa de sedimentación.

Las barreras láser permiten lograr mediciones que ayudan al cálculo de velocidad y aceleración de un flujo granular. De esta manera es posible estudiar con precisión la cinemática del flujo.

III.2.6.3 Cámaras de alta velocidad

El GRANFLOW-SIM cuenta con 5 cámaras de mediana y alta velocidad las cuales pueden ser colocadas tanto en la canaleta como en la unidad de sedimentación. Se construyeron tres soportes metálicos que se colocaron en la canaleta. Estos soportes pueden ser intercambiables y ser colocados casi en cualquier posición en la canaleta. Dado que las paredes de la canaleta son hechas de vidrio es posible una observación nítida de lo que ocurre en la parte del flujo que está en contacto con la pared.

Para lograr una sincronización perfecta de las cámaras se han construido una serie de dispositivos disparadores automáticos que, al hacer pasar una cantidad de electricidad en un solenoide activa mecánicamente el disparador de cada cámara para grabar. Las formas de disparar los actuadores son dos: Se pueden activar al momento de liberar el material del contenedor (tiempo cero); o, se pueden disparar usando un determinado láser, es decir, cuando el material sea detectado por una determinada barrera láser y esto disparara la cámara.

Se cuenta con dos cámaras Sony HDR-XR 150 capaces de grabar a 120 FPS (Frames por segundo) a una resolución de HD (1280 x 720) y tres cámaras Nikon 1 (dos Nikon 1 J1 y una S1) que son capaces de grabar a 400 FPS (640 x 240) o incluso pueden llegar a grabar a 1000 FPS, sin embargo, a esta velocidad la resolución del video es muy baja (320 x 120). Gracias a las cámaras de alta velocidad es posible observar fenómenos desarrollándose dentro del flujo en tiempo real, tales como segregación, sedimentación, formación de ondas secundarias, erosión y formación de estructuras sedimentarias.

III.2.7 Adquisición de los datos

El GRANFLOW-SIM, recibe una gran cantidad de datos y controla diversos sensores de manera simultánea, por esta razón, el sistema electrónico se vuelve complejo. Cada sensor proporciona diferentes tipos de señales tanto en frecuencia como en amplitud y esto implica que la etapa de amplificación y de acondicionamiento de señales, deba ser diseñada de acuerdo al tipo de sensor utilizado. Diferentes sensores requieren también de voltajes y corrientes distintas, dependiendo de la función que deben realizar, por lo que se necesitan fuentes de alimentación y amplificadores dedicados, incrementando la complejidad.

Todo sistema electrónico de un instrumento de medición se divide en dos grandes partes: una analógica y una digital. Los circuitos relacionados con la parte analógica, o analógica, son los que manejan pequeñas señales, que normalmente son continuas; mientras que los relacionados con la parte digital, trabajan con señales discretas. La sección analógica es la que recibe las señales de los sensores, la amplifica y la convierte a señales discretas o digitales; además proporciona las señales que deben controlar los amplificadores de potencia que alimentan a los actuadores y los transductores. La sección digital, es la que se encarga del control de la parte analógica, además de procesar, almacenar y distribuir los datos recabados y la información generada. Las señales analógicas y digitales generadas en el GRANFLOW-SIM son transferidas a dos tarjetas de adquisición de datos que contienen los convertidores analógico/digitales de 16 bits necesarios para el monitoreo de todos los sensores. Los datos son almacenados en archivos de texto y la comunicación entre la parte electrónica de GRANFLOW-SIM y la computadora se realiza mediante una interfaz creada

en Labview. Las tarjetas empleadas para la adquisición de datos son una Measurement Computing (Texas Instruments) modelo USB-1608GX-2AO y una National Instruments modelo NI USB-6211.

Los circuitos utilizados con los diferentes tipos de sensores instalados en el GRANFLOW-SIM, permiten obtener factores de amplificación elevados (400x), una tasa de adquisición de 1000 muestras por segundo como mínimo y una resolución de 16 bits. Estas características dan la posibilidad de realizar mediciones de buena resolución tanto en el tiempo como en la amplitud. Por esta razón se ha optado por utilizar convertidores analógico-digitales de 16 bits con una velocidad de muestreo que permita 15625 lecturas por segundo por canal. Este valor se obtiene dividiendo la velocidad máxima de adquisición declarada por el fabricante entre el número de canales ($250000 \text{ sps} / 16 = 15625 \text{ sps}$). Esto representa una tasa de muestreo mucho mayor a la requerida. Sin embargo, es mejor sobremuestrear, dado que con una baja velocidad de lectura, no es posible reconstruir la señal original si esta cuenta con fluctuaciones rápidas.

III.2.8 Arreglo (“Set up”) experimental

Para la realización de los experimentos en el GRANFLOW-SIM fue necesaria más de media tonelada de material natural entre pómez y líticos. Dicho material fue tamizado para obtener las clases granulométricas deseadas. Las cuales son desde -3 hasta 1 phi con paso de 1 phi. La razón por la cual fueron elegidos estos tamaños de grano es para evitar el efecto de fricción extra que tienen las partículas menores a 1 phi, puesto que se requería analizar el efecto que los clastos de diferente densidad tienen sobre la cinemática de un flujo granular.

Se utilizaron dos tipos de mezclas de materiales: mezclas monodispersas y mezclas polidispersas. Para las mezclas monodispersas, es decir, mezclas de un solo tamaño de grano, se usaron los siguientes: -3, -2, -1, 0 y 1 Phi. Para las polidispersas, es decir, mezclas de todos los cinco tamaños de grano, se decidió usar dos tipos de distribuciones granulométricas, una distribución de tipo Gaussiano (con una moda central en -1 phi) y otra

de tipo Weibull (una mezcla más rica en las fracciones gruesas como -2 y -3 phi) (Figura III.7).

La razón para usar este tipo de distribuciones es que dichas distribuciones son muy comunes en la naturaleza, y asemejan en buena medida a la distribución real de un flujo piroclástico o un flujo granular de origen geológico (Bartali et al., 2012; 2015; Sulpizio et al., 2016; Rodriguez-Sedano et al., 2016).

Para cada mezcla se prepararon cinco diferentes proporciones de pómez-líticos, estas proporciones fueron hechas en volumen tomando el volumen total del contenedor (36 dm^3) como el 100%. Para las mezclas monodispersas se usaron las siguientes proporciones:

- Pómez 0% líticos 100% (P0)
- Pómez 25 % Líticos 75% (P25)
- Pómez 50% Líticos 50% (P50)
- Pómez 75% Líticos 25% (P75)
- Pómez 100 % Líticos 0% (P100)

Para las mezclas polidispersas se usaron las siguientes proporciones:

- Pómez 0% líticos 100% (P0)
- Pómez 10 % Líticos 90% (P10)
- Pómez 50% Líticos 50% (P50)
- Pómez 90% Líticos 10% (P90)
- Pómez 100 % Líticos 0% (P100)

Se decidió usar estos porcentajes para determinar el efecto que pueda tener la pómez sobre los flujos granulares a partir de un valor que se consideró suficiente (25% en mezclas monodispersas) y hasta un valor pequeño pero representativo en volumen como lo es 10% sin generar un número de lanzamientos excesivo.

Cuando los materiales estuvieron listos se procedió a la realización de los experimentos. Para lo cual se usó la siguiente metodología:

1. Se pesan los materiales que componen la mezcla. En el caso de que se trate de una mezcla con pómez y líticos se pesan por separado y luego se mezclan los materiales en proporciones volumétricas.
2. Se introduce la mezcla dentro del contenedor de la canaleta.
3. Desde la caja de control central de la canaleta, se abren las puertas del contenedor accionando el botón de inicio. El material después de una caída libre de aprox. 50 cm. llega a la canaleta y empieza a deslizarse.
4. El frente del flujo granular creado irá interrumpiendo a las barreras láser. Los tiempos de esto se transmiten a la computadora y servirán sucesivamente para efectuar el cálculo de cinemática.
5. Al mismo tiempo las celdas de carga registran el paso del material en forma de la fuerza ejercida perpendicularmente a las barras de acero. Este dato es transformado en presión conociendo la superficie sobre la que el flujo ejerce la fuerza. Estos sensores proporcionan información acerca de la distribución de la masa en el flujo.
6. En zonas estratégicas a lo largo del trayecto las cámaras de video de alta velocidad graban el flujo para registrar procesos que a simple vista son imposibles de observar.
7. Los datos recabados por los sensores de la canaleta son almacenados automáticamente en la computadora en un archivo.txt. Estos datos son analizados posteriormente mediante un software creado y diseñado específicamente en el laboratorio LAIMA-UASLP. Los datos, todos sincronizados con alta precisión, son graficados y analizados estadísticamente obteniendo información de la cinemática, y distribución del material en la avalancha.
8. Una vez que el material se ha detenido por completo se procede a medir el alcance del depósito tomando en cuenta solamente el frente principal. Se considera como el frente principal del flujo a la parte distal del depósito donde los clastos están en contacto unos con otros (Figura III.8) formando un cuerpo compacto de granos. Posteriormente se toman fotografías al depósito formado.

9. Las fotografías son tomadas lateralmente y en planta. Las fotografías laterales pueden ser usadas para formar una imagen panorámica del depósito. Estas se pueden utilizar para realizar un conteo de pómez y líticos y determinar su variación longitudinal en el depósito. Esto, se realiza mediante el software Image Pro-Plus[®].
10. Cuando el proceso ha finalizado completamente y se ha documentado la morfología y extensión del depósito, se recoge el material y se vuelve a cargar para un nuevo lanzamiento. En total un experimento consiste en tres lanzamientos de la misma mezcla.

En total se realizaron 105 lanzamientos (efectivos). Se tomaron aproximadamente 1300 fotografías, 525 videos de alta velocidad y se usaron 35 mezclas diferentes.

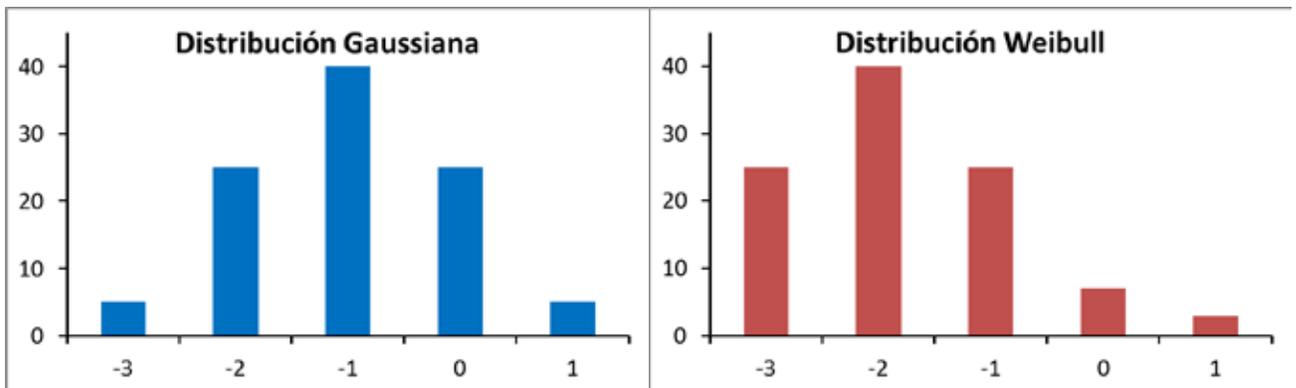


Figura III.7. Para la realización de los experimentos con mezclas polidispersas se usaron dos tipos de distribuciones granulométricas: Una Gaussiana y otra Weibull.

Para el procesamiento de los datos obtenidos que requirieron normalización (algunas gráficas en la parte de la discusión en esta tesis) se utilizó la siguiente metodología. Es importante resaltar que se realizaron dos procesos de normalización por separado, uno para los experimentos que incluyen todas mezclas monodispersas y otro para mezclas polidispersas. El proceso de normalización consistió en tomar el valor más alto registrado (Ej. el valor más alto para velocidad, el más grande para alcance, y así con todos los parámetros) y normalizar el resto de los datos dividiéndolos entre este valor.

Cada experimento consiste en repetir tres veces el mismo lanzamiento bajo las mismas condiciones iniciales (lanzamiento 1, lanzamiento 2 y lanzamiento 3). De esta manera se comprueba la repetitividad del experimento. Una vez que los datos han sido normalizados, con el fin de representar un experimento con un solo valor, se toma el valor de la mediana de los tres lanzamientos que componen un experimento. La mediana es el valor que se represente en las gráficas. Las barras de error en las gráficas representan la desviación estándar.

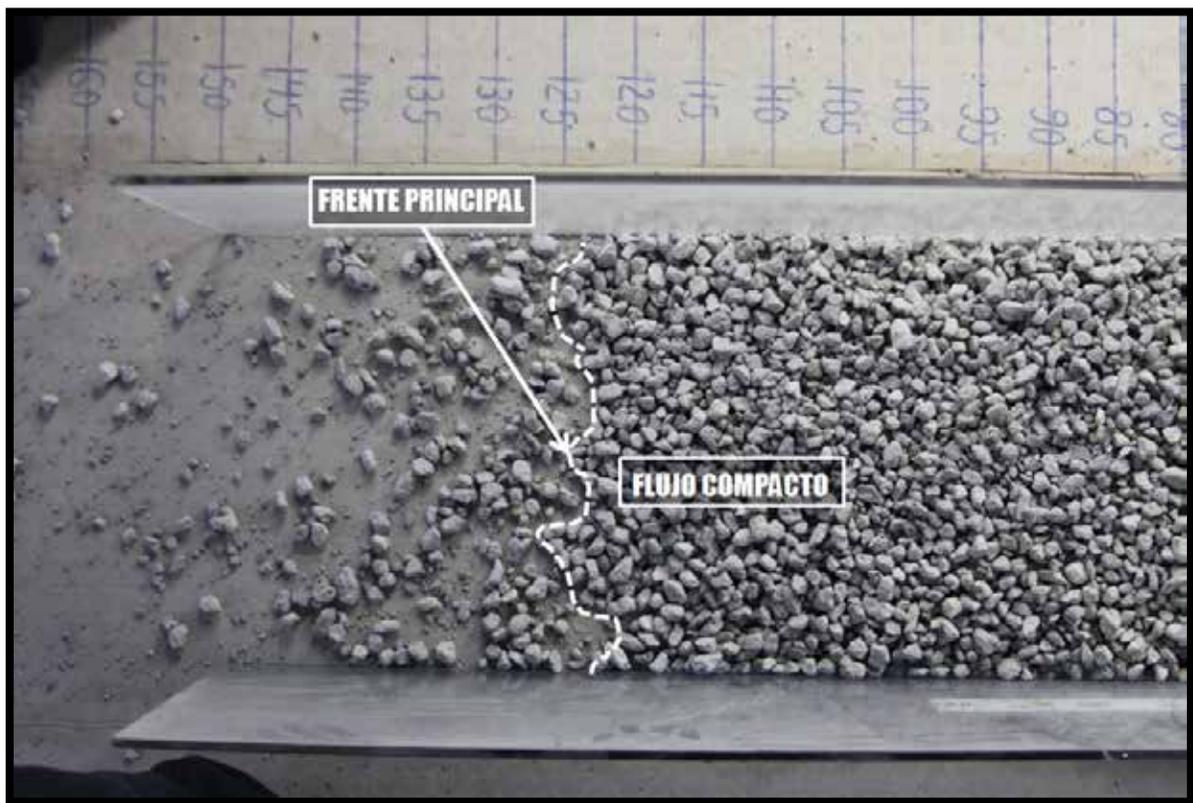


Figura III.8 Fotografía que ilustra lo que en este trabajo es definido como el frente principal (señalado con una línea punteada). Este frente fue el que se tomó en cuenta para medir el alcance de cada flujo.

Para el caso de los análisis hechos a las imágenes panorámicas de los depósitos WP50 y GP50, para cuantificar el proceso de segregación, la metodología ha sido la siguiente:

1. A las imágenes panorámicas de una sección transversal del depósito se les dividió en sectores de 20 cm.

2. Dentro de cada sector se realizó un conteo de las pómez y los líticos usando la herramienta “manual tag” de Image Pro-Plus. De tal forma que de cada sector se reporta un porcentaje de pómez.
3. El porcentaje de pómez en cada sector se graficó contra la distancia. Dicha distancia se expresa como distancia normalizada (cada distancia se divide por la distancia mayor alcanzada).

En ambos casos, los datos muestran algunas tendencias, aunque en uno de ellos (WP50) los datos mostraron mucha dispersión. Por esta razón se usó el método de regresión de cuantiles (Buchinsky, 1998; Koenker and Basset, 1978; Lee and Tanaka, 1999; Yu, et al., 2003) como se usó en Borselli et al. (2012). La regresión de cuantiles es una técnica útil en estos casos porque puede proporcionar medidas más robustas de tendencia central y dispersión estadística. Se utilizaron tres cuantiles relevantes en una distribución: $q(0.5)$ es la mediana y puede usarse para representar la función de tendencia principal de los datos, $q(0.25)$ y $q(0.75)$ representan los valores más alejados de la mediana y pueden ser utilizado para definir los límites en los cuales los valores son más confiables. En este caso específico se llevó a cabo la regresión de cuantiles usando una función exponencial como en la ecuación 1 y utilizando Microsoft® Excel Spreadsheet Office 2013 Solver (Fylstra et al., 1998, Nenov y Fylstra, 2003):

$$P(d) = be^{da}$$

Donde P es el porcentaje de pómez, d es la distancia desde el cambio de pendiente normalizada contra el máximo alcance registrado en las mezclas polidispersas (GP0), y b y a son coeficientes de regresión por cuantiles.

III.2.9 Angulo de reposo, coeficiente de restitución y coeficiente de fricción

III.2.9.1 Angulo de reposo

De todas las mezclas utilizadas se calculó el ángulo de reposo. Este se midió usando el método del cilindro (Wu y Sun, 2008) (Figura III.9). Para lo cual se usó un cilindro de PVC de 20 cm de alto y 10.5 de diámetro como contenedor del material y una tabla de 71 por 33 cm cubierta con el mismo material plástico que la canaleta. Arriba de la tabla se coloca el cilindro con el material y se realiza la prueba. Se realizaron estas pruebas utilizando los materiales rocosos previamente mencionados. Se realizaron pruebas con cada clase granulométrica por separado, en pómez y en líticos, y también en las mezclas polidispersas respetando las proporciones en volumen establecidas. Una vez preparada una mezcla se introduce en el cilindro y se coloca sobre la tabla y se retira el cilindro lentamente para que se forme una pila de material. A continuación se miden los ángulos de sus laderas. Se toman 4 mediciones y se repite el proceso por tres veces, finalmente se promedian los ángulos medidos y de esta manera se obtiene el ángulo de reposo.

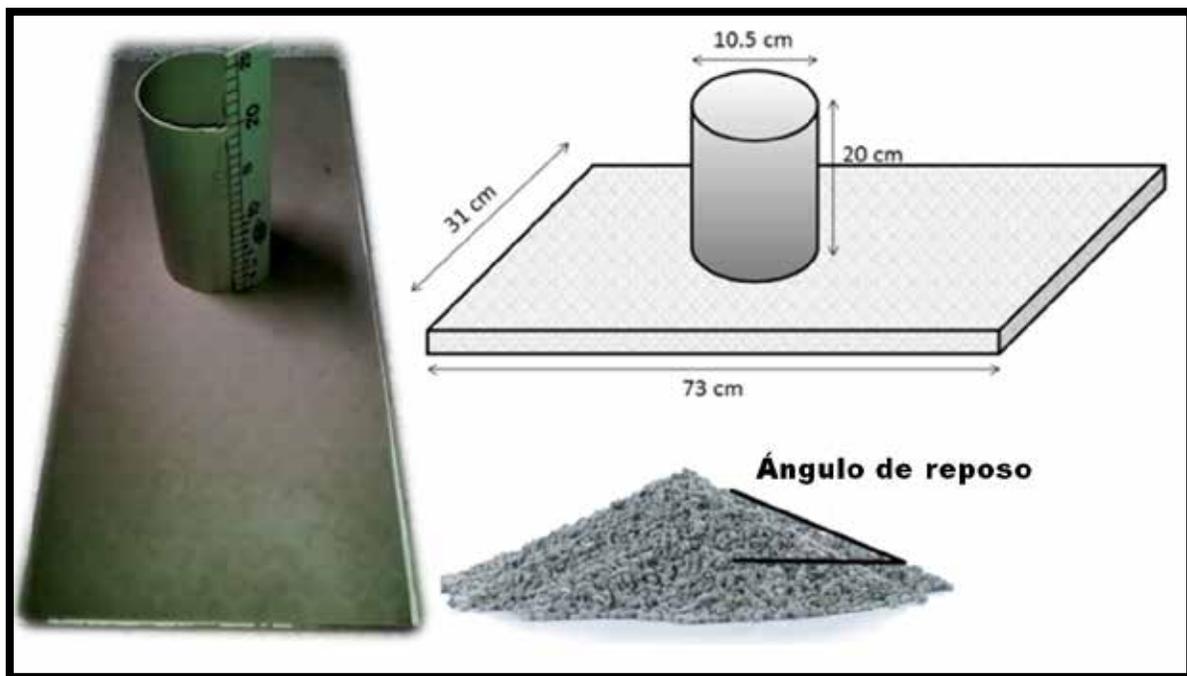


Figura III.9. Metodología utilizada para calcular el ángulo de reposo de los materiales usados en este trabajo.

III.2.9.2 Coeficiente de restitución

Para calcular el coeficiente de restitución (Goldsmith, 2001) de los materiales se usaron partículas de pómez y líticas de tamaño -3 Phi. Se les dejó caer en caída libre desde una altura de 1m. y se impactaron contra el piso de concreto el cual posee características geomecánicas intermedias entre los líticos (dacitas) y las pómez. Mediante análisis en un video de alta velocidad (400 fps) se calculó la velocidad antes del impacto con el suelo y la velocidad después del impacto y se usó la siguiente fórmula:

$$C_R = \frac{V_{2f} - V_{1f}}{V_{1i} - V_{2i}}$$

Donde CR es el coeficiente de restitución ($V_{2f} - V_{1f}$) es el cálculo de la velocidad después del impacto y ($V_{1i} - V_{2i}$) la velocidad antes del impacto. El coeficiente se calculó al promediar las mediciones de 30 repeticiones tanto para líticos como para pómez.

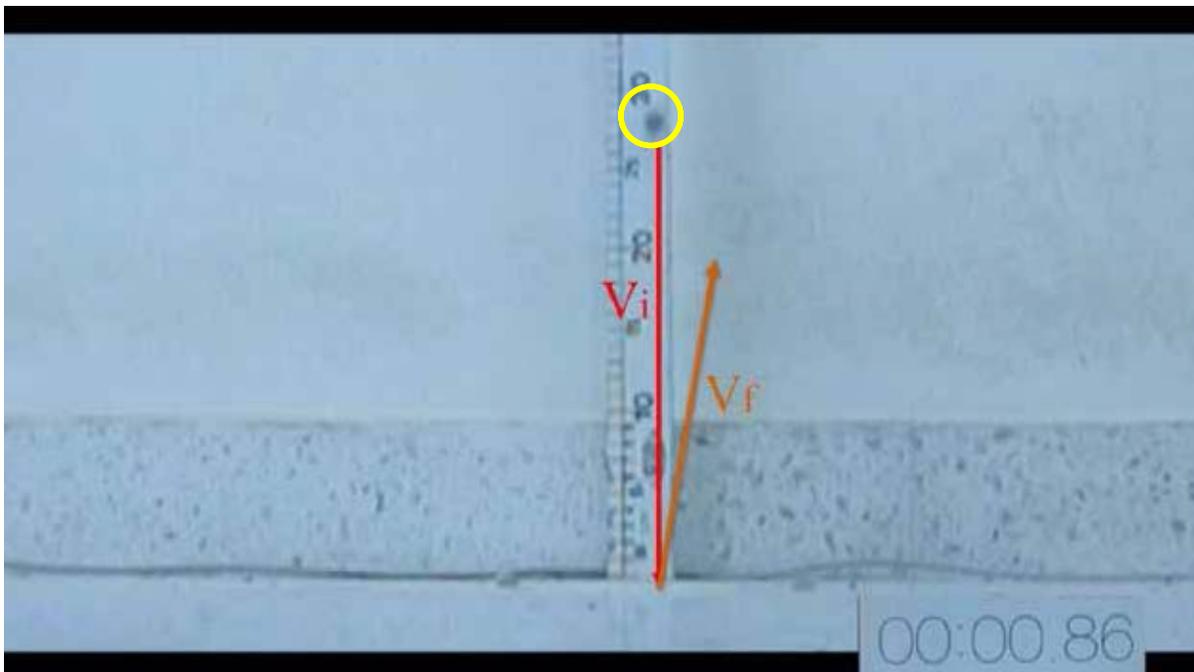


Figura III.10. Método por el cual se obtuvo el valor del coeficiente de restitución de los materiales usados en estos experimentos.

III.2.9.3 Coeficiente de fricción del piso Pirelli

El coeficiente de fricción expresa la oposición al deslizamiento que ofrecen las superficies de dos cuerpos en contacto. Para calcular el coeficiente de fricción del piso Pirelli, o la superficie que se usó como fondo en la canaleta y en la unidad de sedimentación se utilizó la tabla usada para medir el ángulo de reposo como una rampa y sobre ella se colocó una tabla de 18.5 x 10 cm y 200 gr de peso, en la que en el lado que estaba en contacto con la rampa se colocó un segmento de piso Pirelli, de tal forma que ambas superficies en contacto tuvieran este material. Se midió el ángulo a partir del cual esta tabla comenzó a moverse, posteriormente se le colocó una placa de aluminio de 12 x 10 cm y 200 gr. encima para agregar presión y se midió nuevamente dicho ángulo, posteriormente se colocó otra placa igual y finalmente una tercera. Cada experimento se repitió 20 veces, es decir 20 veces únicamente con la tabla, 20 veces con una placa de aluminio y así hasta llegar a las tres placas. Se obtuvo un promedio de los 20 lanzamientos para así tener un valor único para cada experimento. Estos valores se graficaron y el coeficiente de fricción se obtuvo usando la tangente del ángulo de la línea formada.

III.2.10 Escalamiento: análisis dimensional de los experimentos

El escalamiento de experimentos de laboratorio que estudian fenómenos naturales es muy importante. La meta de escalar un experimento no es reproducir un ejemplo natural en específico. La meta del escalamiento es tratar de entender la evolución través del tiempo de un sistema físico. La hipótesis básica es que el modelo simula la evolución del prototipo natural hecho en laboratorio de tal forma que es conveniente para el observador para así estudiar determinados parámetros del sistema físico. El arreglo del experimento es meramente una versión idealizada del fenómeno natural. Usualmente se intenta entender el rol de un limitado número de parámetros en la evolución del sistema. Estos parámetros son dependientes del propio experimento y pueden ser geométricos, cinemáticos o dinámicos (Merle, 2015).

Para escalar los experimentos realizados en este trabajo de tesis se compararon parámetros geométricos y cinemáticos de los experimentos hechos en laboratorio y CPD reales. Las CPD reales fueron flujos ocurridos en el Volcán de fuego de Colima (Saucedo et al., 2004; Saucedo et al., 2010; Sulpizio et al., 2010; Capra et al., 2016), el volcán Soufriere Hills en Montserrat (Calder et al., 1999) y el volcán Monte Santa Elena en Estados Unidos (de flujos piroclásticos ocurridos dos meses después de la gran erupción y colapso de mayo de 1980) (Hayashi y Self, 1992).

La figura III.11 muestra la comparación de parámetros geométricos de experimentos y CPD reales. Estos parámetros son las relaciones H/L (Hayashi y Self, 1992) la cual es la relación existente en la altura (H) de la cual comenzó el desplazamiento de la masa granular y el alcance máximo (L) que el flujo granular obtuvo y la relación L/Ac, la cual es la relación que existe entre el alcance máximo del flujo (L) y el ancho del cauce (Ac) a través del cual el flujo se movió. Se observa que a pesar de la diferencia de magnitudes entre los flujos experimentales y los reales existe una relación clara evidenciada con una línea de potencia, la cual posee un R^2 de 0.89 y una ecuación de la línea de $Y=1.805x^{-0.426}$.

Para escalar la cinemática de los flujos experimentales con los flujos reales se calcularon algunos parámetros los cuales fueron después comparados y graficados. Estos parámetros son: la energía cinética del flujo (natural y experimental), la energía cinética del bloque o partícula más grande (natural y experimental) y la velocidad máxima del flujo (real y experimental). Estas comparaciones pueden ser observadas en las figuras III.12-14.

La figura III.12 muestra la comparación hecha entre la energía cinética de los flujos reales y experimentales contra la energía cinética del bloque o partícula de mayor tamaño de los flujos. Se observa que existe una evidente relación evidenciada con una línea de potencia que tiene un R^2 de 0.92 y una ecuación de $y=17427x^{0.6374}$.

La figura III.13 muestra la comparación entre el parámetro H/L y la energía cinética de los flujos, una comparación geométrica y cinemática. Nuevamente se puede observar una cierta

tendencia entre los flujos experimentales y los reales. Con una línea de tendencia (potencial) se obtuvo un R^2 de 0.86 y una ecuación de $y=0.724x^{-0.045}$.

La figura III.14 muestra la relación de la energía cinética de los flujos con la velocidad máxima de los flujos. Se observa que los flujos reales (mayor escala) tienen una buena relación con los flujos experimentales, mostrando tendencias similares. Mediante una línea de tendencia de potencia se obtuvo un R^2 de 0.97 y una ecuación de $y=0.0049x^{6.5165}$.

La relación entre la energía cinética de los experimentos y los flujos reales muestra que, aunque a menor escala, los flujos experimentales reflejan comportamientos similares a los observados en volcanes como el volcán de Colima, Soufriere Hills o el monte Santa Elena. En otras palabras, es posible encontrar una buena relación que indica que es viable reproducir fenómenos como segregación por densidad, segregación por tamaño o velocidad aun a pequeña escala. Y esto permite inferir y dar un buen acercamiento para tratar de entender estos fenómenos a través de la observación en laboratorio.

III.2.11 Limitantes

El orden de magnitud de las fuerzas que actúan en los flujos reales y los de laboratorio es muy diferente pero aun así, se pudieron encontrar buenas relaciones que hacen pensar que, independientemente de la escala, es posible encontrar fenómenos similares en un flujo real y uno experimental. Sin embargo, en esta serie de experimentos no fueron tomados en cuenta algunos factores importantes que influyen el comportamiento de una corriente piroclástica de densidad. Uno de ellos es la temperatura. Los flujos piroclásticos son capaces de alcanzar temperaturas de hasta 600°C o más, mientras que en los flujos hechos en esta serie de experimentos todos fueron hechos con los materiales a temperatura ambiente (~24-28°C). La temperatura no fue tomada en cuenta al momento de hacer los experimentos debido a que el aparato experimental no fue diseñado para soportar altas temperaturas, los materiales que fueron usados para construir los diferentes módulos de la canaleta sufrirán daños considerables si se usara material previamente calentado. Otra limitante que podría tener esta serie de experimentos es que

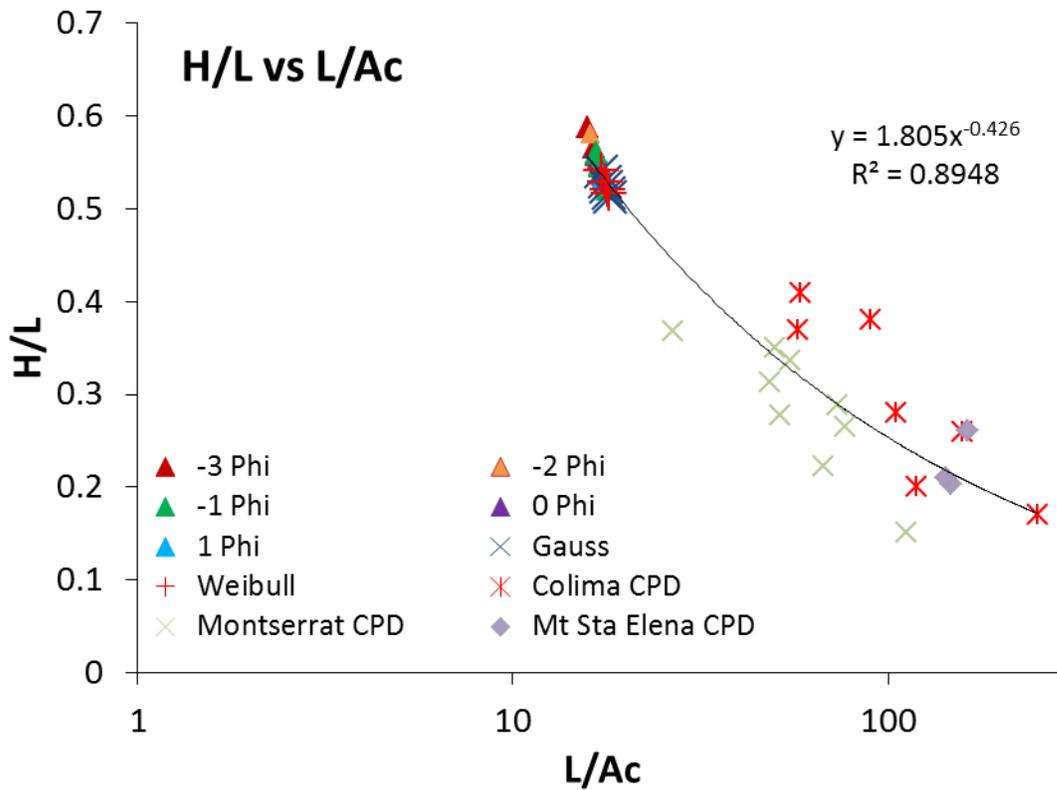


Figura III.11. Comparación de los factores de escala geométricos factor H/L (Hayashi y Self, 1992) contra el factor L/Ac (Ac=Ancho del cauce), ambos parámetros son números adimensionales. Se comparan estos factores en los flujos creados en este trabajo de tesis contra flujos reales en el volcán de Colima (Saucedo et al., 2004; Saucedo et al., 2010; Sulpizio et al., 2010; Capra et al., 2016), el volcán Soufriere Hills en Montserrat (Calder et al., 1999) y el volcán Monte Santa Elena en Estados Unidos (de flujos piroclásticos ocurridos dos meses después de la gran erupción y colapso de mayo de 1980) (Hayashi y Self, 1992). Se usó una línea de tendencia potencial, los valores del R^2 y la ecuación se muestran en la figura.

tampoco se tomó en cuenta la presencia de curvas, variaciones en el tamaño del cauce u obstáculos en el recorrido del flujo, factores que suelen ser muy comunes en las barrancas en volcanes reales.

En orden de observar el efecto que la pómez podría tener en este tipo de flujos granulares, se decidió usar una determinada (y limitada) gama de tamaños de grano (desde 1 Phi hasta -3 Phi). Esto fue con la finalidad de evitar el efecto que materiales inferiores a 0.5 mm pueden tener en el flujo. Esta medida ofrece la posibilidad de delimitar el número de

variables a ser observadas, sin embargo, no permite observar el comportamiento de un flujo con toda la gama de tamaños que puede tener una CPD real.

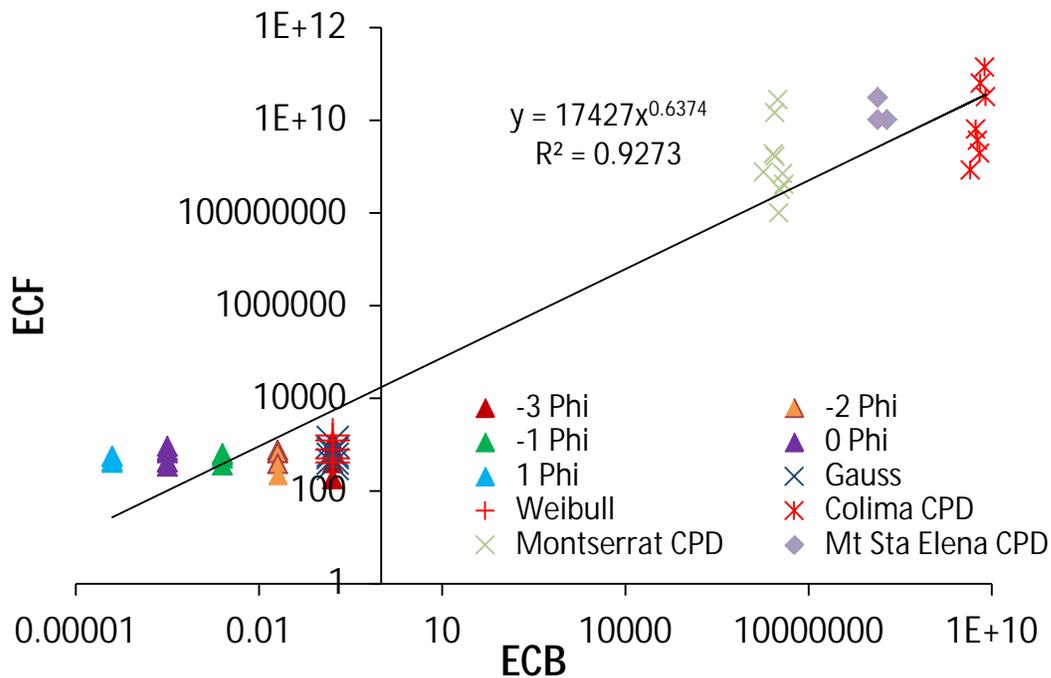


Figura III.12. Comparación de la energía cinética de los flujos (ECF) contra la energía cinética del bloque (ECB) o clasto más grande de cada flujo (En Joules). Se comparan estos factores en los flujos creados en este trabajo de tesis contra flujos reales en el volcán de Colima (Saucedo et al., 2004; Saucedo et al., 2010; Sulpizio et al., 2010; Capra et al., 2016), el volcán Soufriere Hills en Montserrat (Calder et al., 1999) y el volcán Monte Santa Elena en Estados Unidos (de flujos piroclásticos ocurridos dos meses después de la gran erupción y colapso de mayo de 1980) (Hayashi y Self, 1992). Se usó una línea de tendencia potencial, los valores del R^2 y la ecuación se muestran en la figura.

La granulometría específica y limitada podría ser una de las limitantes más importantes en este trabajo, pero es gracias a esta carencia que fue posible analizar el efecto de la pómez de manera aislada e individual.

La diferencia en la magnitud de las fuerzas, la geometría de las barrancas, la temperatura o la granulometría pueden limitar o condicionar un poco los resultados obtenidos en estos experimentos, sin embargo, pueden dar un buen indicio del comportamiento real de las corrientes piroclásticas de densidad y el efecto que la pómez puede tener en estas, lo cual es el objetivo principal de este trabajo de tesis.

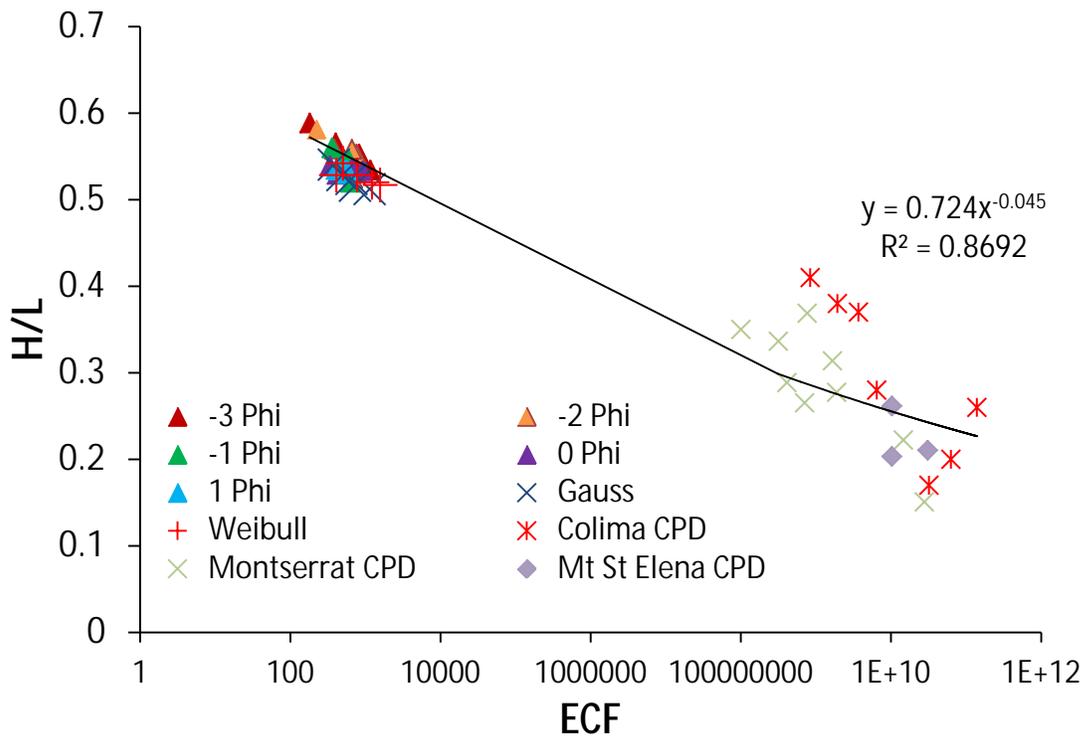


Figura III.13. Comparación del factor de escala H/L (Hayashi y Self, 1992) contra la energía cinética de los flujos. Se comparan estos factores en los flujos creados en este trabajo de tesis contra flujos reales en el volcán de Colima (Saucedo et al., 2004; Saucedo et al., 2010; Sulpizio et al., 2010; Capra et al., 2016), el volcán Soufriere Hills en Montserrat (Calder et al., 1999) y el volcán Monte Santa Elena en Estados Unidos (de flujos piroclásticos ocurridos dos meses después de la gran erupción y colapso de mayo de 1980) (Hayashi y Self, 1992). Se usó una línea de tendencia potencial, los valores del R^2 y la ecuación se muestran en la figura.

