UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2017-11

SIMULACIÓN NUMÉRICA 3D DEL SALTO DE PARTÍCULAS COMO TRANSPORTE DE FONDO EN UN CANAL TURBULENTO

GONZÁLEZ MELLADO, EDUARDO FELIPE

http://hdl.handle.net/11673/40687

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

SIMULACIÓN NUMÉRICA 3D DEL SALTO DE PARTÍCULAS COMO TRANSPORTE DE FONDO EN UN CANAL TURBULENTO

Eduardo Felipe González Mellado

Memoria para optar al título de

Ingeniero Civil

Profesor Guía

Patricio Moreno Casas

Profesor Correferente

Álvaro Ossandón

Noviembre, 2017

RESUMEN

El movimiento de sedimentos en corrientes y ríos presenta dos formas. Los sedimentos en suspensión están constituidos por las partículas más finas mantenidas en suspensión por las fuerzas del flujo, los que sedimentan cuando la velocidad del flujo que los transporta disminuye. Por otro lado, las partículas sólidas de mayor tamaño son arrastradas cerca del lecho, de manera que este tipo de transporte se designa con el nombre de transporte o arrastre de fondo. El transporte de fondo se puede sub-dividir en tres categorías: saltación o salto de fondo, deslizamiento y rodado. La saltación corresponde a un proceso en el que las partículas de mayor tamaño (arenas y gravas por lo general) son suspendidas desde el lecho por el flujo turbulento, y puestas en movimiento. Las partículas que se mueven en este modo de transporte describen una trayectoria de saltos constantes, y se considera el tipo de transporte de fondo más importante para ríos y canales.

Actualmente, la comprensión de la interacción entre las partículas de sedimento y la turbulencia (altos números de Reynolds) es aún limitada. Este tema constituye uno de los ámbitos no resueltos pertenecientes al campo de la mecánica de flujo bifásica. Para poder entender de mejor manera la saltación de sedimentos es que se han desarrollado modelos capaces de predecir el fenómeno, pero ninguno ha logrado un acoplamiento completo entre flujo y partículas.

El presente trabajo presenta un modelo Lagrangiano de seguimiento de partículas que simula la saltación simplemente acoplado al flujo turbulento de un canal. El modelo numérico de saltación de partículas se separa en 3 sub-modelos. El primero se utiliza para describir la trayectoria de salto (vuelo libre) de las partículas mediante la representación de las fuerzas hidrodinámicas que afectan los sedimentos; el segundo corresponde al choque de las partículas con la pared de fondo, para lo cual se representa la rugosidad del lecho por medio de consideraciones geométricas; y el tercero se encarga del choque entre partículas.

Para validar este trabajo se realizaron diferentes simulaciones cuyos resultados (alto y largo promedio de salto) se comparan con los resultados conseguidos con datos experimentales de laboratorio obtenidos de la literatura para diámetros de partícula en el rango de arenas. También se analizó el efecto que tiene la concentración de partículas en el comportamiento de éstas, así como el efecto en los recursos computacionales empleados en

la modelación. Por último, se analizó la dispersión de las partículas para diferentes escenarios de flujo y colisión de partículas.

Palabras clave: esfuerzos de corte, flujo turbulento, modelo numérico, saltación, sedimento.

ABSTRACT

The movement of sediments in streams and rivers has two forms. The sediments in suspension are constituted by the finest particles kept in suspension by the forces of the flow, which sediment when the speed of the flow that transports them diminishes. On the other hand, the larger solid particles are dragged near the bed, so that this type of transport is designated with the name of bottom transport or bottom drag. The bottom transport can be sub-divided into three categories: saltation, sliding and rolling. The saltation corresponds to a process in which larger particles (sands and gravels in general) are suspended from the bed by the turbulent flow, and set in motion. The particles that move in this way of transport describe a trajectory of constant jumps, and it is considered the most important type of bottom transport for rivers and channels.

Currently, the understanding of the interaction between sediment particles and turbulence (high Reynolds numbers) is still limited. This topic constitutes one of the unsolved scopes belonging to the field of biphasic flow mechanics. In order to better understand sediment saltation, models capable of predicting the phenomenon have been developed, but none has achieved a complete coupling between flow and particles.

The present work presents a Lagrangian particle tracking model that simulates saltation simply coupled to the turbulent flow of a channel. The numerical model of particle saltation is separated into 3 sub-models. The first is used to describe the jump trajectory (free flight) of the particles by representing the hydrodynamic forces that affect the sediments; the second corresponds to the collision of the particles with the bottom wall, for which the roughness of the riverbed is represented by geometric considerations; and the third is responsible for the collision between particles.

To validate this work, different simulations were executed, whose results (high and long jump average) are compared with the results of experimental laboratory data obtained from the literature for particle diameters in the range of sands. It was also analyzed the effect that the concentration of particles has on the behavior of these, as well as the effect on the computational resources used in the modeling. Finally, the dispersion of the particles was analyzed for different flow and particle collision scenarios.

Keywords: cutting efforts, turbulent flow, numerical model, saltation, sediment.

GLOSARIO

∇	Operador gradiente
A	Sección transversal de la partícula
$\vec{c}$	Velocidad relativa del centro de masa
$\overrightarrow{c_{fc}}$	Velocidad de deslizamiento entre las superficies de las partículas
C_D	Coeficiente de Arrastre
C_L	Coeficiente de sustentación
C_M	Coeficiente de Magnus
C_m	Coeficiente de masa virtual
d	Diámetro de partícula
d/dt	Derivada respecto al tiempo
d_p	Diámetro de partícula
e	Coeficiente de restitución
f	Coeficiente de fricción
F_{am}	Fuerza de masa añadida
F_{bs}	Fuerza Basset
F_{dr}	Fuerza de arrastre
F_{fa}	Fuerza de aceleración del fluido
F_{lf}	Fuerza de sustentación
F_{mg}	Fuerza Magnus
F_{sw}	Fuerza peso sumergido
g	Aceleración de gravedad
H	Altura de salto
h	Altura del canal
$\vec{J}$	Impulso de la colisión entre partículas
J_n	Componente normal del impulso
J_t	Componente tangencial del impulso
L	Longitud de salto

m	Masa
$\vec{n}$	Vector normal
R	Diferencia entre relaciones de densidad
R_p, R_{ep}	Número de Reynolds explícito de la partícula
t	Tiempo
$\vec{t}$	Vector tangencial
u_*	Velocidad de fricción
u_f	Velocidad del flujo
u_p	Velocidad de la partícula
u_r	Velocidad relativa de la partícula respecto al flujo
U_r	Magnitud de la velocidad relativa
$\overrightarrow{u_r}$	Vector de velocidad relativa en el centro de la partícula
$\overrightarrow{u_{rB}}$	Vector de velocidad relativa en la parte superior de la partícula
$\overrightarrow{u_{rT}}$	Vector de velocidad relativa en la parte inferior de la partícula
v_s	Velocidad de caída de la partícula
y	Dirección normal al plano
α	Factor de masa
γ_x	Factor de dispersión en el eje X
γ_z	Factor de dispersión en el eje Z
θ	Ángulo de inclinación del fondo del canal
μ	Viscosidad dinámica del fluido
ν	Viscosidad cinemática del fluido
ρ	Densidad del fluido
ρp	Densidad de la partícula
τ_*, τ_{cr}	Esfuerzo de corte crítico
τ	Esfuerzo de corte
$\vec{\omega}$	Vector de rotación adimensional de la partícula
$\overrightarrow{\omega_r}$	Vector de rotación relativa adimensional de la partícula

$\overrightarrow{\omega_z}$	Componente adimensional del vector de rotación de la partícula en la dirección transversal del flujo
ω_z	Rotación angular de la partícula a lo largo del eje longitudinal
Ω_p	Velocidad angular de la partícula

CONTENIDO

Resumen i
Abstract iii
Glosario iv
Índice de Figuras ix
Índice de Tablas xiii
Capítulo I Introducción 1
Identificación del problema 1
Objetivo General 5
Objetivos Específicos 5
Capítulo II Revisión de la Literatura 6
2.1 Modelo de saltación de partículas 6
2.2 Descripción de las fuerzas consideradas en el modelo de saltación 7
2.3 Sub-modelo para vuelo libre de partículas 10
2.4 Sub-modelo para colisión de partículas con el fondo del canal 13
2.5 Sub-modelo para colisión entre partículas 14
2.6 Representación del flujo 16
2.7 Información experimental para validación 17
2.8 Difusión 19
Capítulo III Caso de estudio 22
3.1 Caso Particular 22
3.2 Funcionamiento modelo 25
3.3 Análisis 27
Capítulo IV Resultados 29
4.1 Validación del modelo 29
4.2 Concentración de partículas 31
4.3 Recursos computacionales 34

4.4 Dispersión 36

Capítulo V Discusión y Análisis 54

5.1 Validación 54

4.2 Concentración de partículas 55

4.3 Recursos computacionales 56

4.4 Dispersión 57

Conclusiones 61

Referencias 64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. La figura a) muestra un ejemplo de la trayectoria en elevación de una partícula en saltación, mientras que la figura b) muestra los parámetros estadísticos de saltos de partículas. **H** representa la altura del salto, y **L** el largo del salto. Los ejes en dirección del flujo y perpendicular al fondo son normalizados por el diámetro de la partícula **dp**. Fuente: Elaboración propia. 3

Figura 2-1: Esquema de definición 3D para salto de partículas. Fuente: Tesis de Doctorado Patricio Moreno Casas (2014). 11

Figura 2-2. Definición de parámetros para el modelo 3D de colisión de partículas con el lecho de fondo de Tsuji et al. (1985). Las velocidades de la partícula post colisión son denotadas con la virgulilla ^, mientras las velocidades previas a la colisión se denotan con la virgulilla ~. Fuente: Tesis de Doctorado Patricio Moreno Casas (2014). 14

Figura 2-3. Esquema de la colisión entre partículas. Definición de parámetros. Fuente: Tesis de Doctorado Patricio Moreno Casas (2014). 16

Figura 2-4. Representación conceptual de una trayectoria de partículas de transporte de fondo que consta de 3 rangos de escala distintos: local (Local range), intermedio (Intermediate range) y global (Global range). Fuente: Nikora (2002). 21

Figura 3-1. Malla y dominio computacional para LES de un canal de flujo periódico. Fuente: Elaboración propia. 23

Figura 3-2. Output del flujo turbulento, se muestra el campo de magnitud de velocidades (U Magnitude). Fuente: Elaboración propia. 24

Figura 3-3. Ejemplo resultados modelación, graficados en Matlab. Fuente: Elaboración propia. 25

Figura 4-1. Comparación de resultados de simulación numérica de salto de una partícula obtenidos con el modelo propuesto, con información experimental de Niño y García (1998). a) Altura adimensional del salto de partícula ($\boldsymbol{H/dp}$). b) Largo adimensional del salto de partícula ($\boldsymbol{L/dp}$). c) Velocidad adimensional de la partícula en dirección del flujo ($\boldsymbol{up/u*}$). Los valores de Niño y García (1998) se desplazaron en 0.01 $\boldsymbol{\tau/\tau c}$ para mejor la visualización de los resultados .Fuente: Elaboración propia. 30

Figura 4-2.Resultados de modelación para distintas concentraciones de partículas. a) Altura adimensional del salto de partícula ($\boldsymbol{H/dp}$). b) Largo adimensional del salto de partícula

($\boldsymbol{L/dp}$). c) Velocidad adimensional de la partícula en dirección del flujo ($\boldsymbol{up/u*}$). d) Valor absoluto de rotación adimensional de la partícula en el eje y. Fuente: Elaboración propia. 33
Figura 4-3. Porcentaje de tiempo utilizado en el movimiento de partículas v/s el tiempo utilizado en calcular las nuevas velocidades, considerando choque entre partículas y con el lecho de fondo para distintas concentraciones. Caso 1: 0.7% de concentración de partículas. Caso 2: 2.2% de concentración de partículas. Caso 3: 4.8% de concentración de partículas Caso 4: partículas sin considerar choque entre partículas. Fuente: Elaboración Propia. 34
Figura 4-4. Número de colisiones por partícula según concentración de partículas. Fuente: Elaboración propia..... 35
Figura 4-5. Gráfica de la dispersión de partículas con 0.7% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 1.79 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 37
Figura 4-6. Gráfica de la dispersión de partículas con 0.7% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 1.87 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 38
Figura 4-7. Gráfica de la dispersión de partículas con 0.7% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.43 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 39
Figura 4-8. Gráfica de la dispersión de partículas con 0.7% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.50 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 40
Figura 4-9. Gráfica de la dispersión de partículas con 0.7% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.67 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 41
Figura 4-10. Gráfica de la dispersión de partículas con 2.2% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 1.79 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X

(dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 42
Figura 4-11. Gráfica de la dispersión de partículas con 2.2% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 1.87 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 43
Figura 4-12. Gráfica de la dispersión de partículas con 2.2% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.43 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 44
Figura 4-13. Gráfica de la dispersión de partículas con 2.2% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.50 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 45
Figura 4-14. Gráfica de la dispersión de partículas con 2.2% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.67 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 46
Figura 4-15. Gráfica de la dispersión de partículas con 4.8% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 1.79 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 47
Figura 4-16. Gráfica de la dispersión de partículas con 4.8% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 1.87 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 48
Figura 4-17. Gráfica de la dispersión de partículas con 4.8% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.43 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 49

Figura 4-18. Gráfica de la dispersión de partículas con 4.8% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.50 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 50
Figura 4-19. Gráfica de la dispersión de partículas con 4.8% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.67 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia. 51
Figura 4-20. Grafica resumen para $\boldsymbol{\gamma x}$ (a) y $\boldsymbol{\gamma z}$ (b) para la dispersión de partículas en rango intermedio. Fuente: Elaboración Propia. 53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Características de la información experimental de salto de partículas. 18
Tabla 2-2: Conjunto de valores para coeficientes de fricción y restitución. 19
Tabla 4-1. Número de colisiones por partícula según concentración de partículas. 35
Tabla 4-2. Resumen valores de $\boldsymbol{\gamma x}$ para dispersión de partículas en rango local en eje X. . 52
Tabla 4-3. Resumen valores de $\boldsymbol{\gamma x}$ para dispersión de partículas en rango intermedio en eje X. 52
Tabla 4-4. Resumen valores de $\boldsymbol{\gamma z}$ para dispersión de partículas en rango local en eje Z.. 52
Tabla 4-5. Resumen valores de $\boldsymbol{\gamma z}$ para dispersión de partículas en rango intermedio en eje Z. 52

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

Identificación del problema

El transporte de sedimentos es un fenómeno muy importante con implicaciones prácticas en la calidad del agua en ríos, y en la gestión, protección y sostenibilidad de infraestructura. Afecta a corrientes naturales, océanos, lagos y actividades industriales. La abrasión y erosión pueden causar serios problemas en la infraestructura de transporte como carreteras, autopistas y puentes (Julien, 2010). La sedimentación de partículas en canales, puertos y embalses reduce la profundidad efectiva del agua para la navegación y disminuye la capacidad de almacenamiento de los embalses. El sedimento puede ser considerado como un contaminante en sí mismo, pero también actúa como portador y depositador de contaminantes (metales pesados, plaguicidas, patógenos y en general compuestos orgánicos y no orgánicos), generando inconvenientes en la calidad del agua debido al transporte y resuspensión (Board, 1997). El control y manejo de sedimentos es costoso en ambientes naturales y aplicaciones industriales, por lo que la existencia de modelos para predecir su transporte es importante. Lamentablemente, los procesos que gobiernan el transporte de sedimentos no se comprenden en su totalidad. En especial, los procesos a micro-escala como la colisión entre partículas, y la interacción entre las partículas y la turbulencia son generalmente despreciados en los modelos utilizados en ingeniería. Esto último afecta el desempeño, precisión y confiabilidad en la predicción de dichos modelos (Meritt et al, 2003).

El transporte de sedimento se puede dividir en transporte suspendido y de fondo (Julien, 2010). Generalmente se considera que las partículas de menor tamaño como limos y arcillas son transportadas en suspensión, moviéndose lejos de la pared de fondo (carga en suspensión), y las partículas de arena y grava ruedan y se deslizan en una capa delgada cerca del fondo (carga de fondo). La predicción del transporte de fondo es perentoria para la evaluación de riesgo, y en el planeamiento e implementación de medidas de protección de inundaciones en zonas rivereñas; además de su importancia en la modelación de procesos geomorfológicos, sedimentológicos y en la mecánica de ríos. A pesar de su importancia y de la existencia de más de un siglo de investigación en el tema, el conocimiento existente en los procesos involucrados en el transporte de carga de fondo es aun limitado. Es por este motivo que esta memoria se enfoca en el transporte de fondo.

Las partículas entran en movimiento tan pronto como el esfuerzo cortante aplicado en el material del fondo excede al esfuerzo cortante crítico o de inicio de movimiento (García, 2008; Julien, 2010). Cuando los esfuerzos de cizalle son bajos, el movimiento de las partículas se describe principalmente como deslizamiento y/o rotación, sin embargo, con un pequeño aumento de la tensión de corte en las partículas, éstas comenzarán a saltar y chocar con la pared de fondo, en un movimiento no suspendido. Éste último modo de transporte se denomina *saltation* (también conocido como salto de partículas o saltación), y es el modo de transporte de fondo más importante en ríos y canales naturales (García, 2008).

El salto de partículas ha sido objeto de estudios experimentales y numéricos durante varias décadas. Se ha prestado especial atención a la saltación de partículas de arena debido a la erosión eólica en zonas desérticas, a las partículas de nieve y a las partículas de carga en los flujos de agua. A pesar de que la información experimental ha sido la base para la compresión de la mecánica de la saltación de partículas, aún no se han publicado datos completos de movimiento de partículas en un flujo turbulento debido a la dificultad de realizar tal tarea con las tecnologías de medición actuales. Hasta el momento, sólo existen expresiones empíricas de las tasas de transporte de carga en lecho, obviamente con limitaciones relacionadas con rangos específicos de características de flujo y de partículas.

En las últimas décadas se han propuesto una serie de modelos computacionales del transporte de sedimentos como carga de fondo con éxito relativo (Wiberg y Smith, 1985; Niño y García, 1994; Lee y Hsu, 1994; Schmeeckle y Nelson, 2003; Lukerchenko et al., 2006; Lee et al., 2006; y Moreno y Bombardelli, 2012), centrándose principalmente en las estadísticas de saltación, tales como: altura y longitud de salto promedio (ver Figura 1-1). Sin embargo, su exactitud sigue siendo limitada, debido a la falta de conocimiento en la interacción entre el flujo portador y las partículas en movimiento a pequeñas escalas. Por lo tanto, se necesitan más avances en el tema para comprender mejor la física de estos complejos procesos.

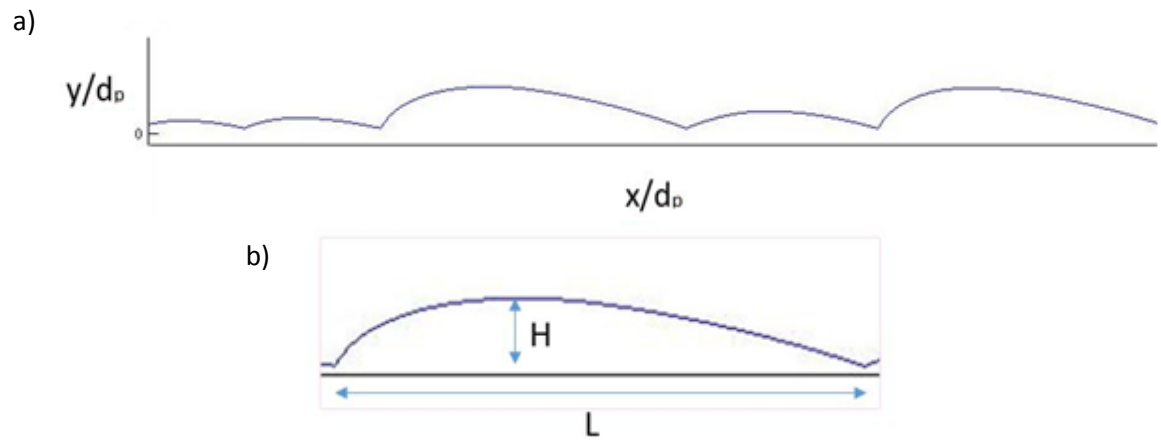


Figura 1-1. La figura a) muestra un ejemplo de la trayectoria en elevación de una partícula en saltación, mientras que la figura b) muestra los parámetros estadísticos de saltos de partículas. H representa la altura del salto, y L el largo del salto. Los ejes en dirección del flujo y perpendicular al fondo son normalizados por el diámetro de la partícula d_p. Fuente: Elaboración propia.

Los primeros modelos de saltos de partículas fueron de naturaleza bidimensional, a pesar de que la saltación es esencialmente un mecanismo tridimensional, por lo que se espera una mejor compresión y predicción del fenómeno utilizando modelos 3D. La mayoría de los modelos trabajan con un enfoque Euleriano-Lagrangiano, en donde el flujo tiene un tratamiento Euleriano como un continuo, mientras que cada una de las partículas se rastrea de manera Lagrangiana.

Generalmente los modelos en 2 y 3 dimensiones usan una representación de velocidad promedio del flujo, en lugar de resolver el flujo real con su dependencia de tiempo. Esta representación de la velocidad se conoce como Ley logarítmica de la pared, o perfil logarítmico de velocidad. Varios modelos (más recientes) que incluyen fluctuaciones de turbulencia en la representación del flujo lo hacen a través de relaciones empíricas obtenidas experimentalmente, o mediante el uso de funciones espectrales para dar cuenta de las fluctuaciones de velocidad. Por lo tanto, para obtener predicciones más realistas, las simulaciones numéricas debieran considerar una representación general del flujo turbulento 3D que imite las condiciones naturales de un flujo de canal abierto. Esto, por cierto, es difícil, sobretodo tomando en cuenta los altos números de Reynolds presentes en canales y ríos. Se pueden aplicar varios niveles de acoplamiento a las simulaciones numéricas: acoplamiento unidireccional, donde el efecto de las partículas en la dinámica del flujo es despreciable; acoplamiento bidireccional, donde las partículas afectan la dinámica del flujo; acoplamiento de tres vías, donde hay efectos hidrodinámicos entre partículas; y acoplamiento de cuatro

vías, donde las colisiones entre partículas son incorporadas al modelo. González (2008) fue pionera en la aplicación de un flujo totalmente turbulento al movimiento de saltación de las partículas en canales, pero con un acoplamiento unidireccional. El acoplamiento unidireccional descuida la influencia de las partículas en la hidrodinámica del flujo y, por lo tanto, no se tiene en cuenta la modificación de la turbulencia debido a la presencia de partículas. Este tipo de enfoque es razonable para bajas concentraciones de partículas, donde la cantidad de partículas por volumen de fluido es tan baja que su efecto en la dinámica del flujo es despreciable.