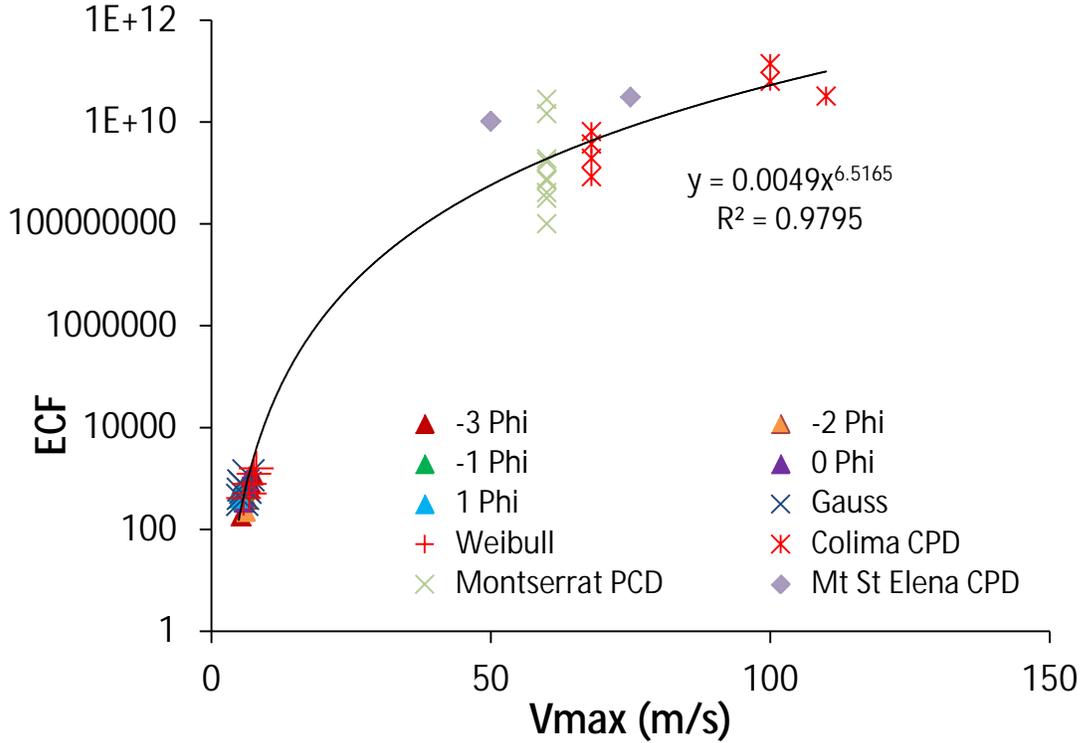


Figura III.14. Comparación de la energía cinética de los flujos contra la velocidad máxima de los flujos. Se comparan estos factores en los flujos creados en este trabajo de tesis contra flujos reales en el volcán Colima (Saucedo et al., 2004; Saucedo et al., 2010; Sulpizio et al., 2010; Capra et al., 2016), el volcán Soufriere Hills en Montserrat (Calder et al., 1999) y el volcán Monte Santa Elena en Estados Unidos (de flujos piroclásticos ocurridos dos meses después de la gran erupción y colapso de mayo de 1980) (Hayashi y Self, 1992). Se usó una línea de tendencia potencial, los valores del R^2 y la ecuación se muestran en la figura.

Tabla III.4. Parámetros usados para la elaboración de las gráficas de escalamiento.

	H/L*	L/AC**	Velocidad max flujo (m/s)	ECF (J)***	ECB (J)****	Referencias
-3 Phi P0	0.53	17.47	7.46	1173.39	0.16	
-3 Phi P25	0.55	16.89	6.92	833.53	0.16	
-3 Phi P50	0.55	17.04	6.83	641.04	0.16	
-3 Phi P75	0.57	16.50	6.32	403.31	0.16	
-3 Phi P100	0.59	15.86	5.31	181.93	0.16	
-2 Phi P0	0.53	17.78	5.68	678.88	0.02	
-2 Phi P25	0.55	16.89	6.25	764.12	0.02	
-2 Phi P50	0.56	16.72	6.29	663.73	0.02	
-2 Phi P75	0.56	16.71	6.35	388.15	0.02	
-2 Phi P100	0.58	16.06	6.16	221.93	0.02	
-1 Phi P0	0.52	17.94	5.62	637.23	2.53E-03	
-1 Phi P25	0.55	17.06	5.62	594.73	2.53E-03	
-1 Phi P50	0.55	17.11	5.89	595.71	2.53E-03	
-1 Phi P75	0.55	17.11	5.64	511.32	2.53E-03	
-1 Phi P100	0.56	16.67	5.78	361.88	2.53E-03	
0 Phi P0	0.53	17.50	6.43	922.28	3.16E-04	
0 Phi P25	0.53	17.56	6.14	746.52	3.16E-04	
0 Phi P50	0.54	17.39	6.04	666.54	3.16E-04	
0 Phi P75	0.53	17.63	5.75	422.72	3.16E-04	
0 Phi P100	0.54	17.31	5.94	338.63	3.16E-04	
1 Phi P0	0.53	17.47	4.89	568.10	3.95E-05	
1 Phi P25	0.53	17.49	4.99	546.74	3.95E-05	
1 Phi P50	0.53	17.61	5.23	552.98	3.95E-05	
1 Phi P75	0.53	17.47	5.16	443.51	3.95E-05	
1 Phi P100	0.54	17.44	5.07	410.61	3.95E-05	
Mezcla Gauss P0	0.51	18.22	6.65	1144.68	0.16	
Mezcla Gauss P10	0.52	18.09	5.74	728.57	0.16	
Mezcla Gauss P50	0.52	17.81	6.11	654.58	0.16	
Mezcla Gauss P90	0.53	17.67	5.66	497.11	0.16	
Mezcla Gauss P100	0.54	17.27	5.53	380.13	0.16	
Mezcla Weibull P0	0.52	18.06	8.04	1578.28	0.16	
Mezcla Weibull P10	0.52	17.94	7.61	1230.39	0.16	
Mezcla Weibull P50	0.53	17.67	6.79	779.05	0.16	
Mezcla Weibull P90	0.53	17.67	5.76	411.68	0.16	
Mezcla Weibull P100	0.54	17.22	6.80	504.56	0.16	
PDC colima 2015 Montegrande	0.20	118.78	100.00	6.30E+10	6.52E+09	Capra et al., 2016
PDC Colima 2005 Montegrande	0.37	57.69	68.00	3.69E+09	5.86E+09	Sulpizio et al., 2010
PDC Colima 2005 La Arena	0.38	90.00	68.00	1.94E+09	6.37E+09	Sulpizio et al., 2010
PDC Colima 2004 La Lumbre	0.28	105.00	68.00	6.47E+09	5.47E+09	Sulpizio et al., 2010
PDC Colima 1913 Fase 1	0.41	58.33	68.00	8.42E+08	4.45E+09	Saucedo et al., 2010
PDC Colima 1913 Fase 2	0.26	158.33	100.00	1.40E+11	7.67E+09	Saucedo et al., 2010
PDC Colima 1913 Fase 3	0.17	250.00	110.00	3.22E+10	7.91E+09	Saucedo et al., 2010
BAF Montserrat 1996	0.37	26.67	60.00	7.66E+08	1.83E+06	Calder et al., 1999
BAF Montserrat 1996	0.31	48.33	60.00	1.67E+09	2.82E+06	Calder et al., 1999
BAF Montserrat 1997	0.28	51.67	60.00	1.89E+09	2.67E+06	Calder et al., 1999
BAF Montserrat 1997	0.15	111.67	60.00	2.79E+10	3.13E+06	Calder et al., 1999
BAF Montserrat 1997	0.22	67.50	60.00	1.46E+10	2.79E+06	Calder et al., 1999
PRF Montserrat 1997	0.27	76.67	60.00	7.11E+08	3.79E+06	Calder et al., 1999
PRF Montserrat 1997	0.29	73.33	60.00	4.13E+08	3.94E+06	Calder et al., 1999
PRF Montserrat 1997	0.35	50.00	60.00	1.01E+08	3.26E+06	Calder et al., 1999
PRF Montserrat 1997	0.34	55.00	60.00	3.18E+08	3.44E+06	Calder et al., 1999
Monte Santa Elena 1980	0.26	162.50	50.00	1.03E+10	1.92E+08	Hayashi ySelf, 1992
Monte Santa Elena 1980	0.20	147.50	50.00	1.03E+10	1.35E+08	Hayashi ySelf, 1992
Monte Santa Elena 1980	0.21	142.50	75.00	3.09E+10	1.35E+08	Hayashi ySelf, 1992

*H/L : Height (altura) / Length (longitud). Parametro adimensional.

** L/AC: Longitud / Ancho del cauce. Parametro adimensional.

***ECF : Energía cinética del flujo

****ECB : Energía cinética del bloque mas grande

RESULTADOS

- RESULTADOS EN MEZCLAS
MONODISPERSAS
 - RESULTADOS EN MEZCLAS
POLIDISPERSAS
-

IV.1 Mezclas monodispersas

Se realizaron 75 lanzamientos con mezclas monodispersas los cuales incluyeron las clases granulométricas -3, -2, -1, 0 y 1 Phi. Con diferentes proporciones de líticos y pómez. Durante estos experimentos fueron usados todos los sensores de la canaleta, de tal forma que se obtuvo información acerca de la velocidad del frente, cantidad de pico y distribución de la masa, alcance y evidencias de segregación por densidad en el depósito final.

En este capítulo se presentan en forma de tablas y gráficas, los resultados obtenidos con esta serie de experimentos. Los datos se encuentran organizados en las siguientes secciones:

1. Cinemática del flujo (Figuras IV.1 – 5).
Velocidad en cada láser
2. Quiebre de pendiente (Figuras IV.6 – 16).
Velocidad vs. Alcance
Velocidad vs. Masa
3. Masa vs. Alcance (Figuras IV.17 – 21).
4. Presión del flujo en el fondo (Figuras IV.22 – 26)

IV.1.1 Cinemática del flujo

En esta sección se describe la cinemática de los flujos en los diferentes módulos de la canaleta. La grafica reporta las velocidades medidas utilizando el sistema de barreras láser colocadas tanto en la canaleta como en el módulo de sedimentación. En cada gráfica los puntos representan mezclas mono dispersas (un solo tamaño de grano) pero con diferentes porcentajes de líticos y pómez. Los porcentajes se refieren al volumen de pómez en relación al volumen total de la mezcla (ej. P25 la mezcla tiene el 25% de pómez y 75% de líticos). Se muestra la velocidad del frente del flujo en función de la distancia.

En esta sección se puede observar que las granulometrías más gruesas presentan velocidades ligeramente mayores que las finas, de hecho, la mayor velocidad registrada en todos los experimentos la obtuvo la mezcla -3 Phi P0 (7.4 m/s) en el láser 10. De la misma manera se puede apreciar que las clases granulométricas gruesas (-3, -2 y -1 Phi) muestran una mayor variabilidad en los resultados, es decir, hay una mayor diferencia en el comportamiento (velocidad) entre las mezclas con diferente proporción de pómez-lílicos. Esta variabilidad es más evidente a partir del láser 5 y en la clase granulométrica -2 Phi. Por otro lado las clases granulométricas finas (0 y 1 Phi) muestran un comportamiento más homogéneo y las diferencias de velocidad entre las mezclas son menores.

Se observan oscilaciones o fluctuaciones de la velocidad de los flujos a lo largo de su recorrido por la canaleta. Estos aumentos y disminuciones de velocidad son evidenciados con flechas de color verde (aumento) y rojo (disminución). El comportamiento general de todas las clases granulométricas (con sus correspondientes proporciones pómez-lílicos) es mostrar un aumento en la velocidad hasta el láser 3 (2.1 m.), en donde las mezclas alcanzan una velocidad (en promedio) de 3.8 m/s, siendo la mezcla -1 Phi P0 la que registró la mayor velocidad en este punto (4.3 m/s), posteriormente se observa una disminución en el láser 4 (2.5 m.), las mezclas registran en promedio velocidades del orden de 3.3 m/s (0 Phi P0 registró la mayor velocidad 3.6 m/s). En el láser 5 (3.1 m.) se registra otro aumento en la velocidad, las mezclas muestran una velocidad promedio (general) de 4.8 m/s, -2 Phi P0 registró la mayor velocidad en este punto (5.6 m/s). Inmediatamente después se observa

una disminución de la velocidad la cual se mantiene hasta el láser 8 (4.3 m.) para la clase granulométrica -3 Phi y hasta el láser 7 (3.9 m.) para el resto de las clases. La clase -3 Phi mostró un valor promedio de 4 m/s en el láser 8, mientras que el resto de las clases mostró una velocidad promedio de 4 m/s en el láser 7.

Finalmente hacia el láser 9, el último del módulo de la canaleta, todas las clases granulométricas muestran un aumento de velocidad (velocidad promedio de 5.3 m/s), siendo la clase -3 Phi la que registró la mayor velocidad de todas (7.2 m/s). Después del cambio de pendiente se observa que algunas clases granulométricas muestran aumento de velocidad inmediatamente después (láser 10), estas variaciones son analizadas en la siguiente sección. Posteriormente se observa un descenso general de la velocidad en todas las mezclas hasta llegar al laser 14 (6.2 m.) con una velocidad promedio de 1.3 m/s. Cabe señalar que todas las mezclas tuvieron alcances que sobrepasaban al laser 14, por esa razón no se tiene una velocidad final de 0 m/s, porque a la altura del láser 14 el flujo aún conservaba algo de velocidad.

Clase -3 Phi

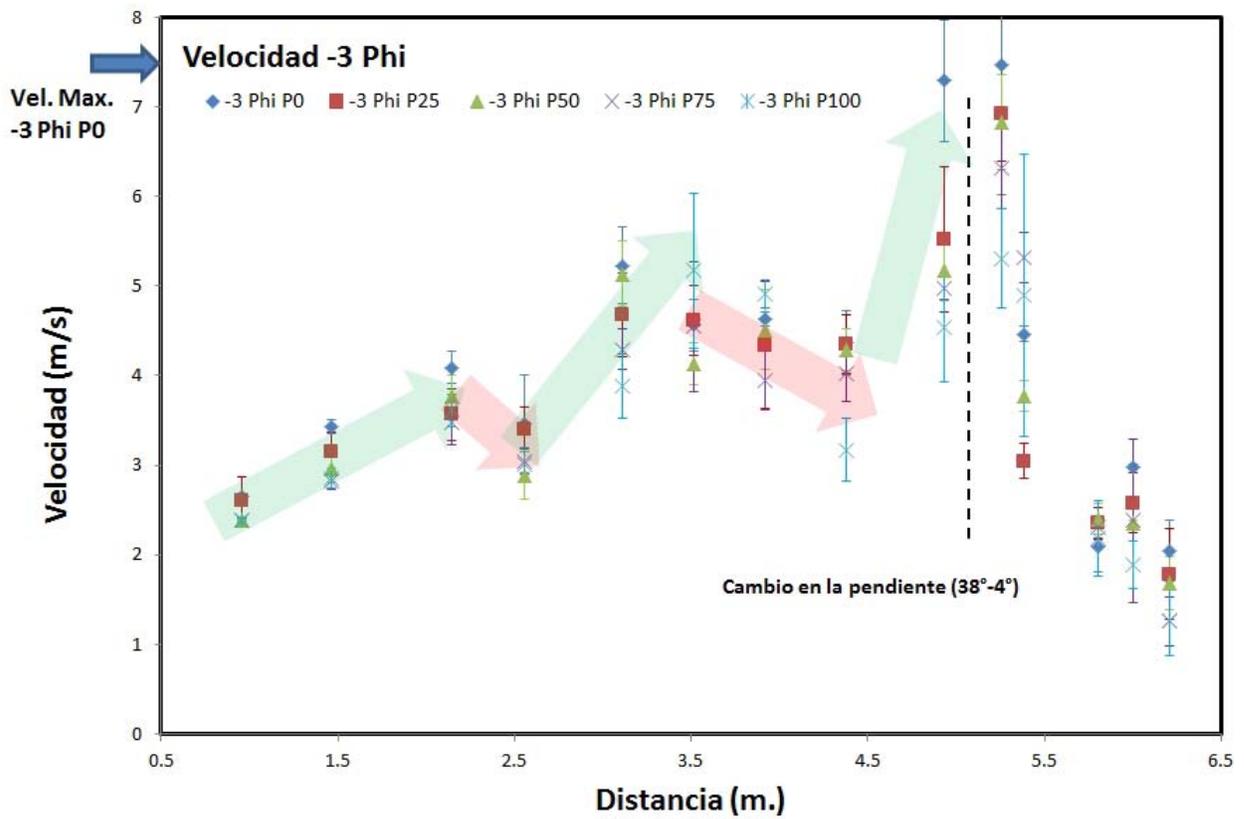


Figura IV.1. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la clase granulométrica -3 Phi. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

Clase -2 Phi

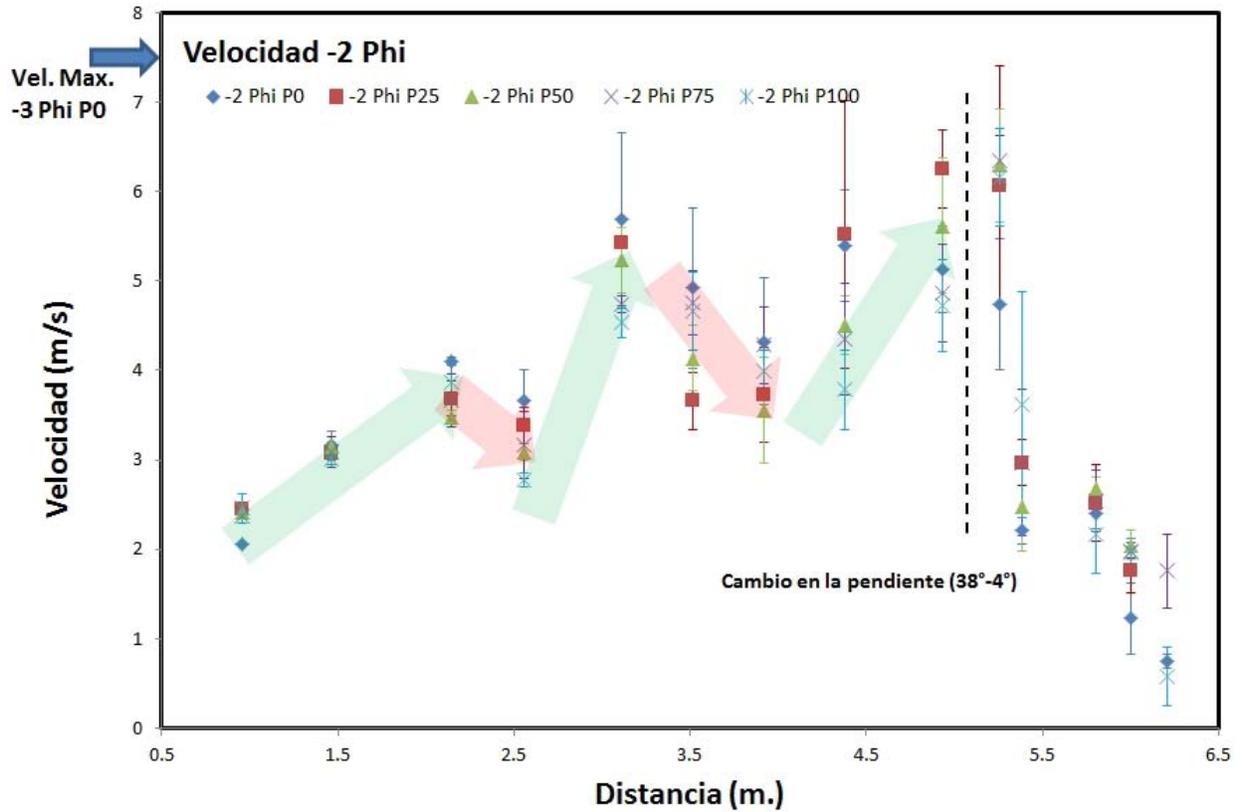


Figura IV.2. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la clase granulométrica -2 Phi. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

Clase -1 Phi

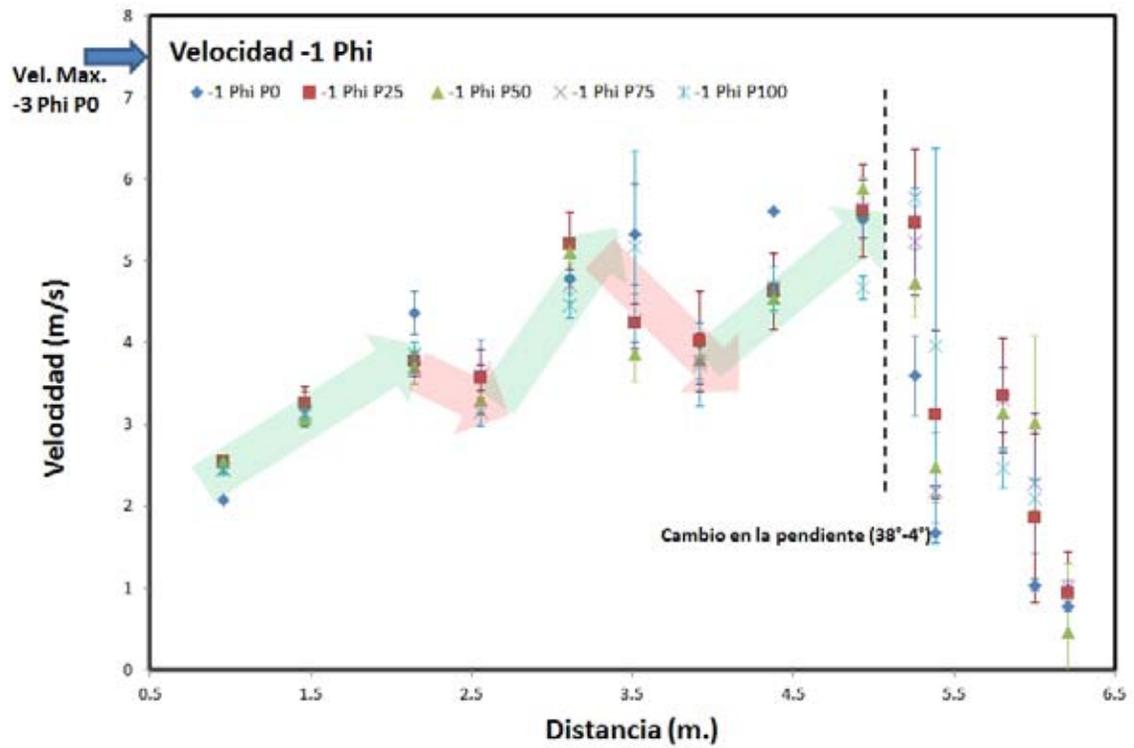


Figura IV.3. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la clase granulométrica -1 Phi. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

Clase 0 Phi

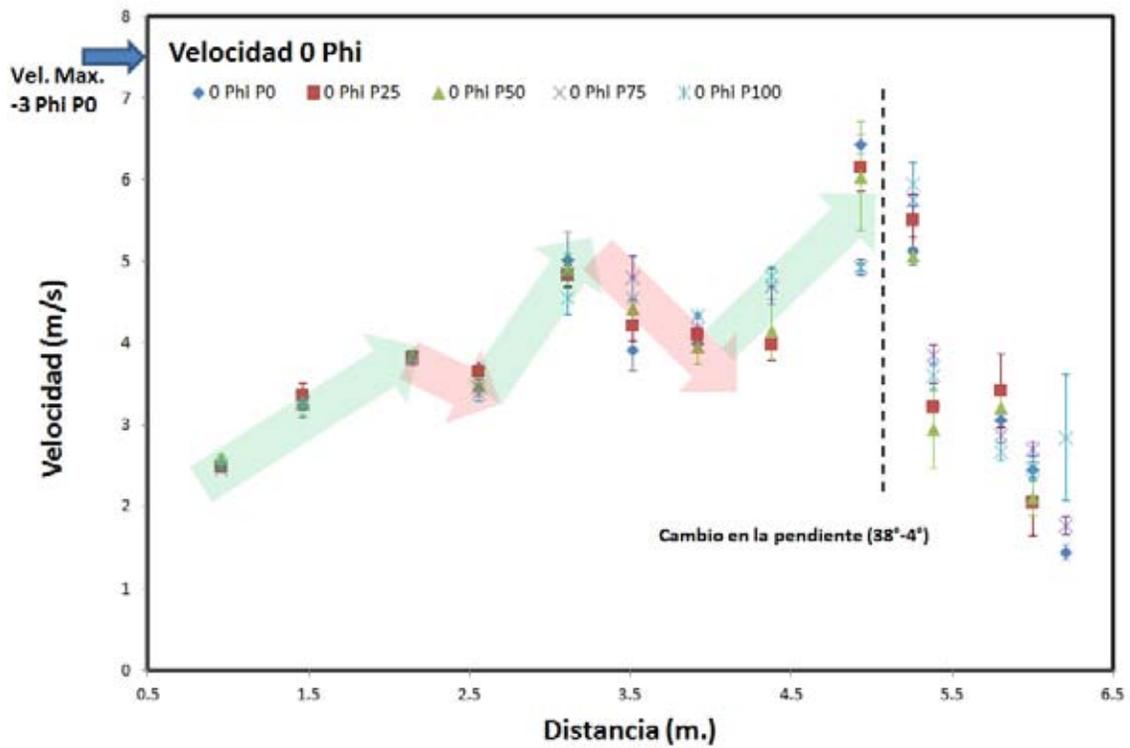


Figura IV.4. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la clase granulométrica 0 Phi. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

Clase 1 Phi

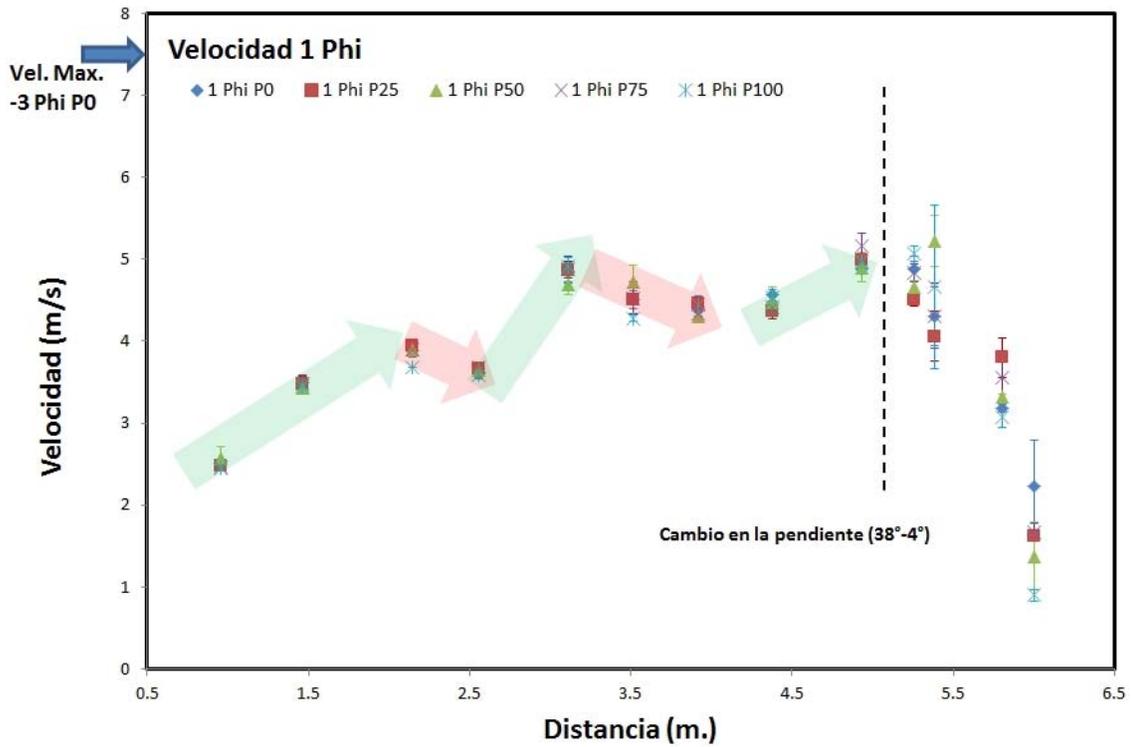


Figura IV.5. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la clase granulométrica 1 Phi. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

IV.1.2 Quiebre de pendiente

En esta sección de resultados se reportan graficas de velocidad antes (láser 9) y después del quiebre (láser 10) que tienen dos enfoques: comparar la velocidad de los flujos contra sus alcances y comparar la velocidad de los flujos contra su masa. Las gráficas permiten observar los cambios que ocurren en el flujo al cruzar el cambio de pendiente (cambios en su velocidad) y el efecto que determina el contenido de pómez en esa transición. Cada página se refiere a una clase granulométrica los diferentes puntos en las gráficas corresponden a diferentes cantidades de pómez en las mezclas. Primeramente se muestran las comparaciones de velocidad contra alcance, en estas se puede apreciar que solo para la clase granulométrica -3 Phi hay una relación que muestra que a mayor velocidad en el láser 10 se observa un mayor alcance. Sin embargo, para el resto de las clases no existe una relación clara entre la velocidad y el alcance. Lo que sí es posible observar, y es más notorio en las clases gruesas es que a mayor contenido de líticos mayor alcance. En las segundas gráficas (Velocidad contra masa) se observa que en la clase -3 Phi a mayor masa, mayor velocidad. Esta tendencia no se observa en el resto de las clases. Dentro de estas gráficas también es posible apreciar el delta de ganancia o disminución de velocidad de una mezcla al momento del cambio de pendiente. Estas diferencias de velocidad pueden estudiarse en función del tamaño de grano y la cantidad de pómez en la mezcla. La figura V.16 muestra la comparación de estos deltas para cada clase granulométrica en función de su contenido de pómez. Se observa que las clases -3 y -2 Phi muestra un patrón de comportamiento muy parecido, mostrando un aumento de velocidad conforme se aumenta el contenido de pómez, sin embargo se necesitó de 25% de pómez en la mezcla para que se pudiera obtener una ganancia de velocidad en la clase -2 Phi. -1 Phi y 0 Phi muestran también comportamientos similares, al agregar 25% de pómez a la mezcla se observa que la pérdida de velocidad es menor, sin embargo, al agregar 50% la disminución de la velocidad aumenta sin ser tan baja como las proporciones P0. Al ir aumentando más la cantidad de pómez se observa que la disminución de velocidad es cada vez menos hasta que se registran ganancias de velocidad. 1 Phi se mostró casi sin cambios, prácticamente conservando su velocidad, o mostrando pérdidas menores, solo la proporción P100 registró una ligera ganancia de velocidad.

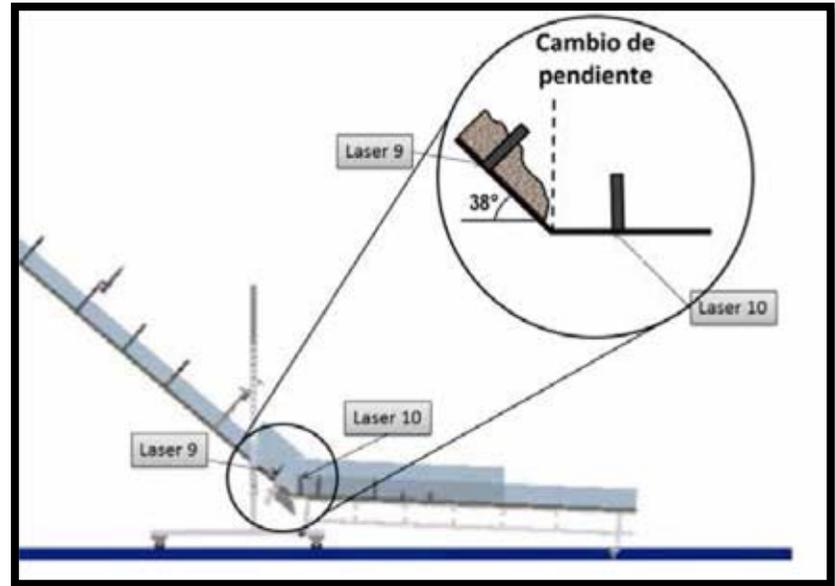
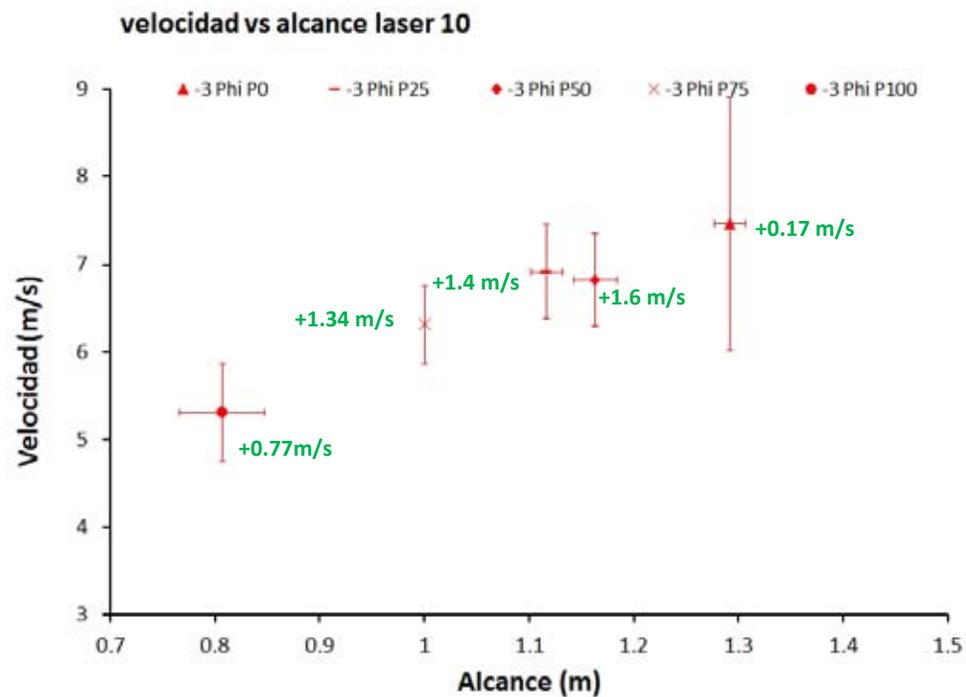
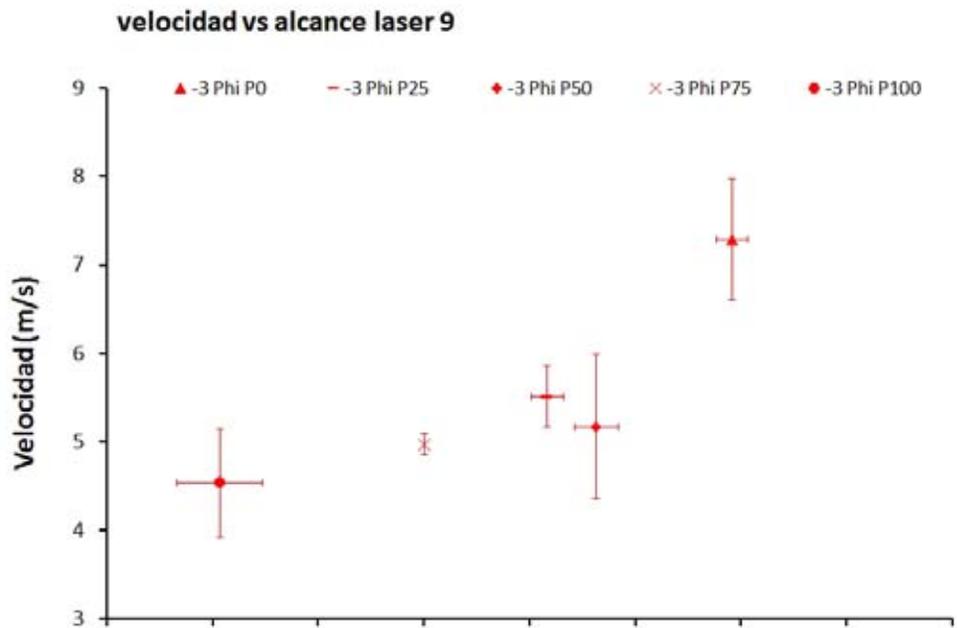


Figura IV.6. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la clase granulométrica -3 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

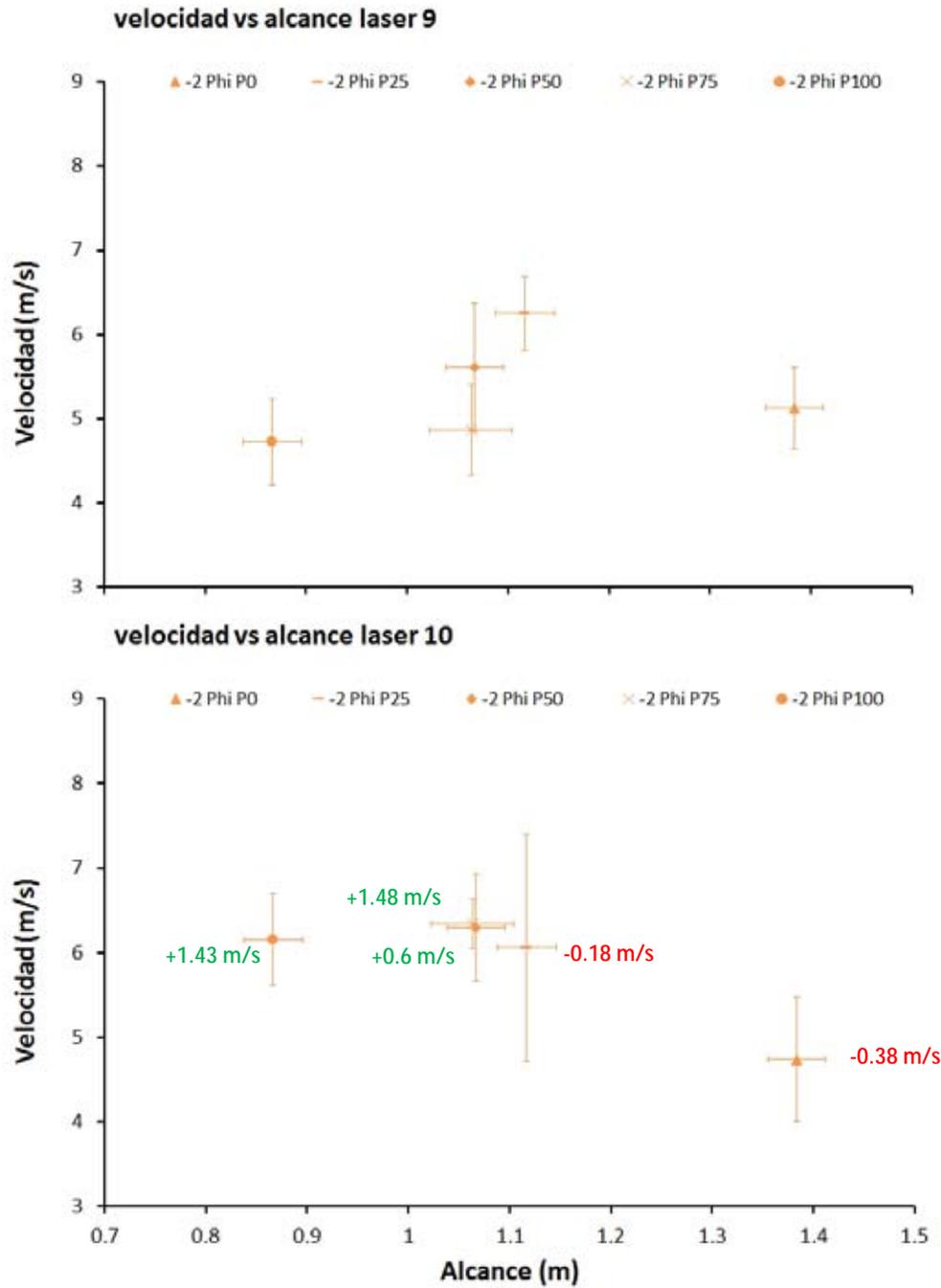


Figura IV.7. Gráficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la clase granulométrica -2 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

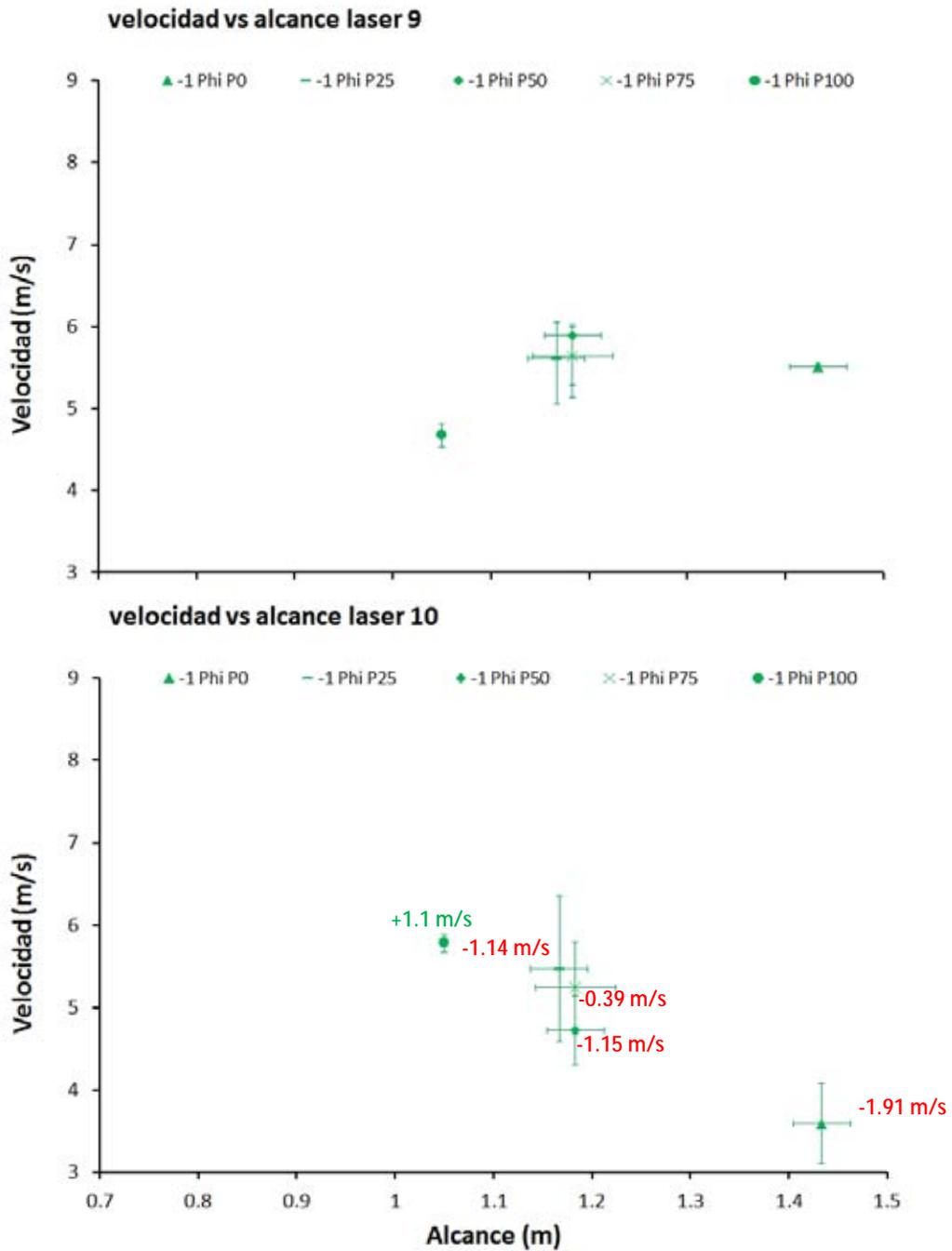


Figura IV.8. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la clase granulométrica -1 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

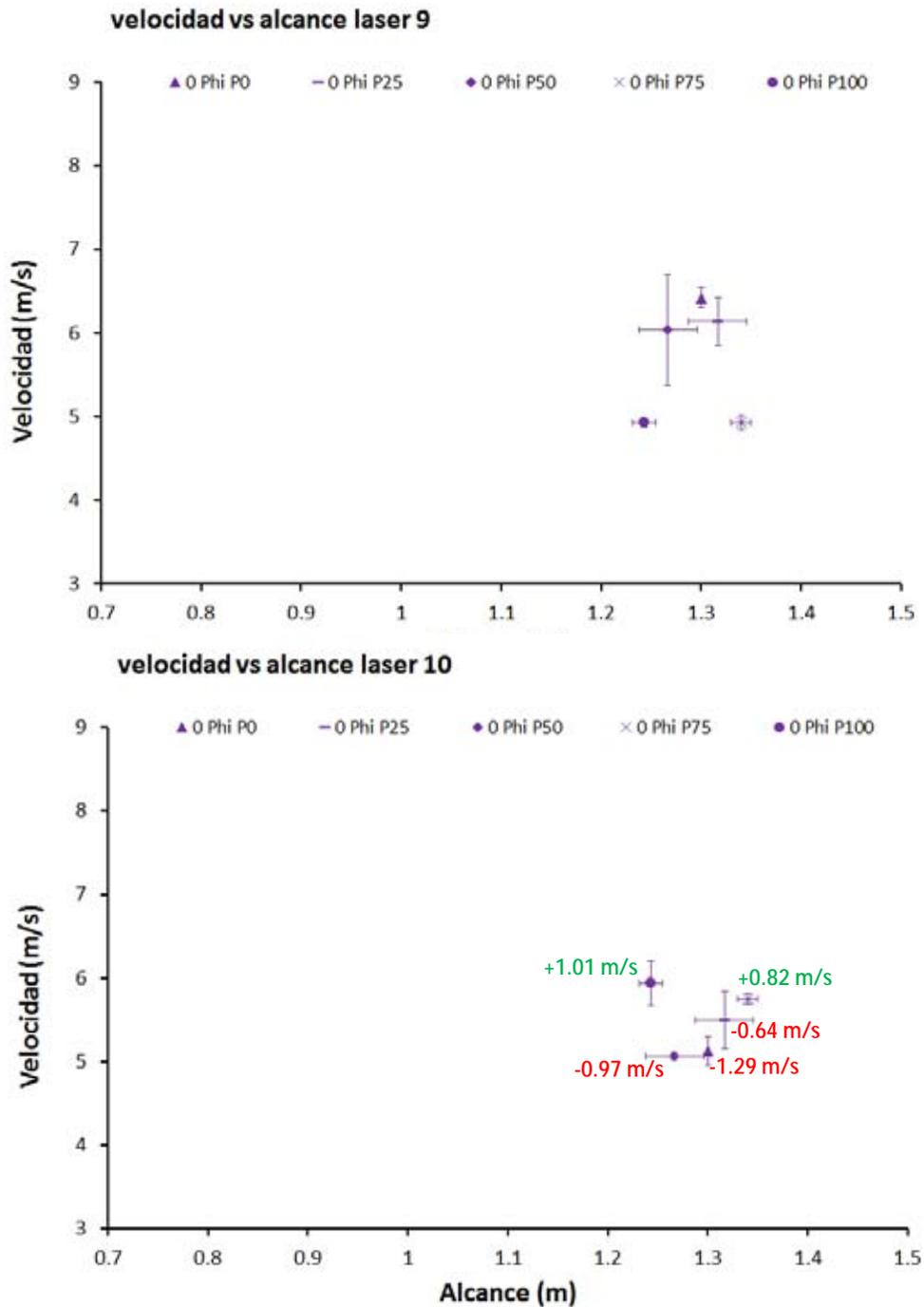


Figura IV.9. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la clase granulométrica 0 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

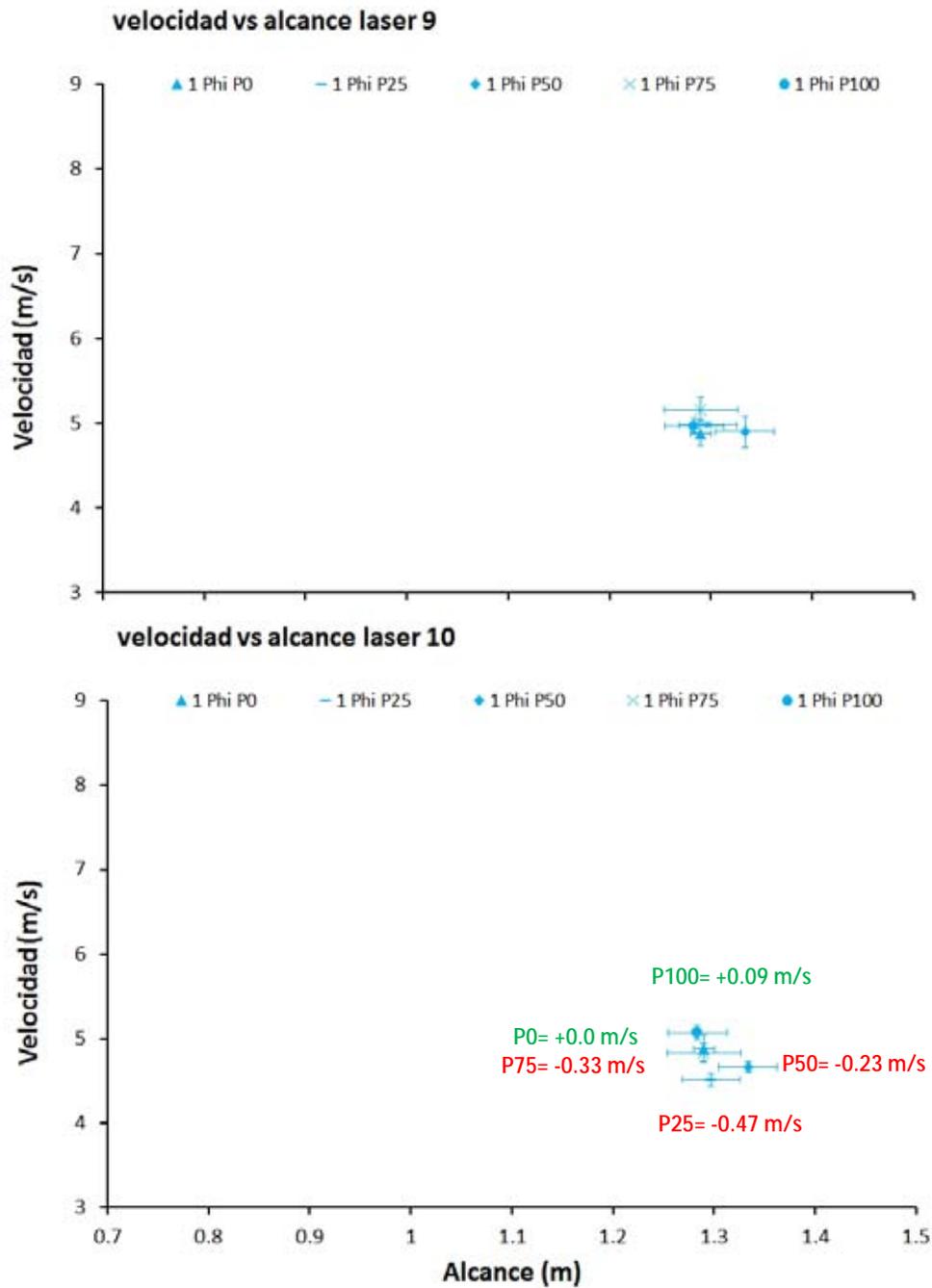


Figura IV.10. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la clase granulométrica 1 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

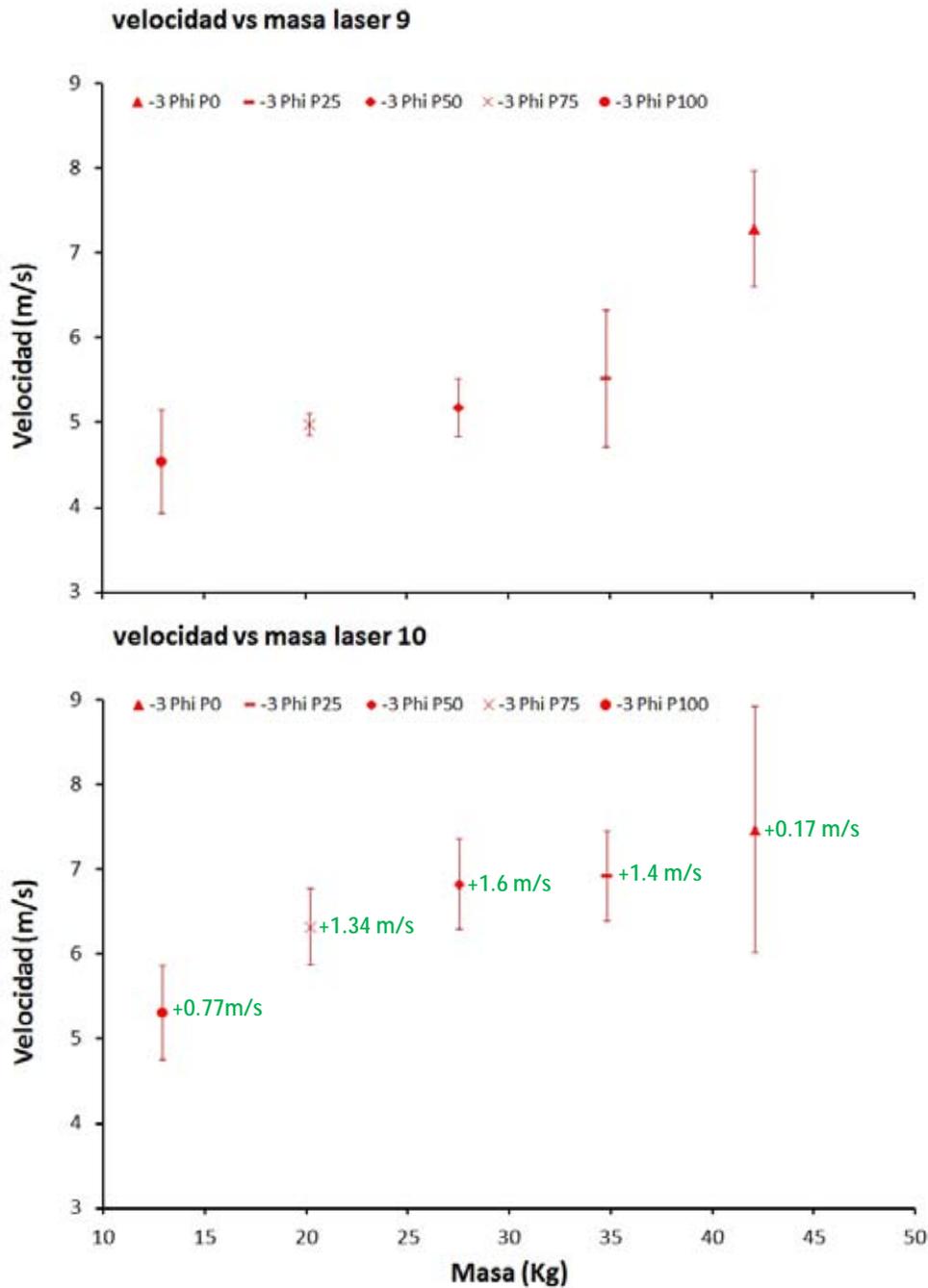


Figura IV.11. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la clase granulométrica -3 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

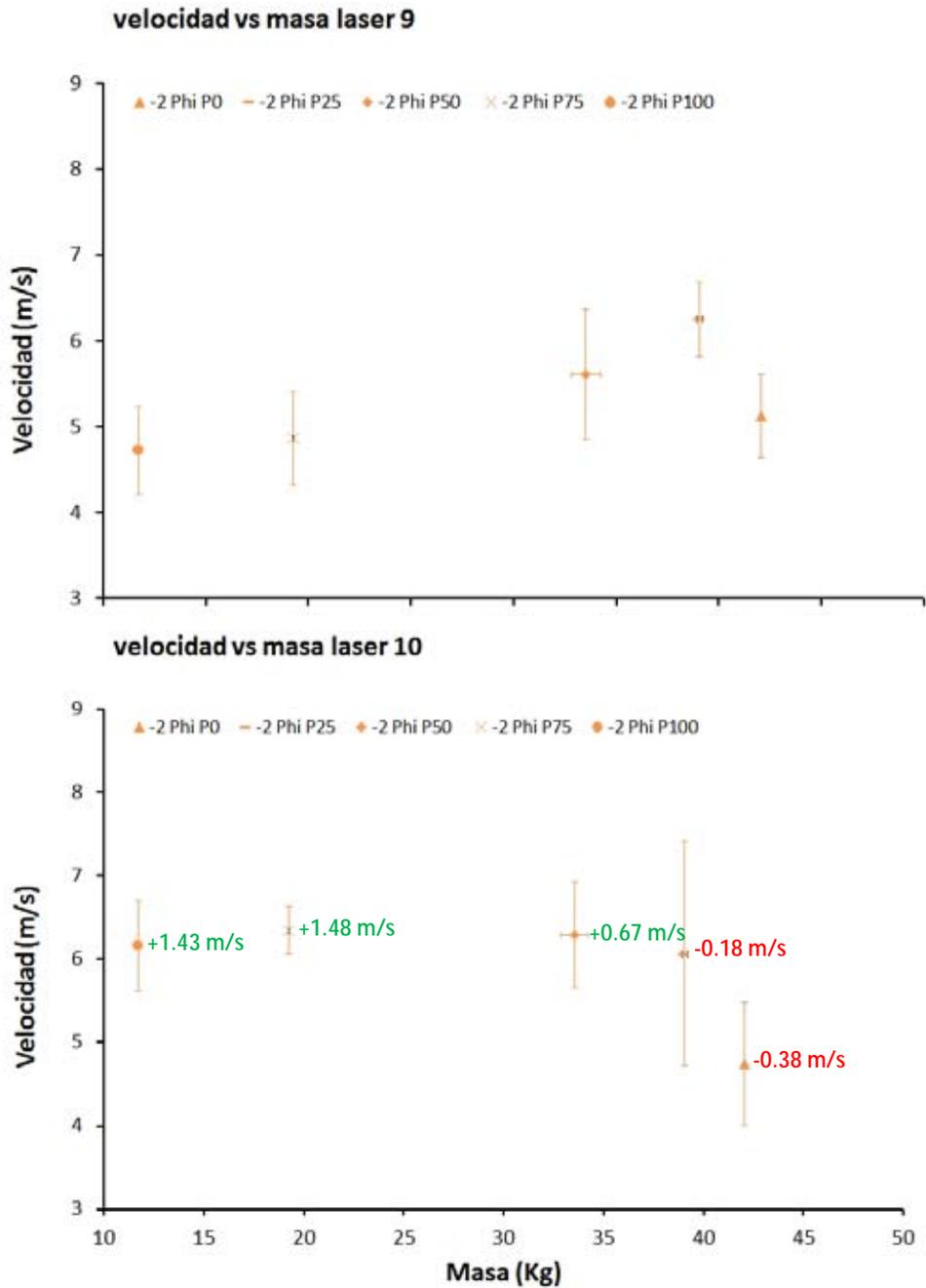


Figura IV.12. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la clase granulométrica -2 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

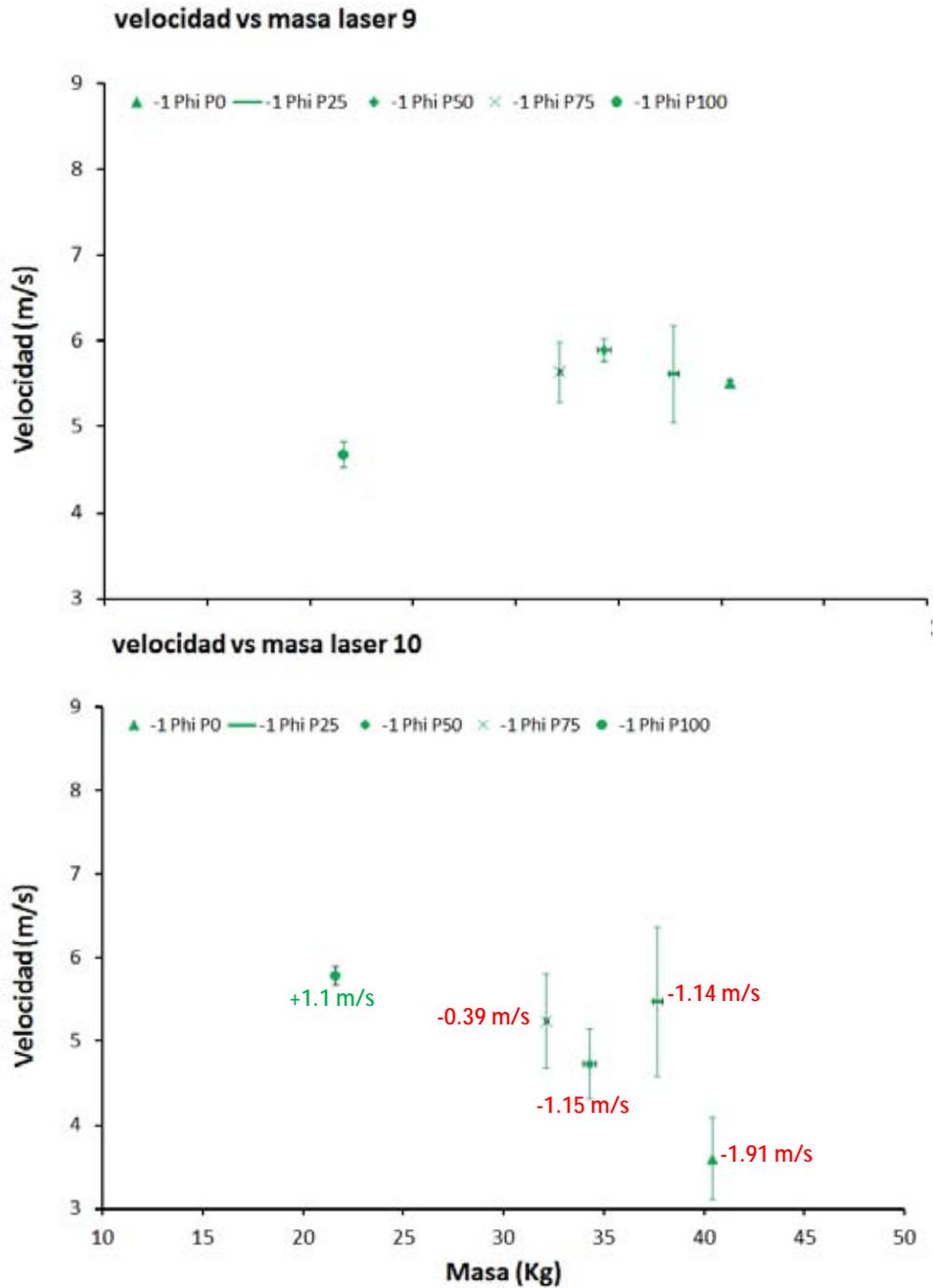


Figura IV.13. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la clase granulométrica -1 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

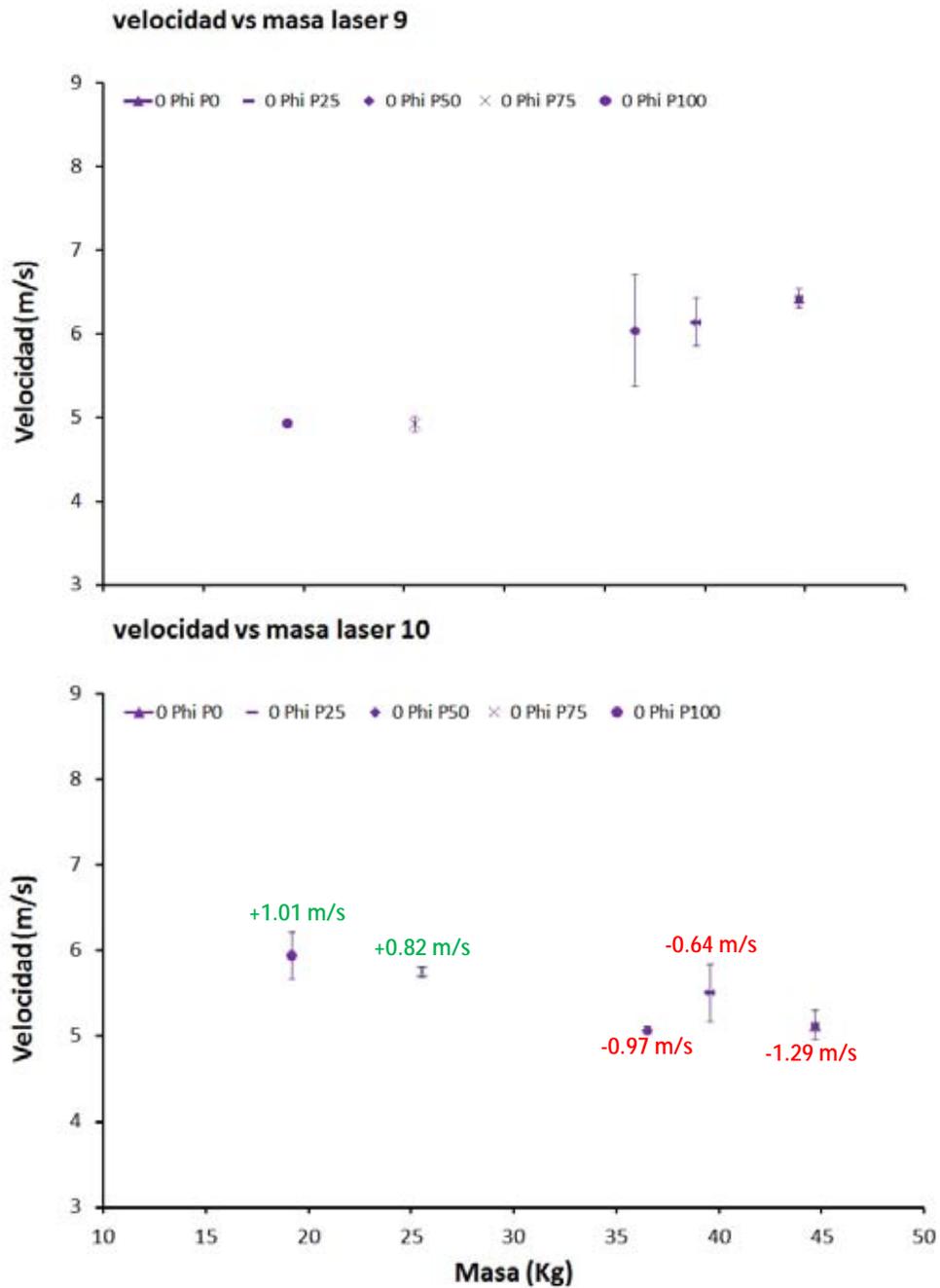


Figura IV.14. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la clase granulométrica 0 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

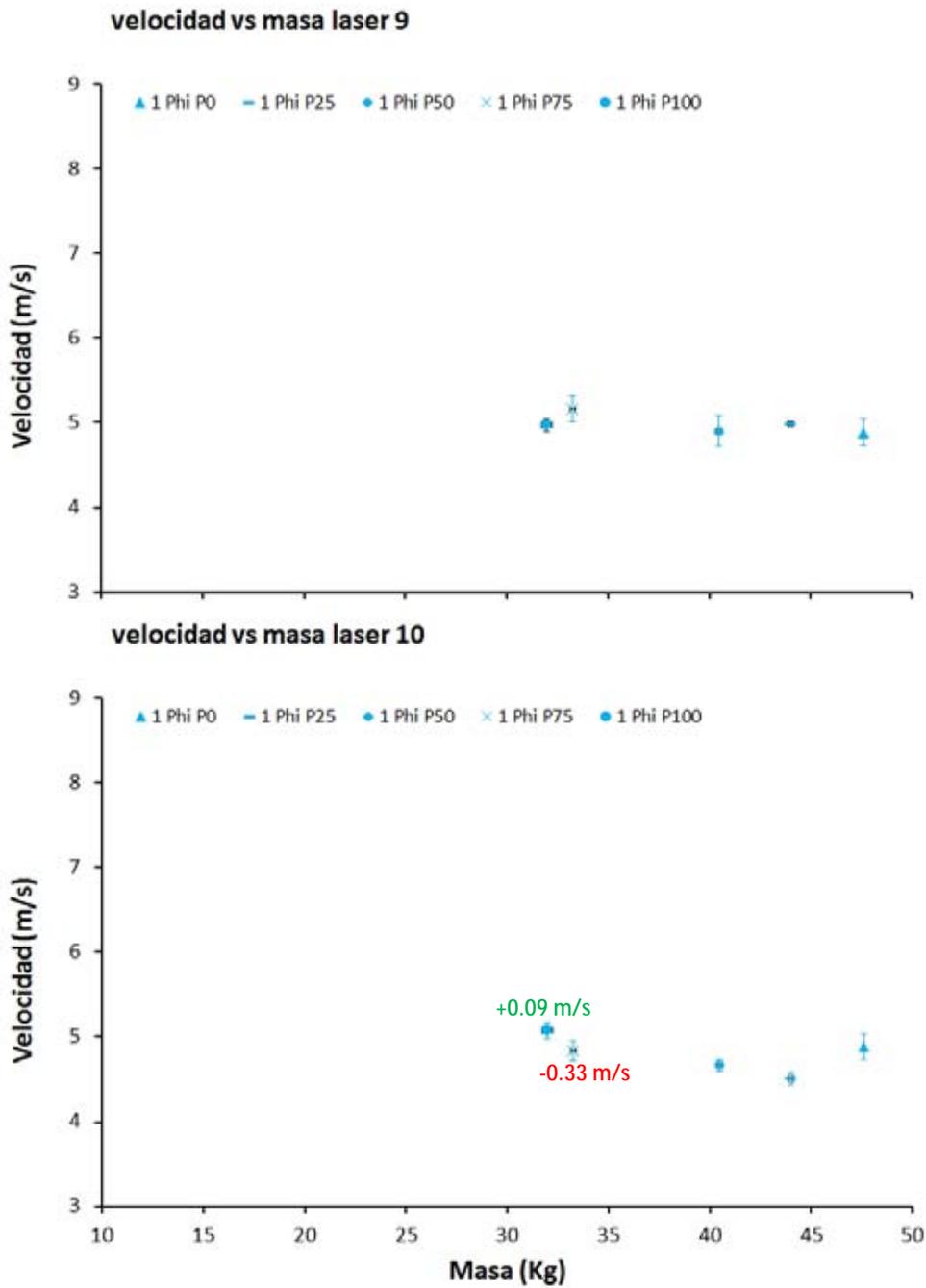


Figura IV.15. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la clase granulométrica -3 Phi. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

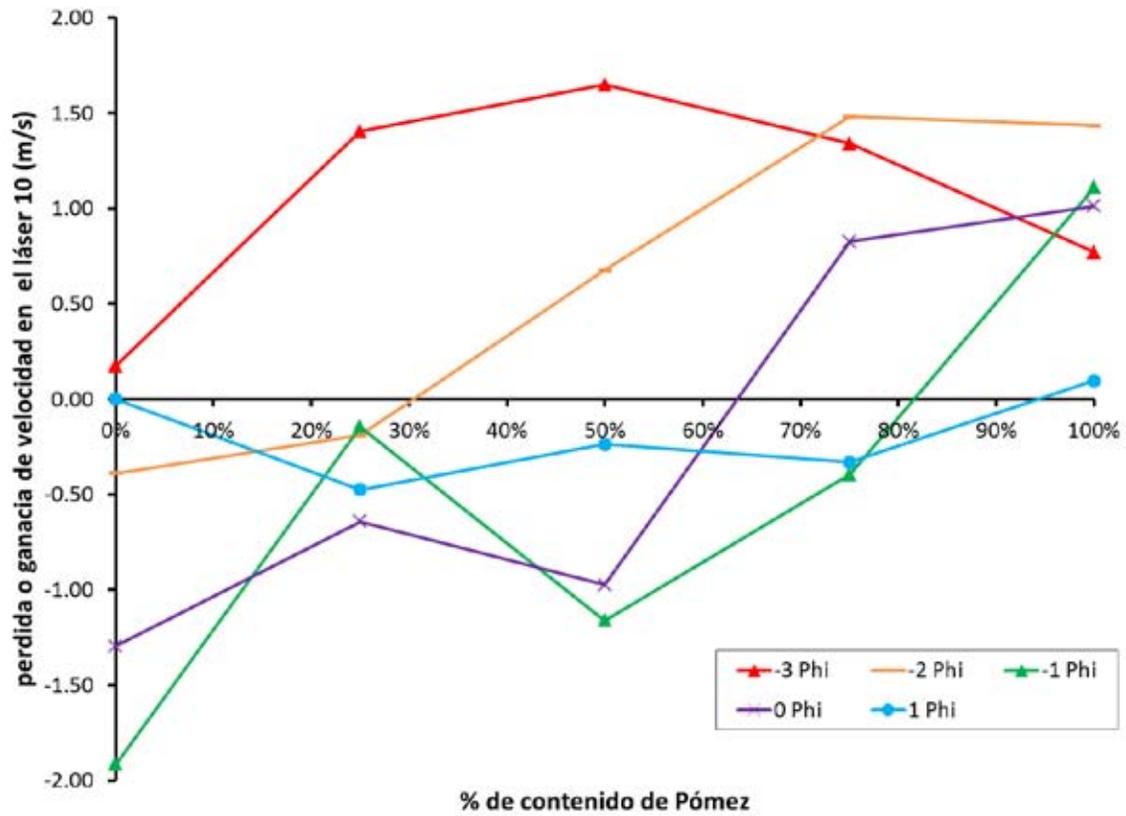


Figura IV.16. Comparación de todas las clases granulométricas que muestra el aumento o disminución de la velocidad registrada en el láser 10 en función del contenido de pómez en la mezcla.

IV.1.3 Masa vs Alcance

Dentro de esta sección de resultados se reporta una comparación entre la masa de cada uno de los flujos, y sus alcances correspondientes. Cada gráfica se refiere a una clase granulométrica y los puntos en la gráfica se diferencian de los demás por el porcentaje de pómez presente en la mezcla.

En general se observa que la tendencia en las clases granulométricas gruesas es que a mayor masa mayor alcance, en otras palabras, a mayor contenido de líticos en la mezcla se observa un mayor alcance. En las mezclas de grano fino, esta tendencia no es muy clara y se observa que a pesar de existir un aumento en la masa, no es evidente un aumento en el alcance, de hecho no se observan variaciones drásticas en el alcance de las mezclas 0 y 1 Phi. Se podría decir que a menor tamaño el alcance tiende a ser el mismo sin importar la cantidad de pómez presente en la mezcla.

Una revisión más detallada de las mezclas de grano grueso revela que si bien la tendencia general es a menor cantidad de pómez mayor alcance, en lo particular se observa que las mezclas que contienen combinaciones de pómez y líticos pueden no seguir de manera fiel esa tendencia y mostrar una ligera disminución en el alcance (-3 Phi P25) o mostrar prácticamente el mismo alcance (-2 y -1 Phi).

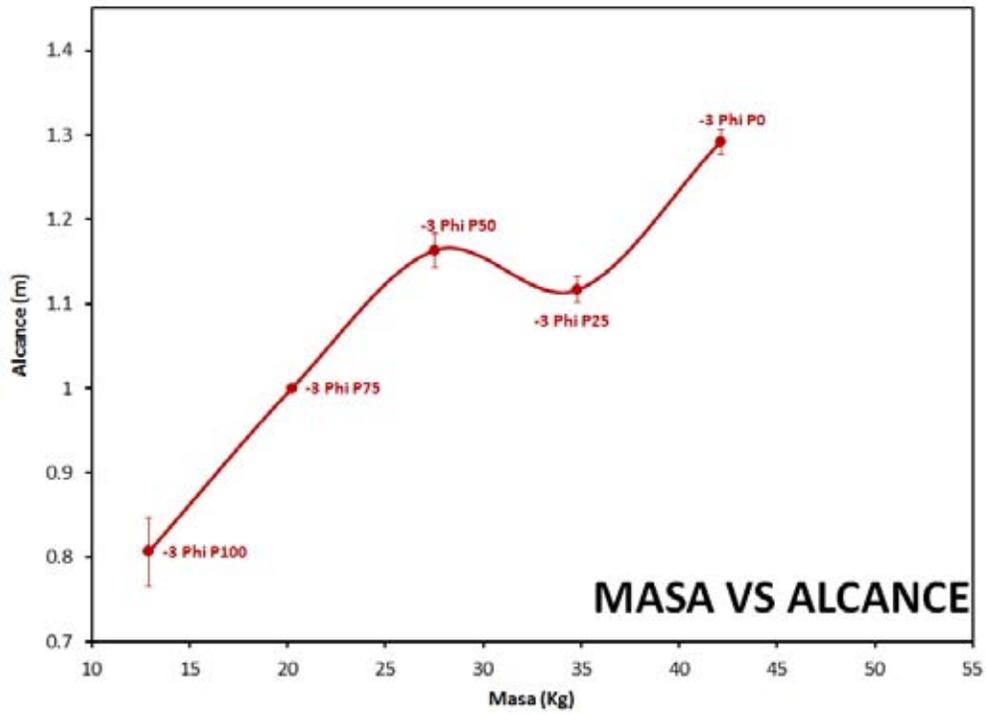


Figura IV.17. Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la clase granulométrica -3 Phi.

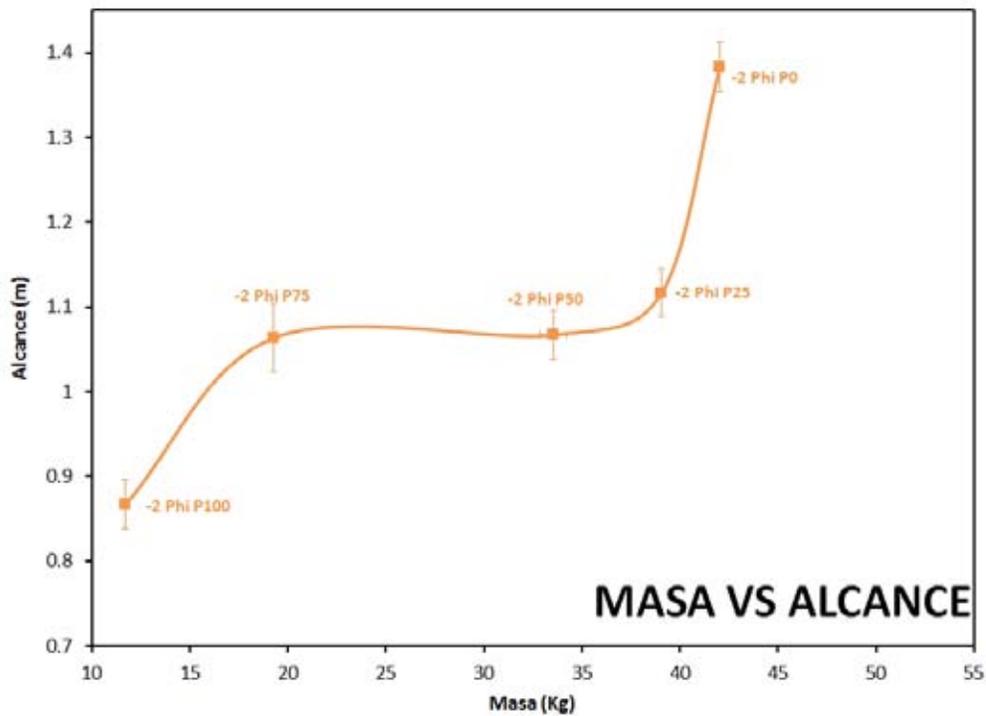


Figura IV.18. Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la clase granulométrica -2 Phi.

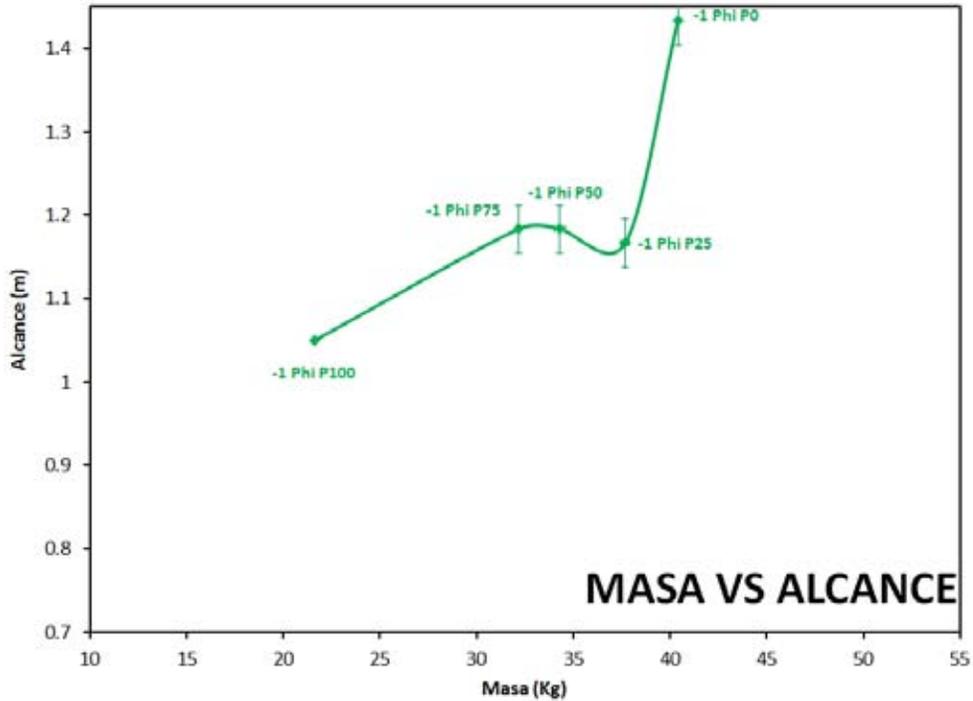


Figura IV.19. Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la clase granulométrica -1 Phi.

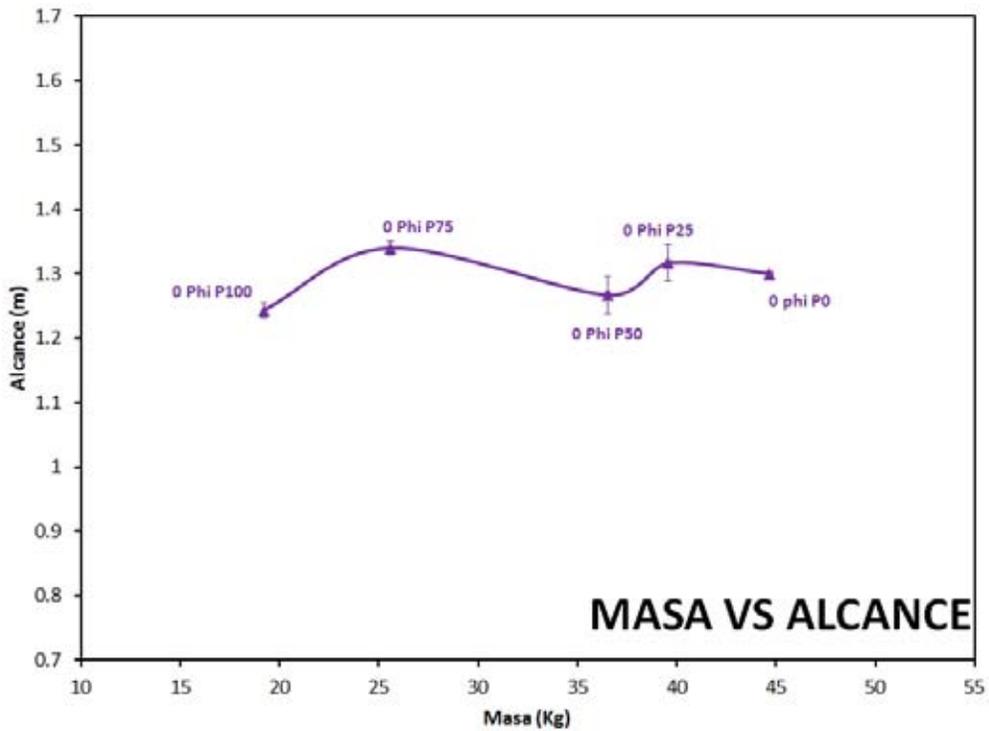


Figura IV.20. Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la clase granulométrica 0 Phi.

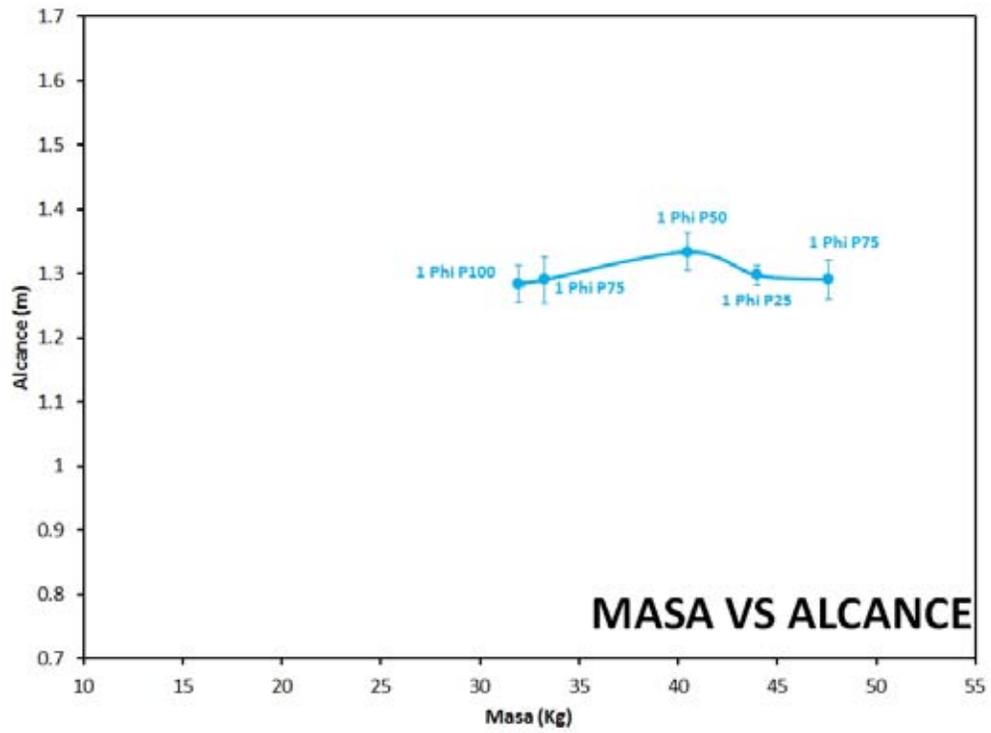


Figura IV.21. Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la clase granulométrica 1 Phi.