Las colisiones entre partículas (acoplamiento de cuatro vías), también es un aspecto importante en la saltación de partículas. Su relevancia dependerá de la concentración de sedimentos que se muevan como carga de fondo, de la intensidad de flujo, y del tamaño, forma y densidad de las partículas (Moreno y Bombardelli, 2012).

El trabajo aquí presentado muestra la primera etapa de un proyecto que busca lograr un modelo numérico de salto de partículas con acoplamiento 3D, de dos y cuatro vías, mediante un enfoque Euleriano-Lagrangiano utilizando la simulación de un canal turbulento. Para validar el modelo de seguimiento de partículas acoplado a la resolución del campo de velocidades del canal, se comparan las estadísticas de altura y largo de salto promediadas, y la velocidad de partícula promedio, con los resultados experimentales de Niño y García (1998), para una partícula de arena, completamente esférica de 0.69 mm de diámetro.

Objetivo General

Estudiar el salto de partículas de arena cerca del fondo en un canal turbulento mediante simulaciones numéricas en tres dimensiones utilizando un enfoque Euleriano-Lagrangiano.

Objetivos Específicos

I. Acoplar la simulación del canal turbulento en OpenFOAM con el código de seguimiento de partículas SALTATE.

II. Obtener resultados del salto de partículas, esto es, alto y largo promedio de salto en la simulación, y compararlos con los resultados experimentales para arenas de Niño y García (1998), para así validar el modelo propuesto.

III. Analizar los efectos de variar concentración de partículas en el comportamiento de éstas, a través de estadísticas de salto, velocidad y difusión de partículas.

CAPÍTULO II
REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Modelo de saltación de partículas

El movimiento de saltación de partículas es modelado como un flujo de dos fases, implicando la interacción de una fase transportadora, en este caso el agua, con una fase dispersa, que corresponde a las partículas de sedimento en movimiento. El modelo de saltación de partículas que será presentado a continuación, trata el flujo, o fase transportadora, con un enfoque Euleriano, es decir, el movimiento del fluido se enfoca en una ubicación específica en el espacio o volumen de control, a través del cual el fluido viaja a medida que pasa el tiempo. Al mismo tiempo la saltación de la partícula de sedimento será tratada con un enfoque Lagrangiano, es decir, cada partícula será seguida de forma individual mientras se mueve en el espacio y tiempo. Una aproximación para un flujo de dos fases requiere considerar ecuaciones separadas que describan el movimiento de la fase transportadora y la fase dispersa.

Para un tratamiento riguroso de la simulación computacional de salto de partículas, habría que desarrollar un mallado computacional muy fino, tan fino que permita resolver las ecuaciones de Navier-Stokes sobre la superficie de cada partícula (de diámetro 0.69 mm) en movimiento aplicando Direct Numerical Simulation (DNS). Sin embargo, esto se torna imposible de lograr debido a las limitadas capacidades computacionales de hoy en día para resolver estas ecuaciones para altos números de Reynolds (de $R_e \geq 10^4$), sumado a los crecientes recursos computacionales requeridos cuando el número de partículas aumenta considerablemente (sobre 10.000 partículas). Por lo tanto, se debe optar por un enfoque diferente. Una muy buena aproximación en estos casos se puede lograr utilizando el point-particle method (o método de la partícula como un punto) que considera que la partícula es un punto que se mueve en el espacio, al que se le asignan fuerzas, velocidad y posición (Prosperetti y Tryggvason, 2007). Este último enfoque permite la simulación simultánea de miles de partículas a un alto número de Reynolds, con costos computacionales elevados pero accesibles a la disponibilidad de capacidad de cómputo actual. Para este método el intercambio de momentum entre la partícula y el fluido que la rodea es modelado, en lugar

de ser resuelto directamente (Prosperetti y Tryggvason, 2007). Los modelos que aplican el point-particle method utilizados en transporte de sedimento, asumen un flujo que es incompresible, y un movimiento de partículas que no experimenta ningún tipo de intercambio de energía o masa con la superficie del grano. Por lo tanto, para la fase dispersa, solo se deben resolver las ecuaciones para la conservación de momentum, tanto lineal como angular, mientras que para la fase transportadora, se resuelven las ecuaciones de momentum lineal y de balance de masa.

El modo de saltación de una partícula consiste en estar saltando y chocando constantemente con la pared de fondo del canal, al mismo tiempo que potencialmente la partícula puede colisionar con otras partículas que se mueven en saltación, esto dependiendo de las concentraciones de sedimento en movimiento. Entre colisiones, las partículas se mueven debido a la interacción con las fuerzas hidrodinámicas ejercidas por el flujo, que son contrarrestadas por la acción de la fuerza de gravedad, la cual atrae constantemente a los granos en movimiento hacia el lecho de fondo (Moreno-Casas et al., 2017). Para caracterizar esta etapa del movimiento de la partícula, es necesario considerar una ecuación que represente las fuerzas hidrodinámicas y la acción de la gravedad. Esta ecuación debe incorporar todas las fuerzas que podrían ser importantes en el proceso de saltación. Cuando la partícula choca con la pared de fondo (u otra partícula), el intercambio de momentum entre la partícula y el lecho de fondo o entre partículas debe ser calculado.

El modelo utilizado y programado, se puede dividir en sub-modelos, que se encargan de emular los procesos físicos de la partícula en movimiento. Esto es, un sub-modelo que describe el movimiento de las partículas entre colisiones con el fondo. Otro sub-modelo se encarga emular la colisión de la partícula con el fondo, y otro sub-modelo emula el choque entre partículas en movimiento. En las siguientes secciones se describen los sub-modelos antes mencionados.

2.2 Descripción de las fuerzas consideradas en el modelo de saltación

Una partícula con masa m, que se mueve con velocidad u_p, en un flujo con velocidad u_f, tiene una aceleración que es determinada por la adición de varias fuerzas actuando sobre la partícula (2º Ley de Newton). Las fuerzas consideradas para el modelo a utilizar en esta memoria son: peso sumergido (submerged weight, F_{sw}), arrastre (drag, F_{dr}), sustentación

(lift, F_{lf}), Basset (F_{bs}), Magnus (F_{mg}), masa añadida (added mass, F_{am}) y aceleración del fluido (fluid acceleration, F_{fa}). Por lo tanto, la ecuación de movimiento para saltación de partículas puede ser escrita como:

$$m\frac{du_p}{dt} = F_{sw} + F_{dr} + F_{lf} + F_{bs} + F_{mg} + F_{am} + F_{fa} \tag{1}$$

La ecuación (1) no considera el efecto de colisión durante el evento de saltación, pues el intercambio de momentum entre dos partículas colisionando se incorpora al modelo utilizando otras ecuaciones. Para la gran mayoría de los términos descritos en la ecuación base se utilizan los términos para las fuerzas descritos en Niño y García (1994).

Fuerza de peso sumergido (F_{sw})

La fuerza de peso sumergido de una partícula esférica puede ser calculada como la diferencia entre la fuerza de gravedad y el principio de Arquímedes (empuje debido al volumen de fluido desplazado):

$$F_{sw} = \frac{\pi}{6}(\rho_p - \rho)gd^3 \tag{2}$$

En donde g es la aceleración de gravedad, ρ y ρ_p son la densidad del agua y de la partícula, respectivamente; y d es el diámetro de la partícula.

Fuerza de arrastre (F_{dr})

Esta fuerza hace referencia a las fuerzas que actúan sobre un objeto sólido en la dirección de la velocidad relativa del flujo, y provienen principalmente de los efectos de presión y de fuerzas viscosas en la superficie de la partícula. La fuerza de arrastre expresada en términos de la velocidad relativa de la partícula en relación al flujo, u_r, puede escribirse como:

$$F_{dr} = -\frac{3}{4}C_D\frac{\rho}{\rho_p}\frac{A\vec{u}_r U_r}{d} \tag{3}$$

En donde C_D es el coeficiente de arrastre, A es la sección transversal de la partícula en la dirección de u_r, y U_r es la magnitud de u_r. La velocidad relativa de la partícula puede ser calculada como $\vec{u}_r = \vec{u}_p - \vec{u}_f$, siendo el primer término la velocidad de la partícula y el

segundo la velocidad del fluido. Para C_D se utiliza la expresión sugerida en Yen (1992) que depende solo del número de Reynolds de la partícula, y que se muestra más adelante.

Fuerza de sustentación (F_{lf})

Para partículas esféricas en presencia de flujo de corte, el gradiente de presión (dado que la velocidad del flujo aumenta con la altura, la presión va disminuyendo, produciéndose una diferencia de presiones en los extremos de la partícula) normal a la dirección de corte generará levantamiento o sustentación. Esta fuerza puede ser escrita como:

$$F_{lf} = -\frac{1}{2} C_L \rho A (\nabla U^2) d \tag{4}$$

Donde ∇U es el gradiente de la velocidad, usualmente calculado como la diferencia entre la velocidad de la partícula en la parte superior e inferior. El coeficiente de sustentación, C_L, también es un coeficiente adimensional y generalmente se asume proporcional a C_D (Wiberg and Smith, 1985).

Fuerza Basset (F_{bs})

La fuerza Basset, o fuerza histórica de Basset, es un término que indica "el retardo temporal en el desarrollo de la capa límite que rodea a la partícula como una secuencia de cambios en la velocidad relativa" (Bombardelli et al. 2008). Esta resistencia se debe a la inestabilidad del flujo alrededor de la partícula y se define como:

$$F_{bs} = -\frac{9}{d}\left(\frac{\rho\mu}{\pi}\right)^{0.5} \int_0^t \frac{d\vec{u}_r}{d\tau} \frac{d\tau}{(t-\tau)^{0.5}} \tag{5}$$

En donde t indica el tiempo, μ corresponde a la viscosidad dinámica del fluido, y τ es la variable de integración. La integral de la ecuación (5) debe ser resuelta con precaución, ya que el límite superior de integración es singular (revisar, por ejemplo, Moreno-Casas y Bombardelli, 2016).

Fuerza Magnus (F_{mg})

La rotación de una partícula en un campo de flujo genera una fuerza perpendicular a la dirección de movimiento y la dirección de rotación. A esta última se le conoce como la fuerza de Magnus o fuerza de sustentación (lift) de rotación. Una forma básica de Magnus para altos números de Reynolds corresponde a:

$$F_{mg} = C_M \pi \rho \frac{d^3}{8} \left(\Omega_p \times \vec{u}_r \right) \tag{6}$$

Donde Ω_p representa la velocidad angular de la partícula, y C_M (o coeficiente de Magnus) considera la dependencia de la fuerza de Magnus sobre el número de Reynolds y la relación entre la rotación y la velocidad relativa de la partícula.

Fuerza de masa añadida (F_{am})

El movimiento de una partícula en un fluido requiere necesariamente de desplazamiento del fluido que rodea la partícula. Este efecto se cuantifica mediante la fuerza de masa añadida o masa virtual. Tratándose, de una partícula esférica inmersa en un flujo de alto números de Reynolds, esta fuerza puede escribirse como:

$$F_{am} = \rho C_m \frac{d}{dt} \left(u_f - u_p \right) \tag{7}$$

En donde C_m es el coeficiente de masa añadida.

Fuerza de aceleración del fluido (F_{fa})

La fuerza relacionada con la aceleración del fluido tiene que ver con el efecto que genera el movimiento del fluido lejos de la partícula, y se puede escribir de la siguiente forma:

$$F_{fa} = \rho \frac{D\vec{u}_f}{Dt} \tag{8}$$

2.3 Sub-modelo para vuelo libre de partículas

El sub-modelo 3D aquí propuesto describe la trayectoria y velocidad de la partícula entre colisiones con el fondo, y por lo tanto, donde las fuerzas hidrodinámicas provocan el movimiento de la partícula. Este modelo extiende formalmente las ecuaciones 2D para la tasa de cambio de los componentes de la velocidad propuestos por Niño y García (1994), y las combina con una ecuación dedicada a seguir la rotación en el tiempo de la partícula a través de la ecuación de momento angular.

Las ecuaciones del Sub-modelo proporcionan las velocidades adimensionales de la partícula en dirección del flujo, transversal al flujo y normal a la pared del fondo (u_p, v_p y w_p, respectivamente; ver Figura 2-1). Las ecuaciones presentadas a continuación muestran la ecuación de momentum de la partícula adimensionalisadas considerando el diámetro de

partícula como una escala de longitud, y la velocidad de fricción (o corte), u^*, como una escala de velocidad.

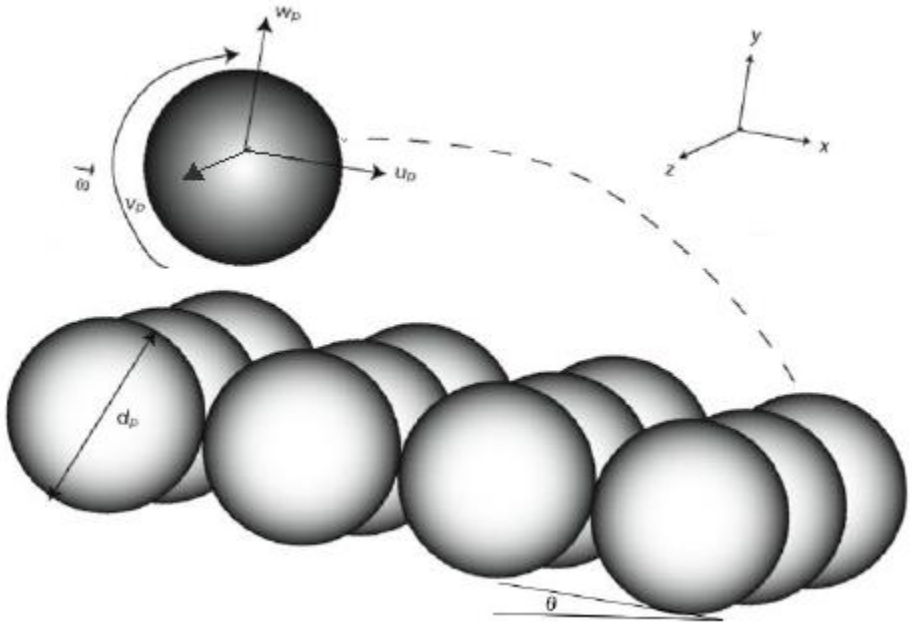


Figura 2-1: Esquema de definición 3D para salto de partículas. Fuente: Tesis de Doctorado Patricio Moreno Casas (2014).

$$\frac{du_p}{dt} = \alpha\frac{\sin\theta}{\tau_*} - \frac{3}{4}\alpha C_D\left(u_p - u_f\right)|\vec{u}_r| + \alpha C_m w_p\frac{du_f}{dz} + \frac{9\alpha}{\sqrt{\pi R_n}{\tau_*}^{1/4}}\int_0^t \frac{d}{d\tau}\left(u_f - u_p\right)\frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} + \rho\frac{du_f}{dt} \tag{9}$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \alpha\frac{\cos\theta}{\tau_*} - \frac{3}{4}\alpha C_D v_p|\vec{u}_r| + \frac{3}{4}\alpha C_L(|\vec{u}_r|_T^2 - |\vec{u}_r|_B^2) - \frac{9\alpha}{\sqrt{\pi R_n}\tau_*^{\frac{1}{4}}}\int_0^t \frac{d}{d\tau}v_p\frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} + \frac{3}{4}\alpha|\vec{u}_r|\left(\vec{w}_z - \frac{1}{2}\frac{du_f}{dy}\right) + \rho\frac{dv_f}{dt} \tag{10}$$

$$\frac{dw_p}{dt} = -\frac{3}{4}\alpha C_D w_p|\vec{u}_r| - \frac{9\alpha}{\sqrt{\pi R_n}\tau_*^{\frac{1}{4}}}\int_0^t \frac{d}{d\tau}w_p\frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} + \rho\frac{dw_f}{dt} \tag{11}$$

En estas ecuaciones (9, 10 y 11), C_D y C_L denotan los coeficientes de arrastre y sustentación respectivamente; $\vec{u}_r$, $\vec{u}_{r_T}$ y $\vec{u}_{r_B}$ son los vectores de velocidad relativa en el centro, en la parte superior y la parte inferior de la partícula, respectivamente; u_f es el

componente de la velocidad del fluido en dirección del flujo; α es definido como $(1 + R + C_m)^{-1}$, en donde C_m es el coeficiente de masa virtual, y R es definido como $(\rho_s/\rho - 1)$ siendo la gravedad específica sumergida de la partícula; τ_* se calcula para este caso como ${u_*}^2/(g\ R\ d_p)$; g es la aceleración de gravedad; $R_p = \left(R\ g\ {d_p}^3\right)^{0.5}/\nu$, el número de Reynolds explícito de la partícula, en donde ν es la viscosidad cinemática del agua; θ es el ángulo de inclinación del fondo del canal respecto del plano horizontal; $\varpi_z = \underline{\omega_z} d_p/u_*$ denota el componente adimensional del vector de rotación de la partícula en la dirección transversal del flujo, donde $\underline{\omega_z}$ representa la rotación angular de la partícula a lo largo del eje longitudinal; t denota el tiempo; τ es la variable de integración; y corresponde la dirección normal al plano del canal.

Los términos en el lado derecho de la ecuación (9) corresponden a las siguientes fuerzas por unidad de masa: peso sumergido o fuerza boyante, fuerza de arrastre no lineal (drag), fuerza de masa añadida o virtual, la fuerza Basset y fuerza de aceleración del fluido, respectivamente. Acerca de la ecuación (10), los términos son: peso sumergido o fuerza boyante, arrastre no lineal, sustentación, Basset, Magnus y fuerza de aceleración del fluido, respectivamente. Por último, respecto a la ecuación (11), los términos representan: fuerzas de arrastre, Basset y fuerza de aceleración del fluido, respectivamente. El operador $d(\cdot)/dt$ indica la derivada usando la velocidad de la partícula.

El coeficiente de arrastre, C_D, fue calculado usando la expresión propuesta por Yen (1992):

$$C_D = \frac{24}{Re_p}\left(1 + 0.15\sqrt{Re_p} + 0.017 Re_p\right) - \frac{0.208}{1 + 10^4 Re_p^{-0.5}} \qquad (12)$$

En donde $Re_p = v_s d_p/\upsilon$ es el número de Reynolds de la partícula, y v_s es la velocidad de caída de la partícula. Por simplicidad, el coeficiente de masa virtual para este modelo fue asumido como $C_m = 0.5$, así como en otros modelos de seguimiento de partículas. El coeficiente de sustentación fue asumido como $C_L = 0.2$, como es sugerido por Wiberg and Smith (1985). El vector adimensional de rotación de la partícula, $\vec{\omega}$, es calculado

numéricamente en cada paso de tiempo usando la expresión propuesta por Yamamoto et al. (2001):

$$\frac{d\vec{\omega}}{dt} = -C_t \frac{15}{16\pi} |\vec{\omega}_r| \vec{\omega}_r \tag{13}$$

En donde $C_t = C_1/\sqrt{Re_r} + C_2/Re_r + C_3 Re_r$; el número de Reynolds del movimiento de rotación es un coeficiente adimensional, $Re_r = {d_p}^2 |\vec{\omega}_r|/4v$; los coeficientes C_1, C_2 y C_3, son obtenidos de la tabla presentada en Yamamoto et al. (2001), y $\vec{\omega}_r$ es el vector adimensional de rotación relativa de la partícula respecto de la vorticidad del fluido.

2.4 Sub-modelo para colisión de partículas con el fondo del canal

La modelación numérica del proceso de colisión de partículas con la pared de fondo es generalmente separado en 3 aspectos: el rebote de la partícula, la representación de la rugosidad de la pared de fondo y la colisión entre partículas. El sub-modelo de rebote de partículas permite el cálculo de la velocidad lineal y angular de la partícula post-colisión, a partir de la velocidad lineal y angular justo antes de la colisión con la pared. Sumado a esto, la pérdida de energía durante la colisión semielástica de las partículas es tomada en cuenta usando coeficientes de fricción y restitución. La representación de las irregularidades propias de cualquier pared de fondo natural en canales o ríos se considera a través de expresiones aleatorias y geométricas. Esto último permite la variabilidad en las alturas y longitudes de los saltos de partículas, así como también en la dispersión global del grano. El modelo utilizado es el propuesto por Tsuji et al. (1985). Este modelo 3D considera la conservación de momentum lineal y angular antes y después de la colisión con el fondo. Las velocidades post-colisión (Figura 2-2), expresadas como una función de la velocidad de la partícula inmediatamente antes de la colisión, son calculadas dependiendo de si la partícula se desliza en el fondo o no. Estas ecuaciones son desarrolladas para el contacto con el plano horizontal entre la partícula en vuelo y la pared de fondo, y se encuentran disponibles en Crowe et al. (2011). Lo ventajoso de este modelo es que puede extenderse fácilmente para simular la colisión entre partículas, tomando en cuenta que el choque de la partícula con el fondo se puede considerar como la colisión entre una partícula con diámetro finito, y otra, la pared, con diámetro infinito.