IV.1.4 Presión del flujo en el fondo

En este conjunto de graficas se muestra la distribución del punto de mayor concentración de partículas en el flujo, en otras palabras, el punto de mayor presión del flujo y como éste va evolucionando durante su recorrido en la canaleta, esto mediante las mediciones de las celdas de carga instaladas a lo largo de este aparato experimental. En la mayoría de los casos el pico se encuentra entre el frente y el inicio del cuerpo del flujo granular. Estos datos aportan información relacionada con engrosamiento y adelgazamiento del flujo.

Primeramente se observa que al igual que los datos anteriormente mostrados conforme se disminuye el tamaño de grano existe una mayor homogeneidad de los resultados, y la variabilidad debida a los cambios producidos por el diferente contenido de pómez se reduce.

Se observa una tendencia general de todas las mezclas a ir reduciendo la presión del punto máximo o de mayor concentración conforme avanza en la canaleta. Existen proporciones que muestran disminuciones menores (P50 y P25) pero en general la tendencia es una disminución progresiva hasta la celda numero 4 ubicada antes del cambio de pendiente.

Sin embargo, en una revisión más a detalle se puede observar que existen algunas “oscilaciones”, es decir lugares en donde la disminución es menor luego otros en donde es mayor o incluso se pueden observar aumentos como -1 Phi P0 o en la clase granulométrica 1 phi.

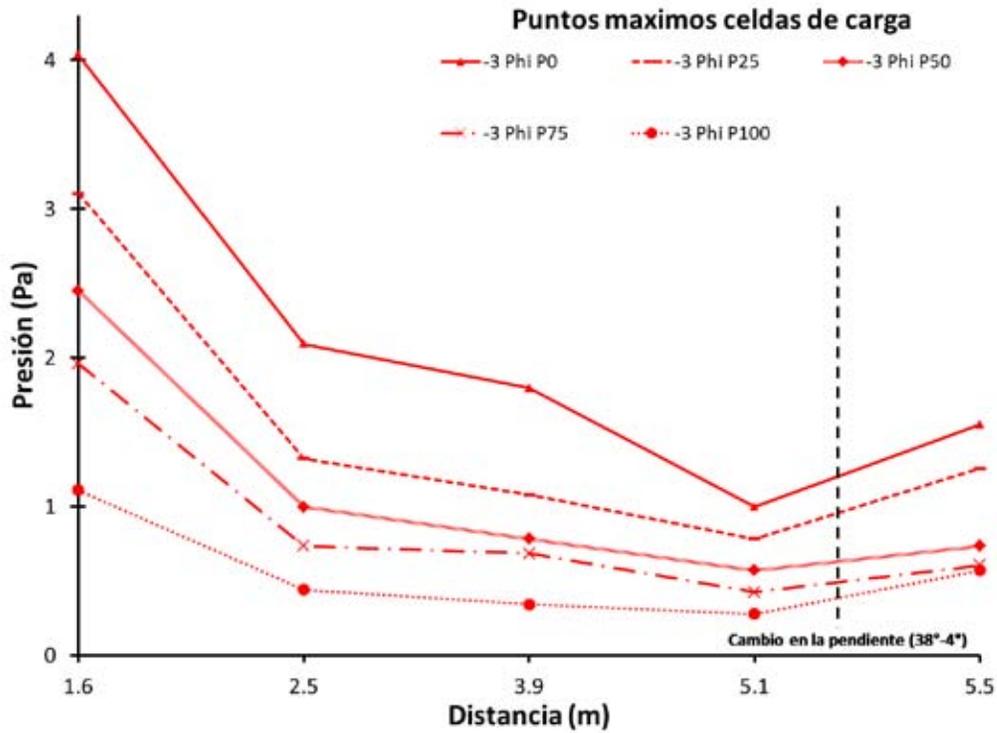


Figura IV.22. Grafica basada en los datos de las celdas de carga. Se usaron los valores máximos registrados en cada celda. Datos correspondientes a -3Φ .

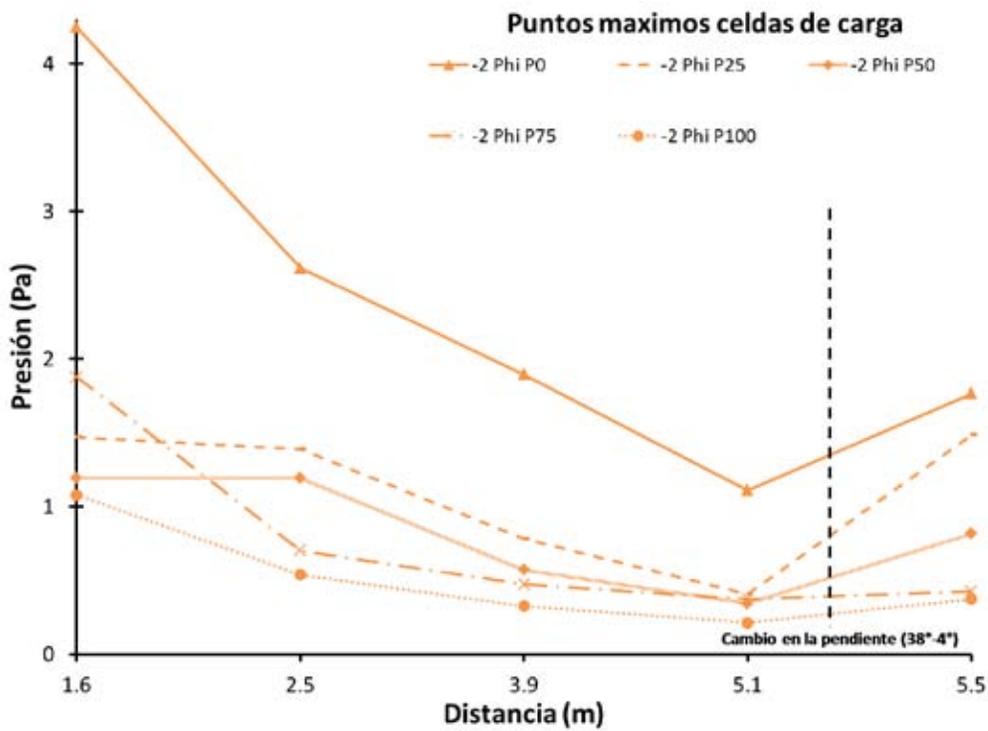


Figura IV.23. Grafica basada en los datos de las celdas de carga. Se usaron los valores máximos registrados en cada celda. Datos correspondientes a -2Φ .

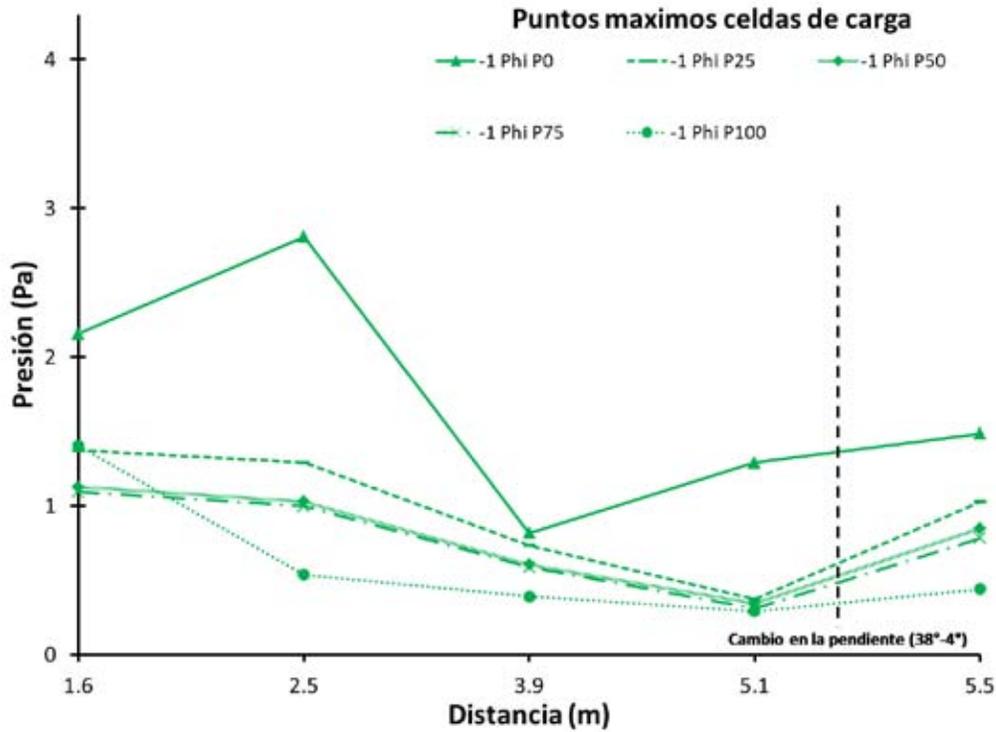


Figura IV.24. Diagrama de comparación entre masa normalizada (eje x) y alcance normalizado (eje y) para la clase granulométrica -3 Phi.

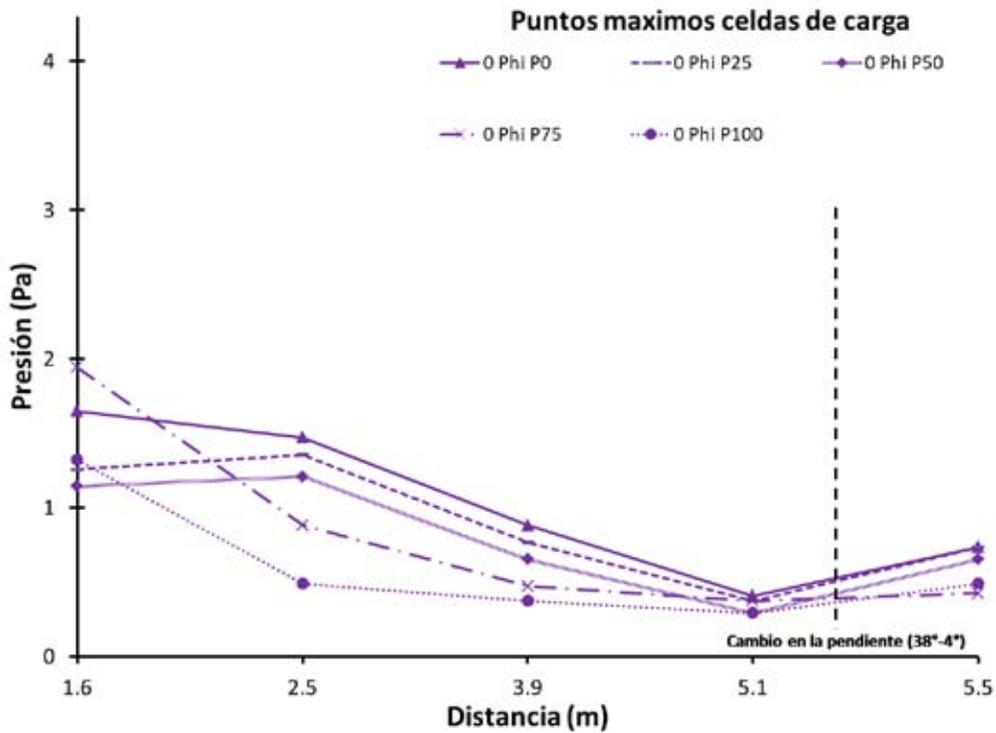


Figura IV.25. Gráfica basada en los datos de las celdas de carga. Se usaron los valores máximos registrados en cada celda. Datos correspondientes a 0Phi.

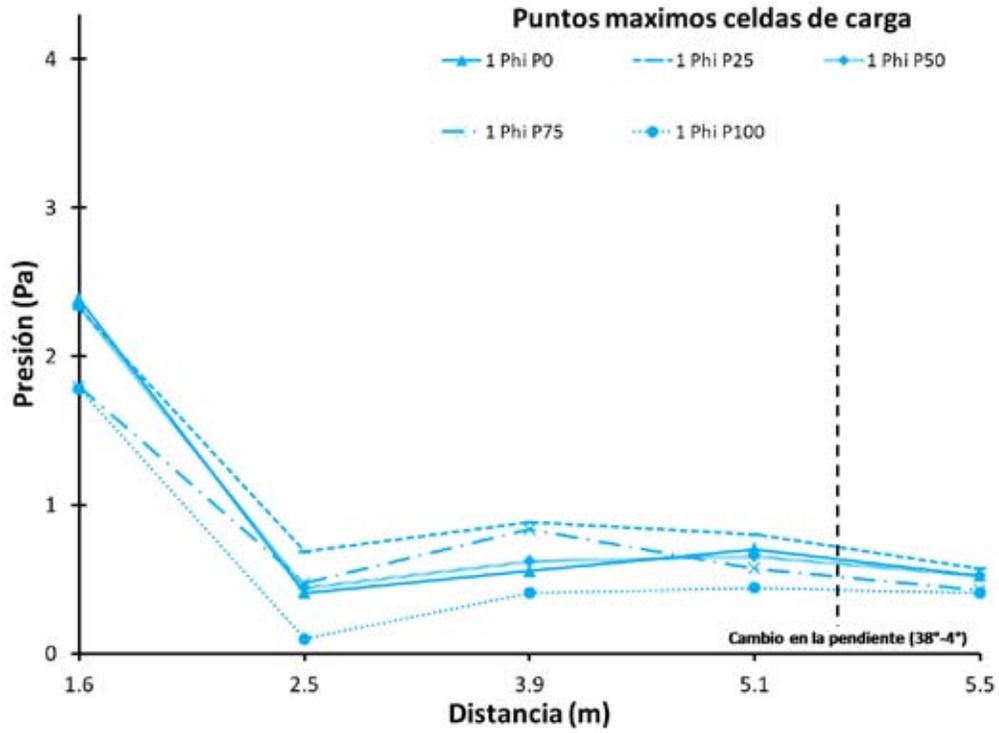


Figura IV.26. Diagrama de comparación entre masa normalizada (eje x) y alcance normalizado (eje y) para la clase granulométrica 1 Phi

IV.2 Mezclas Polidispersas

Se realizaron 30 lanzamientos con mezclas polidispersas diferentes distribuciones granulométricas que incluyeron a las clases granulométricas -3, -2, -1, 0 y 1 Phi. Estas distribuciones fueron una de tipo Gaussiana y otra de tipo Weibull. La razón por la cual se eligieron estas distribuciones es porque son dos de las distribuciones más comunes en la naturaleza, típicamente encontradas en flujos granulares de tipo geológico como flujos piroclásticos o flujos de escombros. Se crearon mezclas con diferentes proporciones de líticos y pómez. Durante estos experimentos, fueron usados todos los sensores de la canaleta, de tal forma que se obtuvo información acerca de la velocidad del frente, cantidad de pico y distribución de la masa, alcance y evidencias de segregación por densidad en el depósito final.

En este capítulo se presentan en forma de tablas y gráficas, los resultados obtenidos con esta serie de experimentos. Los datos se encuentran organizados en las siguientes secciones:

1. Cinemática del flujo (Figuras IV.27 y 28)
Velocidad en todos los láseres
2. Quiebre de pendiente (Figuras IV.29 – 33)
Velocidad vs Alcance
Velocidad vs Masa
3. Masa vs Alcance (Figuras IV.34 y 35)
4. Presión del flujo en el fondo (Figuras IV.36 y 37)
5. Distribución longitudinal de Pómez en el depósito (Figuras IV.38 y 39)

IV.2.1 Cinemática del flujo

En esta sección se describe la cinemática de los flujos en los diferentes módulos de la canaleta. La grafica reporta las velocidades medidas utilizando el sistema de barreras láser colocadas tanto en la canaleta como en el módulo de sedimentación. En cada gráfica los puntos representan mezclas polidispersas (combinación de todos los tamaños de grano) pero con diferentes porcentajes de líticos y pómez. Los porcentajes se refieren al volumen de pómez en relación al volumen total de la mezcla (ej. P10 la mezcla tiene el 10% de pómez y 90% de líticos). Se muestra la velocidad del frente del flujo en función de la distancia.

Se observa que en la canaleta las mezclas Gauss en general muestran velocidades ligeramente mayores, sin embargo, esta diferencia no es tan significativa puesto que se encuentra dentro de la barra de error. Las mezclas Gauss presentan menor dispersión entre los datos de velocidad de sus mezclas con diferentes proporciones de pómez y líticos. De la misma forma que en los flujos monodispersos, estos flujos presentan oscilaciones de velocidad en su recorrido por la canaleta. Mostrando patrones muy similares a los observados en los flujos monodispersos. Comenzando con un aumento en la velocidad que llega hasta el láser 3 en donde se registra una velocidad en promedio de 3.7 m/s siendo la mezcla WPO la que registró la mayor velocidad (3.8 m/s). Siguiendo el mismo patrón, se observa una disminución de la velocidad en el láser 4 en donde se registró una velocidad en promedio de 3.4 m/s. En el láser número 5 se registra un aumento de la velocidad en donde las mezclas alcanzan una velocidad promedio de 4.6 m/s. posteriormente se observa una disminución en la velocidad hasta el láser 7 en donde se observan velocidades promedio de 3.9 m/s. finalmente hacia el láser 9 se observa el mayor aumento de velocidad llegando a alcanzar velocidades de hasta 6.6 m/s.

MEZCLA WEIBULL

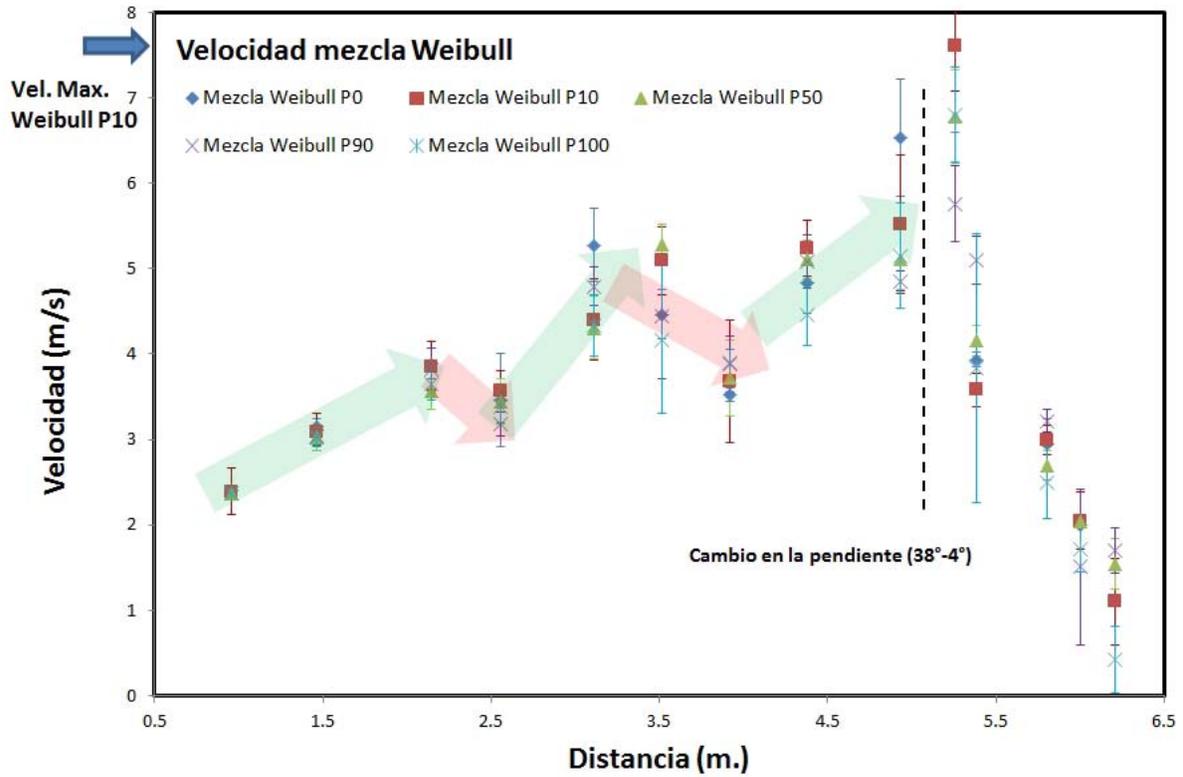


Figura IV.27. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la mezcla Weibull. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

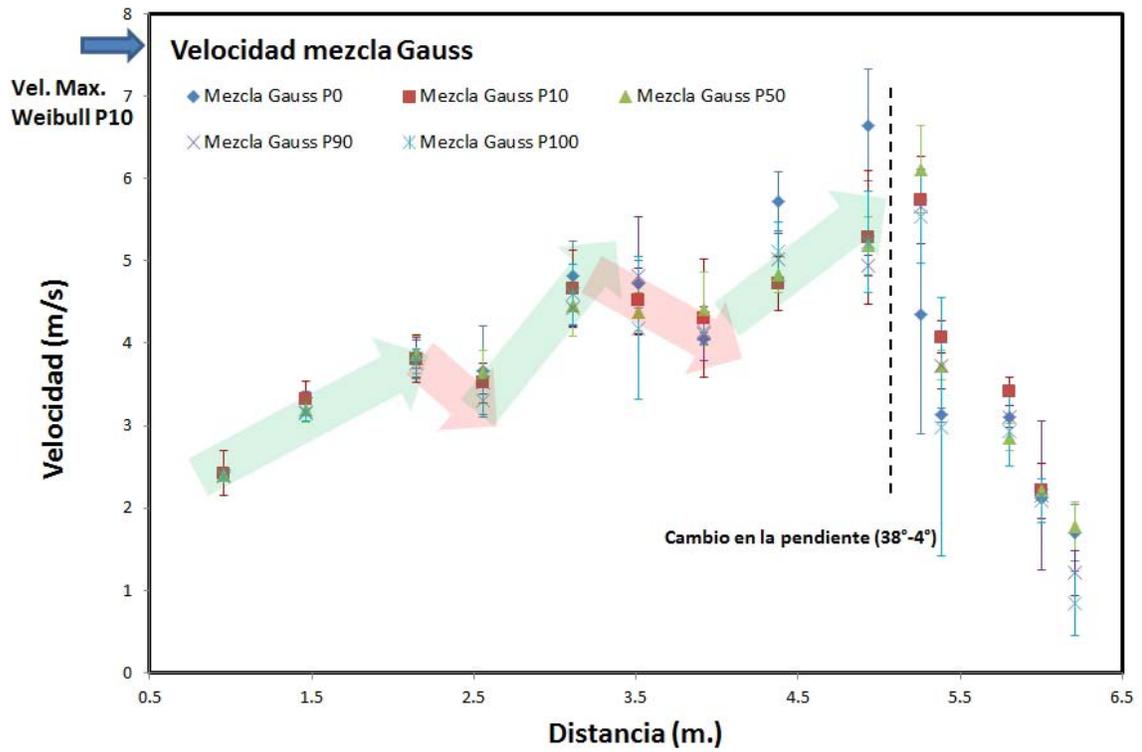


Figura IV.28. La grafica representa valores de velocidad y distancia en la canaleta para la mezcla Gaussiana. Se encuentran representadas diferentes proporciones pómez vs. Líticos. La línea punteada representa el punto del cambio de pendiente.

IV.2.2 Quiebre de pendiente

En esta sección de resultados se reportan graficas de velocidad antes (láser 9) y después del quiebre (láser 10) que tienen dos enfoques: comparar la velocidad de los flujos contra sus alcances y comparar la velocidad de los flujos contra su masa. Las gráficas permiten observar los cambios que ocurren en el flujo al cruzar el cambio de pendiente (cambios en su velocidad) y el efecto que determina el contenido de pómez en esa transición. Cada página se refiere a una clase granulométrica los diferentes puntos en las gráficas corresponden a diferentes cantidades de pómez en las mezclas. Primeramente se muestran las comparaciones de velocidad contra alcance, en estas se observa que es en las mezclas de tipo Weibull que se puede observar una cierta relación entre la velocidad de las mezclas en el láser 10 y el alcance de estas, se observa que a mayor velocidad se tiene un mayor alcance. Esta relación no se observa en las mezclas Gauss donde no se aprecia una relación clara entre estos parámetros. La relación de velocidad contra masa muestra una relación que es más clara en las mezclas Weibull y burda en las Gauss en la que a mayor masa se registra una mayor velocidad. Los deltas de aumento o disminución también han sido analizados, en estos se aprecia primeramente que las mezclas Weibull presentan un mayor aumento de velocidad en el láser 10 que las Gauss. En las mezclas Weibull se aprecia que al agregar 10% de volumen de pómez en la mezcla se produce un aumento en la velocidad post quiebre, sin embargo, al ir aumentando la cantidad de pómez este aumento se hace más pequeño, hasta la mezcla WP100 donde se vuelve a ver un aumento mayor. Por otro lado, la mezcla GP0 muestra una considerable disminución de velocidad producto del cambio de pendiente, sin embargo al agregar 10% de pómez se observa un aumento igualmente considerable, al aumentar el contenido de pómez en la mezcla se siguen observando aumentos de velocidad pero de aproximadamente la misma magnitud en todas.

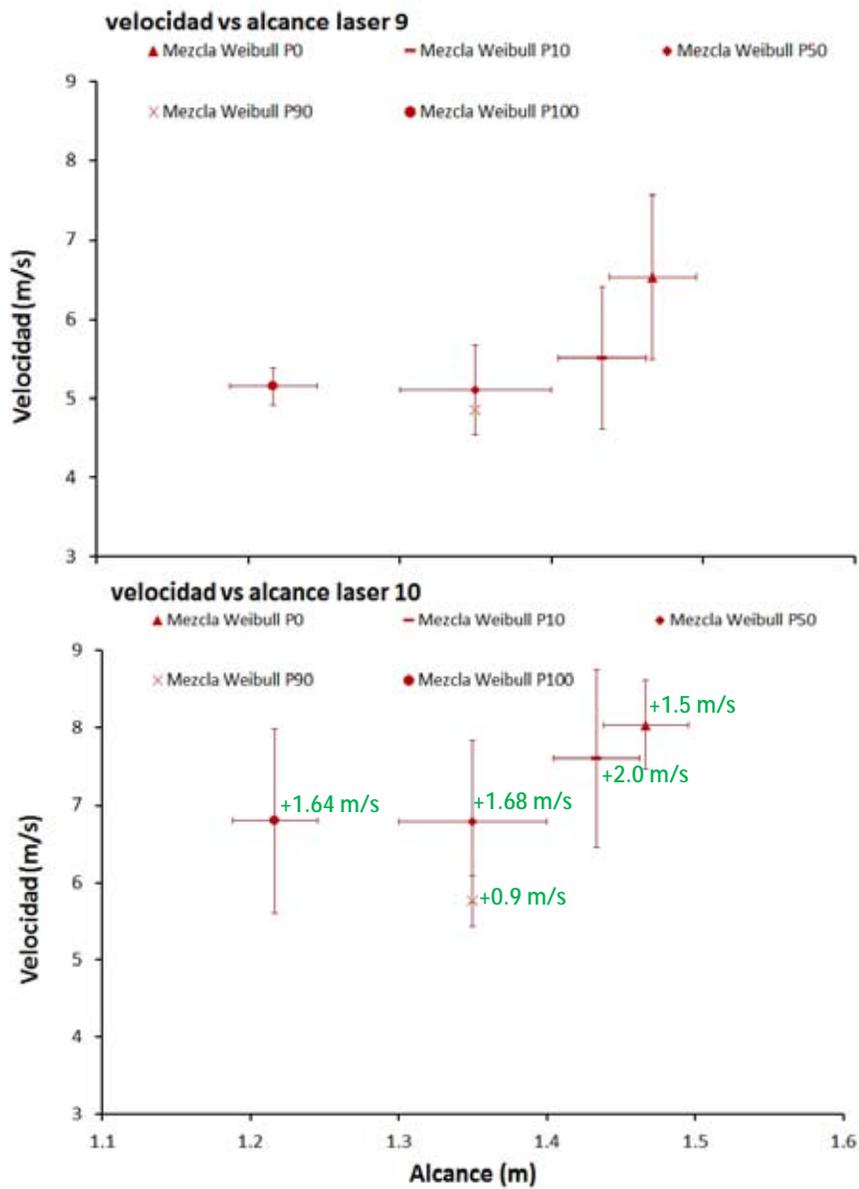


Figura IV.29. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la mezcla Weibull. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

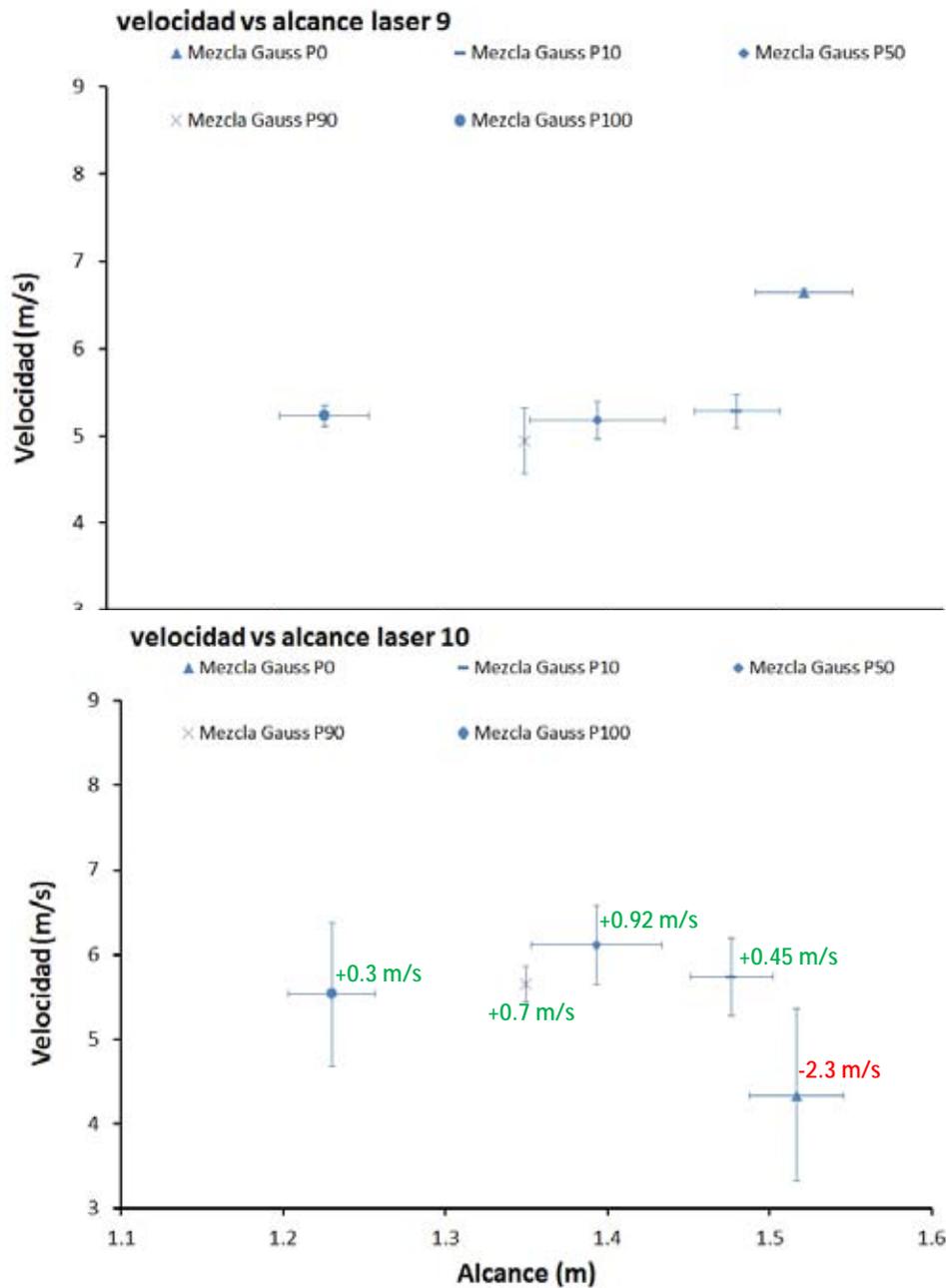


Figura IV.30. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con el alcance para la mezcla Gaussiana. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

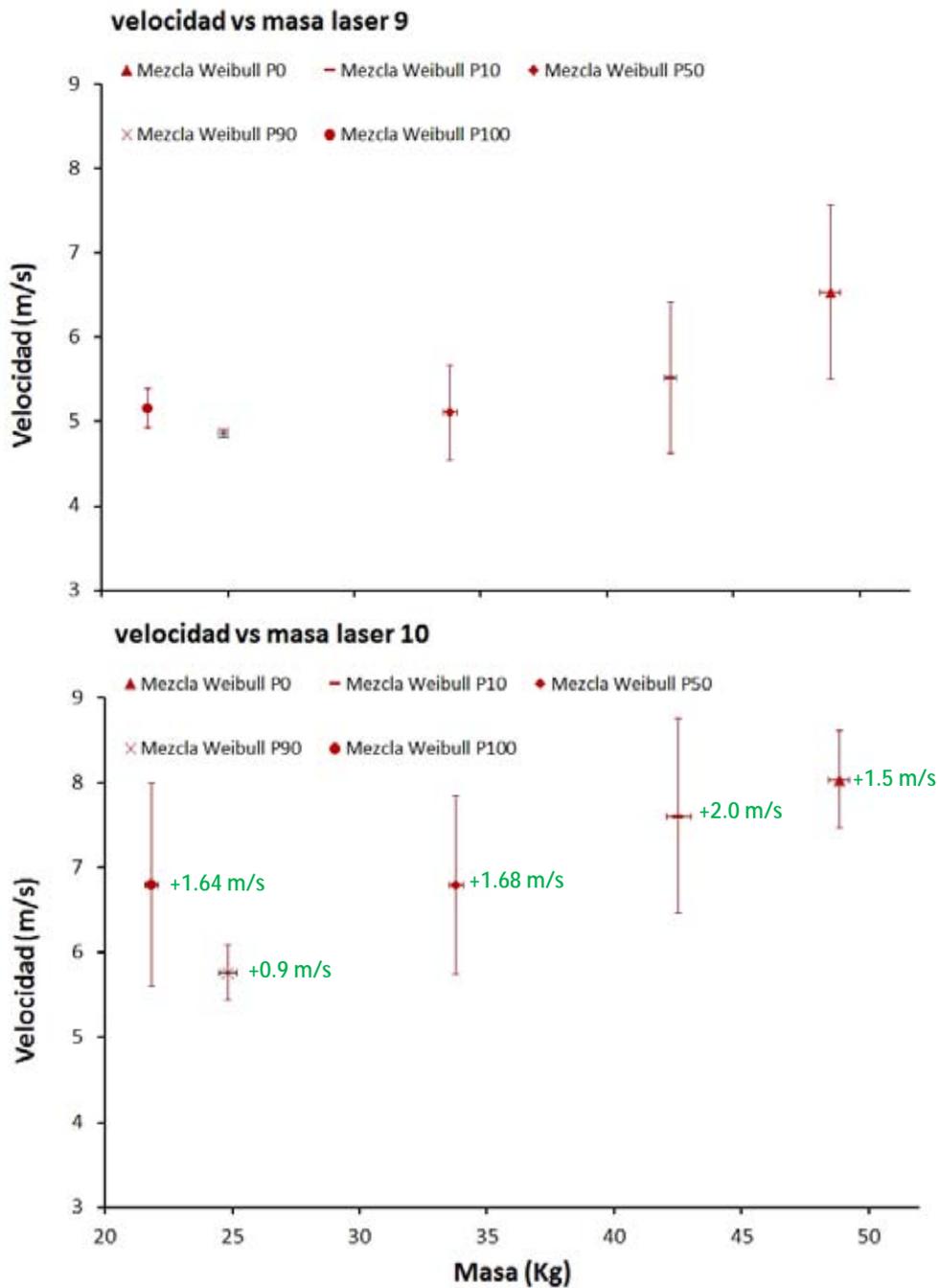


Figura IV.31. Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la mezcla Weibull. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

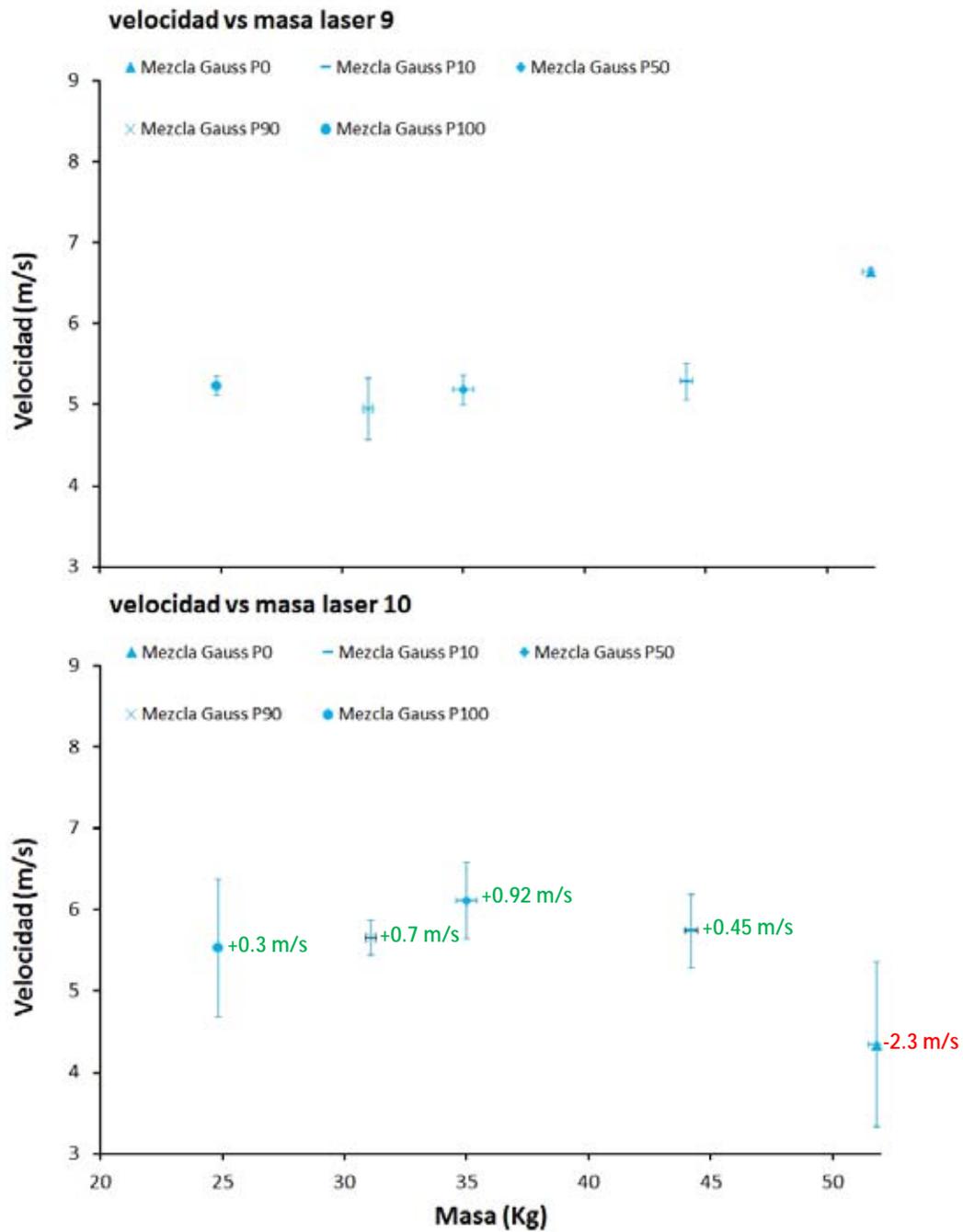


Figura IV.32 Graficas que muestran la velocidad registrada en el láser 9 y el láser 10 comparadas con la masa para la mezcla Weibull. Cada punto es el valor mediano de tres lanzamientos. Los números en la gráfica del láser 10 indican el aumento (verde) o disminución (rojo) de velocidad después del cambio de pendiente.

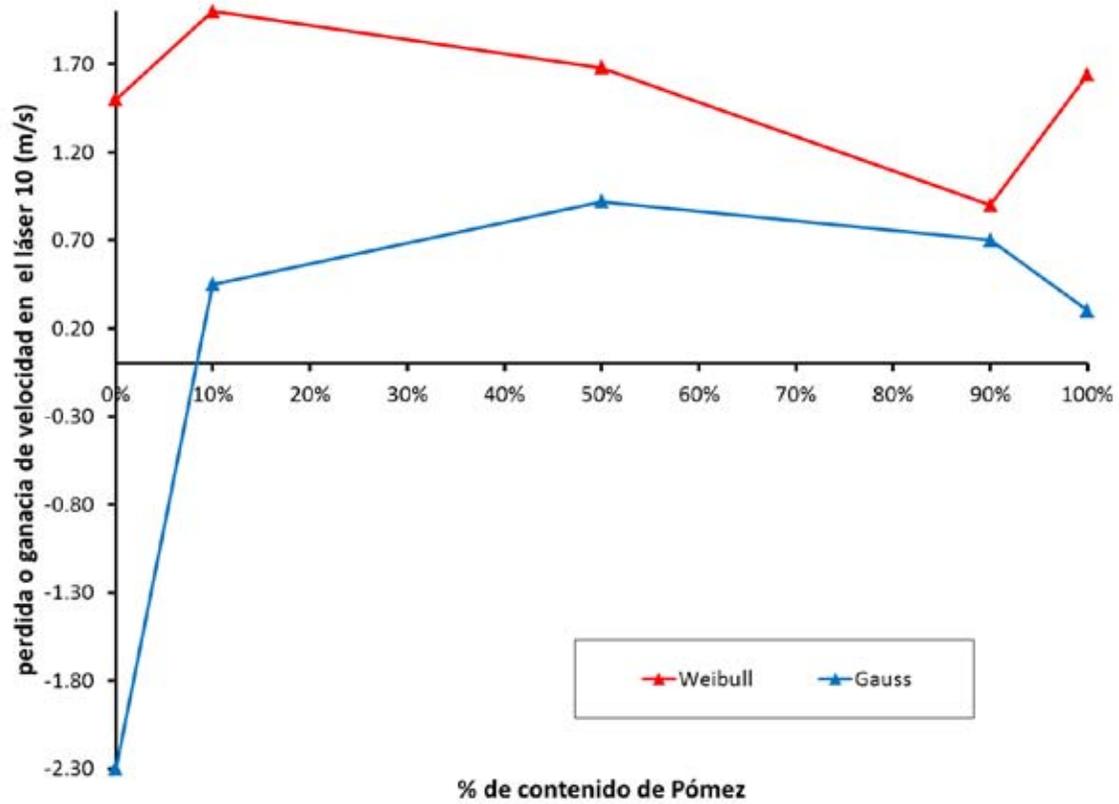


Figura IV.33. Comparación de las mezclas Weibull y Gauss que muestra el aumento o disminución de la velocidad registrada en el láser 10 en función del contenido de pómez en la mezcla.

IV.2.3 Masa vs Alcance

Dentro de esta sección de resultados se reporta una comparación entre la masa de cada uno de los flujos, y sus alcances correspondientes. Cada grafica se refiere a una distribución granulométrica y los puntos en la gráfica se diferencian de los demás por el porcentaje de pómez presente en la mezcla.

En general se observa una tendencia parecida a la encontrada en las mezclas monodispersas en donde a mayor masa se presentan mayores alcances. Esto es más evidente en las mezclas de tipo Gauss. Un análisis más a detalle permite ver que en las mezclas Weibull se observa que en las mezclas extremas o puras existe una diferencia que responde a la relación de entre mayor masa mayor alcance, sin embargo, en las mezclas intermedias se observa que esta relación no es tan clara, presentando alcances similares las mezclas WP90 y WP50. La mezcla WP10 y WP0 si muestran esta relación de manera más clara.

Las mezclas de tipo Gauss, por otro lado, si muestran una muy clara relación entre masa y alcance, siendo las mezclas de mayor masa las de mayor alcance.

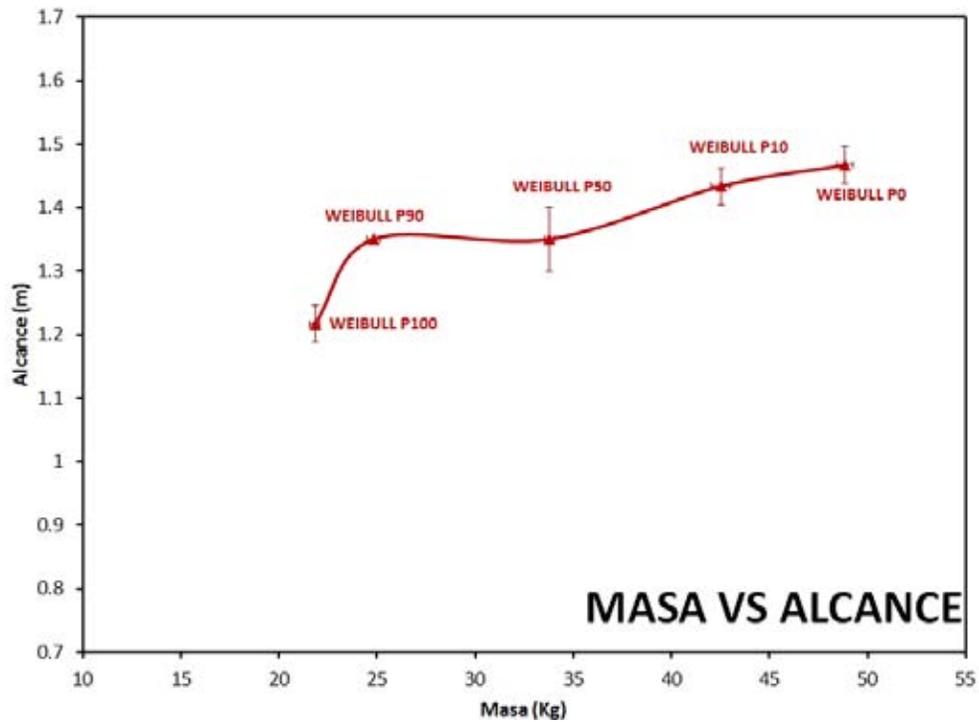


Figura IV.34. Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la distribución granulométrica Weibull.

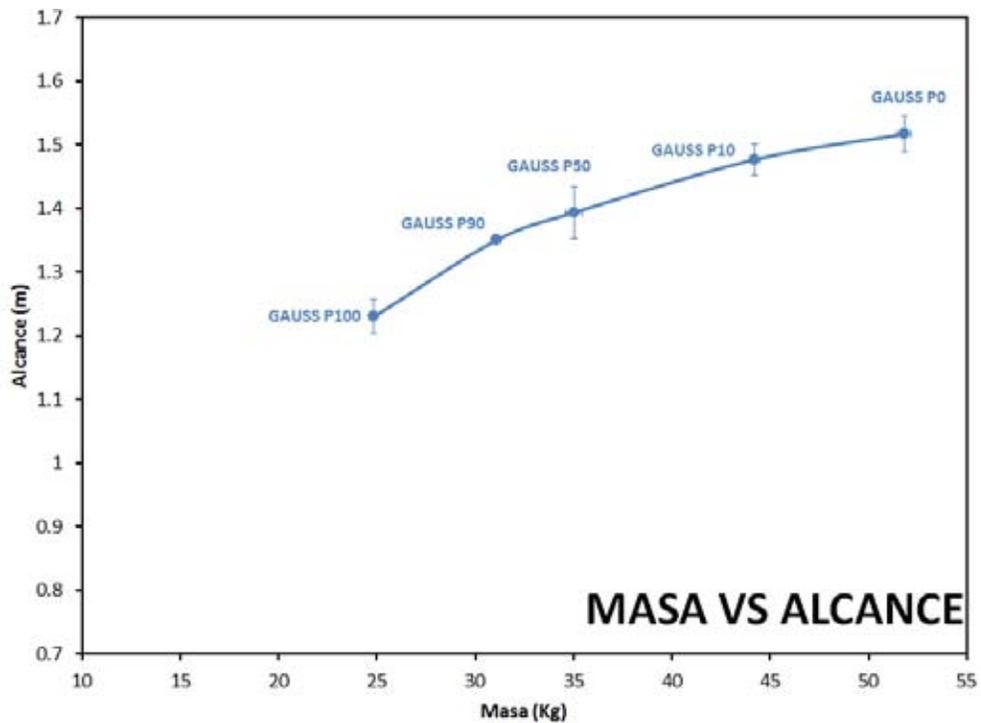


Figura IV.35. Diagrama de comparación entre masa (eje x) y alcance (eje y) para la distribución granulométrica Gauss.

IV.2.4 Presión del flujo en el fondo

En este conjunto de graficas se muestra la distribución del punto de mayor concentración de partículas en el flujo, en otras palabras, el punto de mayor presión del flujo y como éste va evolucionando durante su recorrido en la canaleta, esto mediante las mediciones de las celdas de carga instaladas a lo largo de este aparato experimental. En la mayoría de los casos el pico se encuentra entre el frente y el inicio del cuerpo del flujo granular. Estos datos aportan información relacionada con engrosamiento y adelgazamiento del flujo.

Primeramente se observa que al igual que los datos anteriormente mostrados conforme se disminuye el tamaño de grano existe una mayor homogeneidad de los resultados, y la variabilidad debida a los cambios producidos por el diferente contenido de pómez se reduce.

Los comportamientos de ambas mezclas son muy similares, mostrando un aumento en la presión del flujo (zona de máxima presión) hacia la segunda celda y posteriormente mostrar una progresiva disminución hasta la celda número 4 ubicada antes del cambio de pendiente. Después del cambio de pendiente se observa un aumento en ambos tipos de mezclas.

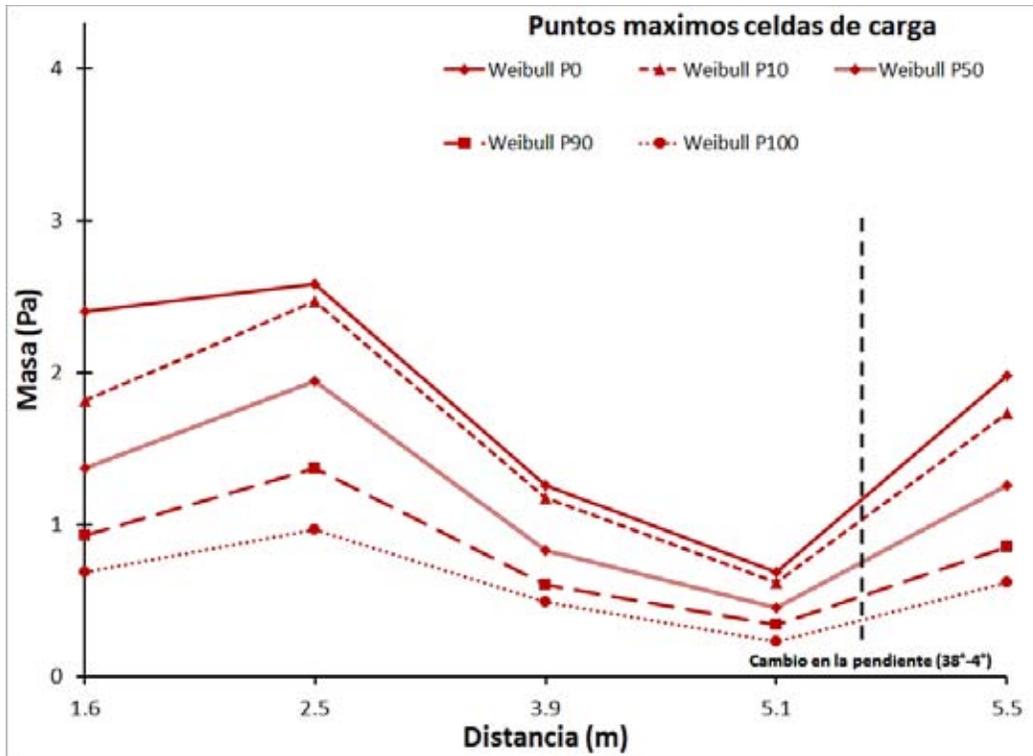


Figura IV.36. Grafica basada en los datos de las celdas de carga. Se usaron los valores máximos registrados en cada celda. Datos correspondientes a las mezclas Weibull.

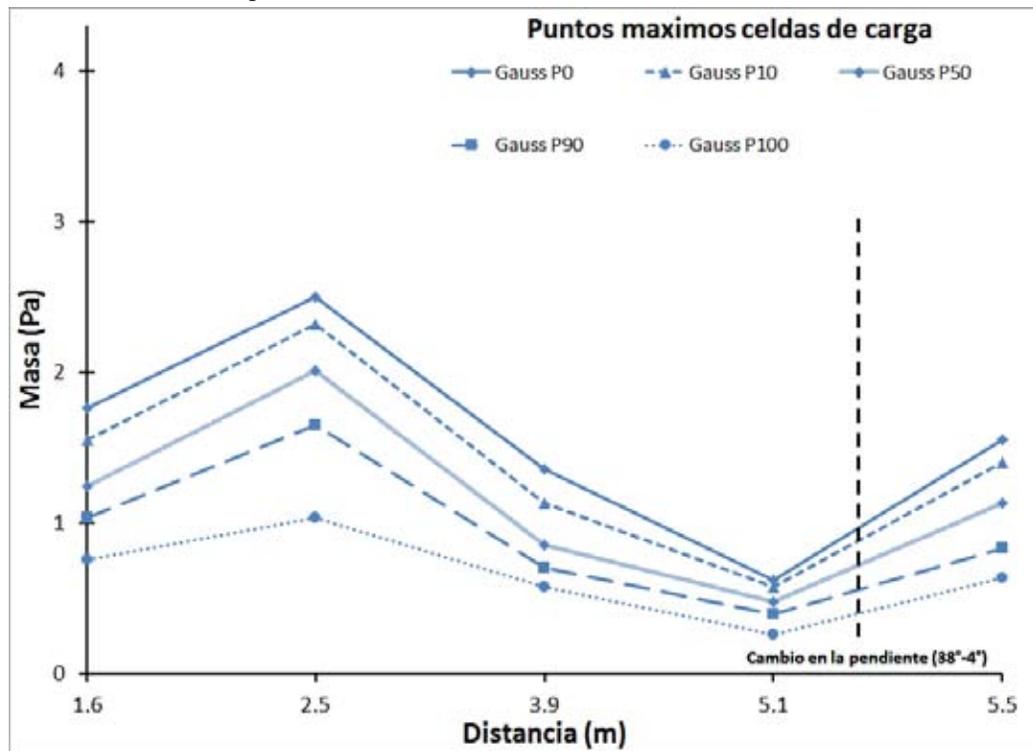


Figura IV.37. Grafica basada en los datos de las celdas de carga. Se usaron los valores máximos registrados en cada celda. Datos correspondientes a las mezclas Gaussianas.

IV.2.5 Distribución longitudinal de pómez en el depósito.

En esta sección de los resultados se presentan los datos recabados del análisis de los microdepósitos formados por los flujos WP50 y GP50.

Se aprecia que el $q_{0.5}$, el cual corresponde a la tendencia principal de los datos, indica que el contenido de pómez aumenta a la distancia dentro de depósito hasta llegar al 100% en la parte más distal. A pesar de la dispersión de los datos el método de la regresión de cuartiles permite visualizar la tendencia principal de los datos con una mejor certidumbre estadística.

Para la mezcla GP50 es posible observar que el incremento de pómez contabilizado a lo largo de este depósito, es más gradual que en la WP50. A partir de 0.2 de la distancia normalizada (0.32 m) se observa que el porcentaje de pómez disminuye y se mantiene así hasta los 0.5 de distancia normalizada (0.77 m). La dispersión de los datos resulta ser menor en comparación con la mezcla WP50.

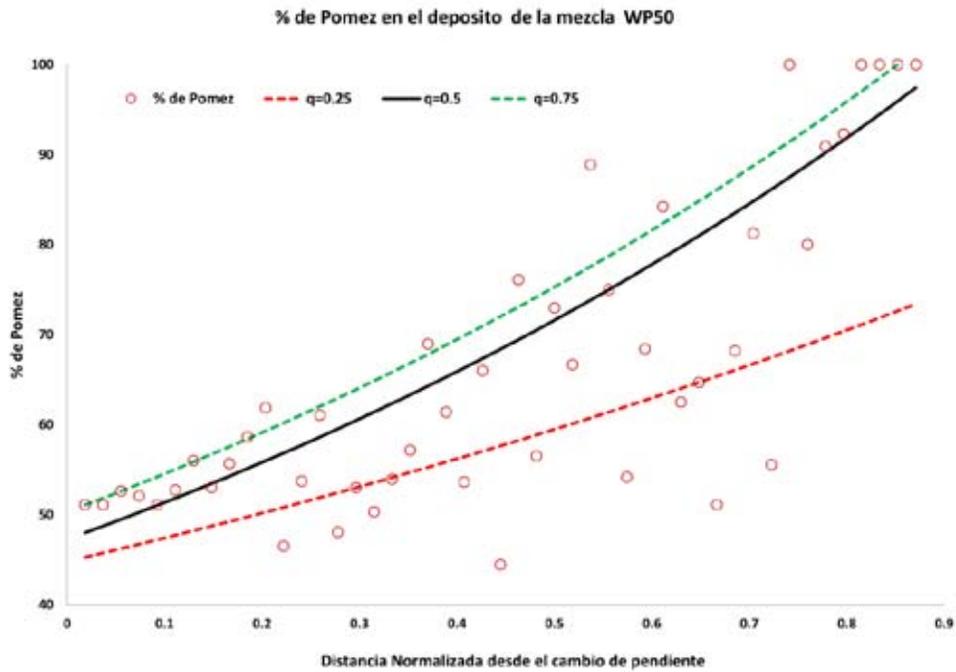


Figura IV.38. Variación longitudinal del contenido de pómez (expresado en porcentaje) desde el cambio de pendiente hasta la parte distal del depósito de la mezcla WP50.

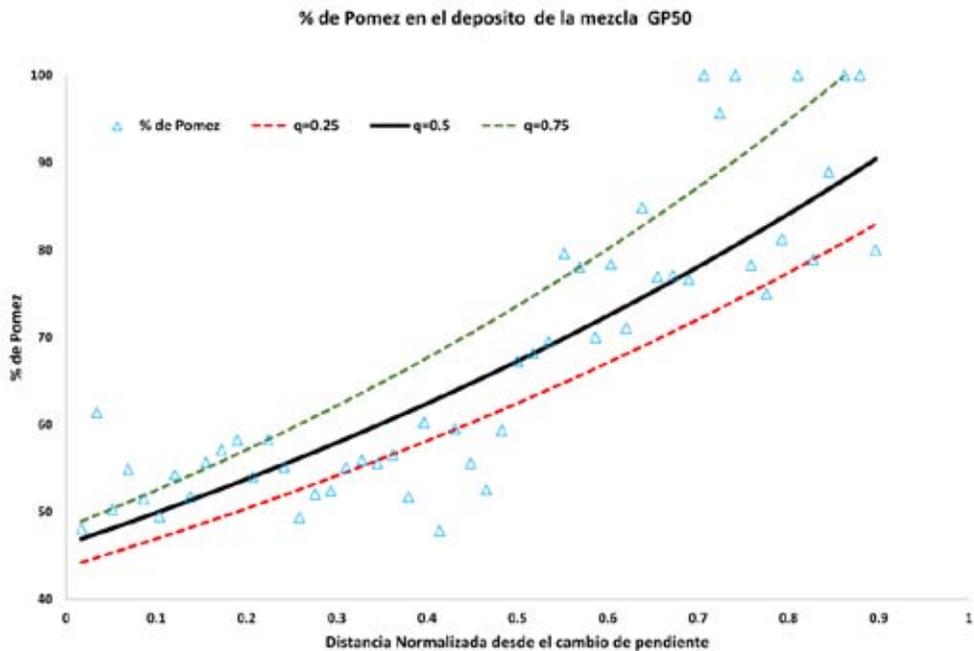


Figura IV.39. Variación longitudinal del contenido de pómez (expresado en porcentaje) desde el cambio de pendiente hasta la parte distal del depósito de la mezcla GP50.

CÁPITULO CINCO

DISCUSIÓN

- MEZCLAS MONODISPERSAS
 - MEZCLAS POLIDISPERSAS
-

Este capítulo donde se discuten los resultados se divide en:

- Discusiones sobre las mezclas monodispersas
 - Influencia del tamaño de grano en la velocidad y alcance y distribución de la masa.
 - Influencia de la relación pómez – líticos en la velocidad y alcance
- Discusiones sobre las mezclas polidispersas
 - Influencia del tamaño de grano en la velocidad y alcance
 - Influencia de la relación pómez – líticos en la velocidad y alcance
 - Efecto de la relación pómez – líticos en la segregación longitudinal del depósito.

Al final del capítulo se pueden consultar dos tablas que resumen de forma sintética las observaciones e interpretaciones de los resultados de los experimentos realizados.

V.1 Mezclas Monodispersas

V.1.1 Influencia del tamaño de grano en la velocidad y alcance.

La velocidad que un flujo granular pueda llegar a alcanzar durante su trayectoria sobre un plano inclinado es función de diversas variables (masa, volumen, densidad de los clastos, tamaño de los clastos, forma y rugosidad de los clastos, rugosidad del plano, inclinación del plano etc). En este trabajo se pretende estudiar el efecto que la densidad de los clastos puede tener sobre la velocidad y consecuentemente el alcance. También se quiere entender como la granulometría puede condicionar velocidad y el alcance.

Densidad y tamaño son variables que pueden condicionar ciertos fenómenos que ocurren en los flujos granulares. Por ejemplo, en lo relacionado con la segregación vertical de los clastos, [Cagnoli y Manga \(2005\)](#), han revelado que mientras que la densidad gobierna la dirección de segregación de los materiales dentro de un flujo, el tamaño de grano influye sobre la velocidad de segregación.

V.1.1.1 Variaciones observadas en la canaleta

De acuerdo a los datos obtenidos en este trabajo, en las figuras IV.1 - 5 (velocidad de todos los flujos en la canaleta y en la unidad de sedimentación), es posible llegar a las siguientes interpretaciones.

De manera muy general se puede ver que la tendencia es un aumento en la velocidad del flujo desde el láser 1 hasta el láser 9 (teniendo incrementos y disminuciones sucesivos) en todos los experimentos. Sin embargo algunas clases granulométricas aumentan más que otras. Tal es el caso de los clastos más gruesos (-3 Phi registró la mayor velocidad de todas). Al graficar una línea de tendencia (regresión lineal) de los datos de velocidad de cada una de las granulometrías (velocidades del Láser 1 al 9) se puede notar que en los flujos con proporción P0 (eliminando el efecto de la densidad) existe una clara relación entre velocidad y tamaño de grano donde conforme se aumenta el tamaño de grano aumenta la velocidad (figura V.1). Los clastos gruesos tienden a acelerar más y ser más veloces que los finos probablemente debido a la mayor agitación (temperatura granular) de los clastos a la base del flujo (Cagnoli y Romano 2012b; Cagnoli y Romano 2013).

Está demostrado, tanto experimental como numéricamente, en los trabajos de Cagnoli y Piersanti (2015), que a menor tamaño de grano corresponde menor agitación. Esto debido a que entre más pequeño sea el tamaño de grano más grande será el número de partículas en la masa granular y la agitación debida a la interacción de las partículas con las asperezas de la superficie penetra menos dentro del flujo. Cuanto menor sea la agitación de las partículas por unidad de masa de flujo, menor será la energía disipada por unidad de distancia de recorrido. Sin embargo, el mayor número de partículas hace que las fracciones finas experimenten mayor fricción, mientras que las gruesas tienen mayor inercia y menor fricción (Sulpizio, 2016). Estos factores pueden ser la razón por la cual las mezclas de grano grueso muestren mayor velocidad en la canaleta.

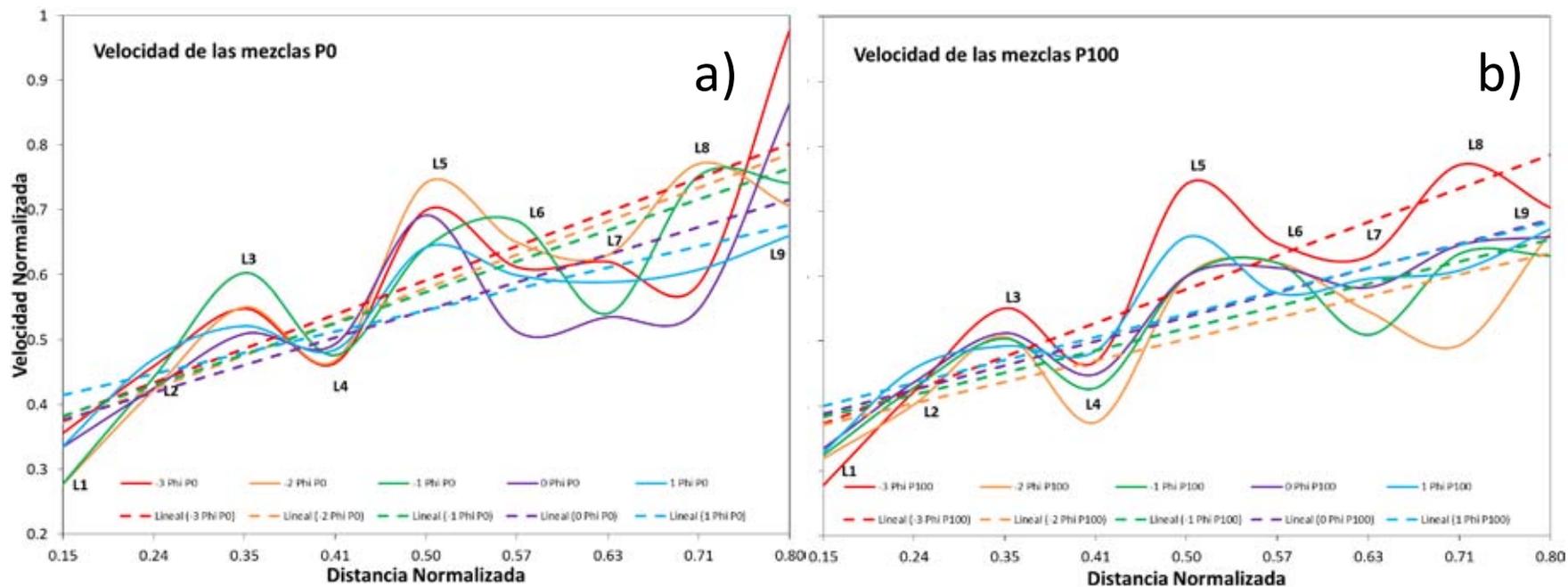


Figura V.1. Gráfico que muestra la velocidad registrada en los primeros nueve láseres de la canaleta (correspondientes solo a la canaleta – plano inclinado). A) muestra la velocidad para las mezclas formadas únicamente por líticas. B) muestra la velocidad para las mezclas únicamente formadas por pómez. Se agregó una línea de tendencia (lineal) para cada clase granulométrica para evidenciar la tendencia general de la velocidad de cada clase.

Los resultados obtenidos reflejan una tendencia a la homogeneidad (mayor repetitividad de las mediciones) de los datos conforme se disminuye el tamaño de grano. Datos referentes tanto a velocidad de flujo como alcance (de todas las clases granulométricas con sus diferentes proporciones de pómez) indican que los flujos granulares compuestos por partículas de tamaño más fino (0 y 1 phi) muestran menor variabilidad (Figura V.2). La razón de este comportamiento se explica, como previamente mencionado, con que al disminuir el tamaño de grano aumenta la cantidad de partículas por unidad de volumen en la masa granular. Esta sobrecarga de partículas en el sistema además de ahogar la agitación (temperatura granular), reduce el efecto que los clastos de menor densidad pueden tener en la cinemática del flujo, además de que al disminuir el tamaño de grano se reduce la porosidad e incrementa la densidad del material. Así que se reduce la diferencia de densidad entre pómez y líticos.

Datos proporcionados por las celdas de carga (Figuras IV.22 – 26) muestran que las partículas gruesas muestran una disminución en los valores de presión del flujo en el fondo (punto de máxima presión o mayor concentración de partículas) progresiva conforme avanza en la canaleta, mientras que las finas muestran incrementos. Estas variaciones pueden ser interpretadas como aumento en la concentración de las partículas y/o aumento en el espesor en un punto determinado del flujo. Las variaciones de espesor se explican con alargamiento (frente y cola del flujo se alejan) o compactación (la distancia entre frente y cola se reduce) del flujo a lo largo de la canaleta (Stick-Slip). La disminución progresiva de las mezclas de gruesos puede estar relacionada a su alta temperatura granular la cual expande el flujo y la cantidad de partículas por unidad de volumen que pasan sobre la celda es menor, además de que la cantidad de vacíos debido a la granulometría es mayor, mientras que en los finos existe mayor número de partículas y mayor concentración en un punto determinado.

Por otro lado se puede observar que existe una disminución notable en casi todas las partículas hacia la celda No. 2, y esto es mucho más evidente en las mezclas finas, indicando que en este tipo de granulometrías existe una expansión o un alargamiento mayor en esta zona. Estas fluctuaciones entre compactación y alargamiento del flujo a lo largo de

la canaleta pueden mostrar indirectamente variaciones en la velocidad del flujo, de tal forma que aumentos, ligeros aumentos, o disminuciones menores en estos datos pueden indicar una aceleración previa, mientras que disminuciones más grandes pueden referirse a una desaceleración previa (Revisar Figuras IV.1 – 5 y IV.16 – 20). Esto puede ser explicado basándose en el efecto stick-slip (Bartali et al., 2015) en donde se hace referencia a que la parte frontal del flujo pierde velocidad y el cuerpo con una velocidad e inercia mayor al alcanzarlo le transfiere momentum lo que no sólo hace acelerar al flujo sino que puede incrementar su espesor y esto se ve reflejado en una mayor presión del fondo del flujo. Sin embargo, aunque la información obtenida apunte a la existencia de este fenómeno, el número de celdas de carga, o puntos de muestreo son pocos para lograr una resolución optima, debido a esto la información también podría quedar abierta a ser interpretada como que los ligeros aumentos o disminuciones menores pudieran indicar una desaceleración. Para futuros trabajos se deberían incrementar el número de celdas de carga con el fin de aumentar la resolución.

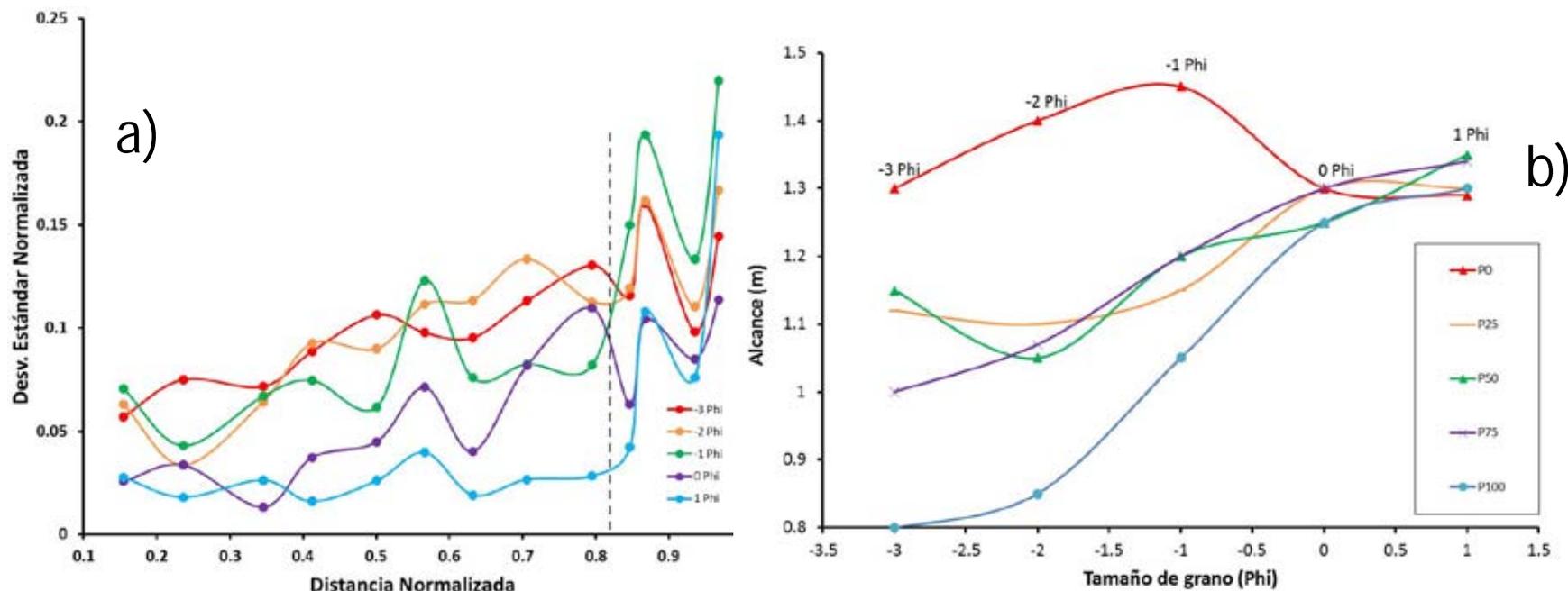


Figura V.2. A) Muestra la variación (desviación estándar) de los resultados de las velocidades normalizadas medidas en la canaleta y en el módulo de sedimentación tomando en cuenta todas las granulometrías con sus diferentes proporciones de pómez. Se observa que hay mayor variación en las clases granulométricas más grandes. B) Muestra la variación de los alcances (en metros) medidos para todas las clases granulométricas y sus diferentes mezclas con proporciones de pómez. Se observa que a pesar del diferente contenido de pómez la variación de los alcances se reduce conforme se reduce el tamaño de las partículas.

V.1.1.2 Variaciones observadas en el cambio de pendiente

De acuerdo a las Figuras IV.6 – 16 es posible observar que las granulometrías finas tienden a la conservación de su velocidad previa al cambio de pendiente o a presentar disminuciones moderadas mientras que las gruesas tienden a aumentar su velocidad. El aumento de velocidad de las granulometrías gruesas al momento del cambio de pendiente puede ser explicada si se toma en cuenta que las mezclas más gruesas experimentan mayor inercia mientras que las finas mayor fricción (Sulpizio, 2016). En cuanto a los finos es posible que pudiera existir cierto grado de expansión debida a la entrada de pequeñas cantidades de aire a la mezcla que por su tamaño de grano menor tienen una mayor capacidad para encapsular el aire en su interior.

V.1.1.3 Variaciones observadas en el Alcance

En cuanto al alcance de los flujos se puede apreciar que los mayores alcances los tuvieron los materiales de grano más fino (Figuras IV.17 – 21) a excepción de las mezclas P0 en donde el mayor alcance lo lograron las mezclas de grano grueso.

Tomando en cuenta únicamente la granulometría, y no el efecto de la pómez, se podría pensar en que una de las explicaciones podría incluir cierta fluidización al incorporar aire dentro del flujo al momento del cambio de pendiente por las razones explicadas anteriormente.

Otra explicación es la mencionada por Cagnoli y Romano (2013), en donde afirman que las mezclas de grano fino tienden a disipar menos energía lo que podría ayudar a conservar por mayor tiempo su energía cinética e impulso y de esta manera lograr mayores alcances. Mientras que las mezclas gruesas al ser más agitadas pierden en menor tiempo su energía teniendo alcances menores.

V.1.2 Influencia de la relación pómez – líticos en la velocidad y alcance.

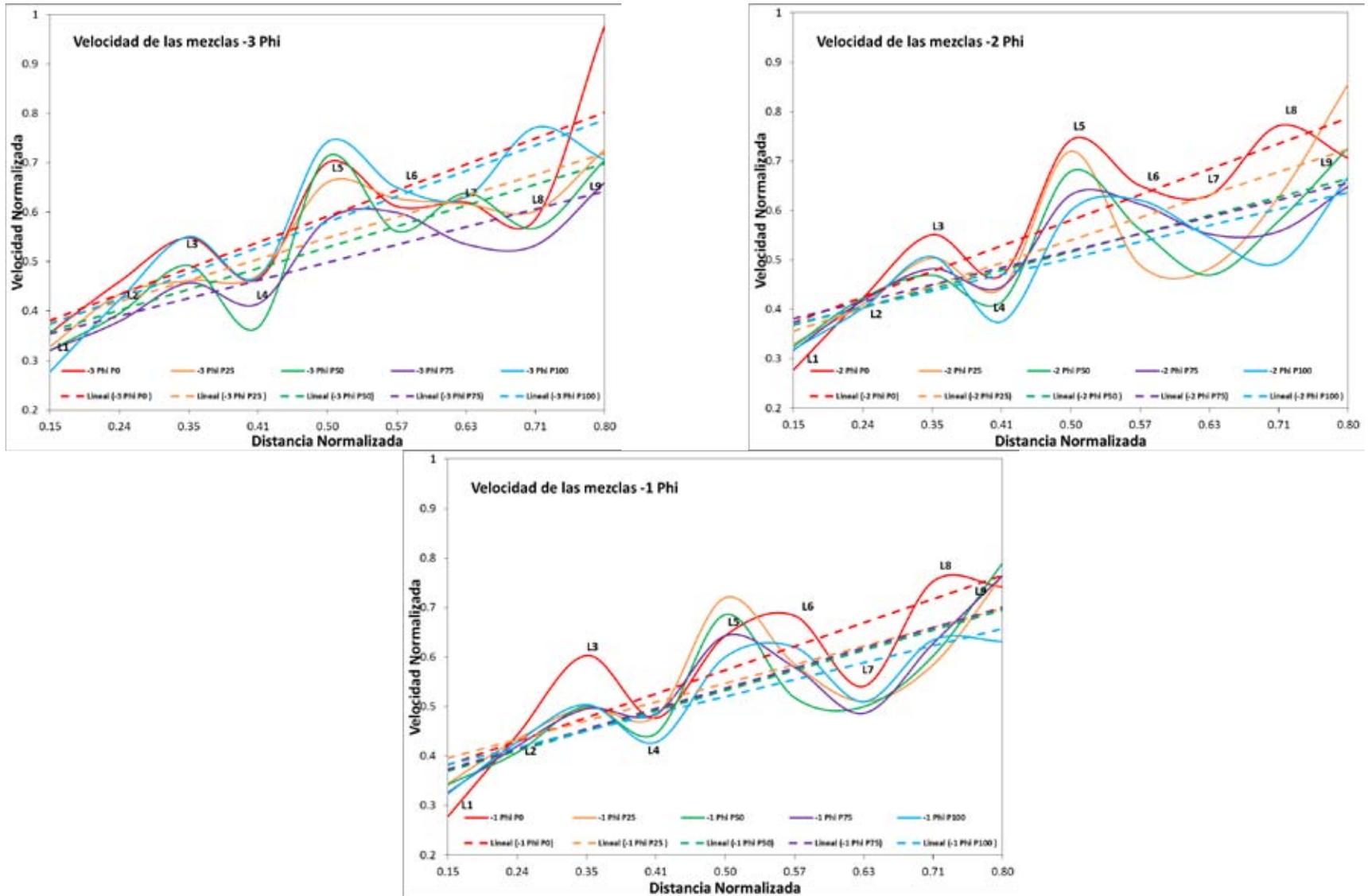
Para iniciar esta parte de la discusión es necesario aclarar que los flujos con proporciones P0 serán tomados como un flujo inicial en donde no existe influencia alguna de la pómez. Consecutivamente se añadieron ciertos porcentajes de pómez en el volumen total del flujo para ver el efecto que esta puede tener y como se va atenuando o intensificando de acuerdo a la cantidad añadida.

V.1.2.1 Variaciones observadas en la canaleta

De acuerdo a los datos en las figuras IV.1 – 5 podemos observar que en la clase granulométrica más gruesa (-3 Phi) las mezclas P0 y P100 tienen velocidades muy parecidas (en promedio), de tal manera que las mezclas puras, a pesar de la diferencia de densidad, se mueven casi a la misma velocidad. Sin embargo, al agregar un 25% de pómez a la mezcla P0 (es decir, la mezcla P25) se observa que la velocidad disminuye, haciéndose esto más evidente hacia la parte baja de la canaleta (desaceleración). Conforme se aumenta el contenido de pómez en la mezcla (P50 y P75) esta tendencia continua y la velocidad va progresivamente disminuyendo (Figuras V.3 y V.4). En las clases granulométricas -2 y -1 Phi el comportamiento es parecido, con la diferencia de que en éstas, P0 y P100 si muestran una diferencia notable en sus velocidades. Así mismo, en las mezclas finas (0 y 1 Phi), las variaciones de velocidad entre mezclas con mismo tamaño de grano pero diferente cantidad de pómez van disminuyendo a tal grado que se puede apreciar que las fluctuaciones en velocidad se reducen y casi desaparecen en 1 Phi.

En síntesis podemos observar que:

1. Uno de los efectos principales que produce la pómez es la disminución gradual de la velocidad
2. Podemos notar que este efecto se atenúa conforme se disminuye el tamaño de grano.



FiguraV.3. Variación de la velocidad de acuerdo al contenido de pómez para las clases granulométricas -3, -2 y -1 Phi (los clastos gruesos).

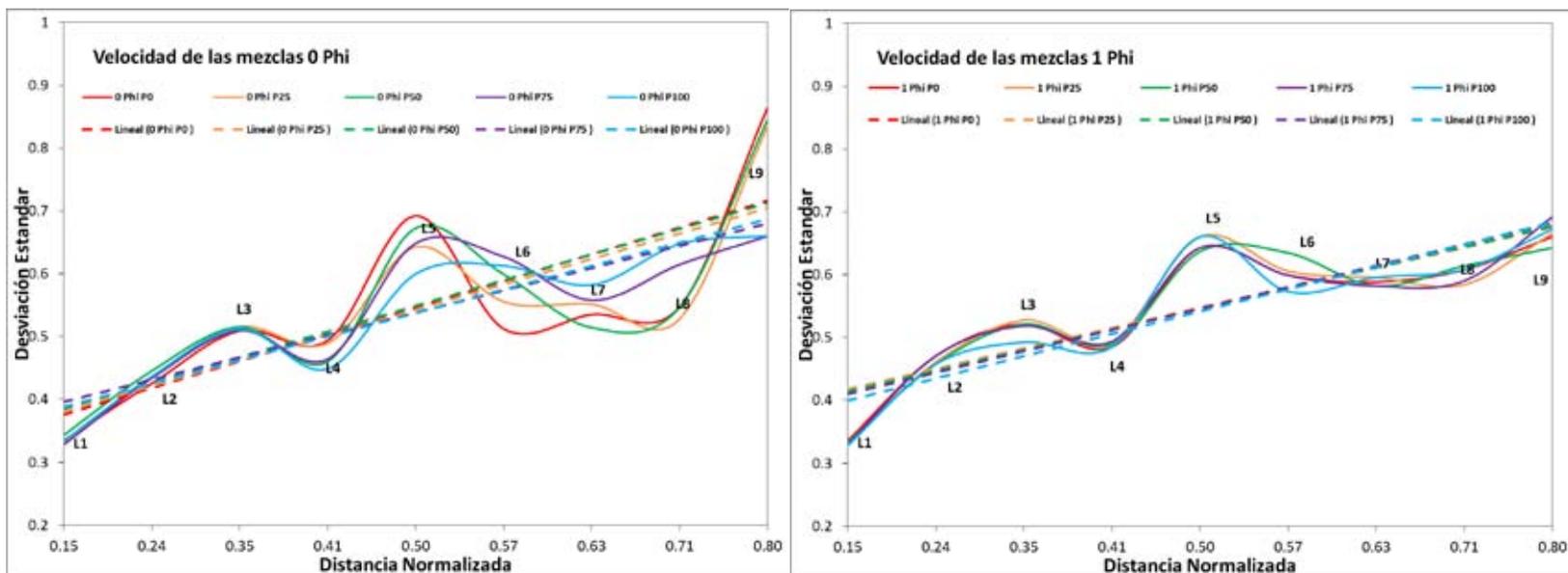


Figura V.4. Variación de la velocidad de acuerdo al contenido de pomez para las clases granulométricas 0 y 1 Phi (los clastos finos).

3. En -3 Phi pómez y líticos se comportan de manera muy similar sin embargo la combinación de estos resulta en reducción de la velocidad.

La primera observación se podría interpretar como el efecto del diferente coeficiente de restitución de los materiales (Goldsmith, 2001) y la rugosidad de la pómez. El coeficiente de restitución es una medida del grado de conservación de la energía cinética en un choque entre partículas clásicas. En una colisión frontal alineada de dos esferas sólidas (como las que experimentan las bolas de billar) las velocidades después del choque están relacionadas con las velocidades antes del choque, por la expresión:

$$C_R = \frac{V_{2f} - V_{1f}}{V_{1i} - V_{2i}}$$

Donde C_R es precisamente el coeficiente de restitución, que toma valores entre 0 y 1. El valor 1 se da en un choque perfectamente elástico, donde se conserva tanto el momento lineal como la energía cinética del sistema. El valor $0 \leq C_R \leq 1$ se da en un choque inelástico (o plástico central) donde sólo se conserva el momento lineal, una porción de la energía cinética inicial de las partículas se "consume" durante el choque, convirtiéndose en energía de deformación plástica, energía sonora, calor, etcétera. Debido a que las pómez tienen un coeficiente de restitución más bajo que los líticos (pómez: 0.27; líticos: 0.48), estas actúan como esponjas, absorbiendo los impactos y limitando la transferencia de la energía de una partícula a otra y consecuentemente la conservación de la energía cinética.

Y finalmente la rugosidad de la pómez es mayor, lo que podría agregar mayor fricción y así, reducir la velocidad de un flujo.

En la segunda observación la razón del porque el efecto de la pómez se reduce al reducirse el tamaño de grano puede ser atribuido a que la diferencia en la densidad de las partículas disminuye conforme se disminuye el tamaño de grano. Las partículas más finas son más compactas debido a que tienen menor número de vesículas. Esto aunado al hecho de que a

menor granulometría menor agitación y mejor conservación de la energía (Cagnoli y Piersanti, 2015).