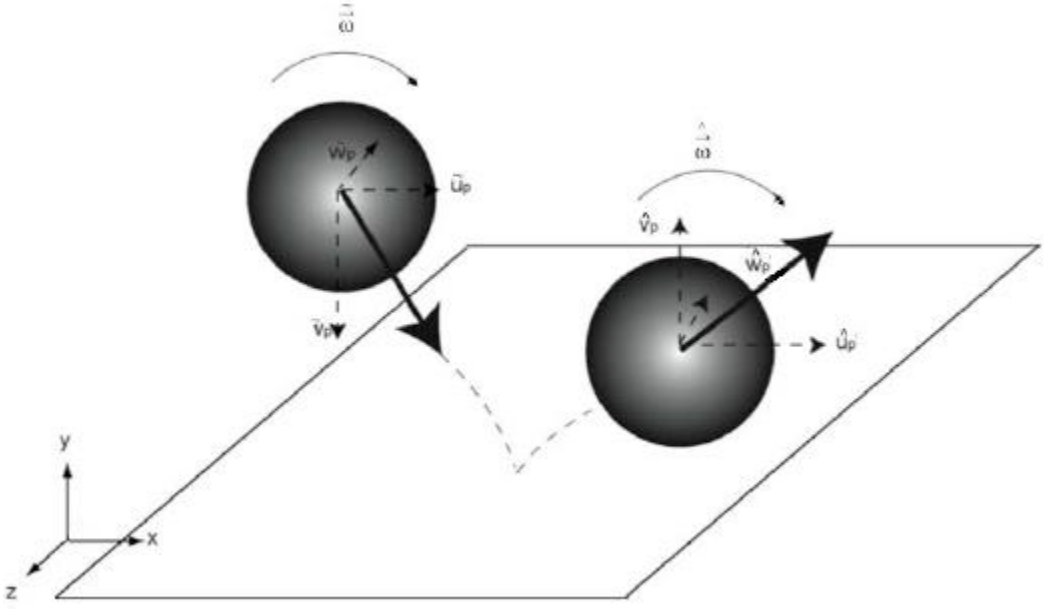


Figura 2-2. Definición de parámetros para el modelo 3D de colisión de partículas con el lecho de fondo de Tsuji et al. (1985). Las velocidades de la partícula post colisión son denotadas con la virgulilla ^, mientras las velocidades previas a la colisión se denotan con la virgulilla ~. Fuente: Tesis de Doctorado Patricio Moreno Casas (2014).

2.5 Sub-modelo para colisión entre partículas

Cuando dos partículas se encuentran en modo de salto y están en curso de colisión, entonces una subrutina que calcule las velocidades lineales y angulares después del choque debe ser utilizado. Para colisión entre partículas, dos modelos son generalmente considerados: el modelo de esfera dura (hard-sphere model), y el modelo de esfera suave (soft-sphere model). El primer modelo considera el intercambio de momentum lineal y angular entre las partículas colisionadas lo que permite calcular velocidades a partir de la información disponible previa al impacto, usando coeficientes de restitución y de fricción. Este modelo contempla sólo colisiones entre dos partículas (colisión binaria), la cual es una buena aproximación para flujos con bajas concentraciones de partículas. Por otro lado, el enfoque del modelo de esfera suave usa elementos mecánicos para modelar colisión entre múltiples partículas, y estimar las velocidades post-colisión, lo que lo hace muy útil cuando la concentración de partículas es alta (se producen colisiones entre múltiples partículas al mismo tiempo), sin embargo, el tiempo de cálculo es mucho más largo que el modelo de esfera dura. Dada las bajas concentraciones de sedimentos que se considerarán (menores al 5% en volumen), se utilizará el modelo de esfera dura, lo que también prioriza el tiempo de cálculo.

Las velocidades post-colisión para cualquier partícula i y j son indicadas a continuación con la virgulilla ^. Estas son calculadas usando las siguientes expresiones, basadas en las velocidades justo antes de la colisión (las cuales se denotan con la virgulilla ~).

$$\vec{\hat{u}}_{pi} = \vec{\tilde{u}}_{pi} + \frac{\vec{J}}{m_i} \tag{14}$$

$$\vec{\hat{u}}_{pj} = \vec{\tilde{u}}_{pj} + \frac{\vec{J}}{m_j} \tag{15}$$

$$\vec{\hat{\omega}}_i = \vec{\tilde{\omega}}_i + \frac{d_p}{2}\vec{n} \times \frac{\vec{J}}{I_i} \tag{16}$$

$$\vec{\hat{\omega}}_j = \vec{\tilde{\omega}}_j + \frac{d_p}{2}\vec{n} \times \frac{\vec{J}}{I_j} \tag{17}$$

En donde $\vec{J}$ es el impulso de la fuerza ejercida sobre la partícula i durante la colisión, y $\vec{n}$ es el vector unitario normal dirigido desde el centro de la partícula i hacia el punto de contacto con la partícula j, como se aprecia en la Figura 2-3. De esta manera, asumiendo partículas esféricas, y considerando valores conocidos para los coeficientes de restitución (e) y fricción (f), $\vec{J}$ puede ser calculado como (Tanaka and Tsuji, 1991):

$$\vec{J} = J_n\vec{n} + J_t\vec{t} \tag{18}$$

$$J_n = (1+e)\vec{n} \cdot \vec{c}\left(\frac{m_i}{2}\right) \tag{19}$$

$$J_t = -fJ_n \tag{20}$$

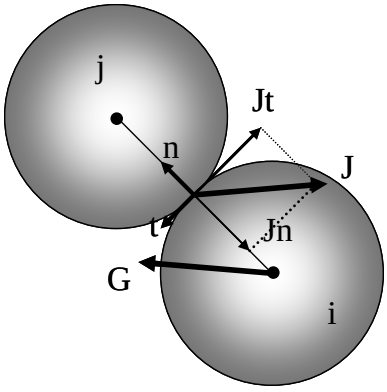


Figura 2-3. Esquema de la colisión entre partículas. Definición de parámetros. Fuente: Tesis de Doctorado Patricio Moreno Casas (2014).

En las ecuaciones (18) a (20), J_n y J_t denota el componente normal y tangencial del impulso, respectivamente, $\vec{t}$ y $\vec{n}$ representan los vectores unitarios normal y tangencial en la dirección de la velocidad de deslizamiento, respectivamente, dado por $\vec{t} = \vec{c}_{fc}/|\vec{c}_{fc}|$. La variable $\vec{c}$ corresponde a la velocidad relativa del centro de masa, $\vec{c} = \vec{\tilde{u}}_j - \vec{\tilde{u}}_i$, mientras la variable $\vec{c}_{fc}$ es la velocidad de deslizamiento entre las superficies de las partículas, que puede ser definida como:

$$\vec{c}_{fc} = \vec{c} - (\vec{c} \cdot \vec{n})\vec{n} - \frac{d_p}{2}\vec{\tilde{\omega}}_i \times \vec{n} - \frac{d_p}{2}\vec{\tilde{\omega}}_j \times \vec{n} \tag{21}$$

2.6 Representación del flujo

En la mecánica de fluidos se pueden identificar los flujos laminar y turbulento. El primero, se presenta cuando las fuerzas viscosas gobiernan frente a las fuerzas inerciales y el movimiento de las partículas de fluido describe trayectorias suaves y definidas (conocidas como líneas de corriente), de manera ordenada, en láminas y sin mezclado significativo. El flujo turbulento es todo lo contrario, es decir, que las fuerzas inerciales son más importantes que las fuerzas viscosas, las trayectorias de su movimiento son irregulares, no son suaves ni definidas y muestran una variación aleatoria en sus cantidades (como velocidad y presión) debido a que el mezclado es importante. Cabe aclarar que entre estos dos flujos existe un estado transicional.

El flujo a utilizar en este estudio se encuentra en régimen turbulento, de manera de emular lo que ocurre en ríos y canales, el cual se caracteriza por:

1. Aleatoriedad: ya que estos flujos son irregulares, caóticos e impredecibles.

2. No linealidad: lo cual se evidencia cuando los flujos sobrepasan el umbral de parámetros adimensionales, como el número de Reynolds y Richardson (Número adimensional que expresa la relación entre la energía potencial y la energía cinética de un fluido), generando que pequeñas perturbaciones crezcan exponencialmente en flujos inestables, hasta que se alcanza un estado caótico. Además, la no linealidad de los flujos turbulentos produce una cascada de estiramientos de vórtices, el cual contribuye a mantener la vorticidad de los flujos tridimensionales.

3. Difusividad: los flujos presentan una alta tasa de propagación de cantidad de movimiento, debido al mezclado macroscópico de las partículas de fluido.

4. Vorticidad: son flujos rotacionales. En los flujos turbulentos existen altos niveles de fluctuación de vorticidad, siendo los vórtices o remolinos, las estructuras reconocibles de dichas fluctuaciones. Es importante destacar que uno de los principales rasgos de los flujos turbulentos es el amplio rango de escalas (espaciales y temporales) que se dan en los vórtices.

5. Disipación: se lleva a cabo por el proceso de estiramiento de los vórtices, transfiriendo la energía y vorticidad a los de menor tamaño y en una secuencia de cascada. Dicho mecanismo llega hasta los vórtices más pequeños, es decir con gradientes de velocidad altos, generando la disipación de energía debida a la viscosidad presente.

El flujo que se utilizará para el modelo de saltación se desarrolló bajo el método Large Eddy Simulation (LES), el cual se basa en un filtrado espacial de las ecuaciones de Navier-Stokes y Continuidad de tal manera, que se resuelven computacionalmente las grandes escalas (el movimiento turbulento de grandes remolinos), mientras que para escalas más pequeñas (pequeños remolinos, que la malla no alcanza a analizar) se asume un modelo que permite considerar de forma aproximada su influencia en la variación general de los parámetros del flujo.

2.7 Información experimental para validación

Para poder validar el modelo de saltación, es necesario revisar que los resultados de este sean coherentes con resultados experimentales existentes en la literatura. Es así como al indagar en las publicaciones del área, es posible encontrar un par de artículos comúnmente

utilizados para validar este tipo de modelos para sedimentos con diámetros dentro del rango de arenas.

Los experimentos más utilizados que contienen información detallada sobre la trayectoria de saltación de partículas son aquellos publicados por Lee (1993), Niño et al. (1994), Lee and Hsu (1994), Niño y García (1998), y Lee et al. (2006). En la tabla 2-1 se resumen y comparan los experimentos según: diámetro de partícula, número de saltos, velocidad de corte (como medida de la intensidad de flujo), y estadísticas de salto.

Tabla 2-1: Características de la información experimental de salto de partículas.

Autores	Método de grabación	Tamaño partícula (mm)	Número de saltos considerados	u_* (m/s)	Variables obtenidas
Niño et al. (1994)	Cámara de video estándar	15-31	80	0.14-0.23	Promedio y desviación estándar de H, L y u_p
Niño and García (1998)	Cámara de video de alta velocidad	0.5-0.8	1-2 saltos por cada 100 partículas	0.021-0.026	Promedio y desviación estándar de H, L y u_p
Lee et al. (2000)	Cámara de video estándar	6	Información no disponible	0.038-0.054	Promedio de H, L y u_p
Lee and Hsu (1994)	Cámara de video estándar	1.36-2.47	Información no disponible	0.036-0.105	Promedio de H, L y u_p
Lee et al. (2006)	Cámara de video estándar	0.6	Información no disponible	0.039-0.068	Promedio de H, L y u_p

En donde H y L representan la altura y largo (adimensionales) promedio, respectivamente, de los saltos de partículas experimentales, mientras que u_p representa la velocidad promedio de la partícula en dirección del flujo.

Los experimentos se llevaron a cabo con arenas (d_p= 0.0625 - 2 mm) y gravas (d_p= 2-64 mm), que corresponden a los tipos de sedimentos no-cohesivos transportados en saltación más comunes en flujos naturales.

Para los valores de los coeficientes de fricción (f) y restitución (e) utilizados en los sub-modelos de colisión de partículas con la pared e intrapartículas, los valores experimentales sugeridos dependen mucho del material de la partícula en saltación y de las condiciones del

flujo, por lo que, no es posible disponer de valores universales. En la tabla 2-2 se muestran valores recomendados por diferentes autores.

Tabla 2-2: Conjunto de valores para coeficientes de fricción y restitución.

Autor	Coeficiente de restitución e	Coeficiente de fricción f
Niño and García (1994)	$e=0.75-0.25\tau*/\tau*c$	**0.89**
Schmeeckle et al. (2001)	**0.65**	**0.1**
Tsuji et al. (1987)	**0.8**	**0.4**

A pesar de esto, en la tesis doctoral de Moreno (2014) se sugiere utilizar los valores de Schmeeckle et al. (2001), luego de una serie de análisis de salto de partículas para dos tamaños de arenas.

2.8 Difusión

Una partícula moviéndose como carga de fondo puede estar en reposo sobre el lecho o estar en movimiento (saltación, rotación o deslizamiento). Cuando una partícula se encuentra en saltación, esta se mueve debido a las fuerzas hidrodinámicas hasta un punto en que queda atrapada durante el proceso de colisión con el fondo, o simplemente la intensidad del flujo disminuye considerablemente de manera que éste no tiene la suficiente fuerza para mantener el transporte. Posteriormente se puede poner en suspensión nuevamente debido al aumento en las fuerzas hidrodinámicas. Por lo tanto, en la trayectoria de movimiento a largo plazo de una partícula en saltación, esta experimenta muchas colisiones con la pared, detenciones y re-suspensiones para seguir su movimiento aguas abajo.

Si las partícula cambian sustantivamente su posición en el tiempo, al ser transportadas por el flujo, respecto de su posición original, entonces se dice que existe una gran difusión o dispersión de partículas en un determinado eje (X, Y o Z). En cambio si las partículas siguen una trayectoria prácticamente rectilínea, entonces se dice que la difusión es cero. Nikora et al. (2001) sugiere un modelo conceptual para estimar la difusión de partículas para el transporte de fondo, identificando tres rangos de escalas espaciales y temporales con diferentes regímenes de difusión: rango local, intermedio y global. Entiéndase por difusión a la razón con que se dispersan las partículas en el plano de planta (X-Y) en el tiempo (no existe difusión en el eje Z).

El rango local corresponde a trayectorias balísticas de partículas, la que ocurre entre dos colisiones sucesivas con el lecho ($\gamma_x \approx \gamma_y \approx 1$). Estas trayectorias son el resultado del movimiento inercial propio de la partícula y sin pausas ni cambios repentinos en las direcciones.

El rango intermedio corresponde a trayectorias de partículas entre dos reposos sucesivos o períodos de reposo. Las trayectorias de este rango consisten en muchas trayectorias locales y pueden incluir decenas o cientos de colisiones con el lecho. En el intervalo intermedio, la difusión puede ser, en principio, lenta o subdifusiva ($(\gamma_x, \gamma_y) < 0{,}5$), normal ($\gamma_x = \gamma_y = 0{,}5$), superdifusiva ($\big((\gamma_x, \gamma_y\big) > 0{,}5$), o mixtas dependiendo de qué factores dominan el proceso de transporte. Por ejemplo, la batimetría del fondo y la turbulencia cercana al lecho pueden tener efectos opuestos sobre la difusión de partículas en saltación, la rugosidad del fondo puede ralentizar los procesos de difusión, mientras que la turbulencia puede aumentarlos.

El rango global de escalas corresponde a trayectorias de partículas que consisten en muchas trayectorias intermedias, del mismo modo que las trayectorias intermedias consisten en muchas trayectorias locales. El comportamiento de la partícula en el rango global de escalas es probablemente subdifusivo ($\gamma < 0{,}5$), como resultado de múltiples períodos de descanso. En la Figura 2-4 se pueden ver los tres rangos (Local, Intermedio y Global) que conforman el modelo conceptual de Nikora et al. (2001).

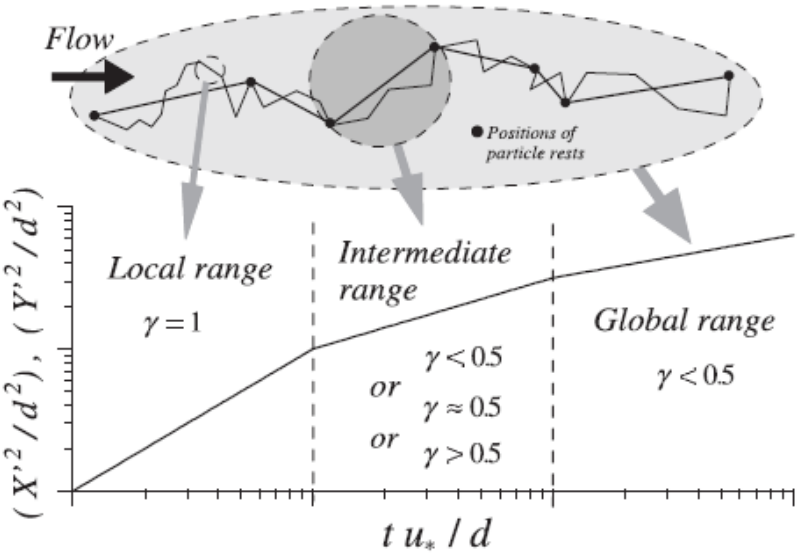


Figura 2-4. Representación conceptual de una trayectoria de partículas de transporte de fondo que consta de 3 rangos de escala distintos: local (Local range), intermedio (Intermediate range) y global (Global range). Fuente: Nikora (2002).

En la Figura 2-4 se tiene que las pendientes de las curvas están dadas por las ecuaciones (regresiones) de línea:

$$X'^2 = \alpha_x t^{2\gamma_x}$$

$$Y'^2 = \alpha_y t^{2\gamma_y}$$

Donde X'^2 e Y'^2 son los momentos de segundo orden de la ubicación de la partícula en X e Y respectivamente; α_x y α_y son constantes; t es el tiempo; $X' = X - \bar{X}$, $Y' = Y - \bar{Y}$, con $\bar{X}$ e $\bar{Y}$ valores promedios; Los exponentes γ_x y γ_y denotan el estado de la difusión.

De acuerdo a los valores experimentales encontrados por Nikora et al. (2001, 2002), se espera que la difusión en Y sea aproximadamente balística en el rango local y superdifusiva en el rango intermedio. Debido a que el modelo de saltos aplicado en esta memoria no comprende descansos de partícula, el rango global no es modelado. El modelo conceptual de Nikora et al. en conjunto con los datos promedios de alto y largo de salto permiten la validación tridimensional del modelo.

CAPÍTULO III
CASO DE ESTUDIO

3.1 Caso Particular

Las partículas modeladas son de d_p= 0.69 mm de diámetro, arena fina, por lo que la información experimental utilizada para validar el modelo será el de Niño y García (1998), mientras que para los coeficientes de fricción y restitución los valores a considerar serán los sugeridos por Schmeeckle et al. (2001), esto de acuerdo a los resultados de las pruebas hechas por Moreno (2014).

En cuanto al flujo se utiliza la modelación de un canal turbulento utilizando LES, con bordes periódicos en la entrada, salida, y en los costados. La altura media del canal h es el espesor de la capa límite correspondiente. El número de Reynolds del flujo se basa en la velocidad de fricción u_* (= 0,024 m / s) y la altura del canal h (=0.028 m) para un Re_τ = 590 resultando un $Re \sim 10^4$. Para resolver el flujo se utilizará el código de open source OpenFOAM.

El tamaño de todo el dominio computacional es igual a $2\pi h \times \pi h \times 2h$ en las direcciones en sentido longitudinal, transversal y vertical, respectivamente, como se muestra en la Figura 2-4. El número de nodos computacionales es $120\ x\ 100\ x\ 110\ =\ 1.320.000$. La simulación computacional utiliza los parámetros entregados en la simulación DNS (direct numerical simulation) entregada por Moser et al. (1999). La discretización de la malla computacional no cambia de tamaño en la dirección del flujo ni a lo ancho del canal. En la dirección normal a la pared de fondo (vertical del canal) la malla se hace cada vez más estrecha cerca de la pared (para capturar de mejor forma los gradientes de velocidad). Los límites en las direcciones del flujo y transversal a ésta se tratan con la condición periódica.

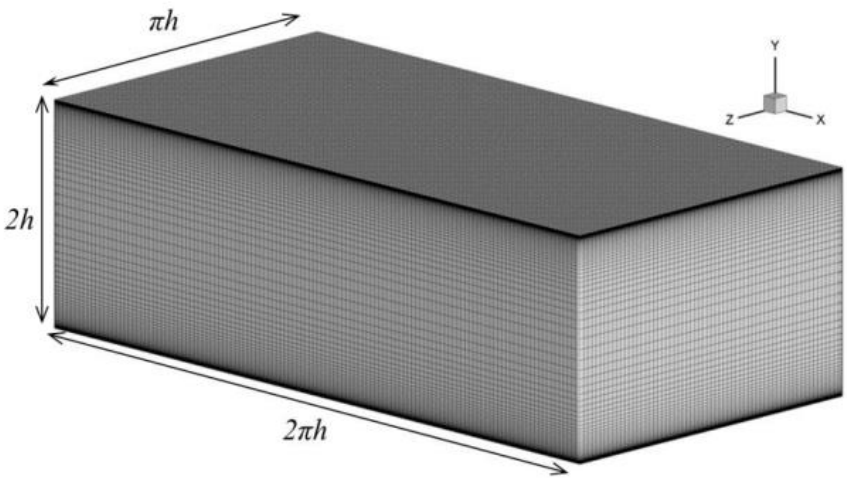


Figura 3-1. Malla y dominio computacional para LES de un canal de flujo periódico. Fuente: Elaboración propia.

Dentro de los Inputs más importantes del código en OpenFOAM están el solver, o método que se utilizara para resolver las ecuaciones del sistema, tiempo de modelación, paso de tiempo, y la especificación del método con el cual se modelará el flujo turbulento.

Los resultados de la simulación que entrega el código en OpenFOAM corresponden a archivos de texto en los cuales se indica la velocidad de flujo, para cada celda del dominio. En la figura 3-2 se observa la representación gráfica de uno de los campos de velocidades obtenidas visto en Paraview (visualizador gratuito utilizado para postprocesar los resultados de la simulación entregados por OpenFOAM). Una vez resuelto el flujo turbulento, las velocidades encontradas para cada celda en el tiempo, se guardan para posteriormente ser utilizadas para correr el código Lagrangiano de salto de partículas SALTATE (acoplamiento unidireccional).