Y finalmente el motivo por el que en la clase -3 Phi, las mezclas P0 y P100 tuvieron comportamientos similares puede ser atribuido al tamaño de grano y a la interacción entre las partículas. En ambos casos las partículas se mueven con movimiento puramente inercial con número limitado de colisiones entre partículas (se trata de partículas grandes y el número de partículas por unidad de volumen es relativamente bajo), relativamente bajas fricciones entre las mismas y la canaleta. Por esta razón la velocidad es determinada principalmente por la fuerza de gravedad que actúa indistintamente sobre ambas litología.

V.1.2.2 Variaciones observadas después del cambio de pendiente

La presencia de la pómez en la mezcla tiene influencia en el comportamiento de las avalanchas granulares después del cambio de pendiente. De acuerdo a los resultados (Figuras IV.6 - 16) el efecto de la presencia de pómez en esta zona es aumentar la velocidad de la mezcla (en comparación a la de antes del quiebre) y a mayor cantidad de pómez mayor aumento de velocidad. El aumento en la velocidad debido a la cantidad de pómez puede deberse a su bajo coeficiente de restitución, y mayor fricción debido a su rugosidad. Esto provoca que el frente del flujo frene inmediatamente después del cambio de pendiente (pero antes del láser 10) lo que causa que el cuerpo del flujo “impacte” y aporte un mayor empuje (Bartali et al, 2015) y de esta manera aumente ligeramente su velocidad dependiendo del contenido de pómez, o que se observe una menor pérdida de velocidad con respecto a otras mezclas.

Por otro lado, se observa que a menor tamaño de las partículas es necesaria una mayor cantidad de pómez para que el flujo pudiera incrementar la velocidad después del cambio de pendiente o que la pérdida sea menor.

En la figura IV.16 se observa que las mezclas finas y sobre todo 1 Phi, muestran una tendencia a disminuir o mantener la velocidad. Solo la mezcla P100 de 1 Phi incrementó ligeramente la velocidad. En 0 Phi, a partir de un contenido de 75 % de pómez (P75) la

velocidad del flujo pudo registrar un aumento (Sin embargo, se observa una tendencia a que al aumentar el contenido de pómez la pérdida de velocidad es cada vez menor). En -1 Phi P25 prácticamente conservó su velocidad, pero se observa que al aumentar la cantidad de pómez la pérdida de velocidad disminuye, y la mezcla P100 registró un aumento más notorio en la velocidad. -2 Phi requirió una mezcla de 50% pómez para poder registrar un aumento y finalmente en -3 Phi es el único tamaño de grano en donde una mezcla de líticos registró un aumento en la velocidad. Ante un cambio de pendiente el efecto de la pómez (menor coeficiente de restitución) ahoga el incremento de la temperatura granular (grado de agitación) y reduce la disipación de energía. El efecto se puede comparar a dar cierto grado de “cohesión” al flujo.

V.1.2.3 Variaciones observadas relacionadas al alcance

En lo referente al alcance, una inspección general a las figuras IV.17-21 indica que entre más fino es el material mayor alcance, sin embargo, al analizar la cantidad de pómez en cada clase granulométrica se observa que en un flujo sin pómez (P0) el mayor alcance lo tienen los gruesos, siendo la mezcla -1 Phi P0 la que registro el mayor alcance de todas las mezclas en todas las clases granulométricas pero al añadir 25% de pómez a la mezcla esto cambia radicalmente (Tabla V.1) y entonces son los finos los que adquieren los mayores alcances.

Tabla V.1 Alcance medido de todas las granulometrías con sus diferentes proporciones de pómez.

P0	P25	P50	P75	P100
1 Phi (1.29 m)	1 Phi (1.30 m)	1 Phi (1.35 m)	1 Phi (1.30 m)	1 Phi (1.30 m)
0 Phi (1.30 m)	0 Phi (1.30 m)	0 Phi (1.25 m)	0 Phi (1.34 m)	0 Phi (1.25 m)
-1 Phi (1.45 m)	-1 Phi (1.15 m)	-1 Phi (1.20 m)	-1 Phi (1.20 m)	-1 Phi (1.05 m)
-2 Phi (1.40 m)	-2 Phi (1.10 m)	-2 Phi (1.05 m)	-2 Phi (1.07 m)	-2 Phi (0.85 m)
-3 Phi (1.30 m)	-3 Phi (1.12 m)	-3 Phi (1.17 m)	-3 Phi (1.00 m)	-3 Phi (0.80 m)

Sin embargo, en un análisis más detallado, se observa que los finos registraron alcances similares sin importar la cantidad de pómez y lo que en realidad sucede es que los gruesos sufren una disminución considerable en el alcance conforme aumenta el contenido de pómez.

La disminución de la velocidad del flujo debido al contenido de pómez, aunado a el bajo ángulo del módulo de sedimentación (4° , lo que si bien es constante para todas las mezclas, cada una de acuerdo a sus características granulométricas y proporción de pómez reaccionará de manera diferente), la fricción extra debido a la rugosidad de la pómez, y la mayor disipación de energía por parte de las granulometrías gruesas, puede ser la explicación por la cual las fracciones de grano grueso disminuyen sus alcances conforme se agrega pómez a la mezcla.

Como se ha venido observando anteriormente entre más fino es el material más tiende a uniformizar su comportamiento y a reducir el efecto de la pómez, es probablemente, que por tal motivo, las fracciones finas conservan sus alcances prácticamente iguales conforme sin importar el contenido de pómez.

Esto puede ser observado de forma clara en la Figura V.2 donde se aprecia que en -3 o -2 Phi existe mucha variación entre los alcances de P0 y P100 mientras que en 0 o 1 Phi esta diferencia se reduce considerablemente.

V.2 Mezclas Polidispersas

V.2.1 Influencia del tamaño de grano en la velocidad y alcance.

Los flujos granulares con mezclas de diferentes granulometrías y contenido de pómez, teniendo el mismo volumen y fluyendo bajo las mismas condiciones experimentales, muestran comportamientos diferentes. Se utilizaron dos tipos de distribuciones granulométricas (Weibull y Gauss) (ver capítulo III), y en esta sección se discuten los resultados obtenidos.

V.2.1.1 Variaciones observadas en la canaleta

Durante su paso por la canaleta, las mezclas con distribución granulométrica de tipo Gauss resultaron ser ligeramente más veloces que las de tipo Weibull (Figuras IV.27 y 28).

Las mezclas Weibull contienen mayor cantidad de clastos gruesos (-3, -2 y -1 Phi) y por lo antes visto con las mezclas monodispersas, se podría esperar que fueran más veloces, sin embargo, esto no fue así. Las mezclas Gauss fueron ligeramente más rápidas (Figura V.5) probablemente debido a que su contenido de partículas de grano grueso (aproximadamente 70% en volumen) se conjuntó con su mayor masa (ergo inercia) y su mayor contenido de material fino (20% más que las Weibull) podría permitir cierto grado de incorporación de aire dentro de la mezcla reduciendo así la fricción, aunque este pudiera llegar a ser mínimo y podría no influir en gran medida.

Las mezclas Gauss mostraron una menor variabilidad en las velocidades en todas sus mezclas en comparación con las Weibull. Esto puede estar asociado a la mayor cantidad de partículas finas lo cual disminuye la temperatura granular, además de que al disminuir el tamaño se reduce la porosidad de la pómez y la diferencia de densidades, lo cual reduce el efecto que ésta pueda tener en el flujo.

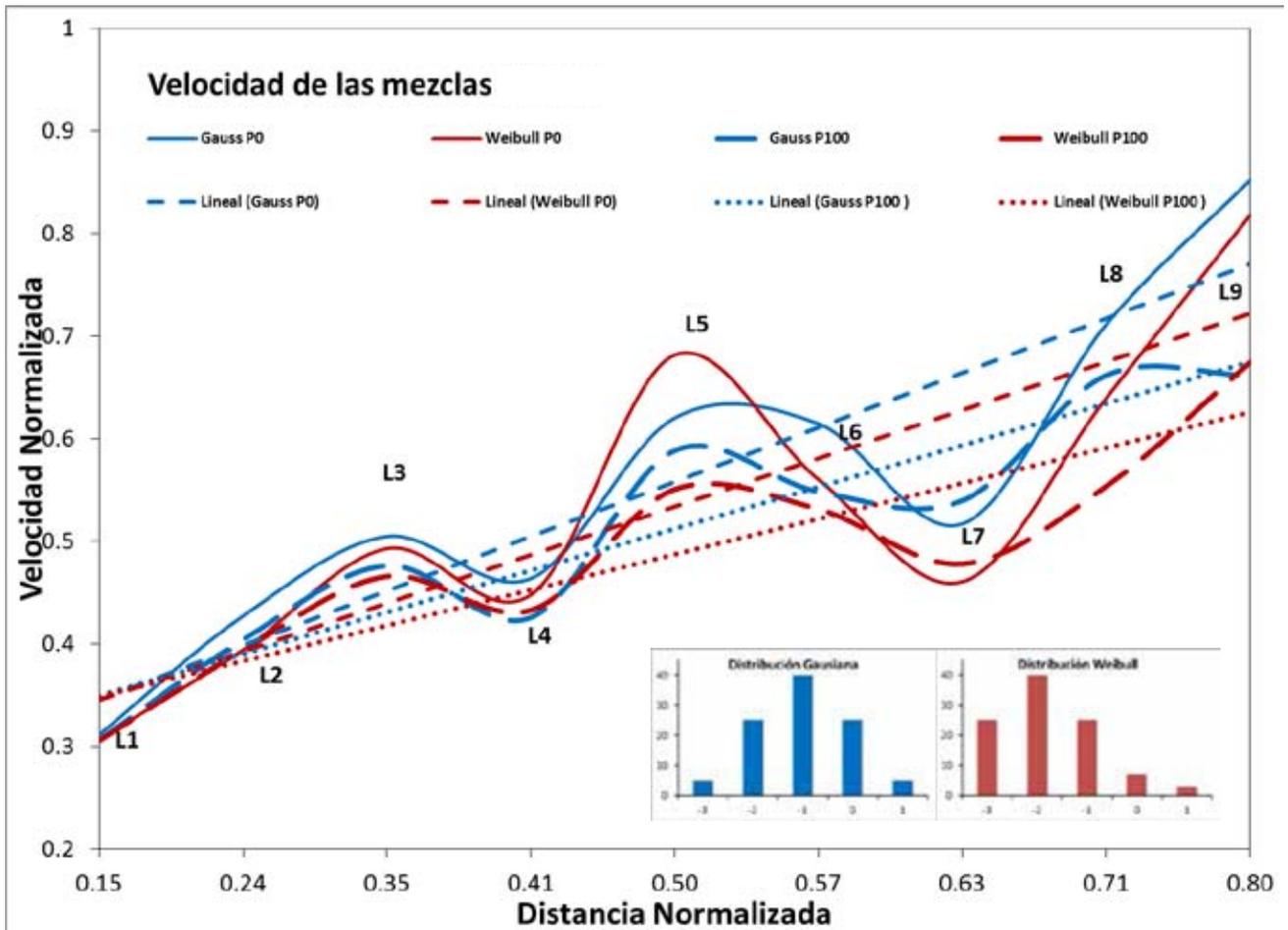


Figura V.5 Gráfico que muestra la velocidad registrada en los primeros nueve láseres de la canaleta (correspondientes solo a la canaleta – plano inclinado). Las líneas continuas representan a las mezclas formadas únicamente por líticas, mientras que las líneas curvas formadas por segmentos de líneas gruesas representan las mezclas formadas únicamente por pómez. Se observan también las líneas de tendencia (lineal) que representan la tendencia general de la velocidad de estas mezclas.

De acuerdo con los datos de las celdas de carga (Figuras IV.34 y 35) el comportamiento de ambos tipos de mezclas es muy similar. Se observa un aumento hacia la celda 2 y una progresiva disminución hasta la celda 4. Después del cambio de pendiente se observa un aumento general. El comportamiento similar de ambas mezclas y diferente al de las mezclas monodispersas indica un cambio en la dinámica interna de los flujos. Probablemente debido a la interacción de partículas de diferentes granulometrías lo que

causa segregación, y es probable que estos cambios e interacciones afecten de la misma forma a las mezclas Gauss y Weibull en cuanto a la presión de fondo del flujo se refiere.

V.2.1.2 Variaciones observadas en el cambio de pendiente

Justo antes del cambio de pendiente, ambas mezclas no muestran una diferencia significativa en sus velocidades (Figuras IV.36 y 37). Después del cambio de pendiente, las mezclas Weibull (con 20% más de clastos gruesos) muestran, aumentos de velocidad superiores a los de las mezclas tipo Gauss. Esto puede ser explicado en términos de las propiedades internas de ambas distribuciones. Las partículas gruesas tienen mayor agitación e inercia y menor fricción al contrario de las finas (Sulpizio, 2016), lo cual puede contribuir a que las mezclas tipo Weibull aumenten la velocidad después del cambio de pendiente. Es probable que los finos absorban el impacto.

V.2.1.3 Variaciones observadas en relación al alcance

En promedio el alcance es mayor para las mezclas con mayor cantidad de granos finos (Figuras IV.34 y 35), sin embargo, la mayoría de estos alcances se encuentran en lugares en donde se traslapan las barras de error. Alcances mayores para granulometrías finas fueron observados en los experimentos monodispersos, es probable que también puede ser debido a la mayor disipación de energía presente en las mezclas Weibull, más ricas en gruesos, sin embargo la diferencia de alcances es muy poca.

V.2.2 Influencia de la relación pómez – líticos en la velocidad y alcance.

Para iniciar esta parte de la discusión es necesario aclarar que los flujos con proporciones P0 (solo líticos) serán tomados como un flujo de referencia (condición inicial) en donde no existe influencia alguna de la pómez. Progresivamente se añadió pómez (manteniendo constante el volumen total de la mezcla) para ver el efecto que ésta puede tener y como se va atenuando o intensificando de acuerdo a la cantidad añadida.

V.2.2.1 Variaciones observadas en la canaleta

De acuerdo a las Figuras Figuras IV.27 y 28 al agregar 10% en volumen de pómez a las mezclas (tanto Gauss como Weibull) la velocidad del flujo se verá afectada y esta se reducirá. En las mezclas tipo Weibull se observa (figura V.6a) que la reducción es gradual conforme se aumenta el contenido de pómez. En el caso de las mezclas Gaussianas (Figura V.6b) existe una gran diferencia en la línea de tendencia de la velocidad entre la mezcla P0 y el resto. La reducción de velocidad del flujo asociada al contenido en volumen de pómez (al igual que en las monodispersas) puede estar relacionada al bajo coeficiente de restitución de la pómez impidiendo la transferencia de energía cinética por completo. Y a la rugosidad de la pómez lo que podría inducir mayor fricción en el flujo. Existe también una diferencia en la fluctuación de la velocidad de ambas distribuciones, en específico después del Láser 4, donde las mezclas Weibull ricas en líticos muestran un aumento de velocidad notable. Esta diferencia de velocidades entre las mezclas Weibull está relacionada con dos aspectos. El primero, el aumento inversamente proporcional al contenido de pómez probablemente debido al efecto reductor de velocidad de ésta y el segundo existe una mayor variabilidad de los resultados en las mezclas con clastos gruesos.

En las mezclas Weibull tenemos un 90% de materiales gruesos y 10% de materiales finos, consecuentemente el efecto de la pómez se verá más reflejado en este tipo de mezclas que en las Gauss.

Entre más fino sea el material el efecto de la pómez se va reduciendo, es probable que ese sea el motivo por el cual al aumentar el contenido de pómez en las mezclas Gauss la reducción de la velocidad no varié mucho y sea la pómez de -1 Phi la que reduzca en mayor medida la velocidad del flujo.

V.2.2.2 Variaciones observadas después del cambio de pendiente

Después del cambio de pendiente la tendencia general de todas las mezclas es a aumentar la velocidad (Figuras IV.29 – 33). Únicamente la mezcla GP0 registró una pérdida del 31% de su velocidad previa al cambio de pendiente, probablemente debido a la cantidad mayor de finos (mayor fricción). Como se describió y explicó previamente, en un cambio de pendiente la pómez tiende a aumentar la velocidad de un flujo, y en mezclas polidispersas no fue la excepción. Se puede observar que al agregar solo 10% de volumen de pómez a la mezcla, se observan cambios. Las mezclas Gauss mostraron aumentos moderados de velocidad mientras que las Weibull la aumentan notablemente. Este efecto puede atribuirse a la granulometría. Es posible que la cantidad de pómez de grano grueso en las mezclas Gauss provoque estos mismos aumentos, sin embargo al tener una igual cantidad de finos el aumento no sea tan grande como en las Weibull.

V.2.2.3 Variaciones observadas relacionadas con el alcance

Las figuras IV.34 y 35 muestran la relación entre la masa y el alcance para ambas mezclas. Analizando estas graficas las mezclas con mayor contenido de pómez muestran los menores alcances de todas. GP0 tiene la mayor velocidad, el alcance más grande y la masa mayor de todas las mezclas polidispersas (ver sección de resultados, mezclas polidispersas). Si consideramos el alcance como un balance entre fuerzas de inercia y fricción, parece ser que los clastos de pómez aumentan la fricción y los fragmentos líticos aumentan la inercia. Esto probablemente debido a las diferentes propiedades elásticas de ambos componentes, los cuales disipan energía cinética en diferentes maneras.

El alcance disminuyó con el aumento de la cantidad de pómez en la mezcla (con un volumen constante para las mezclas) probablemente asociado a la disminución progresiva en la masa debido al aumento progresivo de clastos de baja densidad. Aparentemente entre mayor masa mayor alcance.

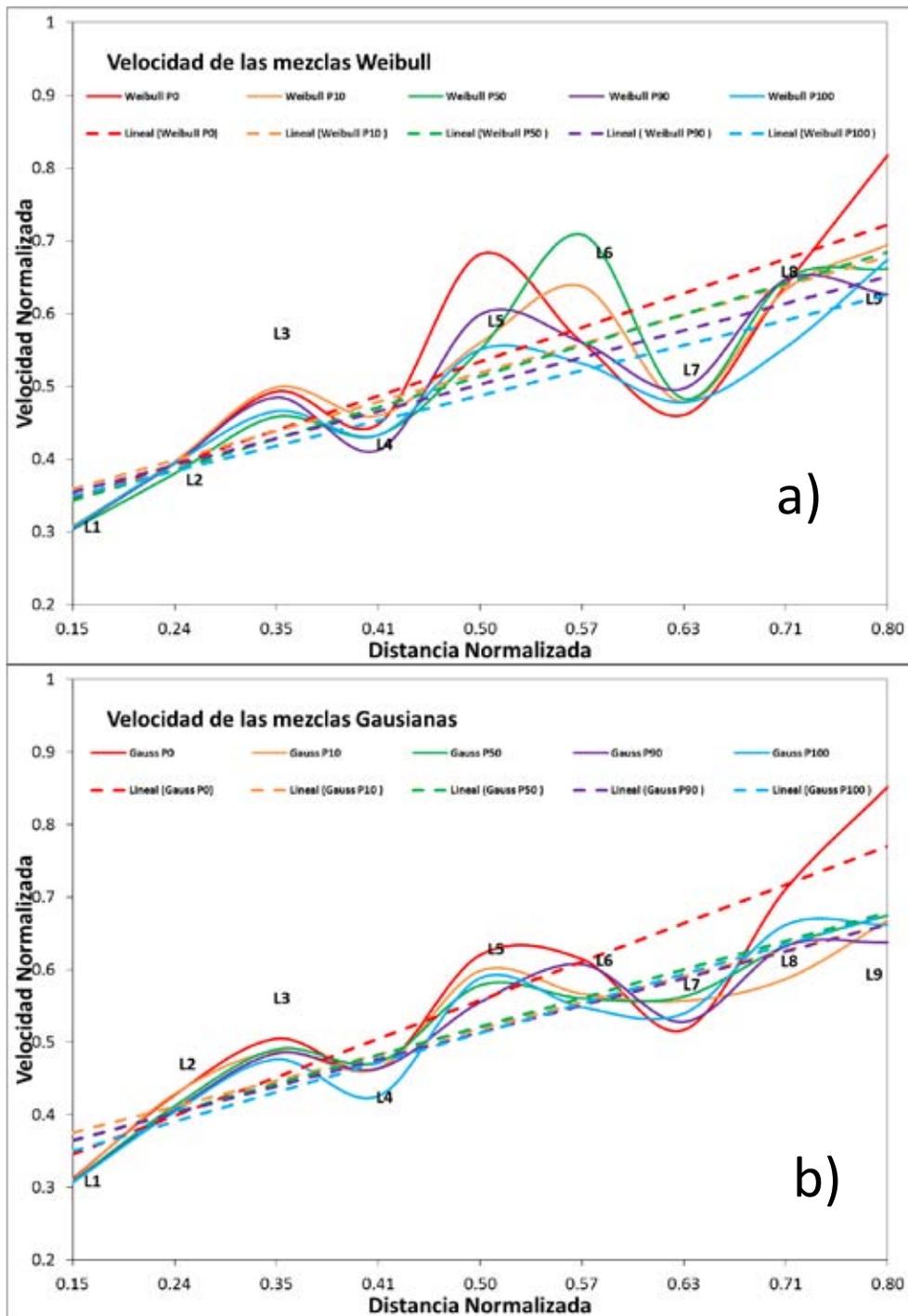


Figura V.6. Variación de la velocidad de acuerdo al contenido de pómez para las mezclas Weibull (a) y Gaussianas (b).

Otro factor que puede estar asociado es el efecto que la pómez de grano grueso tiene de frenar el flujo. Las mezclas Weibull tienen 20% más material grueso por lo que se podría esperar que dicho efecto de la pómez fuera más notorio en dicha distribución.

La mayor cantidad de finos en las mezclas Gauss determinó una menor disipación de energía cinética e impulso. Es posible que la fluidización sea un factor que ayude a estas mezclas a obtener mayores alcances

V.2.2 Influencia de la relación pómez – líticas en la Segregación longitudinal en el depósito: comparación con un caso real.

Los experimentos con 50% de cada material fueron estudiados para determinar los efectos de la segregación entre la pómez y los líticos dentro del depósito final. Las Figuras IV.38 y 39 muestran el porcentaje de pómez presente en el depósito resultante a diferentes distancias partiendo del cambio de pendiente. La figura V.7 muestra las imágenes panorámicas de los depósitos estudiados.

Se observan dos tipos de segregación actuando al mismo tiempo: segregación por densidad y segregación por tamaño. En general los procesos de segregación parecen ser más efectivos en la mezcla Gaussiana. Se observó una gradación inversa en ambas mezclas. Los clastos más gruesos se concentraron en la parte superior del depósito y en el caso de la mezcla Weibull también se concentraron en la parte distal del depósito. En cuanto a la segregación por densidad, esta es más evidente en la mezcla Gaussiana, así como también resulta evidente longitudinalmente en ambos depósitos. En la mezcla Weibull la distribución de la pómez es más dispersa. Esto concuerda con lo observado por Cagnoli y Romano (2012b), Cagnoli y Romano (2013) y Cagnoli y Piersanti (2015) en donde se afirma que los clastos gruesos tienden a tener velocidades de segregación vertical dos veces más grandes que los finos. Además de que entre clastos gruesos existe mayor agitación.

En general la distribución de la pómez apunta a que no solo se concentra en la parte superior de los depósitos sino que también llega a concentrarse hacia las partes distales de los depósitos llegando a encontrarse partes formadas únicamente por material de baja densidad.

Los procesos de segregación observados en estos experimentos concuerdan con las observaciones en casos naturales de corrientes piroclásticas en donde se documentó la segregación de los materiales pumiceos (Calder et al., 1999; Calder et al., 2000; Pittari et

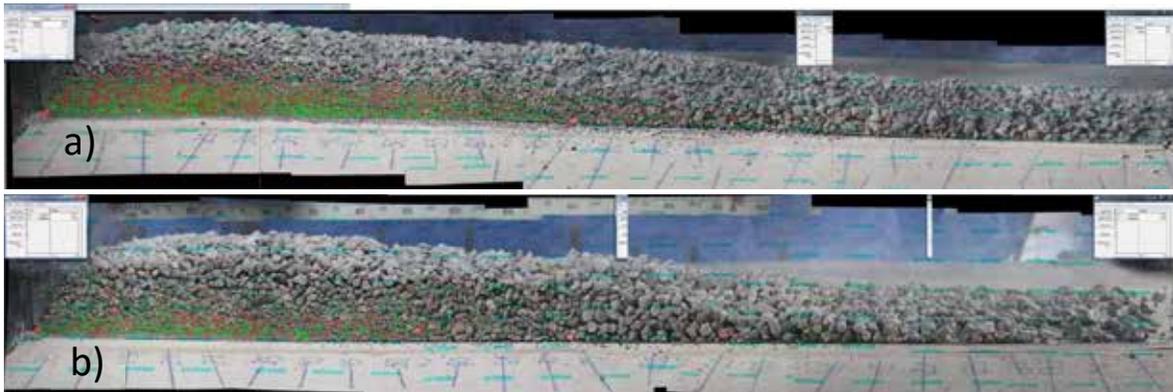


Figura V.7. Imagen panorámica de los depósitos GP50 (a) y WP50 (b). Se muestra el conteo hecho con el software Image Pro. Solo se contaron las partículas que se encontraban en la pared lateral del depósito. Las marcas rojas corresponden a partículas de pómez y las verdes a los líticos

al., 2005), así como la separación de la porción menos densa, la cual está concentrada por lo general en la parte superior del flujo. Esta separación generalmente termina con un flujo secundario constituido en su mayoría por pómez, el cual registra mayores alcances. La porción más densa constituida en su mayoría por líticos es depositada en las partes proximales mientras que en áreas distales los depósitos estarán conformados en su mayoría por fragmentos de pómez. Fenómeno similar a lo registrado en nuestros experimentos en donde podemos apreciar que aproximadamente a los 70 cm del depósito (0.5 de distancia normalizada) después del cambio de pendiente, el contenido de pómez comienza a incrementarse en la parte superior del depósito formado dos capas con diferentes propiedades. De acuerdo a Calder et al. (2000), la interface entre estas capas se transforma en una zona de gran cizallamiento debido a la diferencia de propiedades de ambos materiales (densidad, coeficiente de restitución, coeficiente de fricción, forma y rugosidad de las partículas, etc). Buesch (1992) Sugirió que el desacoplamiento podría ocurrir debido

a la ineficiente transferencia de momentum entre la capa superior de pómez y la inferior de líticos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, al observar los cambios en la velocidad de un flujo en presencia de un cambio abrupto de pendiente se pudo observar que existe una gran diferencia entre el comportamiento de ambos materiales, así que una ineficiente transferencia de energía entre los materiales es entendible y el desacoplamiento (independientemente de la escala) puede ocurrir.

MEZCLAS MONODISPERSAS

Influencia de la granulometría

DESCRIPCIÓN		INTERPRETACIÓN	
VELOCIDAD EN CANALETA	<ul style="list-style-type: none"> Existe una relación entre granulometría y velocidad en donde los clastos gruesos registraron velocidades mayores a los clastos finos. Conforme disminuye el tamaño de grano existe una menor variabilidad (de cada mezcla a lo largo de la canaleta y entre varias mezclas) en la velocidad de los flujos. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.1 – 5 (Pág. 71 - 75) Figuras V.1 a y b (Pág. 115) Figuras V.2 a (Pág. 118)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Los clastos gruesos son más veloces debido a su mayor temperatura granular, a que experimentan mayor inercia y menor fricción que los finos. Dado que son flujos controlados por la gravedad la mayor masa de las mezclas ricas en líticos (mayor inercia) podría explicar esta diferencia de velocidad. La menor variabilidad de los finos puede estar asociada a la mayor cantidad de partículas por unidad de volumen lo cual disminuye la temperatura granular. Además al disminuir el tamaño se reduce la porosidad de la pómez y la diferencia de densidades con los clastos líticos, lo cual reduce el efecto que ésta pueda tener en el flujo. El material fino se comporta como un cuerpo homogéneo mientras que los gruesos muestran un comportamiento discreto, es decir, cada partícula muestra un comportamiento diferente.
VELOCIDAD EN CAMBIO DE PENDIENTE	<ul style="list-style-type: none"> Los clastos gruesos incrementan mas su velocidad después del cambio de pendiente. Las fracciones finas tienden a conservar prácticamente su velocidad o presentar disminuciones moderadas (menores al 20%). 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.6 - 16 (Pág. 77 - 87)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Los clastos gruesos presentan mayores aumentos de velocidad debido a que estos experimentan mayor inercia mientras que los finos mayor fricción. Todo esto en referencia al contacto con la superficie y las paredes, no tanto entre las partículas. Los finos conservan su velocidad probablemente debido a un cierto grado de fluidización debido a su mayor capacidad de encapsular el aire en su interior que compensa el efecto de la mayor fricción. Por otro lado, la menor temperatura granular de los finos les permite una mejor conservación de la energía cinética del flujo.
ALCANCE	<ul style="list-style-type: none"> Existe una relación entre granulometría y alcance en donde se observa que, a menor tamaño de grano, mayor alcance del flujo (excepto en mezclas formadas únicamente por líticos, donde los gruesos registraron alcances mayores). 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.6 - 10 (Pág. 77 - 81) Figuras IV.17 - 21 (Pág. 89 - 91) Figura V.2b (Pág. 118)</p>	<ul style="list-style-type: none"> El mayor alcance de las mezclas finas puede ser explicado de dos formas: 1) Por la expansión del material al incorporar aire al interior (partes superficiales) del flujo al momento del cambio de pendiente (una especie de fluidización pero no como tal). 2) Las mezclas de grano fino tienden a disipar menos la energía lo que podría ayudar a conservar por mas tiempo su energía cinética e impulso. Esto debido a que su mayor numero de partículas hace que la agitación debida a la interacción entre partículas con el sustrato penetre menos en el interior y así la agitación del flujo sea mas baja y consecuentemente la disipación de energía sea menor.

Influencia de la Pómez

VELOCIDAD EN CANALETA	<ul style="list-style-type: none"> Conforme aumenta el contenido de pómez en la mezcla la velocidad del flujo disminuye. El efecto de la pómez se reduce conforme se reduce el tamaño de grano. En -3 Phi las mezclas puras (P0 y P100) presentan velocidades relativamente similares. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.1 – 5 (Pág. 71 - 75) Figuras V.3 (Pág. 121) Figuras V.4 (Pág. 122)</p>	<ul style="list-style-type: none"> La disminución de la velocidad del flujo al agregar volumen de pómez en la mezcla puede estar relacionada al bajo coeficiente de restitución de la pómez que impide una eficiente transferencia de energía cinética. También la rugosidad de la pómez podría inducir mayor fricción en el flujo. Conforme se reduce el tamaño se reduce la porosidad de la pómez y la diferencia de densidades, lo cual reduce el efecto que ésta pueda tener en el flujo. Las mezclas P0 y P100 de -3 Phi muestran velocidades similares debido a que ambas se mueven con movimiento puramente inercial con numero limitado de colisiones y poca fricción entre los clastos y la superficie de la canaleta.
VELOCIDAD EN CAMBIO DE PEND.	<ul style="list-style-type: none"> La presencia de pómez en las mezclas puede aumentar la velocidad del flujo después del cambio de pendiente o reducir la perdida de velocidad. (Excepto en -3 Phi) Conforme disminuye el tamaño de grano se necesita mayor porcentaje de pómez para lograr aumentar la velocidad o disminuir la perdida de esta en el flujo. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.6 - 16 (Pág. 77 - 87)</p>	<ul style="list-style-type: none"> La mayor velocidad o mejor conservación de la misma debido a la cantidad de pómez puede deberse a su bajo coeficiente de fricción. Este provoca que el frente del flujo pierda mas velocidad en el cambio de pendiente lo que causa que el cuerpo del flujo aporte inmediatamente después un mayor empuje y aumente o pierda menos velocidad (Bartali et al, 2015). A menor tamaño de grano menos evidente es el efecto de la pómez, esto explica porque es necesaria una mayor cantidad de pómez para que su efecto se vea reflejado en la respuesta del flujo.
ALCANCE	<ul style="list-style-type: none"> Flujos con clastos gruesos disminuyen su alcance conforme se agrega pómez en la mezcla. Clastos finos tienen alcances muy similares independientemente del contenido de pómez. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.6 - 10 (Pág. 77 - 81) Figuras IV.17 - 21 (Pág. 89 - 91) Figura V.2b (Pág. 118)</p>	<ul style="list-style-type: none"> La fricción provocada por la mayor rugosidad de la pómez, el menor coeficiente de fricción de ésta, además de la mayor dispersión de energía por parte de los clastos gruesos pueden ser la explicación por la cual las fracciones de grano grueso disminuyen sus alcances conforme se agrega pómez a la mezcla. La disminución de la diferencia de densidades entre líticos y pómez en clastos finos explica el porque de sus alcances similares.

M vs. A*

<ul style="list-style-type: none"> En clastos gruesos se observa que a mayor masa mayor alcance, sin embargo dentro de sus mezclas de pómez y líticos (P25, P50 y P75) esta tendencia no es constante. En clastos finos no se aprecia una relación evidente entre masa y alcance. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.17 - 21 (Pág. 89 - 91) Figura V.2b (Pág. 118)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Al aumentar la cantidad de líticos en la mezcla se aumenta la masa. La mayor cantidad de masa aumenta la inercia del flujo lo que produce alcances mayores. La combinación de pómez y líticos causa que este patrón no se cumpla del todo, eso probablemente debido a la mayor fricción ejercida por la rugosidad de la pómez, y su efecto de disminuir la velocidad del flujo. La razón por la cual los finos no muestren una relación masa – alcance clara, puede depender de su capacidad de preservar por mas tiempo la energía cinética y el impulso. Aunado al hecho de que a menor tamaño el efecto de la pómez se reduce.
---	--	--

D. De M.**

<ul style="list-style-type: none"> Las mezclas gruesas muestran una disminución progresiva conforme avanzan en la canaleta. Las finas muestran ligeros aumentos. Las mezclas finas muestran una disminución mayor hacia la celda 2 que las gruesas. Aumentos, ligeros aumentos, o disminuciones menores en estos datos pueden indicar una aceleración previa, disminuciones mas grandes pueden referirse a una desaceleración previa. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.22 - 26 (Pág. 93 - 95)</p>	<ul style="list-style-type: none"> La disminución progresiva en las mezclas de gruesos puede deberse a 1) su alta temperatura granular la cual expande el flujo, 2) distribución y adelgazamiento del cuerpo de la avalancha, 3) la cantidad de partículas por unidad de volumen y los vacíos entre granulos debido a la granulometría es mayor, esto podría explicar los aumentos en los finos. Esto podría indicar que existe mayor expansión del flujo en esta zona de la canaleta. Esto puede explicarse basándose en el efecto stick-slip en donde se hace referencia a que la parte frontal del flujo pierde velocidad y el cuerpo transfiere momentum lo que hace acelerar al flujo y esto se vea reflejado en una mayor presión del fondo del flujo.
--	---	---

* Relación Masa vs. Alcance

** Distribución de la masa/ Presión del flujo en el fondo

MEZCLAS POLIDISPERSAS

Influencia de la granulometría

DESCRIPCIÓN		INTERPRETACIÓN
VELOCIDAD EN CANALETA	<ul style="list-style-type: none"> Las mezclas Gauss mostraron velocidades ligeramente mayores que las Weibull. Las mezclas Gauss mostraron una menor variabilidad en la velocidad de los flujos. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.26 – 27 (Pág. 86 - 87) Figuras V.6 (Pág. 115)</p> <ul style="list-style-type: none"> La mayor velocidad de las mezclas Gauss puede estar relacionada con el hecho de que al tener mayor cantidad de finos la incorporación de aire dentro de la mezcla pueda reducir la fricción. Un factor mas a considerar es que las Mezclas Gauss contienen una masa mayor y por consiguiente podrían presentar una inercia mayor. La menor variabilidad de la mezcla Gauss puede estar asociada a la mayor cantidad de partículas finas lo cual disminuye la temperatura granular, además de que al disminuir el tamaño se reduce la porosidad de la pómez y la diferencia de densidades, lo cual reduce el efecto que ésta pueda tener en el flujo.
VELOCIDAD EN CAMBIO DE PENDIENTE	<ul style="list-style-type: none"> Las mezclas Weibull registraron aumentos de velocidad en este punto, mientras que las Gauss perdieron velocidad. (tomando en cuenta solo muestras puras (WP y GP 0 y 100 para analizar solo el efecto de la granulometría). 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.28 - 31 (Pág. 89 - 92)</p> <ul style="list-style-type: none"> Las mezclas Weibull presentan aumentos de velocidad debido a que gracias a que son mezclas predominantemente gruesas pudieron experimentar mayor inercia mientras que las Gauss mayor fricción. Al momento del cambio de pendiente es probable que los finos absorban el impacto, mientras que las mezclas Weibull sean mas agitadas y muestren mayor velocidad.
ALCANCE	<ul style="list-style-type: none"> Las mezclas Gauss registraron mayores alcances que las Weibull. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.28 - 29 (Pág. 89 - 90) Figuras IV.31 - 33 (Pág. 94)</p> <ul style="list-style-type: none"> El mayor alcance de las mezclas Gauss puede ser debido a la mayor disipación de energía presente en las mezclas Weibull, mas ricas en gruesos, sin embargo la diferencia de alcances es muy poca.

Influencia de la Pómez

VELOCIDAD EN CANALETA	<ul style="list-style-type: none"> La presencia de pómez en las mezclas disminuye la velocidad del flujo. Aun con solo 10% en volumen se observan cambios significativos en ambas distribuciones. En las mezclas Weibull entre mayor sea el contenido de pómez mayor será la reducción en la velocidad, en las Gauss los diferentes contenidos de pómez reducen de manera similar su velocidad. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.26 – 27 (Pág. 86 - 87) Figuras V.7 (Pág. 119)</p> <ul style="list-style-type: none"> La reducción de velocidad del flujo asociada al contenido en volumen de pómez (al igual que en las monodispersas) puede estar relacionada al bajo coeficiente de restitución de la pómez impidiendo la transferencia de energía cinética por completo. Y a la rugosidad de la pómez lo que podría inducir mayor fricción en el flujo. De acuerdo a los resultados, un 10% en volumen de pómez puede ser suficiente para lograr este efecto. Entre mas fino sea el material el efecto de la pómez se va reduciendo, es probable que ese sea el motivo por el cual al aumentar el contenido de pómez en las mezclas Gauss la reducción de la velocidad no varié mucho y sea la pómez de -1 Phi la que reduzca en mayor medida la velocidad del flujo.
VELOCIDAD EN CAMBIO DE PEND.	<ul style="list-style-type: none"> El contenido de pómez aparentemente afecta de manera distinta a las mezclas. Todas las Weibull, registraron aumentos de velocidad (y estos incrementos fueron mayores que en las Gauss), sin embargo no existe una relación clara entre la cantidad de pómez y el aumento, mientras que en las Gauss a mayor pómez mayor aumento. En las mezclas Gauss solo las mezclas pómez – líticos registraron aumentos de velocidad. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.28 - 31 (Pág. 89 - 92)</p> <ul style="list-style-type: none"> El mayor aumento de velocidad por parte de las mezclas Weibull, puede ser debido a la cantidad de pómez, tal como sucedió con las mezclas monodispersas. Otra posible razón podría ser un empuje por parte del cuerpo del flujo el cual colisiona con el frente que ha frenado inmediatamente después del cambio de pendiente (Bartali et al, 2015). Es posible que la cantidad de pómez de grano grueso en las mezclas Gauss provoque estos mismos aumentos, sin embargo al tener una igual cantidad de finos el aumento no sea tan grande como en las Weibull.
ALCANCE	<ul style="list-style-type: none"> En promedio las mezclas Gauss registraron alcances ligeramente superiores a las Weibull. En general el contenido de pómez disminuye progresivamente el alcance de las mezclas. Esto resulta mas evidente en las mezclas Gauss. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.28 - 29 (Pág. 89 - 90) Figuras IV.32 - 33 (Pág. 94)</p> <ul style="list-style-type: none"> La mayor cantidad de finos en las mezclas Gauss determinó una menor disipación de energía cinética e impulso. Es posible que la fluidización sea un factor que ayude a estas mezclas a obtener mayores alcances así mismo la mayor masa de estas puede generar mayor inercia. La fricción provocada por la rugosidad de la pómez y la mayor dispersión de energía por parte de los clastos gruesos pueden ser la explicación por la cual las mezclas Weibull registraron menores alcances. Debido a lo explicado en el punto anterior es posible que la cantidad de pómez de grano grueso presente en las mezclas Gauss sea suficiente para poder disminuir aun mas la velocidad del flujo y así reducir el alcance de estas mezclas y el efecto de la pómez sea mas importante en estas mezclas.

M vs. A*

<ul style="list-style-type: none"> En mezclas Weibull se observa que a mayor masa mayor alcance, sin embargo en las mezclas de líticos - pómez (P10, P50 y P90) esta tendencia no es constante. En las mezclas Gauss existe una clara relación entre masa y alcance, a mayor masa mayor alcance. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.32 - 33 (Pág. 94)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Al aumentar la cantidad de líticos en la mezcla se aumenta la masa. La mayor cantidad de masa aumenta la inercia del flujo lo que produce alcances mayores. La combinación de pómez y líticos causa que este patrón no se cumpla del todo, eso probablemente debido a la mayor fricción ejercida por la rugosidad de la pómez, y su efecto de disminuir la velocidad del flujo. Es posible que la fuerza dominante en las mezclas Gauss sea la masa o inercia, de esta forma al aumentar la masa se obtendrán mayores alcances.
--	--	--

D. De M.**

<ul style="list-style-type: none"> El comportamiento de ambos tipos de mezclas es muy similar. Se observa un aumento hacia la celda 2 y una progresiva disminución hasta la celda 4. Después del cambio de pendiente se observa un aumento general. Aumentos, ligeros aumentos, o disminuciones menores en estos datos pueden indicar una aceleración previa, disminuciones mas grandes pueden referirse a una desaceleración previa. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.21 - 25 (Pág. 81 - 83)</p>	<ul style="list-style-type: none"> El comportamiento similar de ambas mezclas y diferente al de las mezclas monodispersas indica un cambio en la dinámica interna de los flujos. Probablemente debido a la interacción de partículas de diferentes granulometrías lo que causa segregación, y es probable que estos cambios e interacciones afecten de la misma forma a las mezclas Gauss y Weibull en cuanto a la presión de fondo del flujo. Esto puede explicarse basándose en el efecto stick-slip en donde se hace referencia a que la parte frontal del flujo pierde velocidad y el cuerpo transfiere momentum lo que hace acelerar al flujo y esto se vea reflejado en una mayor presión del fondo del flujo..
---	---	---

Segr. P-L***

<ul style="list-style-type: none"> Existen dos procesos de segregación actuando al mismo tiempo: Por tamaño y por densidad. En general la segregación por tamaño es mas efectiva en la mezcla Weibull y por densidad en las Gauss. Sin embargo, se desarrolla gradación inversa en ambos casos. Existe segregación longitudinal de la pómez que se concentra hacia la parte distal del deposito. 	<p>FIGURAS RELACIONADAS: Figuras IV.36 - 37 (Pág. 98)</p>	<ul style="list-style-type: none"> De acuerdo a Cagnoli y Manga (2005) la densidad gobierna la dirección de segregación de los materiales mientras que el tamaño de grano gobierna la velocidad de segregación y los clastos gruesos se segregan el doble de rápido que los finos. Esta podría ser la explicación del porque de la dispersión de los datos de segregación de las mezclas Weibull, la segregación vertical predomina. La segregación longitudinal o enriquecimiento de pómez hacia la parte distal del deposito esta en relación a las propiedades de los materiales (densidad, coeficiente de restitución, de fricción, forma, rugosidad). El desacoplamiento de capas debido a las diferencias de propiedades entre ellas fue sugerida por Calder et al (2000).
--	--	--

* **Relación Masa vs. Alcance**

** **Distribución de la masa/ Presión del flujo en el fondo**

*** **Segregación Pómez – Líticos en el depósito.**

CONCLUSIONES

○ CONCLUSIONES

VI.1 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos y a la interpretación de estos se puede concluir lo siguiente:

Los experimentos descritos aquí revelan información importante acerca de flujos granulares constituidos por una mezcla de materiales de diferente densidad y, por tanto, de diferentes propiedades físicas. A continuación se reportan las conclusiones separadas por tipología de las mezclas (mono y polidispersas), seguidas por conclusiones generales.