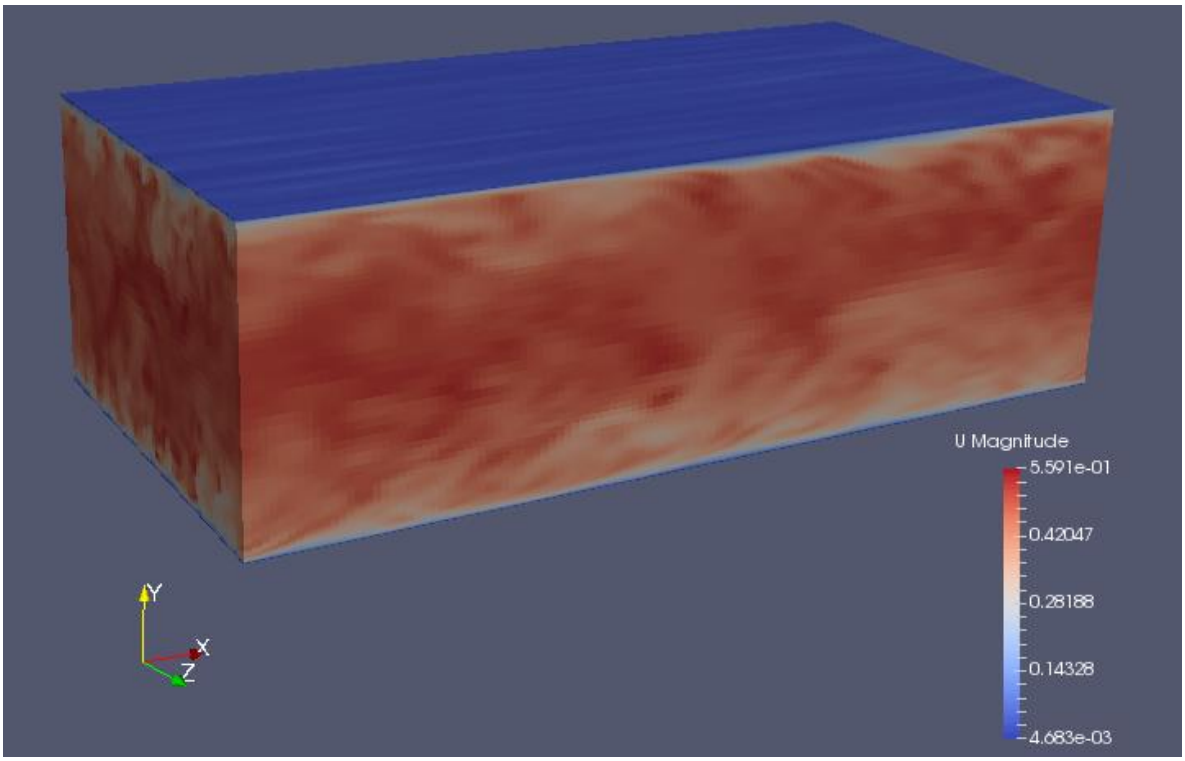


Figura 3-2. Output del flujo turbulento, se muestra el campo de magnitud de velocidades (U Magnitude). Fuente: Elaboración propia.

Para validar el modelo Lagrangiano de seguimiento de partículas (SALTATE) se simularon las condiciones experimentales presentadas por Niño y García (1998), de modo que los resultados obtenidos fueran comparables con la información experimental de dicho trabajo. Estos experimentos proporcionan datos estadísticos de promedio y desviación estándar de 3 parámetros adimensionales: longitud (L) y alto (H) del salto, y velocidad de la partícula en la dirección del flujo (u_p). Se simuló la trayectoria de una sola partícula para un valor de $R_p = 73$. Además, se simularon cinco condiciones diferentes de intensidades de flujo (representadas por el esfuerzo de corte del flujo, τ); se emplearon valores adimensionales de corte de τ/τ_{cr} = 1.79, 1.87, 2.43, 2.5 y 2.67, en donde τ_{cr} es el esfuerzo de corte crítico para el movimiento incipiente de la partícula, que para el tamaño de partícula utilizado en este estudio corresponde a $\tau_{cr} = 0.032$.

Como condición inicial la partícula en movimiento tiene una velocidad lineal y angular preestablecida. Las partículas de fondo no se mueven y se asumen del mismo diámetro de la partícula en movimiento. Las partículas se asumen perfectamente esféricas por simplicidad.

La simulación fue de 200 segundos, en donde se obtuvieron alrededor de 120 saltos para cada caso, de los cuales se descontaron los 10 primeros, eliminando así la influencia de las condiciones iniciales impuestas. Tanto los valores promedios de cada parámetro como sus desviaciones estándar fueron calculadas con la misma metodología. En la figura 3-3 se muestra un ejemplo de los resultados de una modelación, graficados en Matlab.

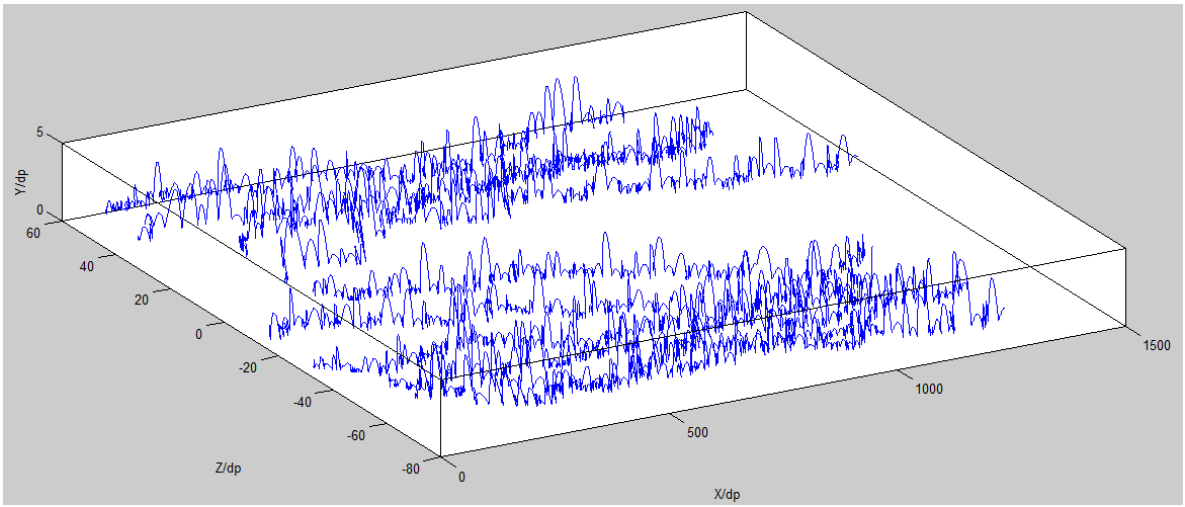


Figura 3-3. Ejemplo resultados modelación, graficados en Matlab. Fuente: Elaboración propia.

3.2 Funcionamiento modelo

Para comenzar es necesario definir el dominio computacional en donde se desarrollará el proceso de saltación de partículas. Como se trata de un acoplamiento simple, donde el flujo se resuelve primero, y luego se ocupan estas velocidades para simular el movimiento da la partícula, se utiliza para el código de seguimiento Lagrangiano, el mismo dominio utilizado en la simulación del flujo turbulento. Al crear las celdas, cada una de ellas tendrá propiedades individuales como lo son la velocidad del flujo y su vorticidad en los 3 ejes respectivamente; el número de partículas que hay dentro de cada celda (las partículas son mucho más pequeñas que una celda computacional), número de celda, y también sus propiedades físicas como ubicación y dimensiones.

Con el espacio definido lo siguiente es crear las partículas. Para ello se escoge una celda al azar (dentro de un rango en donde se produce el fenómeno de saltación) y se crea la partícula dentro. Cada partícula tendrá propiedades como velocidad y rotación en los 3 ejes cada una, los cuales se asignarán de manera estándar al comienzo; así como también el tiempo de modelación en el que se encuentra, el número de la partícula y la celda en la que está.

Entonces se puede proceder a la modelación. Lo primero es leer y asignar las velocidades a cada celda entre dos instantes de tiempo (se asignó un intervalo de 0.25 segundos) de modo que para cada intervalo de tiempo se realice un arreglo lineal entre ambos tiempos representando así la fluctuación de velocidades de forma temporal. Lo segundo es recorrer el espacio (o celdas) hasta encontrar un partícula en alguna de ellas. A esta partícula se le calcula su nueva posición y se revisa si se mantuvo dentro de la misma celda en el paso de tiempo anterior. De no ser así, se debe encontrar la nueva celda a la que pertenece buscando en el espacio más próximo. Luego de eso, se debe actualizar el tiempo en el que se realizó la actualización, ya que se debe considerar que si la partícula cambia de celda, al encontrarnos nuevamente la misma partícula, ésta no se mueva otra vez.

Con todas las partículas en su nueva posición se requiere calcular la nueva velocidad de la partícula, para lo cual existen tres alternativas, que corresponden a los tres sub-modelos que se explicaron anteriormente. El primero corresponde al caso en que la partícula choca con la pared de fondo, con lo que la nueva velocidad se calcula con el modelo de choque entre partícula y lecho utilizando el sub-modelo de choque con la pared. El segundo caso corresponde a cuando se produce colisión entre partículas, con lo cual el sub-modelo correspondiente a colisión entre partículas y se calculan las velocidades para ambos granos. El último caso corresponde a cuando no existe ningún tipo de choque, quiere decir que la trayectoria es libre, por lo que las fuerzas hidrodinámicas son las encargadas de modificar la velocidad (sub-modelo de vuelo libre). Esta secuencia se repite hasta concluir con el tiempo de modelación.

Durante estos procesos, información importante es almacenada en archivos de texto para analizarlos posteriormente. Ésta corresponde a altura y largo de los saltos, y número de saltos realizados, para poder obtener la estadística necesaria; también se guardan valores de

posición, velocidad, rotación y magnitud de las fuerzas que afectan las partículas, en los tres ejes y en cada instante de tiempo. Del flujo se registra la velocidad y vorticidad alrededor de las partículas. También se registran los choques realizados entre partículas.

Una vez terminada la modelación, se procede a calcular los parámetros estadísticos para cada caso.

Cabe destacar que el modelo fue construido de forma que pueda utilizar más de un procesador para los cómputos (programación en paralelo), para así reducir los tiempos de cálculo tanto como sea posible, y modelar miles de partículas al mismo tiempo.

Los valores de entrada necesarios para el funcionamiento del modelo son: número de partículas, identificación de partículas a las que se le guarda la información, número de procesadores a utilizar, tiempo de simulación, paso de tiempo (dt), activar/desactivar fuerzas a considerar, activar/desactivar choque entre partículas, escoger usar flujo turbulento o laminar, y por último el valor del esfuerzo cortante (τ) del flujo que se considerará.

Existen dos tipos de resultados que entrega el código. El primero corresponde a lo que se entrega en pantalla: valores promedios de longitud y altura de salto de partículas, así como sus desviaciones estándar, también se muestran los tiempos de cálculo de cada procesador utilizado, y el tiempo total. El segundo tipo corresponde a los archivos de texto (.txt) en los que se guarda para cada partícula elegida: posición, velocidad, rotación y fuerzas para cada paso de tiempo, velocidad y vorticidad de la celda en la que se encuentra la partícula; y el número de colisiones entre partículas.

3.3 Análisis

Se analizará el efecto de aumentar la concentración de partículas por unidad de volumen. Para ello se hicieron simulaciones para tres concentraciones diferentes: 0.7% (1000 partículas), 2.2% (3000 partículas) y 4.8% (6500 partículas), que son concentraciones que se encuentran dentro del rango diluido (menor a concentraciones de entre 5 – 7 % por volumen), donde el código de colisión entre partículas se considera válido. Se consideraron también los diferentes esfuerzos de corte o intensidades de flujo que se simularon para la validación del modelo.

Para calcular la concentración de partículas, se utilizó el mayor volumen de control dado por el ancho y largo del canal, mientras que la altura se obtuvo del mayor valor entre la suma de la altura promedio y una desviación estándar de la altura de salto para cada esfuerzo de corte simulado.

Para estudiar los efectos de aumentar la concentración de partículas se analizaron parámetros estadísticos de salto, parámetros de movimiento de las partículas y los recursos computacionales utilizados en la simulación.

Los parámetros estadísticos de salto son el valor promedio de alto y largo de salto y sus respectivas desviaciones estándar. Los parámetros de movimiento de las partículas son la velocidad de la partícula en dirección del flujo y la rotación en el eje principal (eje-Y). Los recursos computacionales se analizaron comparando los tiempos de cómputo resultantes entre las dos funciones principales del modelo. La primera es el tiempo utilizado para calcular las nuevas posiciones de cada partícula, mientras que la segunda es el tiempo utilizado para calcular las velocidades para el paso de tiempo siguiente. Este último considera los choques entre partículas y con el lecho de fondo. También se consideró el número de colisiones entre partículas.

Para la dispersión o difusión de partículas se analizan 3 potenciales fuentes de dispersión: la turbulencia (en relación a un flujo unidireccional), la colisión entre partículas y el nivel de concentración de éstas. De este modo se puede ver si estos factores aportan o no a la dispersión de las partículas. Cabe destacar que el análisis de dispersión se realiza en los ejes del plano del río, X-Z según los ejes coordenados utilizados en las simulaciones, siendo X la dirección del flujo, y Z la dirección transversal a este (Y corresponde a la vertical del plano).

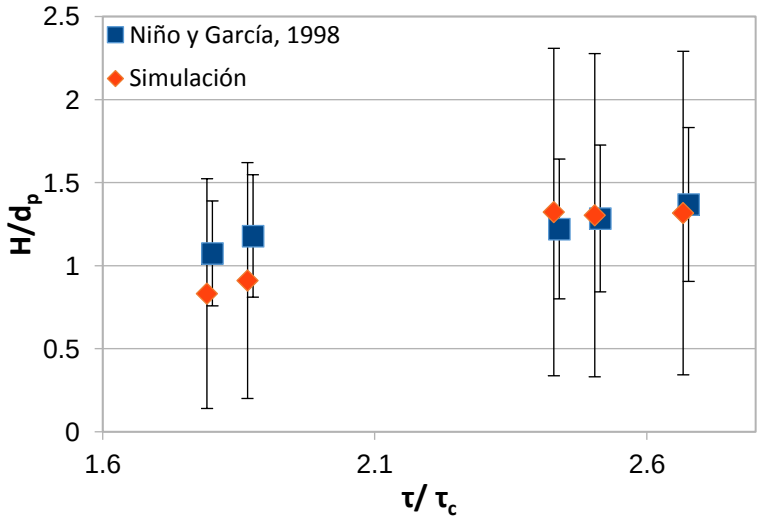
CAPÍTULO IV
RESULTADOS

4.1 Validación del modelo

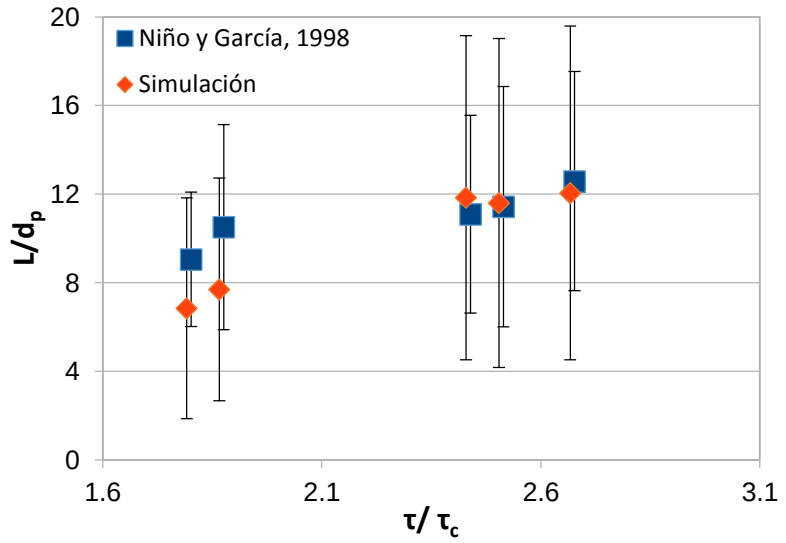
A continuación, se presentan los resultados de modelación que se utilizarán para la validación del modelo de simulación numérica 3D de salto de partícula en un canal turbulento.

Las figuras 4-1a, 4-1b y 4-1c muestran el valor promedio de alto y largo del salto de una partícula adimensionalizado con el diámetro de partícula, y la velocidad promedio de la partícula en dirección del flujo adimensionalizado con la velocidad de fricción, respectivamente, comparados con la información experimental de Niño y García (1998). Se muestra también el rango de una desviación estándar para cada caso. Para calcular la altura y longitud promedio de los saltos de partículas, se promedian la altura y longitud de todos los saltos realizados por las partículas simuladas, que resultaron ser más de 100 por partícula en cada simulación.

a)



b)



c)

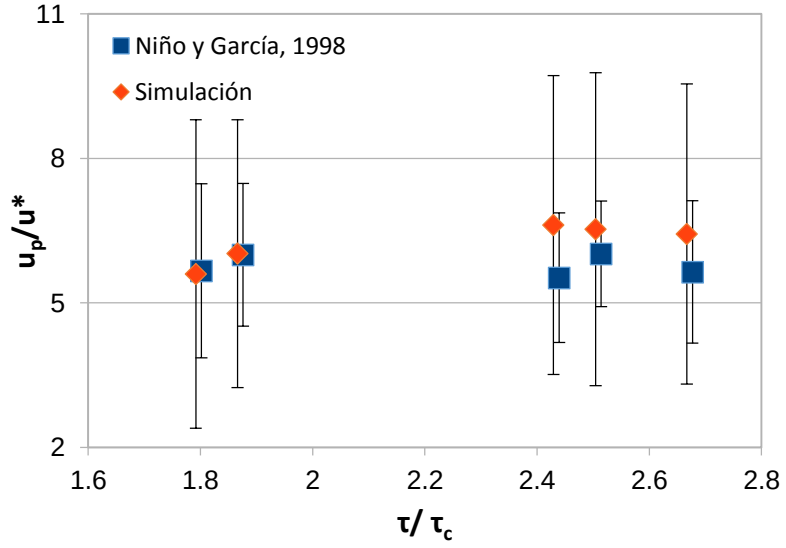


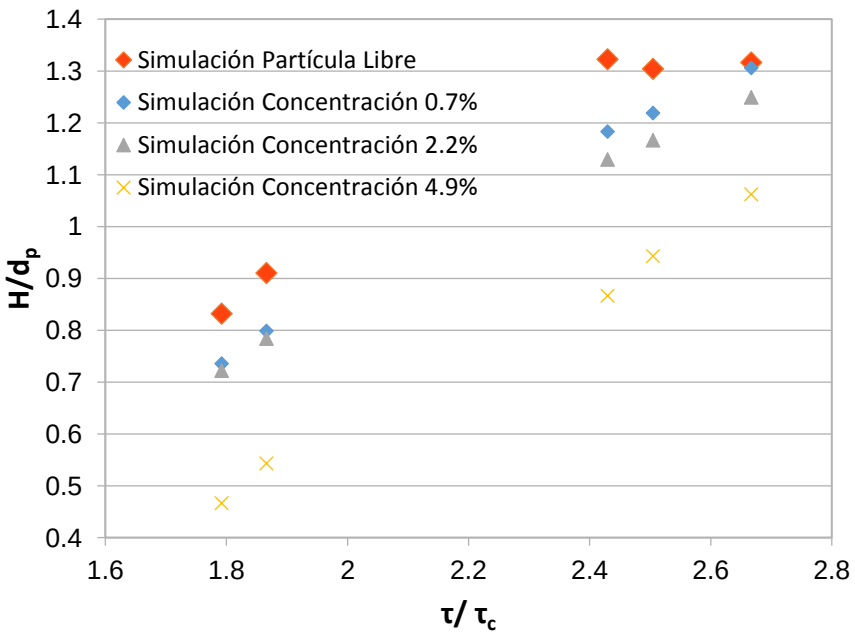
Figura 4-1. Comparación de resultados de simulación numérica de salto de una partícula obtenidos con el modelo propuesto, con información experimental de Niño y García (1998). a) Altura adimensional del salto de partícula (H/d_p). b) Largo adimensional del salto de partícula (L/d_p). c) Velocidad adimensional de la partícula en dirección del flujo (u_p/u_*). Los valores de Niño y García (1998) se desplazaron en 0.01 τ/τ_c para mejor la visualización de los resultados .Fuente: Elaboración propia.

Se puede ver claramente en la figura que los resultados de la simulación se acercan bastante a los resultados experimentales para todas las intensidades de flujo.

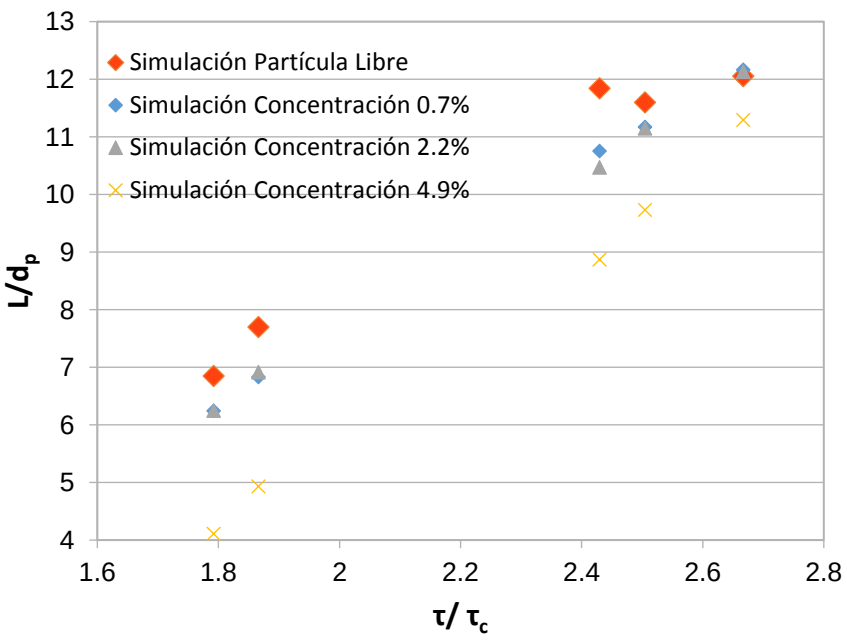
4.2 Concentración de partículas

En la figura 4-2 se muestran las variaciones obtenidas al considerar diferentes concentraciones de partículas por volumen. En la figura 4-2a, 4-2b, 4-2c y 4-2d aparecen los cambios en la altura promedio de salto, el largo promedio de salto, la velocidad promedio de la partícula en la dirección del flujo y el valor absoluto en la rotación de la partícula en el eje principal respectivamente.

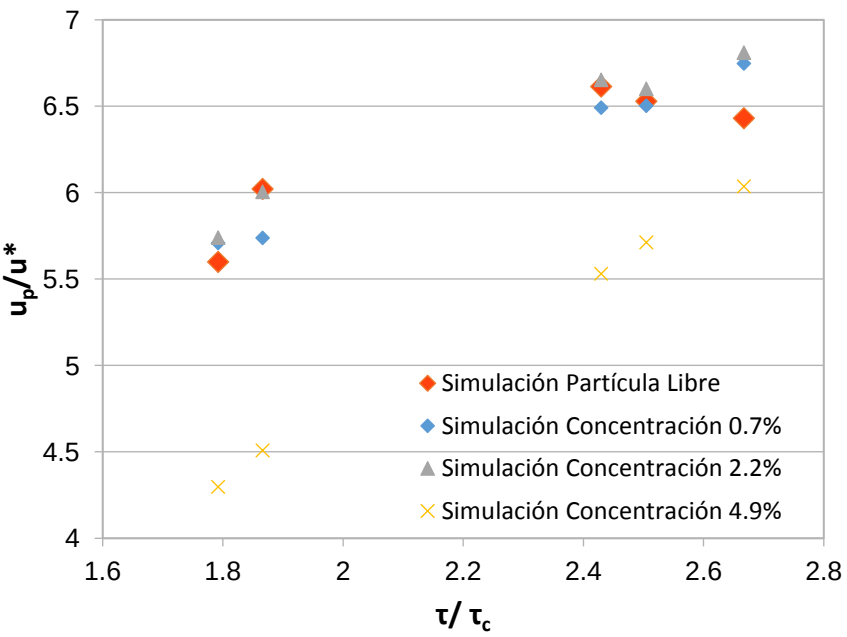
a)



b)


Simulación Partícula Libre
Simulación Concentración 0.7%
Simulación Concentración 2.2%
Simulación Concentración 4.9%
L/dp
τ/ τc
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
1.6
1.8
2
2.2
2.4
2.6
2.8

c)


Simulación Partícula Libre
Simulación Concentración 0.7%
Simulación Concentración 2.2%
Simulación Concentración 4.9%
up/u*
τ/ τc
7
6.5
6
5.5
5
4.5
4
1.6
1.8
2
2.2
2.4
2.6
2.8

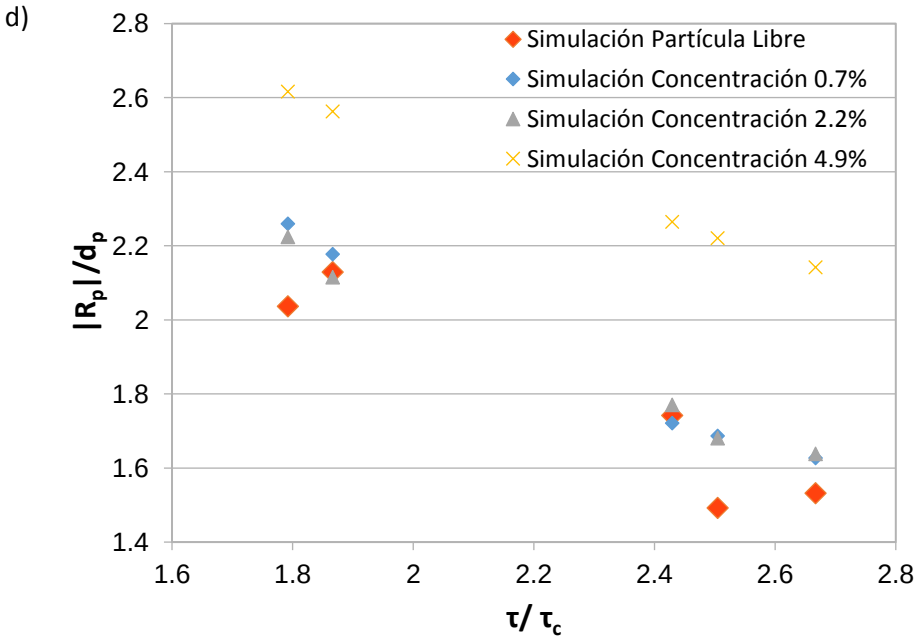
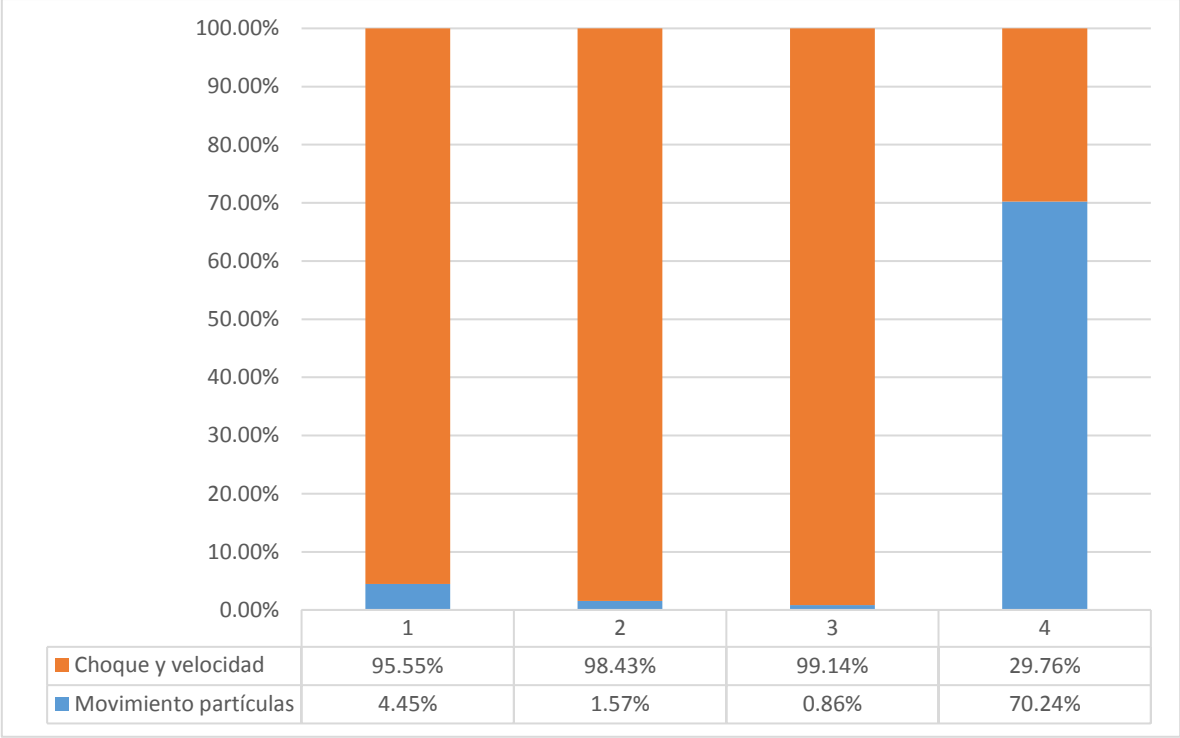


Figura 4-2.Resultados de modelación para distintas concentraciones de partículas. a) Altura adimensional del salto de partícula (H/d_p). b) Largo adimensional del salto de partícula (L/d_p). c) Velocidad adimensional de la partícula en dirección del flujo (u_p/u_*). d) Valor absoluto de rotación adimensional de la partícula en el eje y. Fuente: Elaboración propia.

4.3 Recursos computacionales

A continuación, en la figura 4-3 se presentan los resultados del análisis de los recursos computacionales requeridos para realizar las diversas modelaciones (cuantificados como tiempo de computo). En la figura 4-3 se muestra los porcentajes de tiempo utilizados para calcular el movimiento de partículas en vuelo libre versus el tiempo usado para calcular las nuevas velocidades luego de la colisión de la partícula con el fondo o con otra partícula (considerando choque cuando corresponda), para las distintas concentraciones de sedimento simuladas. El caso 1 considera 0.7% de concentración (1000 partículas) de partículas, el caso 2 2.2% de concentración (3000 partículas) de partículas, el caso 3 4.8% de concentración (6500 partículas) de partículas, y el caso 4 considera partículas en las que no existen colisiones entre ellas (500 partículas).



	1	2	3	4
Choque y velocidad	95.55%	98.43%	99.14%	29.76%
Movimiento partículas	4.45%	1.57%	0.86%	70.24%

Figura 4-3. Porcentaje de tiempo utilizado en el movimiento de partículas v/s el tiempo utilizado en calcular las nuevas velocidades, considerando choque entre partículas y con el lecho de fondo para distintas concentraciones. Caso 1: 0.7% de concentración de partículas. Caso 2: 2.2% de concentración de partículas. Caso 3: 4.8% de concentración de partículas Caso 4: partículas sin considerar choque entre partículas. Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 4-1 y Figura 4-4 se muestra la cantidad aproximada de colisiones entre partículas, por partícula, que sufren durante el período de simulación dependiendo de la concentración de partículas simulada.

Tabla 4-1. Número de colisiones por partícula según concentración de partículas.

Concentración [%]	N° Colisiones
0,7	3500
2,2	25000
4,8	175000

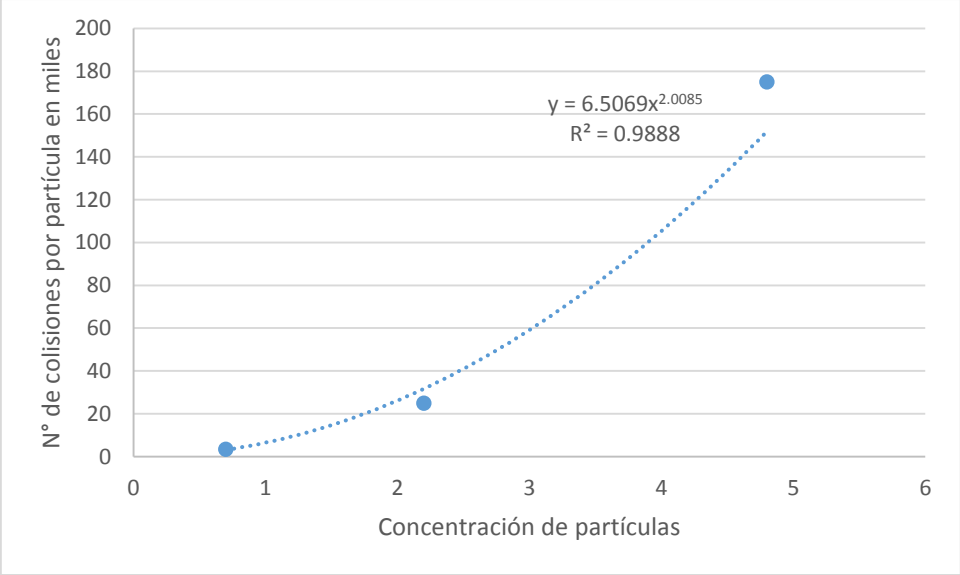
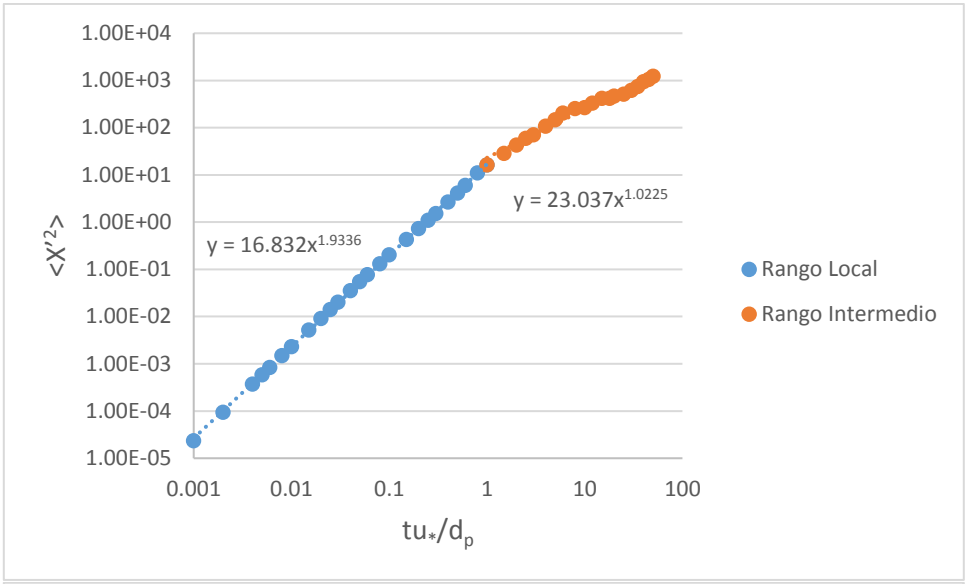


Figura 4-4. Número de colisiones por partícula según concentración de partículas. Fuente: Elaboración propia.

4.4 Dispersión

Las Figuras 4-5 a 4-19 muestran los resultados del análisis de dispersión para los distintos casos propuestos, las 3 distintas concentraciones de partículas utilizadas en el análisis anterior: 0.7%, 2.2% y 4.8%; y para cada una de ellas se consideraron 5 grados de turbulencia. Para cada figura la parte a) corresponde a la dispersión en el eje X (dirección del flujo), y la parte b) a la dispersión en el eje Z (dirección transversal al flujo). Los gráficos de dispersión siguen el modelo conceptual de Nikora et al. (2001,2002) explicados en capítulos anteriores. El color azul en puntos y línea punteada indican valores de simulación y pendiente obtenida mediante regresión lineal, respectivamente, para el rango local. Siguiendo la misma nomenclatura el color anaranjado indica rango intermedio. Las ecuaciones obtenidas en cada rango permiten cuantificar el parámetro γ que indica el valor de dispersión.

a)



b)

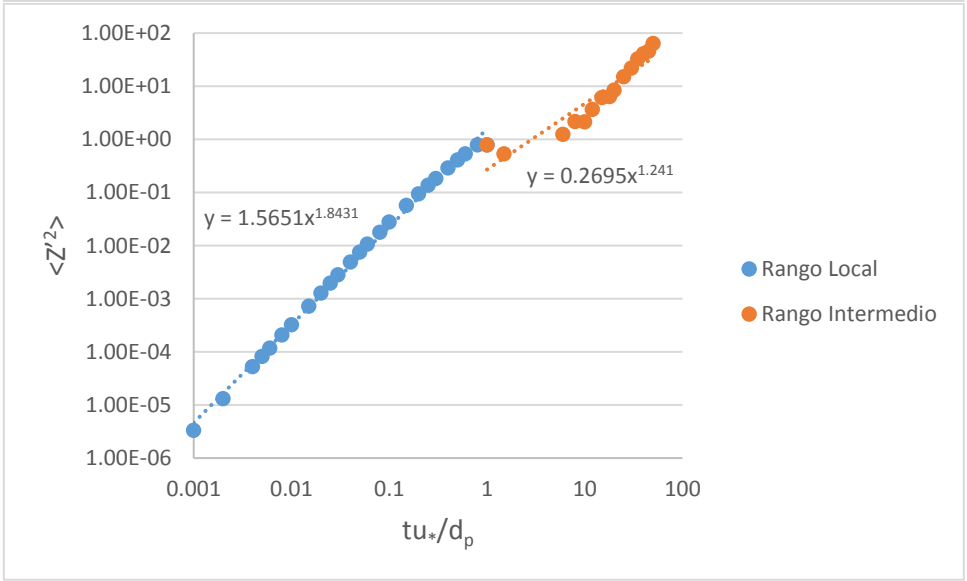
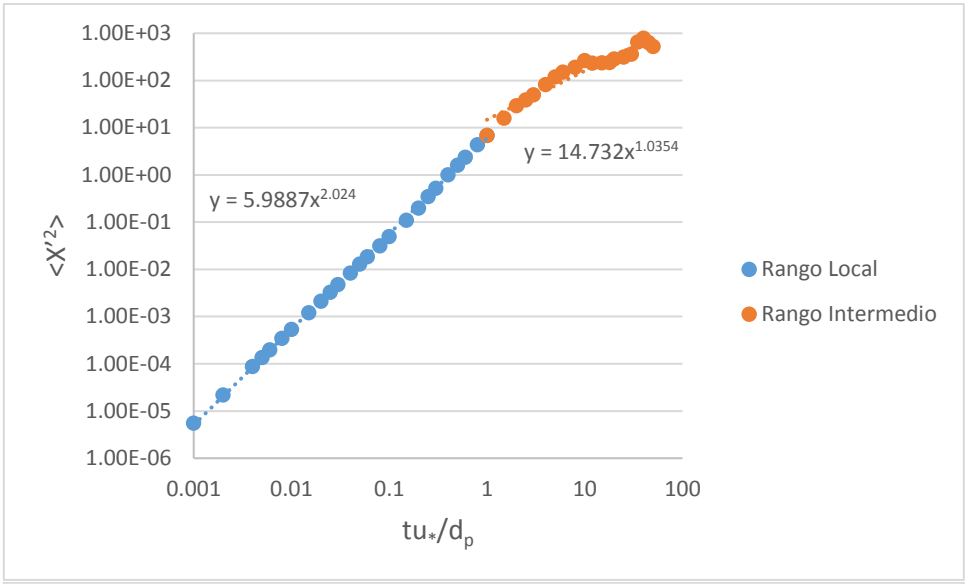


Figura 4-5. Gráfica de la dispersión de partículas con 0.7% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 1.79 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

a)



b)

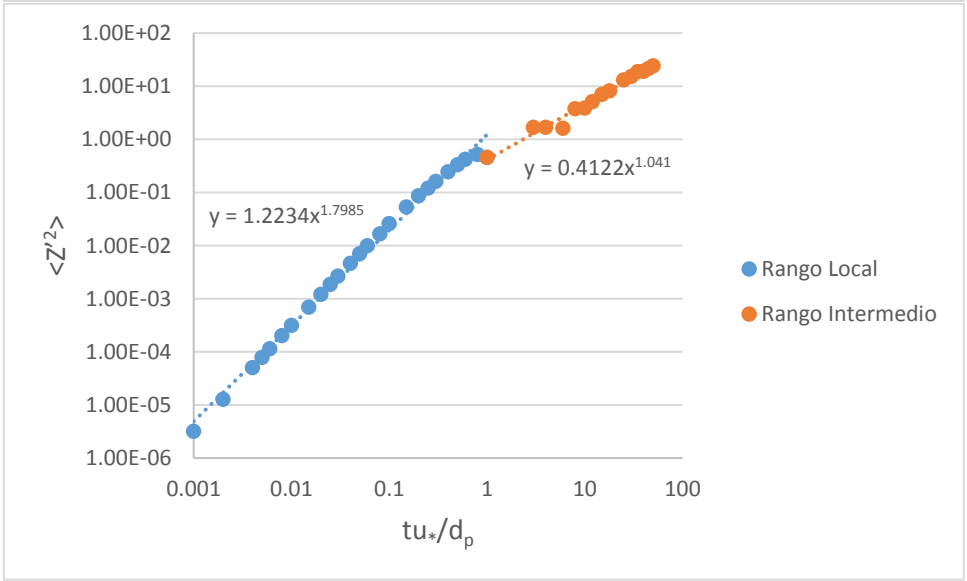


Figura 4-6. Gráfica de la dispersión de partículas con 0.7% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 1.87 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

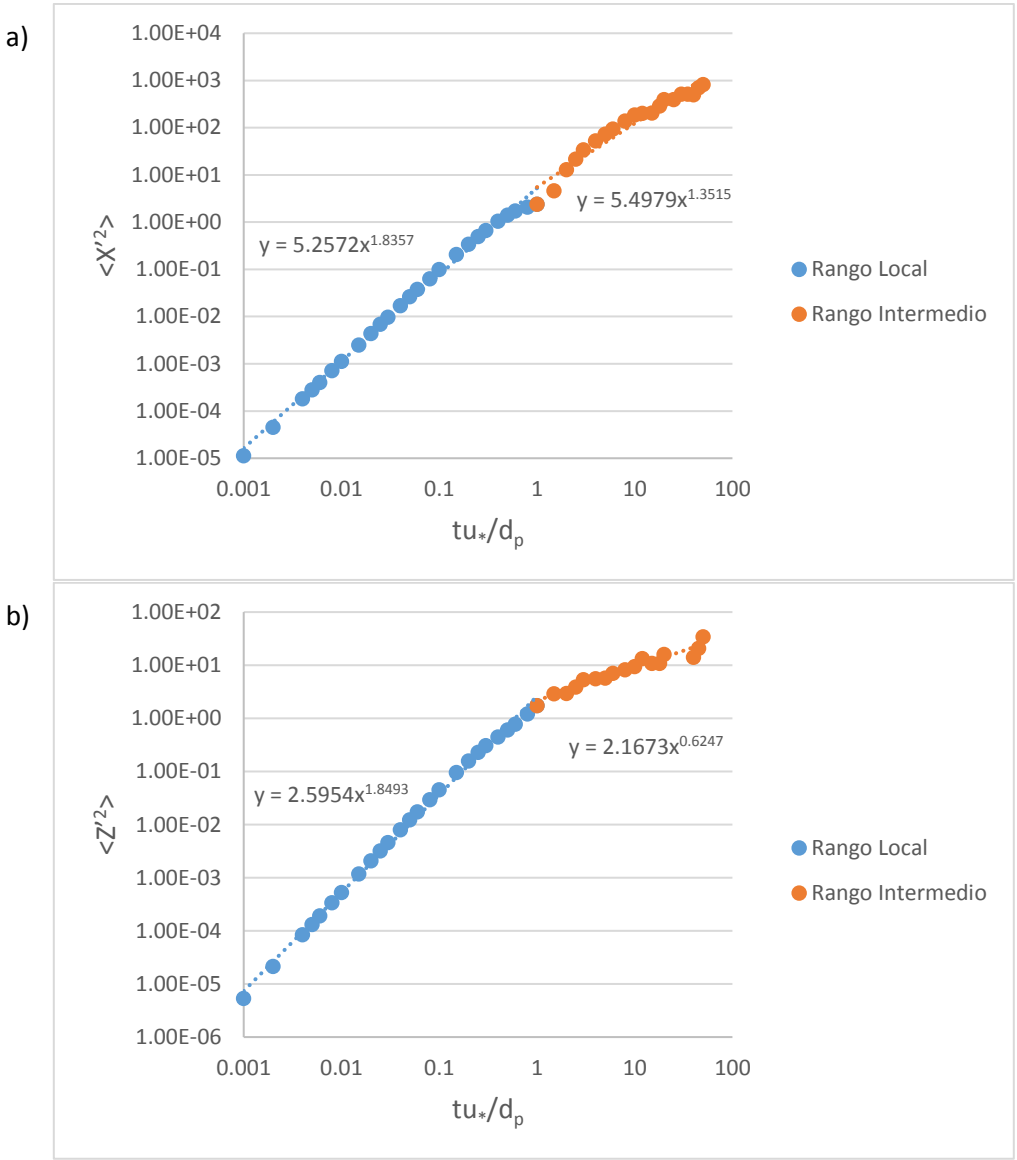


Figura 4-7. Gráfica de la dispersión de partículas con 0.7% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.43 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