VI.1.1 Conclusiones flujos MONODISPERSOS:

- Granulometría y densidad actúan opuestamente en un plano inclinado. Conforme aumenta el tamaño de grano aumenta la velocidad. Conforme aumenta el contenido de clastos de baja densidad disminuye la velocidad (a paridad de volumen y condiciones iniciales)
- Un contenido de 25% en volumen de pómez es capaz de cambiar la cinemática de un flujo granular monodisperso.
- El tamaño de grano influye en la variabilidad de los resultados. Clastos finos tienden a mostrar resultados similares aun variando factores como concentración de pómez.
- Se encontró que el tamaño de grano disminuye este efecto. En general los efectos de la pómez sobre un flujo granular son más fuertes en granulometrías gruesas.
- En un cambio de pendiente el tamaño de grano determina si el flujo acelera o frena (a mayor tamaño mayor velocidad). La densidad de los clastos determina que tanto aumenta (a mayor contenido de pómez mayor aumento de velocidad)
- Existe una relación entre granulometría y alcance en donde se observa que a menor tamaño de grano mayor alcance del flujo
- Se demostró que en granulometrías gruesas la pómez tiene un efecto importante en el alcance de los flujos haciéndolo disminuir conforme crece su contenido en volumen en la mezcla

- Las celdas de carga proporcionan información indirecta acerca de los cambios de velocidad del flujo. Aumentos, ligeros aumentos, o disminuciones menores en estos datos pueden indicar una aceleración previa, disminuciones más grandes pueden referirse a una desaceleración previa.

VI.1.2 Conclusiones flujos POLIDISPERSOS:

- En mezclas polidispersas el tamaño de grano no ejerce una influencia tan marcada como en los monodispersos. La velocidad de los flujos monodispersos parece estar más en función de factores como masa, inercia y acomodo de las partículas.
- Las mezclas con mayor contenido de gruesos mostraron aumentos mayores de velocidad después del cambio de pendiente.
- Las mezclas con mayor cantidad de finos tuvieron mayores alcances.
- 10% de volumen de pómez en la mezcla es suficiente para cambiar la cinemática del flujo sin importar la granulometría.
- El efecto de la pómez es más visible en mezclas con mayor contenido de clastos gruesos.
- En mezclas polidispersas, la pómez también tiende a conservar y/o aumentar la velocidad de un flujo después de un cambio de pendiente.
- El alcance de los flujos disminuyó conforme se aumentó el contenido de pómez.
- La segregación por densidad fue más efectiva en la mezcla con distribución gaussiana.
- En mezclas con mayor contenido de clastos gruesos la segregación por tamaño es más efectiva que la segregación por densidad.
- Longitudinalmente existe un desacoplamiento de los materiales con diferente densidad, dando como resultado una parte proximal rica en líticos y una distal rica en pómez. Este resultado concuerda con las observaciones hechas en casos reales de corrientes piroclásticas de densidad en los volcanes Montserrat, Tenerife y Lascar.

VI.1.3 Conclusiones generales:

Sin lugar a dudas los clastos de diferente densidad tienen efectos notables en la dinámica y cinemática de los flujos granulares. El factor densidad debería ser tomado en cuenta en programas que simulen el comportamiento de corrientes piroclásticas de densidad, para, ayudar a calcular de manera más realística las áreas amenazadas por este tipo de peligros.

Otro punto general muy importante que emerge de estos estudios es que no solamente la granulometría de las avalanchas es un factor determinante que condiciona su comportamiento, también la distribución en el tamaño de las partículas es un importante factor de control. Mezclas monodispersas y polidispersas pueden responder de manera completamente diferente frente a cambios de pendiente y obstáculos en condiciones similares. Esto es muy importante tomarlo en consideración cuando se diseñan experimentos a escala. Muchos experimentos analógicos hoy en día se realizan con mezclas monodispersas y materiales artificiales mientras que en la naturaleza las avalanchas son polidispersas y compuestas por material natural con partículas con propiedades anisótropas, irregulares y de diferente rugosidad.

Es importante resaltar que este estudio se centró en clases granulométricas específicas y limitadas. Existen tamaños de grano más finos que podrían añadir otro tipo de efectos (ej. fluidización, lubricación etc.).

Otro parámetro que en estos estudios no se tomó en cuenta es la cantidad de agua. Este factor abre a un mundo completamente diferente en el campo de los materiales granulares, es decir flujos de escombros con clastos de diferente densidad. Tema fascinante y de extrema importancia que queda abierto para estudios futuros.

REFERENCIAS

- Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., 2001, The Amazcala caldera, Querétaro, México, *Geology and geochronology: Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 111, p. 203-218.
- Allen, J.R.L., 1974a, Sedimentology of the Old Red Sandstone (Siluro-Devonian) in the Cleve Hills area, Shropshire, England: *Sedimentary Geology*, v. 12, p. 73-167.
- Allen, J.R.L., 1984, *Sedimentary Structures, Volume 1: Amsterdam, Elsevier Publishing Company*, 593 p.
- American Society for Testing and Materials 2009, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, ASTM C535, USA.
- Annual Book of ASTM standards, Section 4 Construction, volume 04.02 Concrete and Aggregates, ASTM C131 - 89, Standard Test Method for Resistance to degradation of small size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine
- Ayer, J.E. and Soppett, F.E., 1966, Vibratory compaction: II Compaction of angular shapes: *Journal of American Ceramic Society*, v. 49, p. 207-210.
- 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, London*, v. A225, p. 49-63.
- Barksdale, R. D., 1991, *The Aggregate Handbook: National Stone Association, Washington, DC*.
- Bartali, R., Sarocchi, D., Nahmad-Molinari, Y., Rodríguez-Sedano, L.A., 2012, Estudio de flujos granulares de tipo geológico por medio del simulador multisensor GRANFLOW-SIM: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 64, p. 265–275.

- Bartali, R., Sarocchi, D., Nahmad-Molinari, Y. 2015. Stick–slip motion and high speed ejecta in granular avalanches detected through a multi-sensors flume: *Engineering Geology*, v.195, p. 248 – 257.
- Borselli, L., Torri, D., Poesen, J., Laquinta, P., 2012, A robust algorithm for estimating soil erodibility in different climates: *Catena*, v. 97 p. 85-94.
- Boudon G., Camus G., Gourgaud A., Lajoie J., 1993, The 1984 nuée-ardente deposits of Merapi volcano, Central Java, Indonesia: stratigraphy, textural characteristics, and transport mechanisms: *Bulletin of Volcanology*, v. 55, p. 327-342.
- Branney, M.J., Kokelaar, B.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*, v. 54, p. 504–520.
- Branney, M.J., Kokelaar, P., 2002, Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites, in *Geological Society: Memoir*, London, v. 27, 152 p.
- Brennen, C.E., Sieck, K., Paslasky, J., 1983, Hydraulic jumps in granular material flow: *Powder Technology*, v. 35, p. 31–37.
- Buesch, D.C., 1992, Incorporation and redistribution of locally derived lithic fragments within a pyroclastic flow: *Geological Society of America Bulletin*, v. 104 p. 1193–1207
- Burgissier, A., Bergantz, G.W., 2002, Reconciling pyroclastic flow and surge: the multiphase physics of pyroclastic density currents: *Earth Planetary Science Letters*, v. 202, p. 405–418.
- Caballero, L., Sarocchi, D., Borselli, L., Cardenas, A. I., 2012, Particle interaction inside debris flows: Evidence through experimental data and quantitative clast shape analysis: *Journal of Volcanology and Geothermal research*, Vol., 231-232, 12 – 23 pp.
- Cagnoli, B., Manga, M., 2005, Vertical segregation in granular mass flows: A shear cell study: *Geophysical Research Letters*, v. 32, 10402, doi:10.1029/2005GL023165.
- Cagnoli, B., Romano, G.P., 2010, Effect of grain size on mobility of dry granular flows of angular rock fragments: An experimental determination: *Journal of Volcanology and Geothermal research*, v. 193, p. 18-24.

- Cagnoli, B., Romano, G. P., 2012b, Effects of flow volume and grain size on mobility of dry granular flows of angular rock fragments: A functional relationship of scaling parameters: *Journal of Geophysics Research*, v. 117, B10202, doi:10.1029/2012JB009374
- Cagnoli, B., Romano, G. P., 2013, Vertical segregations in flows of angular rock fragments: Experimental simulations of the agitation gradient within dense geophysical flows: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 265, p. 52–59.
- Cagnoli, B., Piersanti, A., 2015, Grain size and flow volume effects on granular flow mobility in numerical simulations: 3-D discrete element modeling of flows of angular rock fragments: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v.120, p. 2350–2366
- Calder, E. S., Sparks, R. S. J. and Gardeweg, M. C., 2000, Erosion, transport and segregation of pumice and lithic clasts in pyroclastic flows inferred from ignimbrite at Lascar Volcano, Chile: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 104, p. 201–235.
- Calder, E.S., and eight others, 1999, Mobility of pyroclastic flows and surges at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat: *Geophysics Research Letters*, v. 26, p. 537-540.
- Campbell, C. S., 1990, Rapid granular flows: *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 22, p. 57-92.
- Capra, L., Poblete, M.A., Alvarado, R., 2004, The 1997 and 2001 lahars at Popocatepetl volcano (central Mexico). Textural and sedimentological evidences to constrain their origin and hazard: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 131, p. 351-396
- Carey, S. N., 1991, Transport and deposition of tephra by pyroclastic flows and surges. *In: FISHER, R. V. & SMITH, G. A. (eds) Sedimentation in Volcanic Settings. SEPM, Special Publications*, v.45, p. 39-57.
- Carey, S. N., Sigurdsson, H., Sparks, R. S. J., 1988, Experimental studies of particle-laden plumes: *Journal of Geophysics Research*, v. 93, p. 314-15.
- Cas, R., Wright, J.W., 1987, *Volcanic Successions: Modern and Ancient: Allen and Unwin, London*, 528 pp.

- Chough, S.K., Sohn, Y.K., 1990, Depositional mechanisms and sequences of base surges, Songaksan tuff ring, Cheju Island, Korea: *Sedimentology* 37, 1115–1135
- Clarke, A., Voight, B., Neri, A. and Macedonio, G., 2002, Transient dynamics of vulcanian explosions and column collapse: *Nature*, v.415, p. 897–901.
- Clement, E., Rajchenbach, J. and Duran, J., 1995, Mixing of a granular material in a bi-dimensional rotating drum: *Europhysics Letters*, v. 30, p. 7–12
- Coulomb C.A., 1776, Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture: *Memoires de l'Academie Royale pres Divers Savants*, v. 7
- D'antonio, M, Capra L, Sarocchi D, Bellotti F., 2008. Reconstrucción del evento eruptivo asociado al emplazamiento del flujo piroclástico El Refugio hace 13 ka, volcán Nevado de Toluca (México): *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 25, núm. 1.
- Davenport, J. C., and Langer, W. H., 1998, Estimating Los Angeles degradation value using the Schmidt rebound hammer along the Front Range, Colorado: U.S. Geological Survey Open File Report 98-331, 38 p.
- Dellino, P., Isaia, R., Veneruso, M., 2004, Turbulent boundary layer shear flow as an approximation of base surge at Campi Flegrei: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 133, p. 211–228
- Dellino, P., Zimanowski, B., Buttner, R., La Volpe, L., Mele, D., Sulpizio, R., 2007, Large-scale experiments on the mechanics of pyroclastic flow: design, engineering, and first results: *Journal of Geophysical Research*, v. 112, B04202. <http://dx.doi.org/10.1029/2006JB004313>
- Denlinger, R. P., 1987, A model for generation of ash clouds by pyroclastic flows, with application to the 1980 eruptions at Mount St. Helens, Washington: *Journal of Geophysical Research*, v. 92, 10284-10298.
- Di Muro, A., A. Neri, and M. Rosi, 2004, Contemporaneous convective and collapsing eruptive dynamics: The transitional regime of explosive eruptions: *Geophysics Research Letters*, v.31, L10607, doi:[10.1029/2004GL019709](https://doi.org/10.1029/2004GL019709).

- Dolan, M. T. 2004 Observations of lahars along the Sacobia-Bamban river systems, Mount Pinatubo, Philippines [MS. thesis]: Michigan Technological University, Houghton, Michigan, 48pp.
- Drake, T.G., 1990, Structural features in granular flows: *Journal of Geophysical research*, v. 95, p. 8681-8696.
- Duran, J., Sands, 1999, *Powders, and Grains: An Introduction to the Physics of Granular Materials* (translated by A. Reisinger). Springer-Verlag New York, Inc., New York, ISBN 0-387-98656-1.
- Erbacci, G., Baxter, P.J., 2008, Transient 3D numerical simulations of column collapse and pyroclastic density current scenarios at Vesuvius: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 178, p. 378–396.
- Esposti Ongaro, T., Neri, A., Cavazzoni, C., Erbacci, G., Salvetti, M.V., 2007, A parallel multiphase flow code for the 3D simulation of explosive volcanic eruptions: *Parallel Computers*, v. 33, p. 541–560.
- Esposti Ongaro, T., and seven more, 2008, Transient 3D numerical simulations of column collapse and pyroclastic density current scenarios at Vesuvius: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 178, p. 378–396.
- Fagents, S. A., Gregg, T.K.P., Lopes, R.M.C. (Eds.), 2013, *Modeling Volcanic Processes: The Physics and Mathematics of Volcanism*: Cambridge University Press, 421 p.
- Finney, J.L., 1970a, *Proceedings of the Royal Society, London, Ser. A.*, 319: 479-493.
- Fisher, R. V., 1966, Mechanism of deposition from pyroclastic flows: *American Journal Science*, v. 264, p. 350-363.
- Fylstra, D., Lasdon, L., Watson, J., & Waren, A., 1998, Design and use of the Microsoft Excel Solver: *Interfaces*, v. 28(5), p. 29-55.
- Gaither, A., 1953, A study of porosity and grain relationships in experimental sands: *Journal of sedimentary Petrology*, v. 23, p. 180- 195.
- Goldsmith, W., 2001, *Impact: The theory and physical behaviour of colliding solids*: Dover Publications, New York.
- Gotoh, K. and Finney, J.L., 1974, Statistical geometrical approach to random packing density of equal spheres: *Nature*, v. 252, p. 202-205.

- Gray, J. M. N. T., Kokelaar, B. P., 2010, Large particle segregation, transport and accumulation in granular free-surface flows: *Journal of Fluid Mechanics*, v. 652, p. 105–137.
- Hagen, G.H.L., 1852, Bericht über die zur Bekanntmachung geeigneten Verhandlungen der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. pp. 35–42
- Hernández, J., Carrasco-Núñez, G., Aguirre-Díaz, G., 2009, Dinámica eruptiva de la “Pómez Ezequiel Montes” en la caldera Amazcala, centro de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 26(2), p. 482-500.
- Heywood, H., 1946, *Journal of Chemical Eng Soc. Imp. Coll.*, 2: 9-26.
<http://dx.doi.org/10.1029/2001JB000508>.
- Huppert, H.E., Turner, J.S., Carey, S.N., Sparks, R.S.J., Hallworth, M.A., 1986, A laboratory simulation of pyroclastic flows down slopes: *Journal of Geophysical Research*, 91, p. 179–199
- Ippolito, I., Annic, C., Lemaître, J., Oger, L., Bideau, D., 1995, Granular temperature: Experimental analysis: *Physical Reviews*, v.52 (2), p. 2072-2075.
- Iverson R.M., 2003. The debris-flow rheology myth. *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Rickenmann and Chen (eds). Millpress, Rotterdam, ISBN 90 77017 78
- Iverson R.M., Costa J.E., LaHusen R.G., 1992, Debris-flow flume at H.J. Andrews Experimental Forest, Oregon. U.S. Geological Survey Open-file Report 92-483.
- Iverson R.M., Logan M., Denlinger R.P., 2004, Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 2. Experimental tests: *Journal of geophysical research*, v. 109, f01015, doi:10.1029/2003JF000084.
- Iverson, Haye Hinrichsen, Dietrich E. Wolf (eds), *The Physics of Granular Media*. 2004, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. ISBN 978-3-527-60362-6,
- Iverson, R. M. and Vallance, J. W., 2001, New views of granular mass flows: *Geology*, v. 29, p. 115-118.
- Iverson, R. M., Reid, M. E. and Lahusen, R. G., 1997, Debris-flow mobilization from landslides: *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, v. 25, 85-138.
- Iverson, R.M., 1997, The physics of debris flows: *Reviews of Geophysics*, v. 35, p. 245-296.

- Jaeger, H. M. Nagel, S. R. y Behringer, R.P., 1996, Granular solids, liquids, and gases: Reviews of Modern Physics, v. 68, p. 1259.
- Kadanoff, L.P., 1999, Built upon sand: Theoretical ideas inspired by granular flows: Reviews of Modern Physics, v. 71, p. 435-444.
- Kahraman, S, Fener, M., 2007, Predicting the Los Angeles abrasion loss of rock aggregates from the uniaxial compressive strength: Mater Letters, v. 61, p. 4861-4865.
- Khakhar, D. V., McCarthy, J. J. y Ottino, J. M., 1997. Radial segregation of materials in rotating cylinders. Physical Fluids 9, 3600–3614
- Kasner E., Supnick F., 1943, The Apollonian Packing of Circles: Proceedings of the National Academic of Sciences, v. 29(11), p. 378–384.
- Kolbuszewski, J., 1948a, Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech., 1: 158-165.
- Kolbuszewski, J., 1948b, Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech., 7: 47-49.
- Kolbuszewski, J., 1950a, Research, 3: 478-483.
- Krattenmaker, Jim, 1998, Interview: Control Manager, Asphalt Paving Company: February 17
- Kurdin, R.D., 1973, Classification of mudflows: Soviet Hidrology, v. 4, p. 310-316.
- Nenov, I. P., Fylstra, D. H., 2003, Interval methods for accelerated global search in the Microsoft Excel Solver: Reliable Computing, v. 9(2), p. 143-159.
- Pierson, T. and Scott, K., 1985, Downstream dilution of a lahar: Transition from debris flows to hyperconcentrated stream flow: Water Resources Research, v. 21 (10), p. 1511-1524.
- Langer, W.R and Glanzman, V.M., 1993, Natural Aggregate Building America's Future: U.S. Geological Survey Circular 1110.
- Leva, M. and Grummer, M., 1947, Pressure drop through packed tubes: prediction of voids in packed tubes: Chemical Engineer Proceedings, v. 43, p. 713-718.
- Linares-Guerrero, E., Goujon, C., Zenit, R., 2007, Increased mobility of bidisperse granular avalanches: Journal of Fluid Mechanics, v. 593, p. 475–504.
- Lube, G., Breard, E. C. P., Cronin, S. J., Jones, J., 2015, Synthesizing large-scale pyroclastic flows: Experimental design, scaling, and first results from PELE.: Journal of Geophysical Research Solid Earth, v. 120, p. 1487-1502.

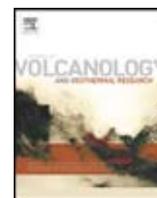
- Macrae, J. C. and Gray, W. A., 1961, Significance of the properties of materials in the packing of real spherical particles: *British Journal of Applied Physics*, v. 12, p. 164-72.
- Major, J.J., 1997, Depositional processes in large-scale debris flow experiments: *Journal of Geology*, v. 105, p. 345–366.
- Malin, M.C., Sheridan, M.F., 1982, Computer assisted mapping of pyroclastic surges: *Science*, v. 217, p. 637–639.
- Middleton, G.V., Southard, J.B., 1984, *Mechanics of Sediment Movement*: SEPM Press.
- Neri, A., Dobran, F., 1994, Influence of eruption parameters on the thermo fluid dynamics of collapsing volcanic columns: *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, v. 99B6, p. 11833-11857.
- Neri, A., Esposti Ongaro, T., Macedonio, G., Gidaspow, D., 2003, Multiparticle simulation of collapsing volcanic columns and pyroclastic flows: *Journal of Geophysics Research*, v. 108B4, p. 2202.
- Neri, A., Macedonio, G., 1996, Numerical simulation of collapsing volcanic columns with particles of two sizes: *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, v.101B4, p. 8153–8174.
- Neri, A., P. Papale, and G. Macedonio, 1998, The role of magma composition and water content in explosive eruptions: II. Pyroclastic dispersion dynamics: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 87, p. 95–115.
- Neumann, B.S., 1953, In: J.J. Hermans (Editor), *Flow Properties of Disperse Systems*: Amsterdam, pp. 382-422.
- Pierson, T. and Scott, K., 1985, Downstream dilution of a lahar: Transition from debris flows to hyperconcentrated stream flow: *Water Resources Research*, v. 21 (10), p. 1511-1524.
- Pittari, A., Cas, R.A.F., Martí, J., 2005, The occurrence and origin of prominent massive, pumice-rich ignimbrite lobes within the Late Pleistocene Abrigo Ignimbrite, Tenerife, Canary Islands: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 139, p. 271–293.
- Postma, G., 1986, Classification for sediment gravity flow deposits based on flow conditions during sedimentation: *Geology*, v. 14, p. 291-294.

- Pudasaini, S. P., Hutter, K., 2003, Granular Avalanche Model in Arbitrarily Curved and Twisted Mountain Terrain: A basis for the extension to debris flow. In: Dieter Rickenmann and Cheng-Lung Chen (Eds.) Debris Flow Hazards Mitigation: mechanics, Prediction and Assessment, v. 1, 491 – 502, Millpress.
- R. A. Bagnold., 1954, Experiments on a Gravity-Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear: Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, v. 255, p. 49-63.
- Reynolds, Osborne , 1885, LVII On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact, with experimental illustrations: Philosophical Magazine Series 5. 20 (127): 469–481. [doi:10.1080/14786448508627791](https://doi.org/10.1080/14786448508627791)
- Rickenmann, C.L., and Cheng-Lung Chen (Eds.), 2003, Debris Flow Hazards Mitigation: mechanics, Prediction and Assessment, v. 1, 491 – 502, Millpress.
- Roche, O., Phillips, J.C., Kelfoun, K., 2013, Pyroclastic density currents. In: Fagents, S. A., Gregg, T.K.P., Lopes, R.M.C. (Eds.), Modeling Volcanic Processes: The Physics and Mathematics of Volcanism: Cambridge University Press, 421 p.
- Rodriguez-Sedano, L. A., Sarocchi, D., Sulpizio, R., Borselli, L., Campos, G., Moreno Chavez, G., 2016, Influence of particle density on flow behavior and deposit architecture of concentrated pyroclastic density currents over a break in slope: Insights from laboratory experiments: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 328, 178-186.
- Rogers, C.A., 1958, Proceedings of Mathematic Society of London, v. 3, p. 609-620.
- Rutgers, R., 1962, Nature (London), v. 193, p. 465-466.
- Savage, S. B., 1983, Granular flows down rough inclines - review and extension. *In:* Jenkins, J.T. and Satake, M. (eds) Mechanics of Granular Materials: New Models and Constitutive Relations. Elsevier, Amsterdam, 61-281.
- Savage, S. B. and Lun, C. K. K., 1988, Particle size segregation in inclined chute flow of dry cohesionless granular solids: Journal of Fluid Mechanics, v. 189, p. 311-335.
- Savage, S.B., 1979, Gravity flow of cohesionless granular materials in chutes and channels: Journal of Fluid Mechanics, v. 92, p. 53–96

- Schwarzkopf, L.M., Schmincke, H.U., Cronin, S.J., 2005, A conceptual model for block-and ash flow basal avalanche transport and deposition, based on deposit architecture of 1998 and 1994 Merapi flows: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 139, p. 117–134.
- Scott, D.M., Davidson, J.F., Cheah, S.E., Chua, C., Gummow, J.G., Lam, B.P.M., Reder, I., 2009, Transient Granular Flows in an Inclined Rotating Cylinder: Filling and Emptying: *Industrial Engineering Chemical Research*, v. 48, p. 159–165
- Scott, G.D. and Kilgour, D.M., 1969: *British Journal of Applied Physics*, v. 2, p. 863-866.
- Sohn, H.Y. and Moreland, C., 1968: *Canadian Journal of Chemical Engineer*, v. 46, p. 162-167.
- Sohn, Y. K. and Chough, S. K., 1993, The Udo Tuff Cone, Cheju Island, South Korea - transformation of pyroclastic fall into debris fall and grain flow on a steep volcanic cone slope: *Sedimentology*, v. 40, p. 769-786.
- Sparks, R. S. J., 1976, Grain size variations in ignimbrites and implications for the transport of pyroclastic flows: *Sedimentology*, v. 23, p. 147-188.
- Sparks, R.S.J., Wilson, L., Hulme, G., 1978, Theoretical modeling of the generation, movement, and emplacement of pyroclastic flows by column collapse: *Journal of Geophysical Research*, v. 83, p. 1727–1739.
- Sulpizio, R., 2016, Investigation of transport and deposition dynamics of volcanic granular flows through laboratory experiment and comparison with field data [PhD. thesis]: Universidad Autonoma de San Luis Potosí, 135pp.
- Sulpizio R., Dellino P., Doronzo D.M., Sarocchi D., 2014, Pyroclastic density currents: state of the art and perspectives: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 283, p. 36-65.
- Sulpizio, R., Dellino, P., 2008, *Sedimentology, depositional mechanisms and pulsating behaviour of pyroclastic density currents*. In: Martí, J., Gottsman, J. (Eds.), *Caldera Volcanism: Analysis, Modelling and Response*. *Developments in Volcanology*, 10. Elsevier, pp. 57–96.
- Sulpizio, R., Mele, D., Dellino, P., La Volpe, L., 2007, Deposits and physical properties of pyroclastic density currents during complex Subplinian eruptions: the AD 472 (Pollena) eruption of Somma-Vesuvius, Italy: *Sedimentology*, v.54, p. 607–635.

- Sulpizio, R., Zanchetta, G., Demi, F., Di Vito, M.A., Pareschi, M.T., Santacroce, R., 2006, The Holocene syneruptive volcanoclastic debris-flows in the Vesuvian area: geological data as a guide for hazard assessment. In: Siebe, C., Macias, J.L., Aguirre-Diaz, G.J. (Eds.), *Neogene—Quaternary Continental Margin Volcanism: A Perspective from Mexico*. GSA Special Paper, 402, pp. 203–221.
- Sulpizio, R., Castioni, D., Rodriguez-Sedano, L. A., Sarocchi, D., Lucchi, F., 2016, The influence of slope-angle ratio on the dynamics of granular flows: insights from laboratory experiments: *Bulletin of Volcanology*, 78: 77 DOI 10.1007/s00445-016-1069-5.
- Suzuki, Y. J., T. Koyaguchi, M. Ogawa, and I. Hachisu, 2005, A numerical study of turbulent mixing in eruption clouds using a three-dimensional fluid dynamics model: *Journal of Geophysical Research*, v. 110, B08201, doi:[10.1029/2004JB003460](https://doi.org/10.1029/2004JB003460).
- Takahashi, T. y Tsujimoto, H., 2000, A mechanical model for Merapi type pyroclastic flow: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 98, p. 91-115.
- Valentine, G. A., 1987, Stratified flow in pyroclastic surges, *Bulletin of Volcanology*, v. 49, p. 616-630.
- Valentine, G.A., Wohletz, K.H., 1989, Numerical models of Plinian eruptions columns and pyroclastic flows: *Journal of Geophysical Research*, v. 94, p. 1867–1887.
- Vallance JW, 2005, Volcanic debris flows. In: Jakob M, Hungr O (eds) *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer Berlin Heidelberg, Praxis, pp 247–271
- Walker, B.P. and Whitaker, T., 1967, *Geotechnique*, v. 17, p. 161-167.
- Walker, G.P.L., 1983, Ignimbrite types and ignimbrite problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 17, p. 65–88.
- Wilson, C.J.N., 1980, The role of fluidization in the emplacement of pyroclastic flows: an experimental approach: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 8, p. 231–249.
- Wilson, C.J.N., Hildreth, W.E., 1997, The Bishop Tuff: new insights from eruptive stratigraphy: *Journal of Geology*, v. 105, p. 407–443.
- Wilson, L., Sparks, R.S.J., Huang, T. C., and Watkins, N.D., 1978, The control of volcanic eruption column heights by eruption energetics and dynamics: *Journal of Geophysical Research*, v. 83, p. 1829-1836

- Wohletz, K. H., McGetchin, T.R., Sandford, M. T., Jones, E.M. 1984. Hydrodynamic aspects of caldera-forming eruptions; numerical models, in *Calderas and associated igneous rocks*. *Journal of Geophysical Research*, v. 89, p. 8269-8285.
- Wohletz, K.H., Sheridan, M.F. and Brown, W.K. 1989. Particle size distributions and the sequential fragmentation/transport theory applied to volcanic ash. *Journal of Geophysical Research* 94: doi: 10.1029/89JB01248.
- Wright, J. V. & Walker, G. P. L., 1981, Eruption, transport and deposition of ignimbrite - a case-study from Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 9, p. 111-131.
- Yamasato, H., 1997, Quantitative analysis of pyroclastic flows using infrasonic and seismic data at Unzen Volcano, Japan: *Journal of Physic Earth*, v. 45, p. 397-416.



Influence of particle density on flow behavior and deposit architecture of concentrated pyroclastic density currents over a break in slope: Insights from laboratory experiments



Rodríguez-Sedano L.A.^{a,*}, Sarocchi D.^{b,c}, Sulpizio R.^{d,e}, Borselli L.^b, Campos G.^b, Moreno Chavez G.^b

^a Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Queretaro, Mexico

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

^c Department of Geosciences, Boise State University, 1910 University Drive, Boise, ID 83725-1535, United States

^d Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, via Orabona 4, 70125, Bari, Italy

^e IDPA-CNR, via M. Bianco 9, Milan, Italy

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 May 2016

Received in revised form 14 October 2016

Accepted 30 October 2016

Available online 3 November 2016

Keywords:

Laboratory experiments

Granular segregation

Concentrated pyroclastic density currents

Density contrast

Granular flows

ABSTRACT

Geological granular flows are highly complex, gravity-driven phenomena whose different behaviors depend on the mechanical properties, density and granulometric distributions of the constituent materials. Years of research have produced significant advances in understanding transport and deposition processes in granular flows. However, the role and effects of clast densities and density contrast in a granular flow are still not fully understood. In this paper we show the effect that pumice has on dry granular flows; specifically on flow velocity and longitudinal segregation of the deposits. Our work confirms, by experimental results, field observations on pumice/lithic segregation and longer pumice runout.

We report results of velocity decay and deposit architecture for a granular flow passing over a break in slope (from 38° to 4° inclination). The 30 experimental runs were carried out in a five-meter long laboratory flume equipped with a series of sensors that include laser gates and high-speed cameras (400 fps). We used two poly-disperse mixtures of dacitic lithics and rhyolitic pumice in varying amounts, with Weibull and Gaussian particle size distributions.

The pumice/lithic ratio changes the flow response passing over a break in slope. This effect is particularly evident starting from 10% of pumice volume into the flow mixture, independently of its granulometric distribution.

Runout relates to mass following a power law, with an exponent close 0.2.

The experiments confirm that pumice segregation affects polydispersed mixtures, similarly to what has been observed in real field deposits, where density decoupling produces lithic-enriched proximal areas and pumice-enriched distal areas. The results obtained prove that the presence of low-density materials in a dense granular flow has a strong influence on its behavior.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Granular flows are among the most studied, yet not fully understood phenomena on Earth. Scientists have tried to explain their kinematics, segregation, rheology and many other aspects through a wide range of approaches and targets over the past decades (Pouliquen, 1999; Kueppers et al., 2012; Sulpizio et al., 2014; Lube et al., 2015).

Granular flows are a common phenomenon in everyday life, from industrial processes to large-scale granular flows in nature that can cause disasters such as landslides, debris flows and concentrate pyroclastic density currents (CPDCs).

Granular matter is defined as a set of particles that can be of different sizes, densities and shapes that can move independently and interact with each other (Kadanoff, 1999). Therefore, a granular flow could be defined as the movement and interaction of large quantities of particles of different sizes, shapes and densities that move in a liquid or gaseous medium.

One of the most interesting characteristics of polydisperse granular flows is particle segregation. When granular material is moving, particles are rapidly sorted as a function of their size, density and shape. Studies of segregation phenomena in granular flows are mostly focused on particle size segregation (Savage and Lun, 1988; Ottino and Khakhar, 2000). Particle segregation has been investigated using mathematical (Tripathi and Khakhar, 2011; Larcher and Jenkins, 2013; Larcher and Jenkins, 2015) and analogue modeling (Drahn and Bridgwater, 1983; Alonso et al., 1991; Hajra and Khakhar, 2005; Jain et al., 2005a, 2005b;

* Corresponding author.

E-mail address: lrodriguez2021@live.com.mx (L.A. Rodríguez-Sedano).

Larcher and Jenkins, 2013; Gray et al., 2015). All the above-mentioned literature deal with models based on simplified conditions (spherical particles, few particle size classes and artificial materials). Data on particle density segregation with natural material and using laboratory flumes is absent. Density segregation in volcanic granular flows has been investigated in debris flows (Dolan, 2004; Capra et al., 2004; Vallance, 2005), in CPDCs (Calder et al., 1999, 2000; Pittari et al., 2005), and using numerical simulations (Mitani et al., 2004). In CPDCs, low-density pumice segregation is an important factor that influences flow rheology, runout and the texture of the final deposits (Calder et al., 2000; Pittari et al., 2005). Both authors reported that pumice is segregated toward the upper and external regions of the flow, causing a significant rheological contrast with the lower, lithic-rich, denser zone. They also conclude that the upper and lighter pumice-rich zone can detach from the main flow as its lower, denser portion decelerates due to basal frictional forces, changes in slope or topographic barriers, and can run further ahead as a mobile derivative PDC. The vertical segregation of granular materials was also investigated by Cagnoli and Romano (2013), by means of laboratory experiments. They concluded that vertical segregation of materials can be generated by the imbalance of forces and the strong impulses due to collisions with the subsurface asperities.

Larcher and Jenkins (2015) formulate an improved kinetic theory, modeling the evolution in time and space of the relative concentration of bi-disperse systems of artificial spherical beads. Their model well describe the rates of segregation with time and distance as function of the flow depth, average particle size, flow inclination, restitution coefficient and the volume fraction of the species. The study of CPDC in natural settings has major limitations, due to their unpredictable behavior and hostile nature. Furthermore, the turbulent ash clouds that accompany moving CPDCs hinder direct observation of physical processes occurring in the basal part of the flow. Most of these difficulties can be overcome through laboratory experiments using granular flow simulators (experimental flumes; Iverson et al., 1992, Roche et al., 2004; Cagnoli and Romano, 2010; Dellino et al., 2007, 2010a, 2010b; Roche et al., 2010; Girolami et al., 2011; Lube et al., 2015).

The use of these facilities represents a unique opportunity for observing and measuring processes that can be scaled to real events (Iverson et al., 1992, Dellino et al., 2007, 2010a, 2010b, 2011, 2014;

Sulpizio et al., 2009; Bartali et al., 2012, 2015; Dioguardi et al., 2013). Another advantage of laboratory experiments is the ability to control boundary conditions that can influence flow variables.

In this paper we present the results of laboratory experiments on polydisperse volcanic granular flows using natural particles of different densities. The flow kinematics, runout and deposit architecture are discussed and compared with three real cases of density-segregated CPDC deposits.

2. Materials and methods

All experiments were carried out using GRANFLOW-SIM (Fig. 1), a modular experimental flume designed and developed at the LAIMA (Image Analysis and Analogue Modelling Laboratory, for its Spanish acronym) at the Geology Institute of the Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Mexico (Bartali et al., 2012, 2015). It consists of three main modules: i) a charge box, ii) a flume, and iii) an expansion box (Fig. 1). The charge box is made of waterproof PVC, has an electromagnetic lock at the bottom that can be opened remotely. It has a volume of 0.036 m³, which is the volume for all mixtures used in this study. The charge box has a lateral window of tempered glass that allows the material inside to be viewed and can be placed at different heights (from 0.4 m to 2.7 m above the flume) according to the needs of the experiment. The flume is made of PVC plastic with a textile floor to increase friction, and is 4.9 m long and 0.3 m wide, with 0.25 m lateral walls of tempered glass. The flume has a straight channel that can be inclined at any angle from 0° to 45°. It is equipped with a series of sensors in the form of laser gates to measure the flow front velocity. The laser beam sensors are positioned at 1.5 cm from the flume bottom. There are nine gates along the flume (Fig. 1). These gates consist of a laser source and a photodiode receptor, and are placed outside the glass walls. When the granular flow front crosses the laser gate, the light beam is interrupted and the time automatically recorded. This allows calculating velocity of the flow front along the flume. At each laser barrier the velocity was calculated using the central difference rule, which was adopted in order to reduce the approximation error in velocity calculation.

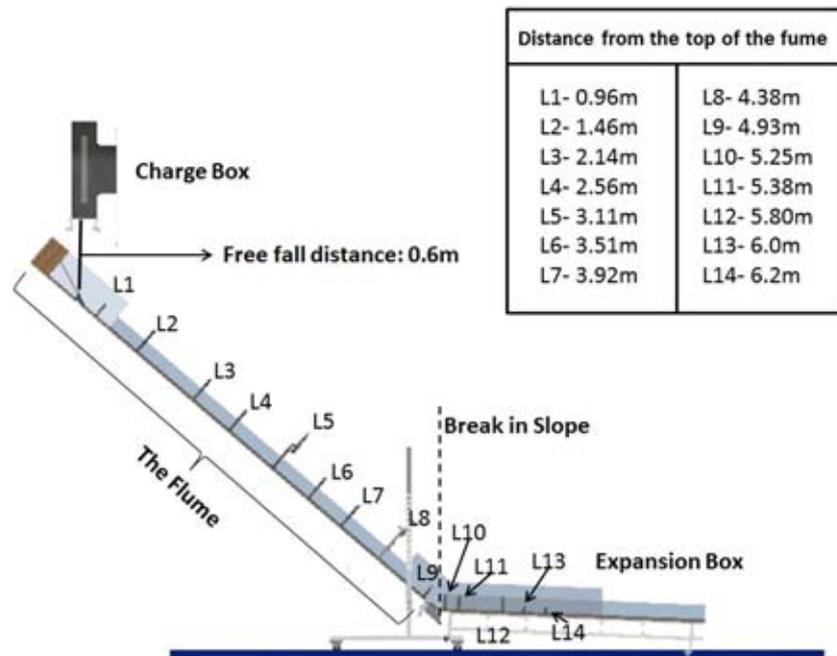


Fig. 1. Diagram of GRANFLOW-SIM experimental flume. L1–L14 indicate positions of laser gates. The flume can be inclined from 0° to 45°. The sedimentation module can be inclined from 0° to 25°.

In this study we used only the values of the lasers 9 and 10 (the lasers before and after the break in slope) in order to get the velocity changes after a break in slope. The expansion box is 2.4 m long and 1.2 m wide, with 0.25 m glass sidewalls. This module can be inclined between 5° and 25° , and is equipped with five laser gates (Fig. 1). For our experiments we used two glass walls (0.25 m high and 1.5 m long) that channelize the flows in the expansion box. These walls are used to simulate the behavior of CPDCs in a ravine with vertical walls.

Three high-speed camcorders (Nikon 1S1 and J1, 400 fps) complete the recording equipment. The camcorders can be placed at any position along the flume and the expansion box.

Pyroclastic mixtures (lithics and pumices) with two different grain size distributions (Gaussian and Weibull) were used for the experiments (Fig. 2). The use of Gauss and Weibull distributions is justified because they are classic grain size distribution common in many natural, transported sediments (Wohletz et al., 1989, Wohletz et al., 1995). The used grain size classes are -3ϕ (8–16 mm), -2ϕ (4–8 mm), -1ϕ (2–4 mm), 0ϕ (1–2 mm) and 1ϕ (0.5–1 mm) ($\phi = -\log_2 d$, where d is the particle diameter). Five different pumice–lithic volume ratios were created for each of the two grain size distributions. Fig. 2 shows Gaussian distributions with the different pumice–lithic proportions, where GP0 (GP stands for Gaussian Pumice 0%) and GP100 (Gaussian Pumice 100%) represent mixtures made up exclusively of lithics and pumice, respectively. The Gaussian distribution is defined by mean -1.0ϕ (2 mm) and standard deviation 1.0ϕ (0.5 mm). The Weibull distribution is defined as a three-parameter Weibull distribution type by the parameters scale (alpha) = 2.26, shape (beta) = 2.18, and shift (lambda) = -4.3ϕ , which corresponds to mean -2.3ϕ (4.9 mm), standard deviation 0.97ϕ (0.51 mm) and skewness $+0.51 \phi$.

For this study all mixtures were prepared using constant volume of 0.036 m^3 . We produced several mixtures with variable mass and densities (Table 1), spanning from 1440 kg/m^3 for the pure lithic Gaussian distribution (GP0) to 690 kg/m^3 for the pure pumice Gaussian distribution (GP100). And from 1360 kg/m^3 for pure Weibull distribution (WP0), to 600 kg/m^3 for pure pumice Weibull distribution (WP100). Velocities of all the experiments are listed in the appendix (Table A1).

The volcanic material consists of low-density (760 kg/m^3) rhyolitic pumice and dense (2700 kg/m^3) dacitic lithics.

The angle of repose was measured using the cylinder method. A $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ sample was placed inside a cylinder (20 cm high and 10.5 cm in diameter). A wooden plate covered by the rubber floor (the same as the flume) was placed at the base of the cylinder. The slow lifting of the cylinder produces a stack of granular material whose slope corresponds to the angle of repose (Fig. A1).