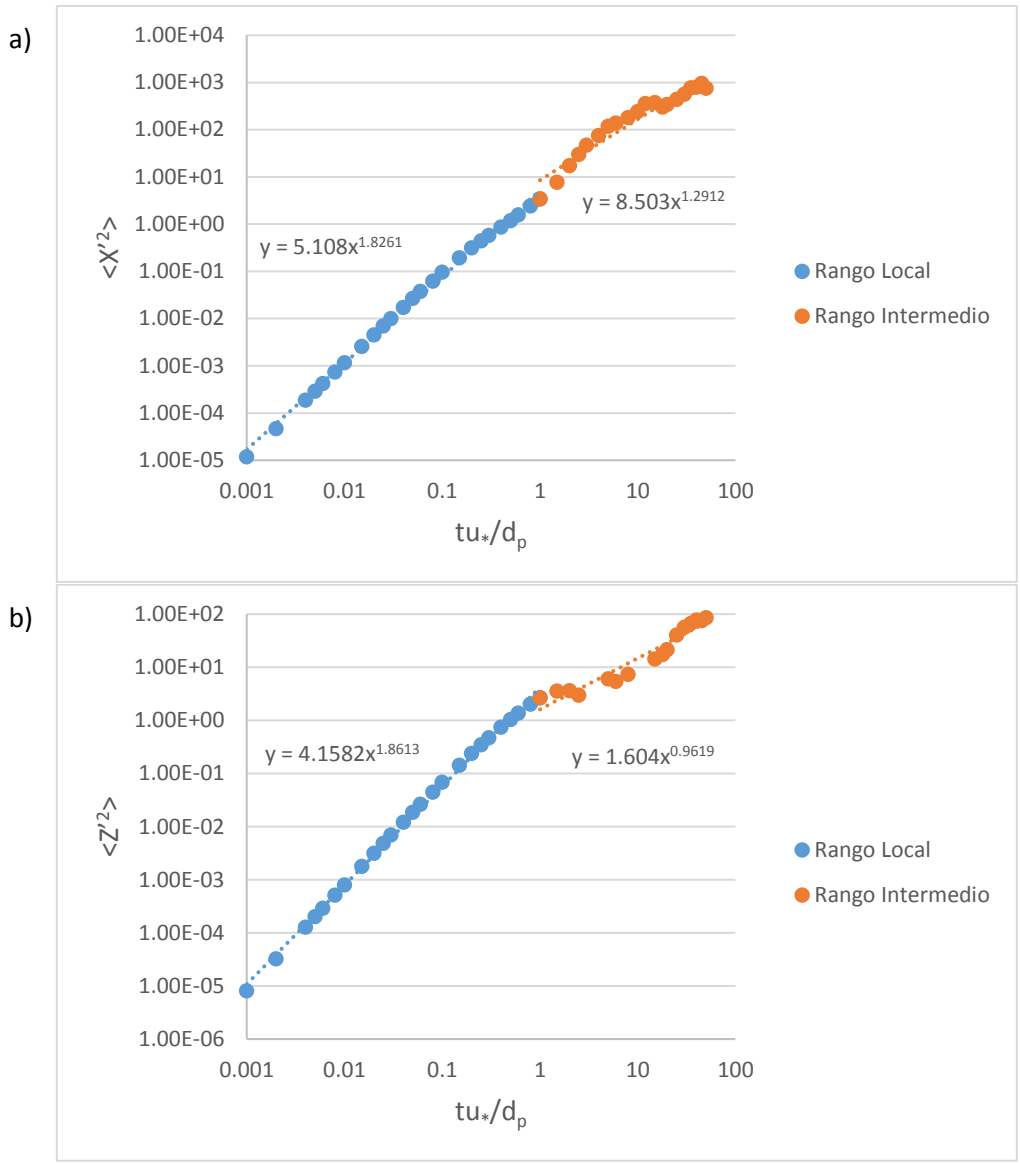


Figura 4-8. Gráfica de la dispersión de partículas con 0.7% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.50 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

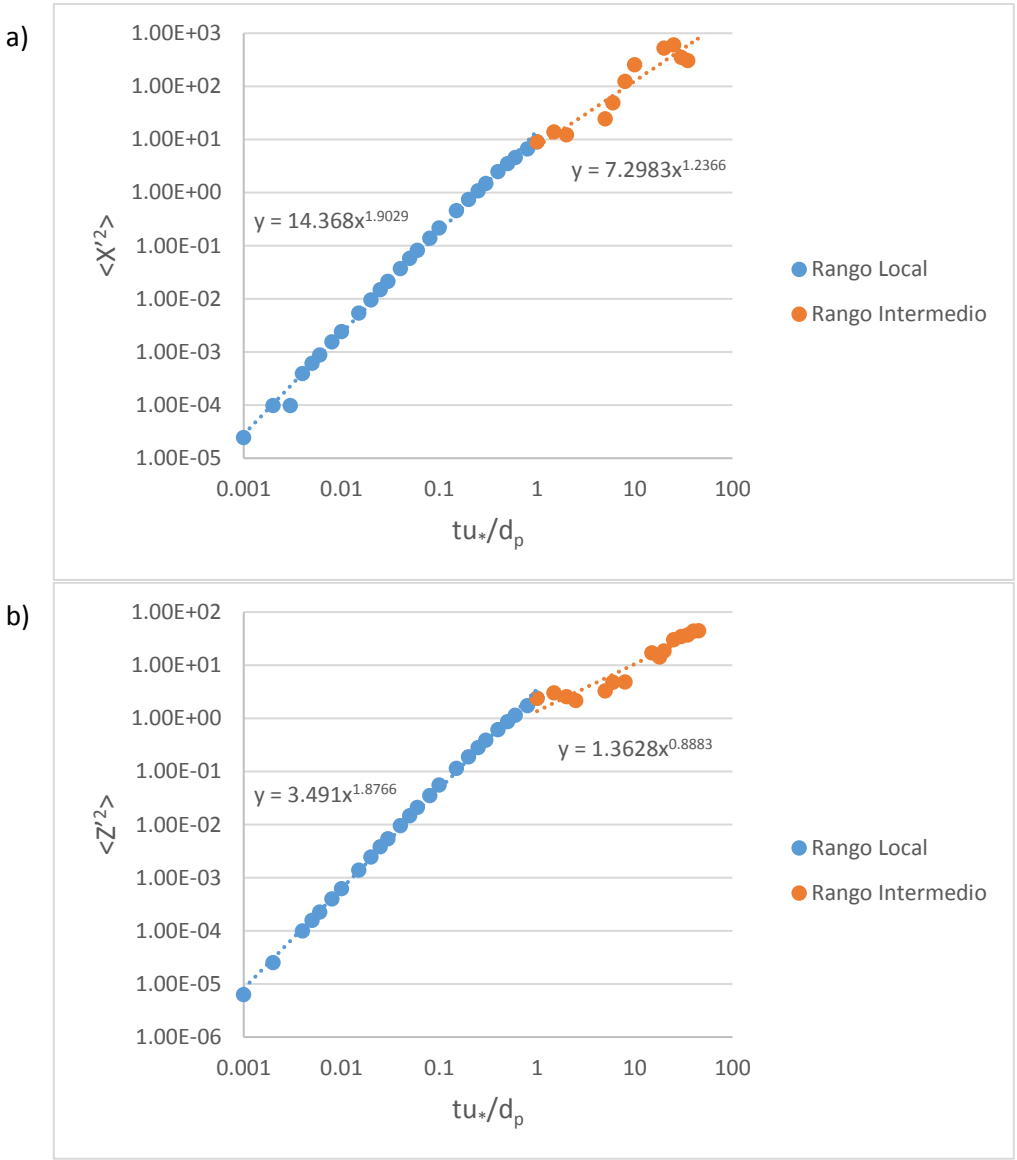
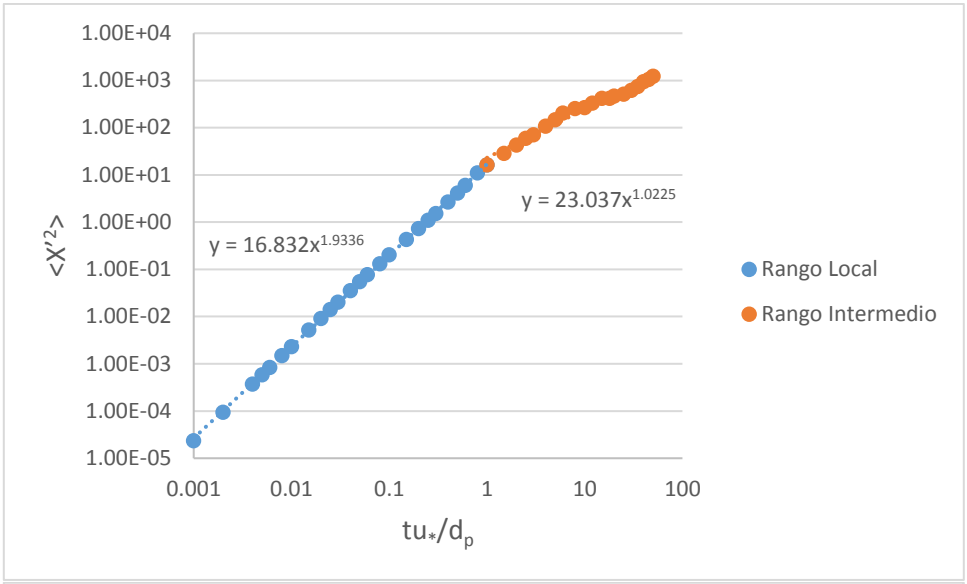


Figura 4-9. Gráfica de la dispersión de partículas con 0.7% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.67 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

a)



b)

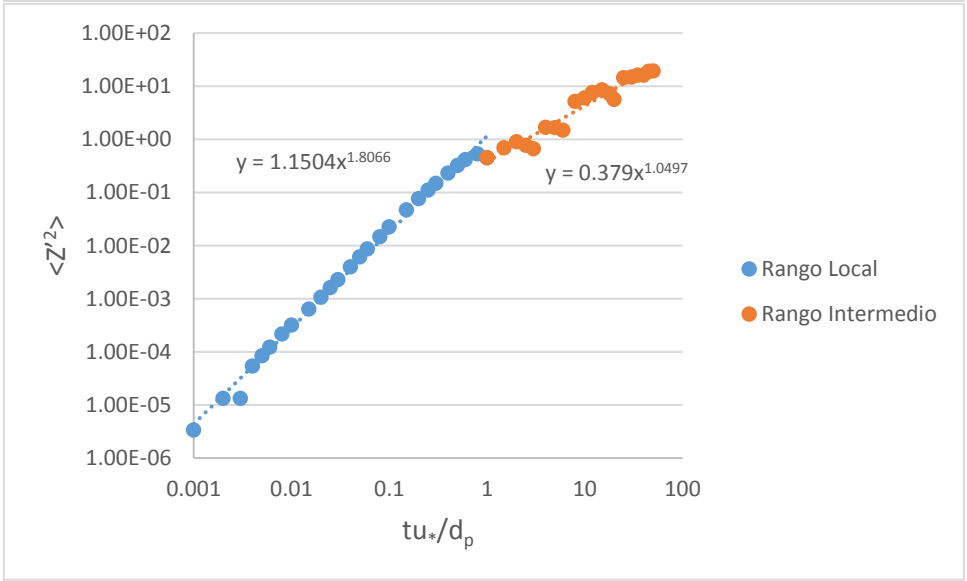
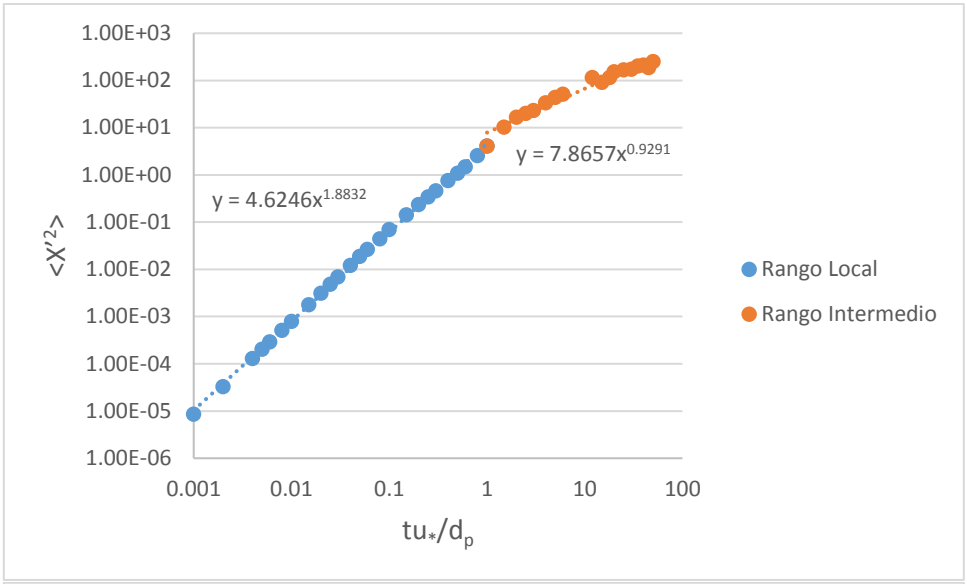


Figura 4-10. Gráfica de la dispersión de partículas con 2.2% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 1.79 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

a)



b)

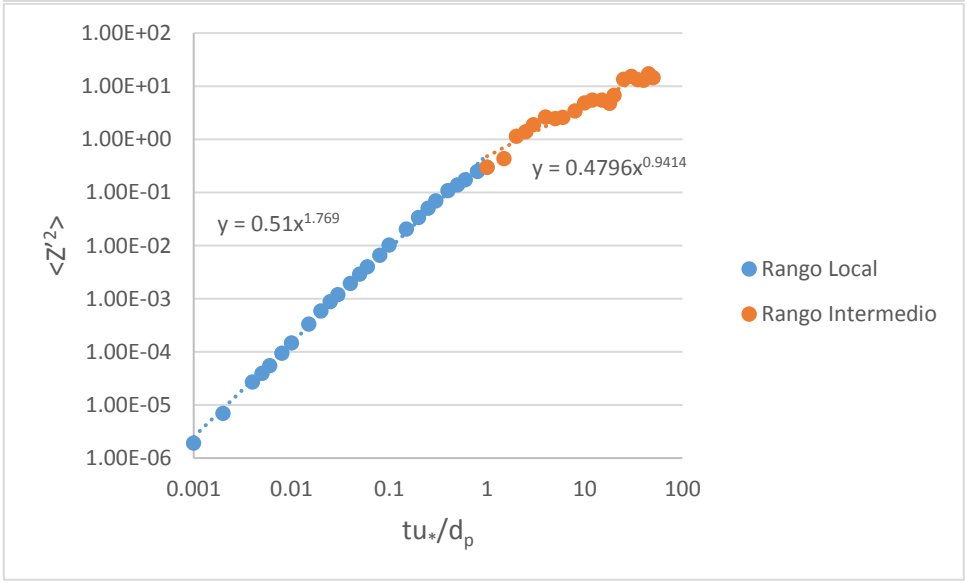


Figura 4-11. Gráfica de la dispersión de partículas con 2.2% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 1.87 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

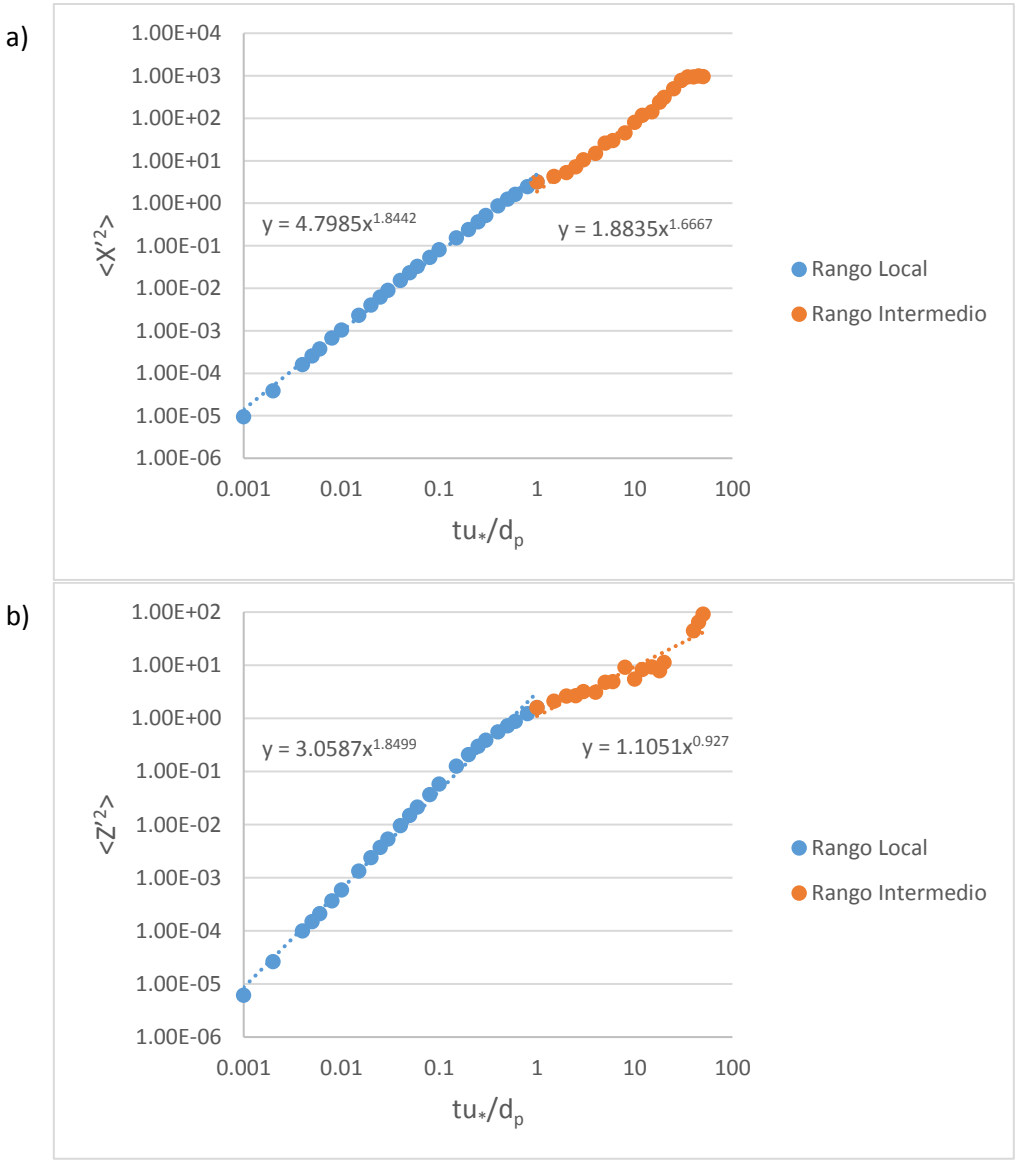


Figura 4-12. Gráfica de la dispersión de partículas con 2.2% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.43 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

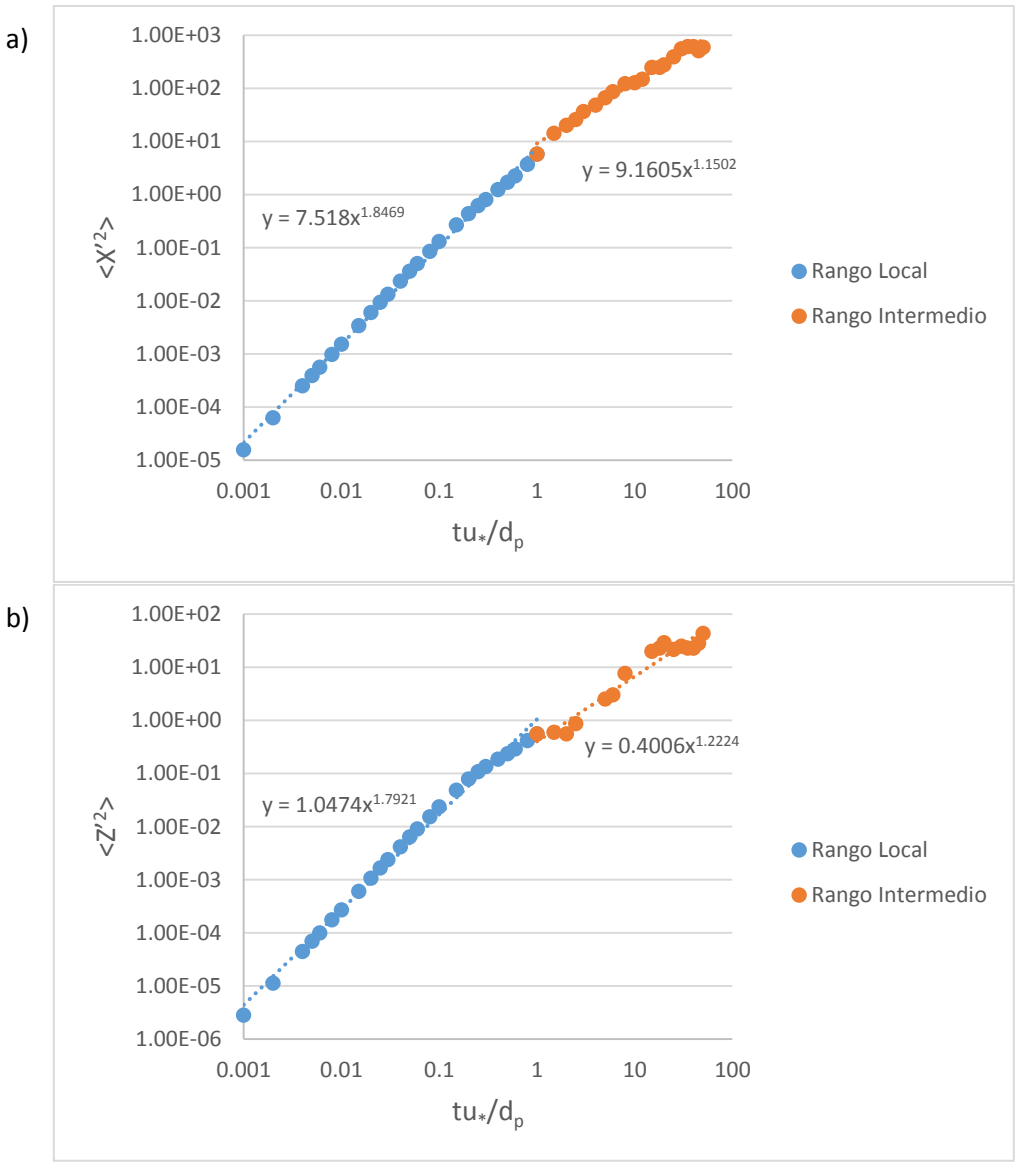


Figura 4-13. Gráfica de la dispersión de partículas con 2.2% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.50 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

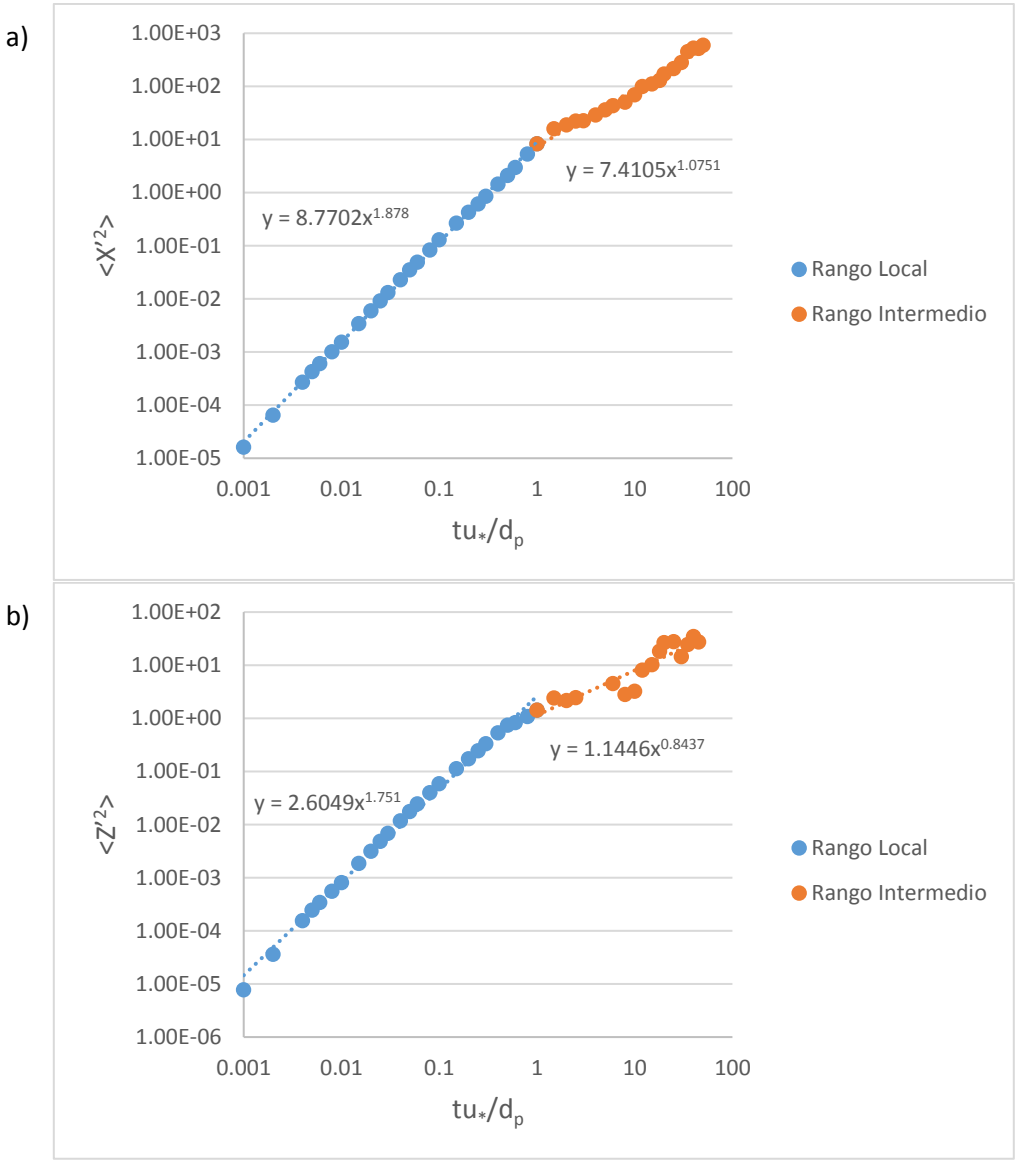


Figura 4-14. Gráfica de la dispersión de partículas con 2.2% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.67 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

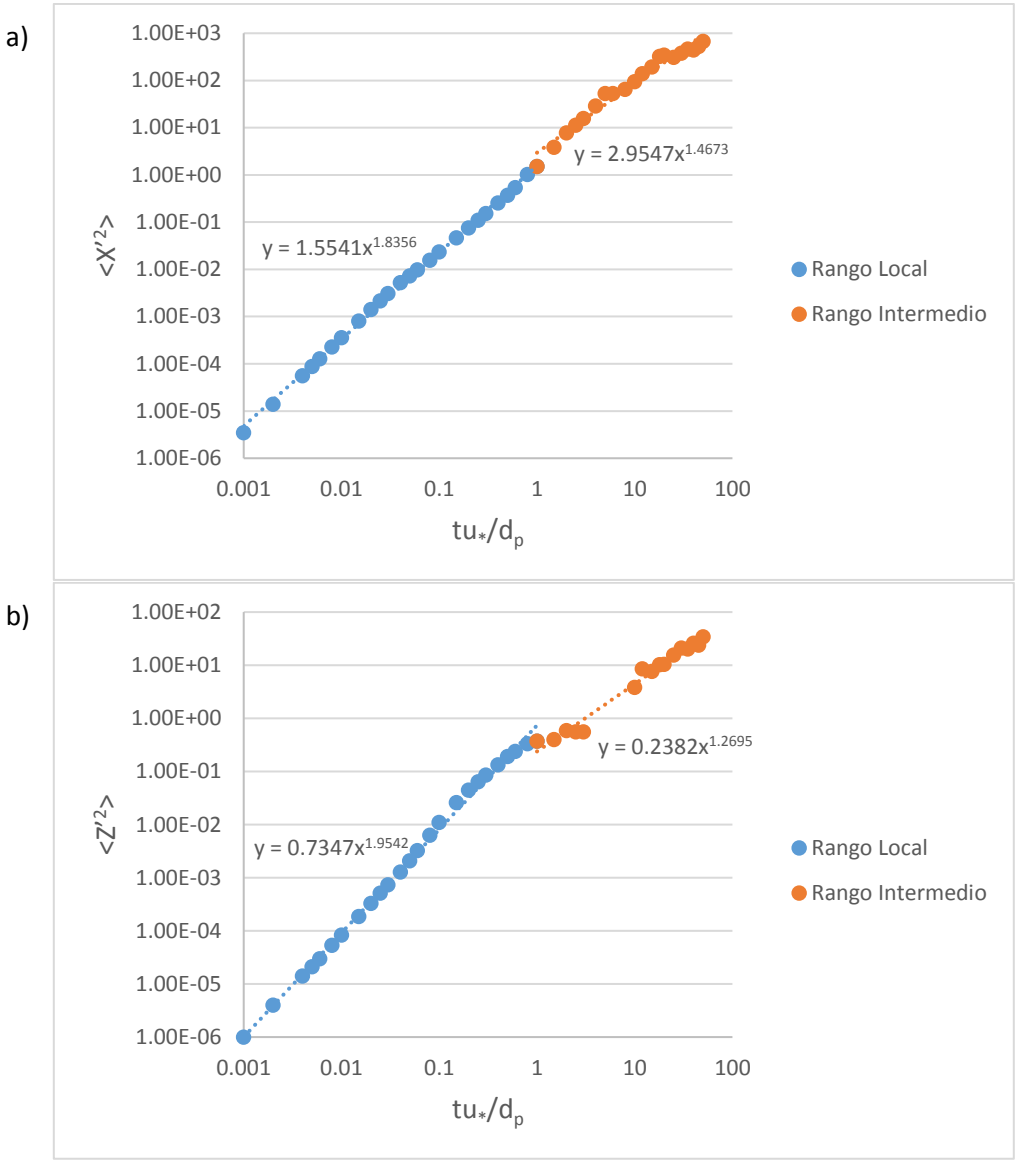


Figura 4-15. Gráfica de la dispersión de partículas con 4.8% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 1.79 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

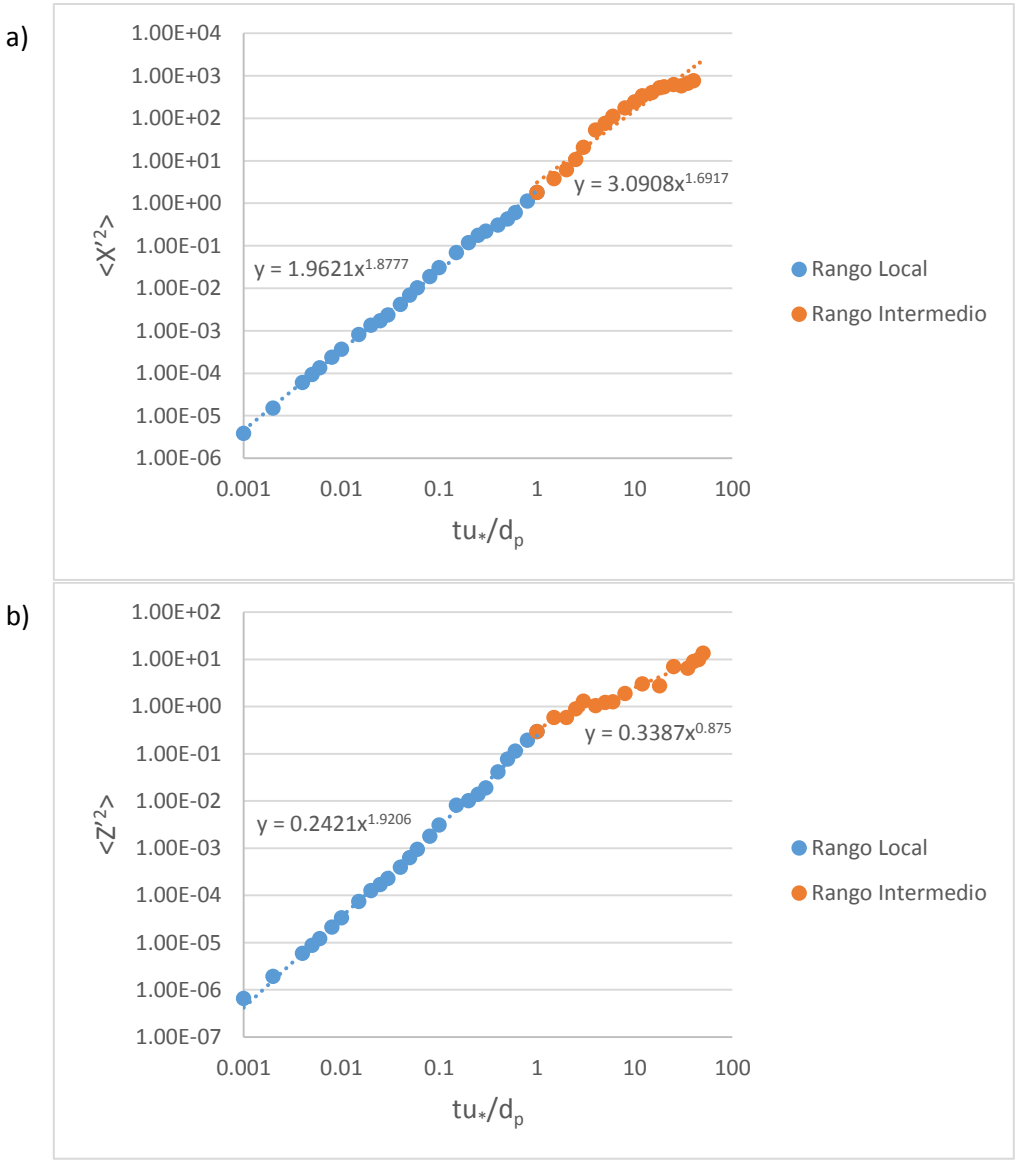


Figura 4-16. Gráfica de la dispersión de partículas con 4.8% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 1.87 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

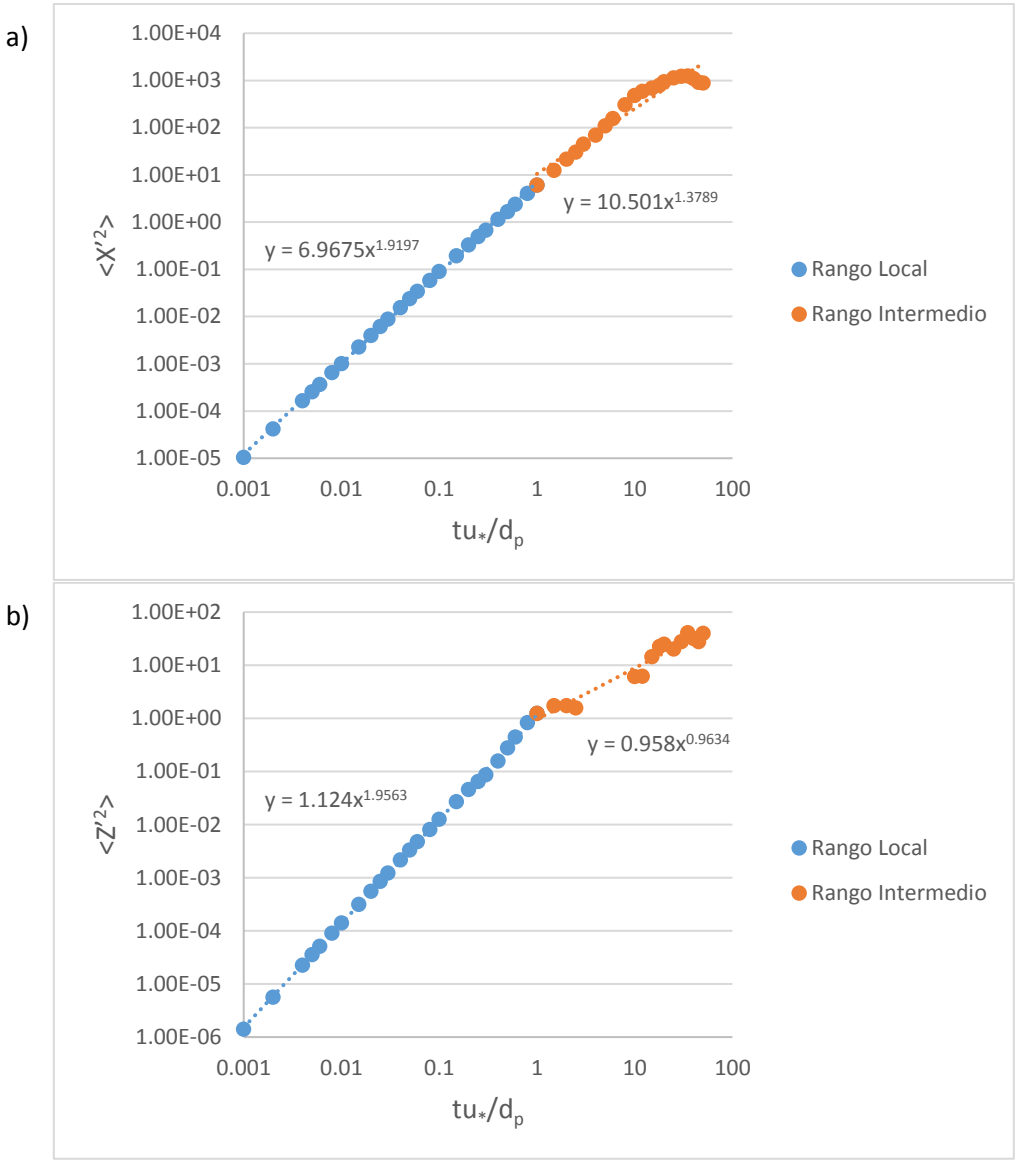


Figura 4-17. Gráfica de la dispersión de partículas con 4.8% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.43 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

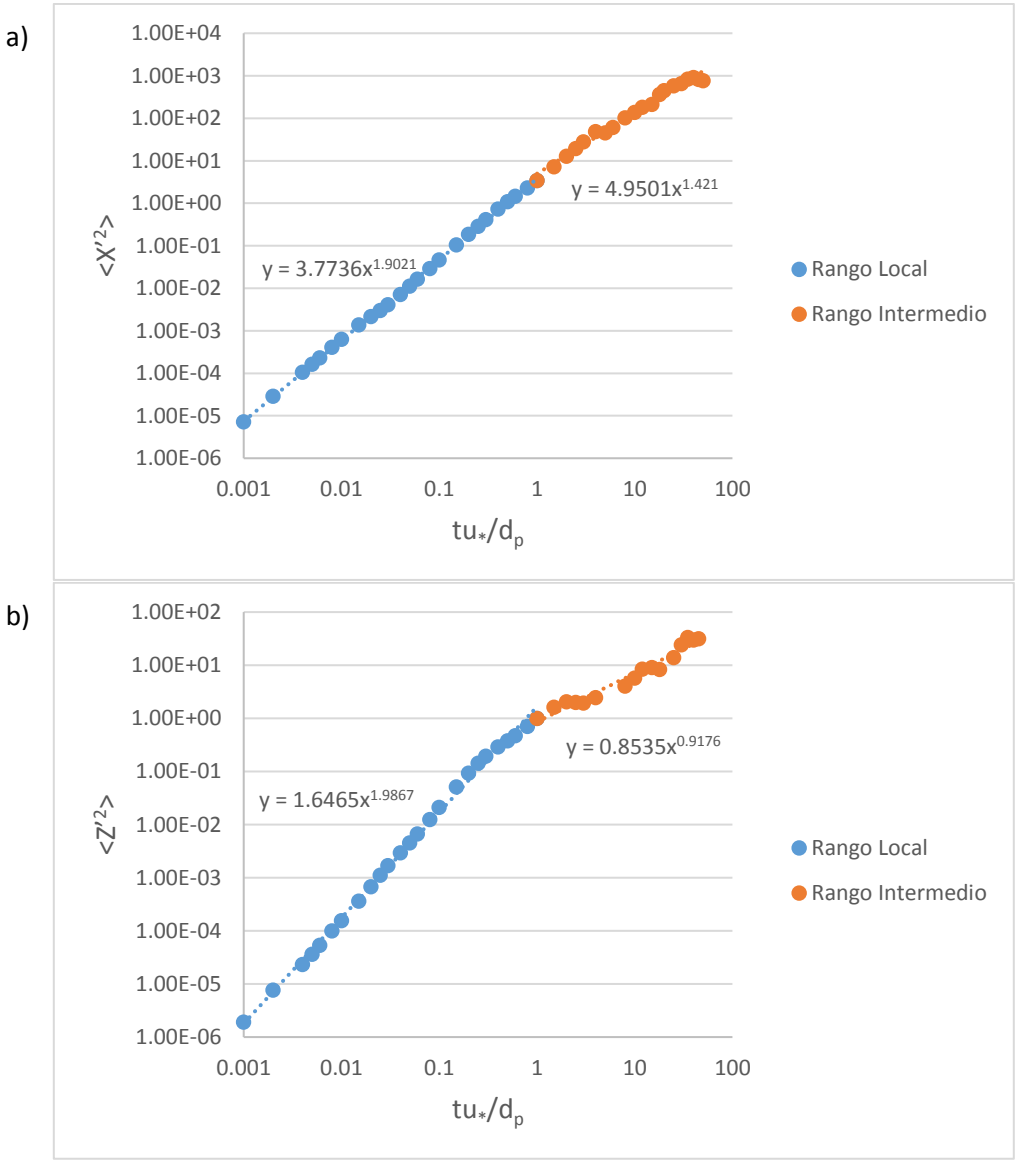


Figura 4-18. Gráfica de la dispersión de partículas con 4.8% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.50 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

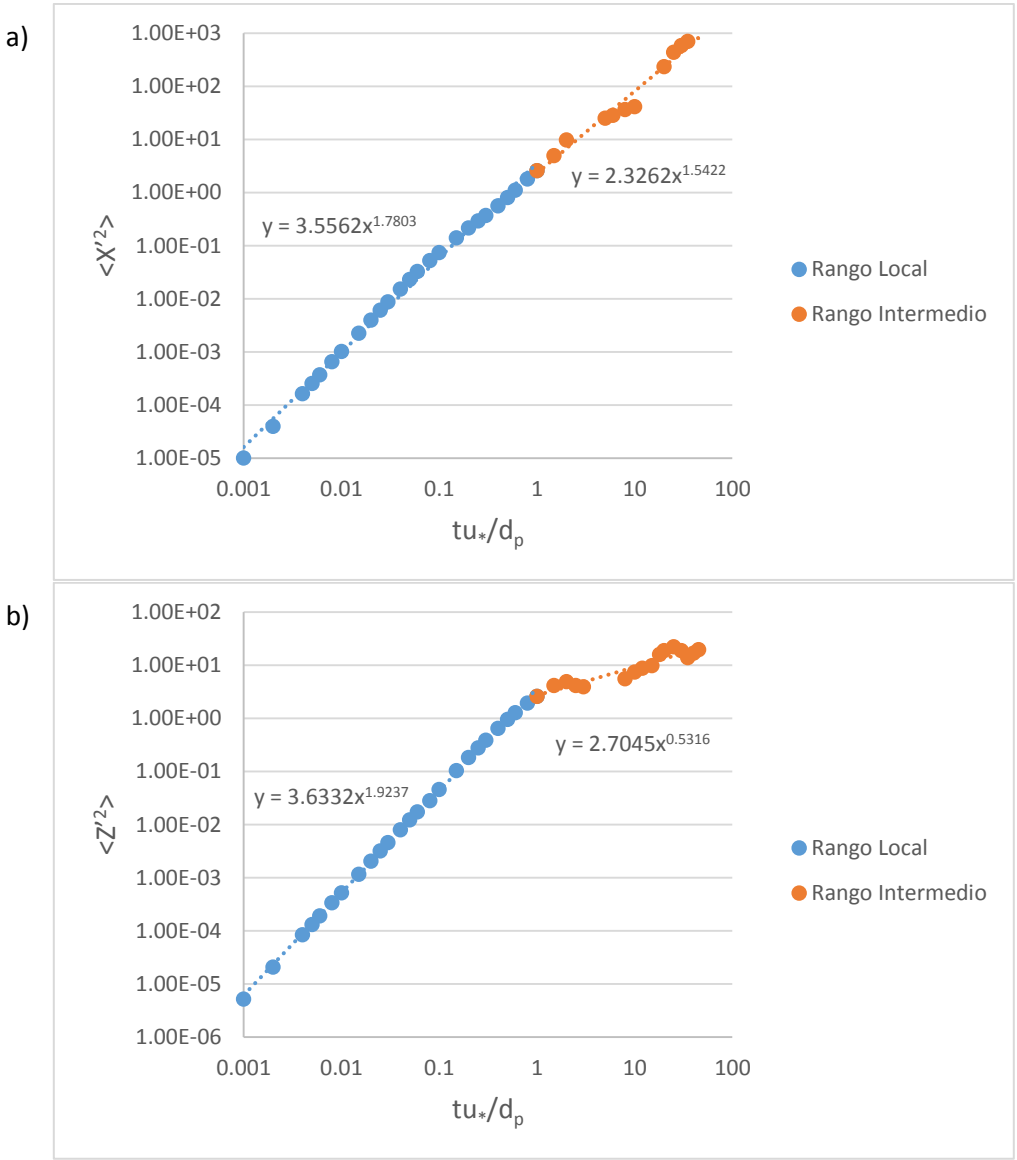


Figura 4-19. Gráfica de la dispersión de partículas con 4.8% de concentración y para flujo turbulento con esfuerzo de corte 2.67 veces el esfuerzo crítico. a) Dispersión en el eje X (dirección del flujo), b) dispersión en el eje Z (perpendicular a la dirección del flujo en el plano). Fuente: Elaboración propia.