For each experiment the charge box was completely filled with the mixture, and the granular material was released into the flume after a free fall of 0.6 m. The falling material impacts the flume on a small ramp having an inclination of 20° , in order to smooth the transition between free falling and flowing along the channel. As the granular flow developed, sensors recorded the passage of the material until it came to a complete rest. Two data cards (Texas Instruments® and MDA® which record at 15,000 samples per second per channel) were used for data capture on a laptop.

Each experiment consists of three runs with the same initial and boundary conditions (Table 1). A total of 30 runs corresponding to 10 different experiments were carried out with the same flume configuration (channel slope 38° , expansion box slope 4°). The deposit formed after each run was photographed at high resolution for image analysis.

In order to measure runout we first individuated the flow front border (Fig. 3). We consider the flow front as the distal part of the deposit where clasts are still in touch to each other (Fig. 3), forming a compact body of grains. Measures were taken at this point.

In order to better compare the results of different runs, the experimental data (velocity, mass and runout) were normalized against the maximum-recorded value for each parameter. Velocity at laser 9 was normalized against the maximum velocity registered for all experiments at this point. For runout, data were normalized against the maximum runout measured, while the mass was normalized versus the maximum mass. Once all values were normalized, the mean value and standard deviation of each experiment (3 runs) was calculated.

Image analysis of two experimental deposits (GP50 and WP50 runs) enabled the longitudinal segregation of pumice to be studied. Lateral photographs of the deposit were taken and a panoramic image of the whole micro-deposit was constructed. The resulting images were divided longitudinally into equal areas (taking the change in slope as the starting point). A count of the number of pumice and lithic particles was made for each area using the Image Pro Plus Software (Media Cybernetics Inc.). By using this semi-manual technique, it is possible to quantify the lateral segregation of pumice and lithic particles along the deposits. In both case-study data shown trends, although in one case data are scattered. For this reason, a quantile regression method (Buchinsky, 1998; Koenker and Basset, 1978; Lee and Tanaka, 1999; Yu et al., 2003), as implemented by Borselli et al. (2012), is used to analyze the produced dataset. The quantile regression technique is useful in these cases because it is more robust against local outliers influence and can provide more robust measures of central tendency and statistical dispersion. We use three relevant quantiles in a distribution: $q(0.5)$ is the median and can be used to represent the main trend function of the data, $q(0.25)$ and $q(0.75)$ represent the values farthest away from

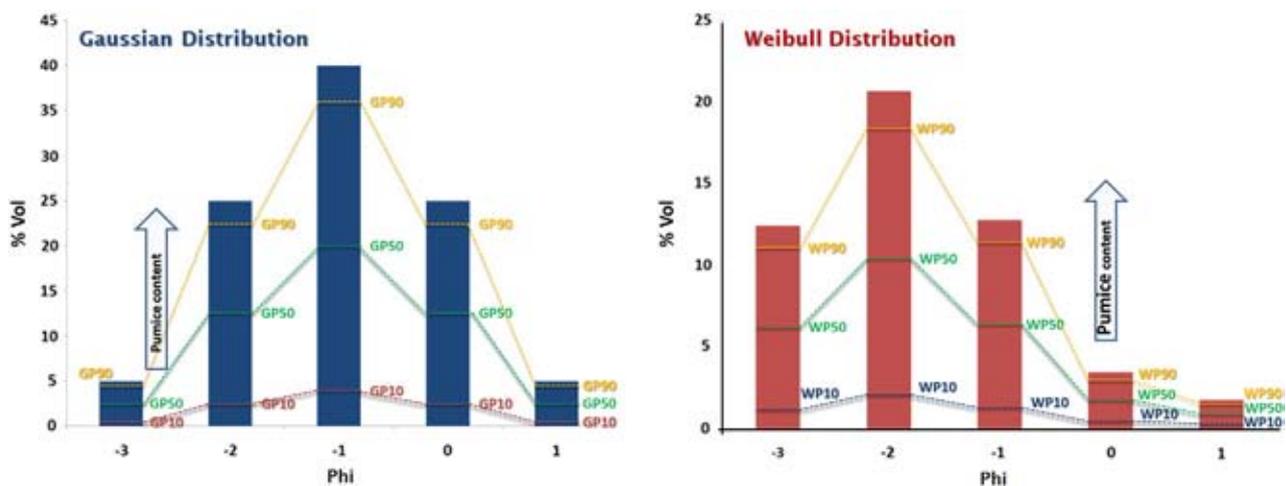


Fig. 2. Granulometric distributions and pumice proportions used for these experiments.

Table 1
Experimental setup and mixture characterization values.

Label	P (% in vol.)	RO mean (cm)	RO stdev (cm)	RO cv (%)	RA (°)	FI (°)	EBA (°)	Rep. num.	MTM (kg)	MNTM (kg)	MV (dm ³)	MAD (gr/cm ³)	MPM (kg)	RO nor.	RO nor. stdev
GP0	0% pum	151.67	2.887	1.903	29°	38°	4°	3	52	1.000	36.0	1.44	0.000	0.978	0.019
GP10	10% pum	147.67	2.517	1.704	28°	38°	4°	3	44.25	0.851	36.0	1.23	2.490	0.953	0.016
GP50	50% pum	139.33	4.041	2.901	32°	38°	4°	3	34.8	0.669	36.0	0.97	12.450	0.899	0.026
GP90	90% pum	135.00	2.000	1.481	30°	38°	4°	3	31.05	0.597	36.0	0.86	22.410	0.871	0.013
GP100	100% pum	123.00	2.646	2.151	28°	38°	4°	3	24.9	0.479	36.0	0.69	24.900	0.794	0.017
WP0	0% pum	146.67	2.887	1.968	31°	38°	4°	3	48.9	0.940	36.0	1.36	0.000	0.946	0.019
WP10	10% pum	143.33	2.887	2.014	30°	38°	4°	3	42.65	0.820	36.0	1.18	2.190	0.925	0.019
WP50	50% pum	135.00	5.000	3.704	28°	38°	4°	3	33.7	0.648	36.0	0.94	10.950	0.871	0.032
WP90	90% pum	135.00	2.000	1.481	30°	38°	4°	3	24.65	0.474	36.0	0.68	19.710	0.871	0.013
WP100	100% pum	121.67	2.887	2.373	31°	38°	4°	3	21.9	0.421	36.0	0.61	21.900	0.871	0.019

Label	Mixture total mass (kg)	MNTM (kg)	MV (dm ³)	MAD (gr/cm ³)	MPM (kg)	RO nor.	RO nor. stdev
Pumice proportion							
Runout (mean) (cm)							
Runout standard deviation (cm)							
Runout variation coefficient (%)							
Repose angle							
Flume inclination							
Expansion box angle							
Number of repetitions							

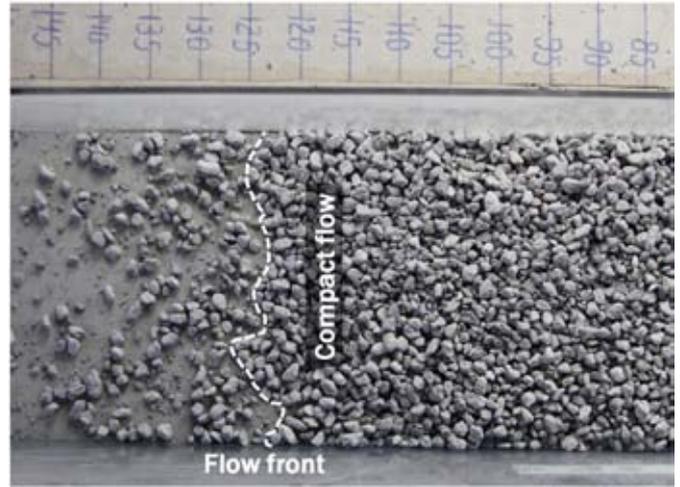


Fig. 3. Photograph that illustrates the compact flow front. We used the compact flow front to measure the runout of the flows.

the median and can be used to define the boundaries in which the values are most reliable. In our case we carry out the quantile regression using an exponential function as Eq. ((1), and using Microsoft® Excel Spreadsheet Office 2013 Solver (Fylstra et al., 1998; Nenov and Fylstra, 2003):

$$P(d) = be^{da} \tag{1}$$

where P is % pumice; d is the normalized distance from the break in slope using the maximum recorded runout (GP0 mixture), b and a are quantile regression coefficients. For more information about quantile function the reader is addressed to Appendix A2.

3. Results

3.1. Changes in velocities and runout induced by break in slope

Flow velocity and runout were measured for the two granulometric distributions (Weibull and Gaussian) with five different pumice/lithic proportions (Table 1). The results presented here report flow velocities recorded just before and after the break in slope. At laser 9 it is possible to observe the maximum velocities of any type of mixture, while on laser 10 it is possible to see how each mixture responds to a topographic change (slope change from 38° to 4°).

Three main groups with similar behavior can be identified. The first is pumice-rich and comprises WP100 and GP100 (Group A), the second WP90, WP50, GP90 and GP50 (Group B), and the third group is lithic-rich and consists of the WP10, WP0, GP10 and GP0 distributions (Group C; Fig. 4).

Group A has an average mass of 23.3 ± 1.5 kg. Group B is mostly made of pumice-rich to equal lithic/pumice distributions, with an average mass of 31 ± 1.51 kg. Group C has an average mass of 46.8 ± 1.5 kg.

Prior to the change in slope, all the mixtures move at comparable average velocities, with the only exception of GP0 (Fig. 4a, c). The velocity is not affected by the mass, with the only exception of GP0. After the break in slope the average velocities roughly separate between Gaussian and Weibull distributions, although large overlapping of values is observable and the suggested difference has poor statistical meaning (Fig. 4b, d). Also in this case the mass does not seem to significantly influence the velocity.

In Group A WP100 shows an increase in average velocity after the change in slope. This velocity is in the same range as the fastest mixtures (of group C) before the change in slope, and is one of the three fastest velocities recorded of all groups. In contrast GP100 undergoes a strong decrease in velocity, making it one of the slowest mixtures after the

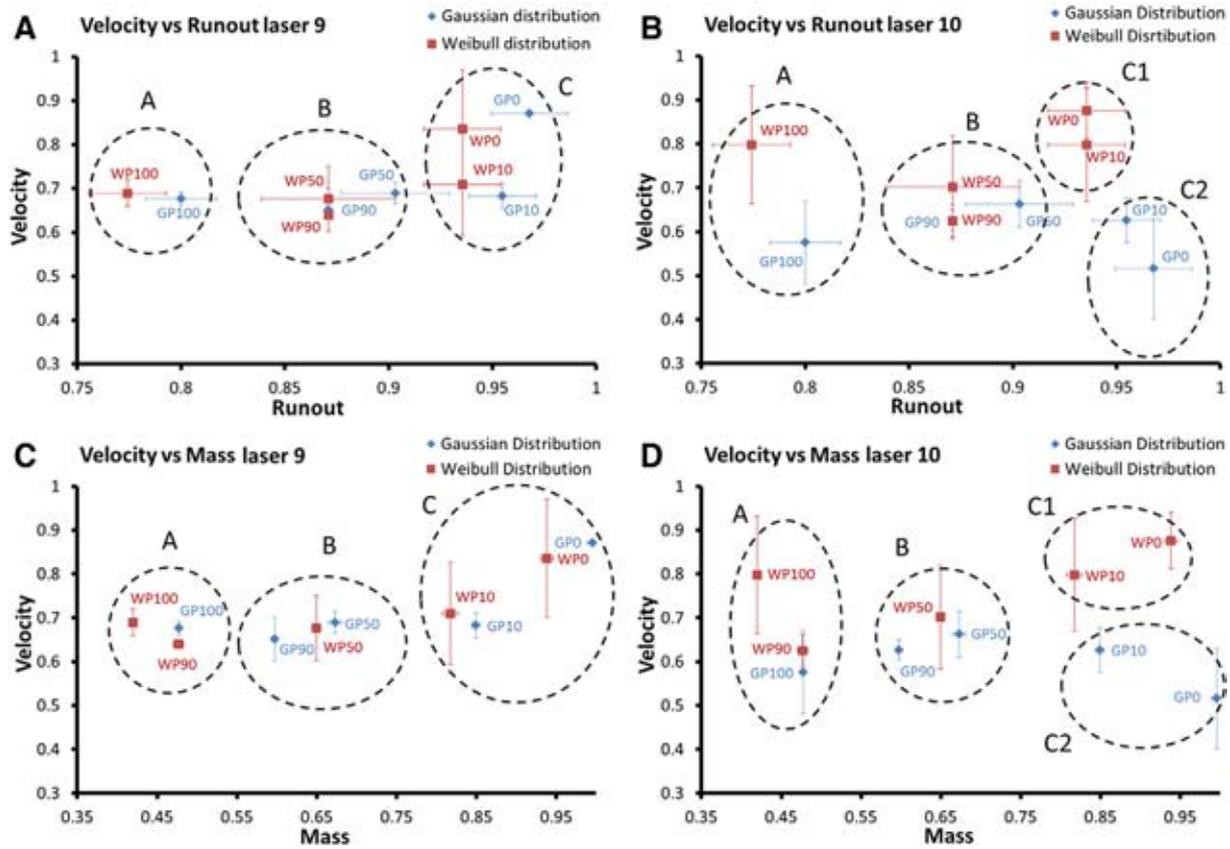


Fig. 4. Normalized velocity before (laser 9) and after (laser 10) the break in slope compared to normalized runout (3a and b) and mass (3c and d). It is possible to observe the different behavior of any mixture to the change in slope, as well as the three main groups according to the runout.

change in slope (Fig. 4). Group B does not show appreciable change in velocity before and after the break in slope (Fig. 4). Group C mixtures are some of the fastest mixtures before the change in slope (WP0 and GP0; Fig. 3a). After the change in slope, WP and GP mixtures preserve their velocity but in different ways, forming two sub-groups (C1 and C2; Fig. 4b and d). GP mixtures presented a loss in average velocity, especially GP0, which in this case had the lowest velocity of all. The C2 sub-group is made up of only GP mixtures. WP mixtures fall into the C1 subgroup. GP10 and W10 show decrease in their average velocities after the change in slope.

Analyzing the runouts vs. mass, Group A mixtures (the lightest in mass) have the shortest runouts of all (Fig. 5b). GP0 had the maximum velocity, the longest runout and the highest mass of all the mixtures (Fig. 5b). The normalized runout vs. normalized mass diagram indicates similar power law relationship for both Gaussian and Weibull distributions (Fig. 5a, b). The regression functions for Gaussian and Weibull distribution are quite similar (Fig. 5b), and, in average, can be expressed as:

$$N_r = 0.973NTM^{0.2103} \tag{2}$$

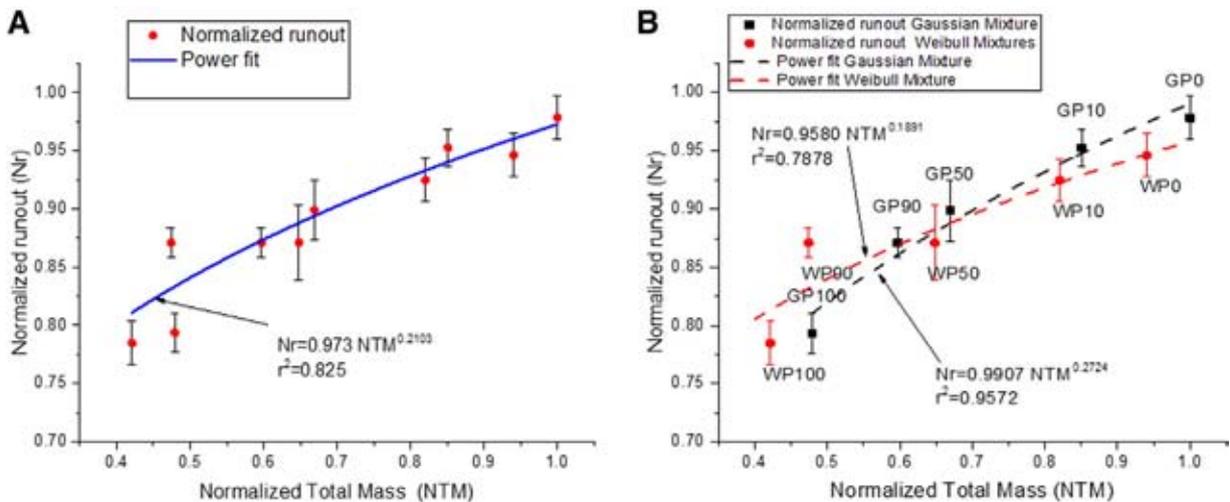


Fig. 5. Normalized runout vs. normalized mass and vs. pumice fraction by mass in the mixtures: a) Normalized runout vs. normalized mass, global data; b) Normalized runout vs. normalized mass, with separate mixtures type groups.

3.2. Longitudinal pumice distribution along the deposits

In order to study the segregation behavior of clasts in a mixture with different densities, a quantitative study was made of the GP50 and WP50 deposits.

A panoramic image of the experimental deposit was divided into sectors of equal area. In order to obtain the longitudinal variation of the pumice/lithic ratio, the panoramic image of GP50 (blue; Fig. 6) was divided into 52 sectors each 2.6 cm wide. Pumice and andesite particles were counted (a total of 5636 particles in the image in Fig. 6).

Pumice fragments are preferentially concentrated in the upper part of the deposit. The deposit shows a pumice concentration ranging between 50% and 60% starting from the break in slope, but after 70 cm (0.5 normalized distance), which corresponds approximately to the center of mass of the deposit, pumice content starts to gradually increase and lithic content to decrease. At 110 cm (0.7 normalized distance), it starts to show sectors formed exclusively by pumice.

The same experiment was performed using the WP50 mixture (Fig. 6, red). This deposit was split into 47 sectors 2.8 cm wide and 4725 particles were counted. In this case the longitudinal distribution of pumice was more disperse, but showed the same trend. At 70 cm from the break (0.5 normalized distance) the percentage of pumice in the deposit

ranged from 50% to 90% and it was not until after 110 cm (0.7 normalized distance) that the percentage of pumice within the deposit reached 100%.

4. Discussion

Granular mixtures with different granulometry and pumice contents, having the same volume and flowing at the same experimental conditions, show different behaviors. Distinct groups of runouts were identified, which did not depend on the initial velocity. The main factor that affects such behavior is the mass (Figs. 4 and 5). This is because the normalized velocities overlap, irrespective of mixture and grain size distributions (Fig. 4).

4.1. Influence of grain size on velocity and runout

Before the break in slope, both Weibull and Gaussian distributions do not show any significant difference in velocity. After the break in slope, the Weibull (coarse grained) distributions show, on average, slightly higher values of velocity than the Gaussian (finer grained) distributions, although the difference is not statistically representative. This may be explained in terms of the inertial properties of the two

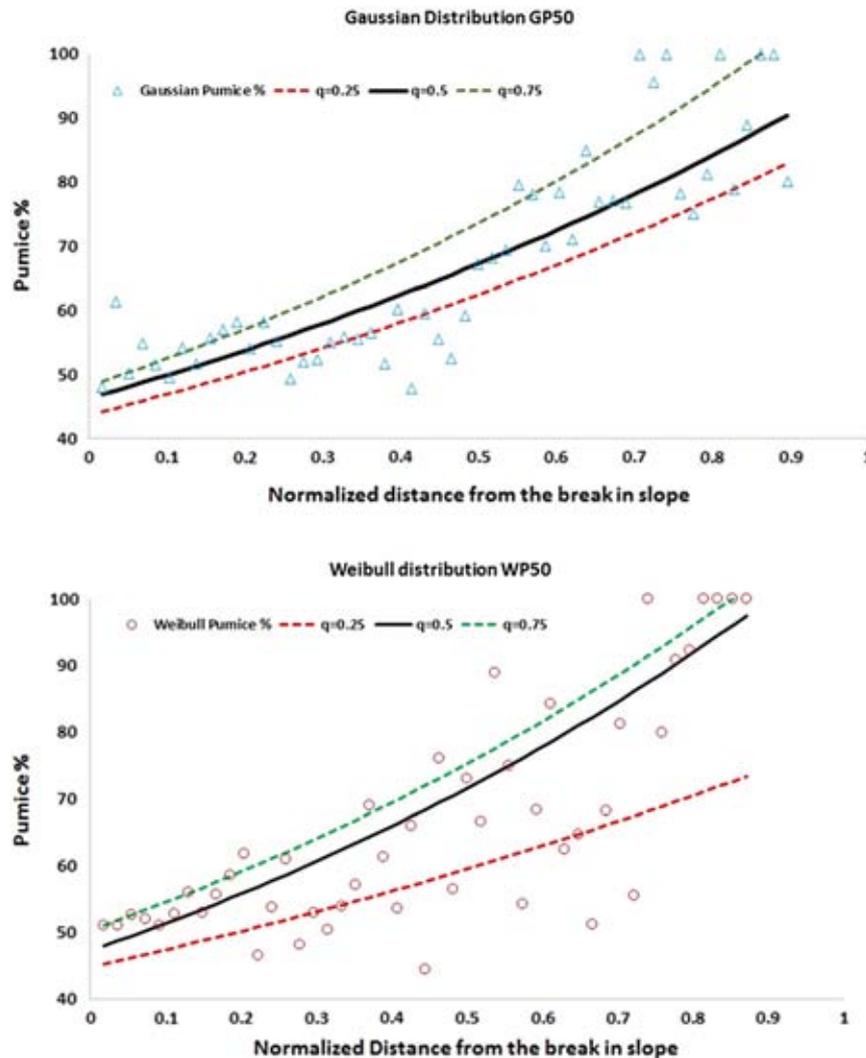


Fig. 6. Longitudinal variation in pumice content (expressed as percentage) from the break in slope to the maximum runout of the GP50 and WP50 mixtures. Distance was normalized against the maximum runout of all mixtures, which was GP0. Black line represents $q=0.5$ of all data.

distributions. Finer particles have lower inertia than coarser particles (coarse particles are more agitated) and this contributes to slowing down the velocity after the break in slope, which is the first physical perturbation in the rectilinear trajectory. Mixtures with a similar fraction of lithics and pumice (50% lithics, 50% pumice) in both the Weibull and Gaussian distributions do not show any significant change in velocity, while the other Weibull mixtures show a slight increase in average velocity and the Gaussian mixtures show an average reduction of velocity after the break in slope (Fig. 4). This is probably due to the bouncing effect of large clasts at the break in slope, with elastic rebound at the base that accelerates the coarsest clasts. This is particularly evident in the case of Weibull distributions, which have a larger amount of coarser clasts. On average, runout is greater for finer mixtures, but it is worth noting that error bars overlap in all cases (Fig. 5). Longer runouts for finer grained flows were suggested by Cagnoli and Romano (2012) and Cagnoli and Piersanti (2015), due to the greater energy consumption of shacked coarse particles with respect to the finer ones. Our experiments results are not in contrast with this suggestion, although it is not statistically relevant for the grain size distribution we used. Finally particle agitation dissipates energy because it requires speed components in random directions. That could be the reason why Gaussian mixtures (finer grain size) reach a little bit longer runouts than Weibull ones (coarser grain sizes).

4.2. Influence of mass (pumice/lithic ratio) on velocity and runout

All the mixtures move at same velocity (within the error bar) before the break in slope (Fig. 4a, c), irrespective of their mass. Inspection of Fig. 5 shows how the normalized runout has power law dependence on the normalized mass. The regression functions for Gaussian and Weibull distribution are quite similar, and can be expressed with exponent close to 0.2 (Eq. (2)). It means that up to 0.5–0.6 of normalized mass value (~25–32 kg), a slight increase in mass of the mixture produces a significant larger runout. This effect is reduced for values of normalized mass greater than 0.7 (~35 kg). If we consider the runout as the balance between inertial/frictional forces, it seems that pumice clasts increase friction and lithic fragments increase inertia. This is probably due to the different elastic properties of the two components (pumice and lithics) of the mixtures, which dissipate kinetic energy in different ways even at similar (within 10%) mass of the mixtures.

The normalized runout drop down with increase of pumice fraction by mass (with constant volume of the mixture) following a linear law as indicated in Fig. 5a and b, and this is related to the progressive decrease of mass due to increase of total pumice fraction. All the experiment was planned in order to evaluate the flow behavior with different mass but with constant flow volume.

It is important to note that Gaussian mixtures always show longer runouts than the correspondent Weibull mixtures. This is related to the masses of the mixtures; Gaussian mixtures are heavier than Weibull, although they have the same volume and granulometric distribution. The greater the mass the greater the inertia and therefore this will be reflected in the runout results.

4.3. Pumice–lithic segregation with distance

The experiments with 50% pumice, in which the most important velocity conservation was observed, were also used to study the segregation effects between pumice and lithics inside the final deposits at rest. Fig. 6 shows the percentage of pumice present in the resulting deposits at different relative distances from the break in slope.

Two types of segregation were observed acting at the same time in our experiments: segregation by size and density. In general the segregation process appears to be more efficient for the Gaussian

mixtures (finer grain sizes). Reverse grading was observed in both GP50 and WP50 mixtures. The coarsest clasts of both materials were concentrated at the top of the deposits, and in the case of Weibull mixture, also in the distal part. Concerning the segregation for density, this is more evident in the Gaussian mixture and longitudinally along the deposits. Data concerning pumice distributions in the deposits are more scattered in the case of the Weibull mixture where the coarse clasts are more abundant. This observation suggests that in coarsest mixtures the segregation process by size may be predominant.

The segregation process observed in our experiments supports observations on natural cases of PDCs where segregation of pumiceous materials has been observed (Calder et al., 1999; Calder et al., 2000; Pittari et al., 2005), as well decoupling of the less dense portion, which is usually concentrated in the upper portions of the flow. This separation generally leads to a secondary flow consisting mostly of pumice, which runs longer and affects a more extensive area. The denser lithic portion is deposited on more proximal areas, resulting in deposits with greater pumice content in distal areas. Similar behavior was observed in our laboratory experiments. Fig. 6 shows that the distal portion of the studied deposit has higher pumice content than the proximal areas.

At approximately 70 cm (0.5 normalized distance) from the change in slope, the pumice content starts to increase and concentrate toward the top, forming two layers with different properties. According to Calder et al. (2000), the interface between the layers becomes the zone of greatest shear due to the very different properties of pumices and lithics (density, restitution coefficient, friction coefficient, particle shape etc.) Buesch (1992) suggested that decoupling might occur due to inefficient transfer of momentum between the upper pumice layer and the lower and denser lithic layer. According to our data and observing how the velocity changes after the change in slope for different mixtures (i.e. a mixture made of pumice and one of lithics), it is understandable that reactions of flows to a change in slope are extremely different, so an efficient energy transfer between materials (lithics and pumice) could be not fully achieved, and decoupling (independently of the scale) would occur.

5. Conclusions

The experiments described here reveal important information about granular flows constituted of mixtures with materials of different density and elastic properties.

According to these results, the pumice/lithic ratio in a polydisperse natural granular flow influences the flow runout and, even roughly, the velocity after the break in slope. Polydisperse monolithologic mixtures composed of 100% pumice or 100% dense lithics have a more evident response to changes in slope, gaining or losing velocity. Flow velocity is directly related to inertial forces and elastic properties of the materials and how they respond to a break in slope. Granulometry has an important role because the bouncing effect of large clasts at the break in slope is very different in Weibull mixtures (coarse) and Gaussian mixtures (finer).

Runout relates to mass, following a power law with 0.2 exponent (Eq. (2)). Mixtures fully composed of lithics have far longer runouts than fully pumiceous mixtures of the same granulometry. This is because at equal volumes Gaussian mixtures are heavier than Weibull mixtures (due to granulometric distributions), which means Gaussians are denser and therefore have greater inertia than Weibull mixtures.

Deposits of CPDC with mixtures of pumice and lithic clasts in the Montserrat, Tenerife and Lascar volcanoes show a clear density segregation/separation, which ends with deposits made up mostly of lithic fragments in proximal areas and mostly pumiceous in distal areas. Experiments carried out in our flume reproduced similar behavior and produced deposits that show very similar characteristics. Our

experiments show enriched pumice content in the distal parts of the deposits, in analogy with what is observed in nature. The presence of a less effective pumice segregation in Weibull mixture deposits suggests that in coarse mixture segregation for size is probably more efficient than the segregation for density contrast.

The results of our study show that the pumice/lithic ratio in pyroclastic density currents affects their behavior. This effect is particularly evident for pumice content greater than 10% vol. Taking into account the density factor in programs that simulate PDCs can help in calculating more realistic hazardous areas.

Acknowledgments

We wish to thank Oscar Segura Cisneros, Sergio Gonzalez Bautista, Ludving Rojano and Luis Felipe Rodríguez Quibarrera for their help during the experimental work. We are also grateful to Margaret Schroeder Urrutia for refining the English version of the paper.

This work was partially supported by Ciencia Básica CONACyT projects (SEP-83301), and CONACyT - Ciencia Básica-2012-01-184060, PROMEP UASLP-PTC-241. Luis Angel Rodríguez Sedano acknowledges CONACyT for PhD grant (No. 245245).

Appendix A1

The angle of repose was measured using the cylinder method (Fig. A1). The material flows from the base when the cylinder rises slowly. The static internal friction angle corresponds to the slope of the pile of granular material.

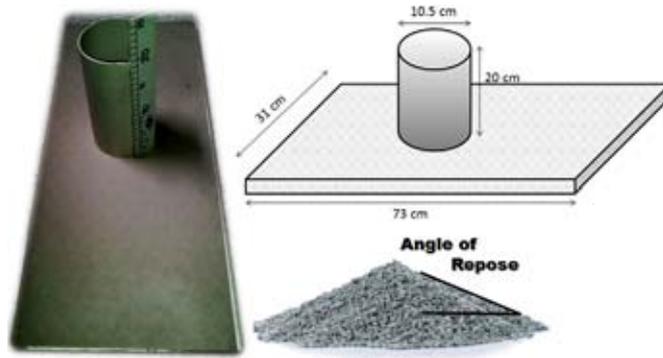


Fig. A1. Instrumentation and methodology used to obtain the repose angle in these experiments.

Table A1

Velocity in all lasers (m/s).

Laser	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14
Dist. (m)	0.96	1.46	2.14	2.56	3.11	3.51	3.92	4.38	4.93	5.25	5.38	5.80	6.00	6.20
GP0	2.43	3.33	3.94	3.62	4.84	4.80	4.03	5.55	6.65	4.60	3.10	3.18	2.10	1.70
GP10	2.42	3.35	3.80	3.62	4.67	4.42	4.35	4.58	5.21	5.58	3.96	3.42	2.17	1.29
GP50	2.40	3.22	3.82	3.68	4.51	4.37	4.39	4.94	5.27	5.90	3.62	2.79	2.22	1.81
GP90	2.40	3.17	3.78	3.62	4.33	4.74	4.12	4.94	4.97	5.58	3.52	3.18	2.24	1.37
GP100	2.39	3.15	3.72	3.32	4.59	4.28	4.21	5.16	5.16	5.13	2.76	2.95	2.10	0.75
WP0	2.40	3.08	3.85	3.49	5.32	4.37	3.59	4.99	6.38	7.80	3.96	2.95	1.86	1.34
WP10	2.40	3.09	3.89	3.59	4.37	4.97	3.73	4.94	5.42	7.11	3.63	3.02	1.92	1.10
WP50	2.37	2.96	3.58	3.38	4.30	5.53	3.77	5.05	5.16	6.25	4.23	2.55	2.17	1.59
WP90	2.37	3.08	3.78	3.22	4.67	4.37	3.88	5.04	4.89	5.57	4.89	3.45	1.38	1.59
WP100	2.39	3.08	3.64	3.38	4.30	4.15	3.73	4.32	5.26	7.11	3.63	2.55	1.67	0.41

Appendix A2

According to Koenker and Basset (1978) the optimal quantile regression function $q_p(x)$ may be obtained by minimizing the following generalised objective function $f(obj)$:

$$f(obj) = \min_{\beta} \left[\sum_{i \in \{i: y_i \geq f_i(\beta^t, x_i)\}} p |y_i - f_i(\beta^t, x_i)| + \sum_{i \in \{i: y_i < f_i(\beta^t, x_i)\}} (1-p) |y_i - f_i(\beta^t, x_i)| \right] \tag{2}$$

where:

- i is the index that identifies element i of the data set;
- x_i, y_i are the coordinates of the i th element of the data set;
- p is the chosen regression quantile (e.g.: 0.1, 0.5, 0.75 ...);

β^t is a vector that contains the values of the coefficients defining the quantile function to be optimized (i.e., coefficients a and b , to be found during the optimization process);

$f_i(\beta^t, x_i)$ is the regression quantile function as defined by $\beta^t \beta^t$ and the position x_i .

The objective function (Eq. ((2))) was implemented in the Solver for a set of quantile values (0.25, 0.5, 0.75) for Weibull and Gaussian datasets.

References

Alonso, M., Satoh, M., Miyanami, K., 1991. Optimum combination of size ratio, density ratio and concentration to minimize free surface segregation. *Powder Technol.* 68, 145–152.
 Bartali, R., Sarocchi, D., Nahmad-Molinari, Y., Rodríguez-Sedano, L.A., 2012. Estudio de flujos granulares de tipo geológico por medio del simulador multisensor GRANFLOW-SIM. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 64, 265–275.

- Bartali, R., Sarocchi, D., Nahmad-Molinari, Y., 2015. Stick–slip motion and high speed ejecta in granular avalanches detected through a multi-sensors flume. *Eng. Geol.* 195, 248–257.
- Borselli, L., Torri, D., Poesen, J., Laquinta, P., 2012. A robust algorithm for estimating soil erodibility in different climates. *Catena* 97, 85–94.
- Buchinsky, M., 1998. Recent advances in quantile regression models. *J. Hum. Resour.* 33, 88–126.
- Buesch, D.C., 1992. Incorporation and redistribution of locally derived lithic fragments within a pyroclastic flow. *Geol. Soc. Am. Bull.* 104, 1193–1207.
- Cagnoli, B., Piersanti, A., 2015. Grain size and flow volume effects on granular flow mobility in numerical simulations: 3-D discrete element modeling of flows of angular rock fragments. *J. Geophys. Res.* 120:2350–2366. <http://dx.doi.org/10.1002/2014JB011729>.
- Cagnoli, B., Romano, G.P., 2010. Effect of grain size on mobility of dry granular flows of angular rock fragments: an experimental determination. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 193, 18–24.
- Cagnoli, B., Romano, G.P., 2012. Effects of flow volume and grain size on mobility of dry granular flows of angular rock fragments: a functional relationship of scaling parameters. *J. Geophys. Res.* 117, B02207. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JB008926>.
- Cagnoli, B., Romano, G.P., 2013. Vertical segregations in flows of angular rock fragments: Experimental simulations of the agitation gradient within dense geophysical flows. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 265, 52–59.
- Calder, E.S., Cole, P.D., Dade, W.B., Druitt, T.H., Hoblitt, R.P., Huppert, H.E., Richie, L., Sparks, R.S.J., Young, S.R., 1999. Mobility of pyroclastic flows and surges at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat. *Geophys. Res. Lett.* 26, 537–540.
- Calder, E.S., Sparks, R.S.J., Gardeweg, M.C., 2000. Erosion, transport and segregation of pumice and lithic clasts in pyroclastic flows inferred from ignimbrite at Lascar Volcano, Chile. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 104, 201–235.
- Capra, L., Poblete, M.A., Alvarado, R., 2004. The 1997 and 2001 lahars at Popocatepetl volcano (central Mexico). Textural and sedimentological evidences to constrain their origin and hazard. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 131, 351–396.
- Dellino, P., Zimanowski, B., Buttner, R., La Volpe, L., Mele, D., Sulpizio, R., 2007. Large-scale experiments on the mechanics of pyroclastic flow: design, engineering, and first results. *J. Geophys. Res.* 112, B04202. <http://dx.doi.org/10.1029/2006JB004313>.
- Dellino, P., Buttner, R., Dioguardi, F., Doronzo, D.M., La Volpe, L., Mele, D., Sonder, I., Sulpizio, R., Zimanowski, B., 2010a. Experimental evidence links volcanic particle characteristics to pyroclastic flow hazard. *Earth Planet. Sci. Lett.* 295, 314–320.
- Dellino, P., Dioguardi, F., Zimanowski, B., Buttner, R., Mele, D., La Volpe, L., Sulpizio, R., Doronzo, D.M., Sonder, I., Bonasia, R., Calvari, S., Marotta, E., 2010b. Conduit flow experiments help constraining the regime of explosive eruptions. *J. Geophys. Res.* 115, B04204. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006781>.
- Dellino, P., De Astis, G., La Volpe, L., Mele, D., Sulpizio, R., 2011. Quantitative hazard assessment of phreatomagmatic eruptions at Vulcano (Aeolian Islands, Southern Italy) as obtained by combining stratigraphy, event statistics and physical modelling. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 201, 364–384.
- Dellino, P., Dioguardi, F., Mele, D., D'addabbo, M., Zimanowski, B., Büttner, R., Doronzo, D.M., Sonder, I., Sulpizio, R., Dürrig, T., La Volpe, L., 2014. Volcanic jets, plumes and collapsing fountains: evidence from large-scale experiments, with particular emphasis on the entrainment rate. *Bull. Volcanol.* 76, 834–852.
- Dioguardi, F., Dellino, P., De Lorenzo, S., 2013. Integration of large-scale experiments and numerical simulations for the calibration of friction laws in volcanic conduit flows. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 250, 75–90.
- Dolan, M.T., 2004. Observations of Lahars Along the Sacobia-Bamban River Systems, Mount Pinatubo, Philippines. ((48 pp.). MS thesis). Michigan Technological University, Houghton, Michigan.
- Drahn, J.A., Bridgwater, J., 1983. The mechanisms of free surface segregation. *Powder Technol.* 36, 39–53.
- Fylstra, D., Lasdon, L., Watson, J., Ware, A., 1998. Design and use of the Microsoft Excel Solver. *Interfaces* 28 (5), 29–55.
- Girolami, L., Roche, O., Druitt, T.H., Corpetti, T., 2011. Particle velocity fields and depositional processes in laboratory ash flows, with implications for the sedimentation of dense pyroclastic flows. *Bull. Volcanol.* 72, 747–759.
- Gray, J.M.N.T., Gajjar, P., Kokelaar, P., 2015. Particle-size segregation in dense granular avalanches. *C. R. Phys.* 16, 73–85.
- Hajra, S.K., Khakhar, D.V., 2005. Radial mixing of granular materials in a rotating cylinder: experimental determination of particle self-diffusivity. *Phys. Fluids* 17, 013101 (2005).
- Iverson, R.M., Costa, J.E., Lahusen, R.G., 1992. Debris-flow flume at H. J. Andrews experimental forest, Oregon. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.* 92–483 (2 pp.).
- Jain, N., Ottino, J.M., Lueptow, R.M., 2005a. Combined size and density segregation and mixing in noncircular tumblers. *Phys. Rev. E* 71, 051301.
- Jain, N., Ottino, J.M., Lueptow, R.M., 2005b. Regimes of segregation and mixing in combined size and density granular systems: an experimental study. *Granul. Matter* 7, 69–81.
- Kadanoff, L.P., 1999. Built upon sand: Theoretical ideas inspired by granular flows. *Rev. Mod. Phys.* 71, 435–444.
- Koenker, R., Basset, G., 1978. Regression Quantiles. *Econometrica* 46 (1), 33–50.
- Kueppers, U., Putz, C., Spieler, O., Dingwell, D.B., 2012. Abrasion in pyroclastic density currents: insights from tumbling experiments. *Phys. Chem. Earth* 45–46, 33–39.
- Larcher, M., Jenkins, J.T., 2013. Segregation and mixture profiles in dense, inclined flows of two types of spheres. *Phys. Fluids* 25, 113301.
- Larcher, M., Jenkins, J.T., 2015. The evolution of segregation in dense inclined flows of binary mixtures of spheres. *J. Fluid Mech.* 782, 405–429.
- Lee, H., Tanaka, H., 1999. Upper and lower approximation models in interval regression using regression quantile techniques. *Eur. J. Oper. Res.* 116, 653–666.
- Lube, G., Breard, E.C.P., Cronin, S.J., Jones, J., 2015. Synthesizing large-scale pyroclastic flows: experimental design, scaling, and first results from PELE. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 120, 1487–1502.
- Mitani, N.K., Matuttis, H.G., Kadono, T., 2004. Density and size segregation in deposits of pyroclastic flow. *Geophys. Res. Lett.* 31, L15606.
- Nenov, I.P., Fylstra, D.H., 2003. Interval methods for accelerated global search in the Microsoft Excel Solver. *Reliab. Comput.* 9 (2), 143–159.
- Ottino, J.M., Khakhar, D.V., 2000. Mixing and segregation of granular materials. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 32, 55–91.
- Pittari, A., Cas, R.A.F., Marti, J., 2005. The occurrence and origin of prominent massive, pumice-rich ignimbrite lobes within the late Pleistocene Abrigo ignimbrite, Tenerife, Canary Islands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 139, 271–293.
- Pouliquen, O., 1999. Scaling laws in granular flows down rough inclined planes. *Phys. Fluids* 11, 542.
- Roche, O., Gilbertson, M.A., Phillips, J.C., Sparks, R.S.J., 2004. Experimental study of gas-fluidized granular flows with implications for pyroclastic flow emplacement. *J. Geophys. Res.* 109, B10201. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JB002916>.
- Roche, O., Montserrat, S., Niño, Y., Tamburrino, A., 2010. Pore fluid pressure and internal kinematics of gravitational laboratory air-particle flows: insights into the emplacement dynamics of pyroclastic flows. *J. Geophys. Res.* 115, B09206. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB007133>.
- Savage, S.B., Lun, C.K.K., 1988. Particle size segregation in inclined chute flow of dry cohesionless granular solids. *J. Fluid Mech.* 189, 311–335.
- Sulpizio, R., Dellino, P., Mele, D., La Volpe, L., 2009. Generation of Pyroclastic Density Currents from Pyroclastic Fountaining or Transient Explosions: Insights from Large-Scale Experiments. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 3. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1307/3/1/012020>.
- Sulpizio, R., Dellino, P., Doronzo, D.M., Sarocchi, D., 2014. Pyroclastic density currents: state of the art and perspectives. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 283, 36–65.
- Tripathi, A., Khakhar, D.V., 2011. Rheology of binary mixtures in the dense flow regime. *Phys. Fluids* 23, 113302.
- Vallance, J.W., 2005. Volcanic debris flows. In: Jakob, M., Hungr, O. (Eds.), *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, Berlin Heidelberg, Praxis, pp. 247–271.
- Wohletz, K.H., Sheridan, M.F., Brown, W.K., 1989. Particle size distributions and the sequential fragmentation/transport theory applied to volcanic ash. *J. Geophys. Res.* 94 <http://dx.doi.org/10.1029/89JB01248>.
- Wohletz, K.H., McQueen, R.G., Morrissey, M., 1995. Experimental study of hydrovolcanism by fuel-coolant interaction analogues. *Proc. NSF/JSPS AMIGO-IMI Seminar, Santa Barbara, CA, June 8–13*, pp. 287–317.
- Yu, K., Lu, Z., Stander, J., 2003. Quantile regression: applications and current research areas. *Statisticians* 52 (3), 331–350.