En las Tablas 4-2 y 4-3 y Figura 4-19 se muestra el resumen de los parámetros obtenidos de las gráficas anteriores para los ejes X y Z, de modo de analizar el tipo de dispersión para cada caso.

Tabla 4-2. Resumen valores de γ_x para dispersión de partículas en rango local en eje X.

Concentración de Partículas	γ_x para cada esfuerzo de corte/esfuerzo crítico en rango local				
	1.79	1.87	2.43	2.5	2.67
0.7%	0.97815	1.02195	0.93105	0.92605	0.95145
2.2%	0.9668	0.9416	0.9221	0.92345	0.939
4.8%	0.9178	0.93885	0.95985	0.95105	0.89015

Tabla 4-3. Resumen valores de γ_x para dispersión de partículas en rango intermedio en eje X.

Concentración de Partículas	γ_x para cada esfuerzo de corte/esfuerzo crítico en rango intermedio				
	1.79	1.87	2.43	2.5	2.67
0.7%	0.51125	0.5177	0.67575	0.6456	0.6183
2.2%	0.51125	0.46455	0.83335	0.5751	0.53755
4.8%	0.73365	0.84585	0.68945	0.7105	0.7711

Tabla 4-4. Resumen valores de γ_z para dispersión de partículas en rango local en eje Z.

Concentración de Partículas	γ_z para cada esfuerzo de corte/esfuerzo crítico en rango local				
	1.79	1.87	2.43	2.5	2.67
0.7%	0.92155	0.89925	0.92465	0.93065	0.9383
2.2%	0.9033	0.8845	0.92495	0.89605	0.8755
4.8%	0.9796	0.9603	0.97815	0.99335	0.96185

Tabla 4-5. Resumen valores de γ_z para dispersión de partículas en rango intermedio en eje Z.

Concentración de Partículas	γ_z para cada esfuerzo de corte/esfuerzo crítico en rango intermedio				
	1.79	1.87	2.43	2.5	2.67
0.7%	0.6205	0.5205	0.3124	0.4810	0.44415
2.2%	0.52485	0.4707	0.4635	0.6112	0.42185
4.8%	0.63475	0.4375	0.4817	0.4588	0.2658

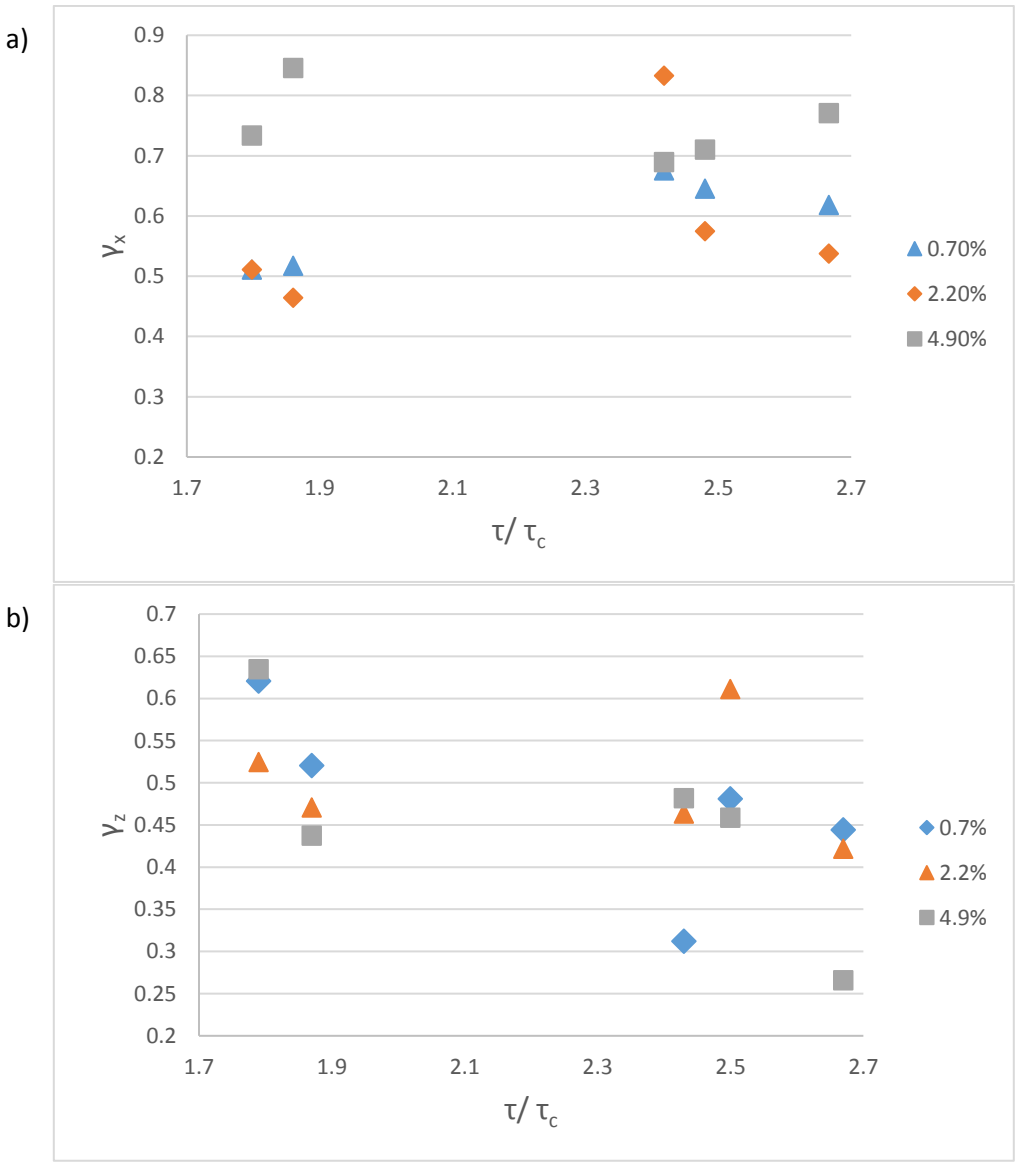


Figura 4-20. Grafica resumen para γ_x (a) y γ_z (b) para la dispersión de partículas en rango intermedio. Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO V
DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

5.1 Validación

En primera instancia se presentan los resultados con los que se pretende validar el modelo respecto de las estadísticas de salto. Se puede mencionar que los resultados en cuanto a sus valores promedio y desviación estándar son bastante coherentes respecto de los resultados experimentales de Niño y García (1998). Por lo tanto, el modelo se puede considerar validado para reproducir alto y largo promedio de salto (validación en dos dimensiones).

En la figura 4-1a se muestran los resultados de altura de salto. De los datos de Niño y García se observa que la altura promedio de salto aumenta con el aumento de los esfuerzos cortantes ejercidos por la turbulencia. En cuanto a los datos de simulación, se observa el mismo comportamiento. Se observa también que los resultados de la simulación se acercan más a los valores experimentales a medida que aumentan los valores de esfuerzos de corte.

En la figura 4-1b se muestran los resultados de longitud de salto. Los datos experimentales arrojan el mismo comportamiento que el caso anterior, es decir, con el aumento de la intensidad del flujo, el promedio del largo de los saltos también aumenta. En cuanto a la precisión los valores obtenidos a partir de la simulación se encuentran dentro del rango de desviación estándar establecidos en los resultados experimentales. Cabe señalar que los resultados de la simulación tienen mejor capacidad de predicción con mayores intensidades de turbulencia.

Por último en la figura 4-1c se muestran los resultados de velocidad de la partícula. Al igual que en los casos anteriores, se observa que a mayores esfuerzos cortantes, mayor es la velocidad promedio de la partícula en el flujo. Ocurre lo mismo con los resultados de la simulación, con lo que se corrobora la proporcionalidad entre estos 2 factores, la velocidad de la partícula y la turbulencia del canal. En este caso, a diferencia de los casos anteriores, la mayor precisión ocurre a bajos esfuerzos cortantes, pero aun así se encuentran dentro del rango de desviación estándar.

Hay que recordar que tanto los resultados experimentales como los de las del modelo corresponden a valores promediados sobre cientos de saltos. Por lo que al tener el modelo

resultados muy similares a los resultados experimentales, se puede asegurar que el modelo puede predecir el comportamiento de saltos de partículas de arenas en promedio.

4.2 Concentración de partículas

A medida que la cantidad de partículas transportada aumenta, la probabilidad de colisión entre ellas es cada vez mayor. Durante este proceso, las partículas pierden energía, cambian de dirección y mientras mayor es la concentración se obstaculiza la trayectoria de las partículas. En la figura 4-2 se muestran los resultados de las simulaciones para diferentes concentraciones de partículas, y los diferentes esfuerzos cortantes simulados.

El primer caso a analizar es la altura del salto de partículas (Figura 4-2a). Se observa una disminución paulatina del valor promedio de altura de salto a medida que la concentración de partículas va aumentando, siendo el último caso, concentración de 4.8%, en donde se aprecia la mayor disminución. Esto se puede explicar porque a medida que aumenta la concentración existe una gran cantidad de choques que limita el movimiento de las partículas, y por lo tanto limita también el rango de salto que puede alcanzar cada una de estas.

El segundo caso que se analiza es la longitud de salto de partículas (Figura 4-2b). Para la variación respecto a las concentraciones de partículas transportadas se aprecia que a medida que ésta aumenta, las longitudes de los saltos van disminuyendo. Igual que para el caso de altura de salto, la longitud promedio de este también disminuye para concentraciones mayores. Sin embargo, esta disminución es mayor para el caso en donde los esfuerzos cortantes son menores. Se podría concluir a partir de esta figura entonces que las fuerzas ejercidas por el flujo a mayores intensidades paulatinamente se vuelven más importantes que las colisiones entre partículas, contrarrestando su efecto en el largo promedio del salto.

El tercer caso corresponde a la velocidad media de la partícula en la dirección del flujo (Figura 4-2c). El efecto de la cantidad de partículas para concentraciones de 0,7% y 2,2 % no muestra una tendencia clara respecto de sus efectos en la velocidad de partícula en la dirección del flujo, pero para concentraciones de 4.8% la velocidad disminuyo para todos los esfuerzos cortantes. Esto último permite inferir que la concentración de partículas afecta las velocidades de éstas a partir de cierto rango, que debe ser cercano al 5%, para concentraciones muy bajas no existe efecto significativo.

El cuarto y último caso corresponde a la magnitud de la rotación respecto del eje-Y (Figura 4-2d). Si se observa el comportamiento de la partícula libre se tiene que la rotación de la partícula disminuye a medida que la intensidad del flujo aumenta, lo que hace que sea inversamente proporcional a éste. Por otro lado, para las diferentes concentraciones se observa un comportamiento similar para cada caso de concentración de partículas, la rotación de la partícula también disminuye cuando los esfuerzos cortantes del flujo aumentan. Finalmente, comparando los diferentes casos de concentración, a bajos porcentajes no se aprecia tendencia alguna, sin embargo, para la concentración de 4.8%, el aumento en la rotación es significativo. De esto último se puede suponer que la cantidad de partículas en el flujo afecta la rotación de éstas, pero a partir de cierta nivel de concentración de partículas (cercana al 4.8%).

4.3 Recursos computacionales

Los sub-modelos que componen el modelo SALTATE propuesto, incluyen el vuelo libre de las partículas, la colisión partículas-suelo y la colisión entre partículas. Cada uno de ellos consume recursos computacionales, lo que se traduce en consumo de tiempo y computo. Dependiendo de las consideraciones que se tomen, algunos sub-modelos requerirán más tiempo para obtener los resultados.

En la figura 4-3 se muestran los porcentajes de tiempo utilizados en el movimiento de partículas v/s el tiempo usado en calcular las nuevas velocidades, para los diferentes casos propuestos: 1) 0.7% de concentración de partículas en el flujo, 2) 2.2% de concentración de partículas en el flujo, 3) 4.8% de concentración de partículas en el flujo, y 4) partículas libres en las que no existe choque entre partículas. Los casos 1 a 3, incluyen la colisión entre partículas. Para el caso 4, la subrutina de colisión entre partículas fue apagada, por lo que las partículas no colisionan cuando están en la misma posición. Para este último caso el código asume que las partículas se superponen, sin afectar su trayectoria (no existe colisión), como si fueran partículas fantasmas (conocido en la literatura como ghost particles).

Para el caso en donde las partículas se mueven libremente, sin que exista colisión entre ellas (se modelaron 500 partículas), el 70% del tiempo es empleado en mover las partículas, mientras que solo el 30 % es usado para calcular las velocidades de las partículas para el siguiente paso de tiempo. Al no considerar colisión entre partículas, la rutina de colisión entre

partículas no se utiliza (siendo la que más tiempo consume), y sólo se considera el cálculo de velocidades en la colisión de la partícula con el suelo.

Ya cuando las concentraciones aumentan, primero se tiene un 0.7% de partículas en el flujo, aquí solo el 4.45% del tiempo es usado en mover las partículas (1000 para este caso), y el 95.55% se usa para las nuevas velocidades, teniendo en cuenta que existe colisión entre partículas, y que éste es el sub-modelo que mayor tiempo consume. Esto es, cada vez que dos partículas colisionan se activa la subrutina de colisión entre partículas que calcula las velocidades post-colisión a partir del cambio de momentum que existe, modificando la trayectoria de ambas.

La segunda concentración usada fue de 2.2% de partículas (3000 partículas). El 1.57% del tiempo se usó para mover las partículas y casi el 98.5% del tiempo se usó en calcular las velocidades para el paso de tiempo siguiente, ya sea con el sub-modelo de colisión entre partículas o de choque de fondo.

Por último se hizo una modelación con 4.8% de partículas en el flujo (6500). En este caso apenas el 0.86% del tiempo se utilizó en mover las partículas en el espacio, dejando más del 99% del tiempo para el cálculo de velocidades.

De esta manera, se puede concluir que a medida que las concentraciones aumentan, los recursos computacionales utilizados para calcular las nuevas velocidades debidas a la colisión con otra partícula es cada vez mayor. Esta diferencia se debe a la cantidad de choques que existen entre partículas a lo largo de la simulación. En la Tabla 3-1 se muestran las colisiones aproximadas por partícula para las diferentes concentraciones, y el cambio no es lineal, sino más bien potencial, obteniéndose un exponente igual a 2 al hacer una regresión con los datos.

4.4 Dispersión

Las Figuras 4-5 a 4-18 muestran los resultados del análisis de dispersión de partículas para los distintos niveles te turbulencia, de acuerdo a los diferentes esfuerzos de corte que estos provocan, y para las 3 distintas concentraciones de partículas en el flujo que se utilizaron para el análisis de comportamiento. Para cada figura la parte a) corresponde a la

dispersión en el eje X (dirección del flujo), y la parte b) a la dispersión en el eje Z (dirección perpendicular al flujo).

Las Tablas 4-2 a 4-5 muestran el resumen de los valores de γ_x y γ_z de los diferentes casos de simulación (Figuras 4-5 a 4-19), tanto para el rango local como para el rango intermedio de difusión, de acuerdo al modelo conceptual de difusión de partículas sedimentarias propuesto por Nikora et al. (2001, 2002). Este último se muestra en la Figura 4-20 a y b.

Lo primero será analizar la dispersión en el eje X. El rango local establece un valor de 1 para el parámetro γ_x, y para todos los casos analizados, este valor se encuentra en el rango de 0.89015 a 1.02195, siendo valores cercanos al teórico.

En cuanto al rango intermedio se analiza por concentración.

Para una concentración de 0.7% de partículas en el flujo, para los dos niveles de turbulencia más bajos las simulaciones muestran una dispersión normal con un valor de γ_x de 0.5. Los tres niveles más altos de turbulencia presentan valor para γ_x mayores a 0.6 lo que indica una que existe super-difusión, probablemente provocada por la turbulencia.

Para una concentración de 2.2% de partículas en el flujo, se observa algo similar al caso anterior, en donde para los dos niveles de turbulencia más bajos la difusión es normal ($\gamma_x \approx 0.5$), mientras que para los tres niveles más altos de turbulencia la difusión es más rápida, con valores de γ_x mayores a 0.5.

Para la concentración de partículas más alta, 4.8%, el parámetro γ_x es mayor a 0.5 para todos los casos de turbulencia, lo que corresponde a súper-difusión, independiente de cuanta turbulencia haya en el flujo. Esto nos permite inferir, que la colisión entre partículas es muy importante para generar mayores difusiones a intensidades de flujo menores.

De lo anterior se observa que para bajas concentraciones de partículas, la turbulencia afecta la difusión cuando supera cierto umbral límite, lo que provoca un efecto positivo en la dispersión. A medida que aumenta la cantidad de partículas, la turbulencia aporta en todos los casos, independiente de la turbulencia que exista.

Si comparamos los casos según la cantidad de partículas en el flujo, las concentraciones bajas, 0.7% y 2.2%, tienen una dispersión normal o levemente súper-difusiva, dependiendo de la turbulencia que exista, mientras que para la mayor concentración, 4.8%, la dispersión es rápida en todos los casos, y mayor que en las dos concentraciones más bajas, lo que indica que a mayor concentración de partículas, la dispersión es cada vez mayor. Al aumentar la cantidad de partículas que interactúan, la cantidad de colisiones entre ellas también aumenta, lo que provoca que una mayor cantidad de partículas cambie su trayectoria respecto a su posición original, lo que se transforma en una mayor difusión.

Ahora corresponde analizar la dispersión en el eje Z. Al igual que para el eje X, el rango en que se mueve el parámetro γ_z para el rango local es de 0.8755 a 0.99335, valores que también son próximos a 1 o rango balístico, como indica el modelo conceptual.

Para el rango Intermedio se analiza por concentración.

Para una concentración de 0.7% de partículas en el flujo, los 3 niveles más bajos de turbulencia indican que existe una disminución en la dispersión, pasando de súper-difusiva a normal, y luego a sub-difusiva, el cuarto nivel de turbulencia entrega una dispersión cercana a normal, para luego disminuir nuevamente a sub-difusiva en el nivel más alto de turbulencia.

Para una concentración de 2.2% de partículas en el flujo, se observa una tendencia similar que para la concentración anterior, los 3 niveles inferiores de turbulencia indican una disminución en la dispersión pasando de difusión-normal a sub-difusiva, para luego aumentar la difusión en el cuarto nivel de turbulencia a super-difusiva, y bajar nuevamente a sub-difusiva con la mayor turbulencia.

Para la concentración de partículas más alta, 4.8%, el comportamiento sigue siendo parecido. A medida que la turbulencia va aumentando, la dispersión va disminuyendo pasando de súper-difusiva a sub-difusiva, luego entra en un rango normal, para finalmente pasar de levemente sub-difusiva a una sub-difusión muy baja cercana a cero.

De los 3 casos de concentraciones se observa que la tendencia de la difusión es disminuir a medida que aumenta la turbulencia, pero existe un rango que produce un quiebre en esa tendencia. Una vez pasada esa fase, la dispersión vuelve a disminuir.

Para elucidar los motivos por los que se produce el comportamiento descrito en los párrafos anteriores, es necesario realizar más simulaciones con concentraciones entre 2 y 5%. Lamentablemente por tiempo estas simulaciones no se alcanzaron a realizar en el presente trabajo.

CONCLUSIONES

Los resultados de la modelación para la validación del modelo resultaron similares a los datos experimentales de Niño y García (1998) para una partícula de arena de 0.69 mm de diámetro, dado que los valores de los parámetros analizados se encontraban dentro del rango de error correspondiente a una desviación estándar.

Los resultados de altura y longitud de salto reflejaron el mismo patrón que presentaban los valores experimentales de Niño y García (1998), de los cuales se aprecia que al aumentar los esfuerzos cortantes, se producen saltos (en promedio) más altos y más largos. Este patrón también se observó en los resultados de las modelaciones para estas mismas características. En cuanto a la velocidad no se observó ninguna tendencia especial, pero aun así los resultados modelados fueron cercanos a los experimentales. Con esto se puede decir que se cuenta con un modelo capaz de representar el comportamiento promedio del salto de partículas como transporte de fondo en un canal turbulento, y con ello se podría indagar en futuros análisis para diversas condiciones que permitan entender en profundidad la física que subyace en el salto de partículas de fondo. Así como en este caso se analizaron las concentraciones de las partículas y su efecto en algunas propiedades de las partículas, también es posible analizar partículas de otros tamaños, analizar la importancia de cada fuerza en el efecto de transporte y otras más.

Las concentraciones utilizadas son relativamente pequeñas, dado que, el sub-modelo de colisión utilizado no permite concentraciones mayores a 5 – 7 % (flujo diluido), de acuerdo a la literatura, debido a que, es un modelo que sólo considera el choque entre 2 partículas al mismo tiempo, lo que es efectivo para concentraciones diluidas de sedimento.

Se observa que la cantidad de partículas en el flujo afecta de diferentes maneras los parámetros que se estudiaron. La altura y longitud de salto se vieron disminuidas a medida que aumentaban las partículas, esto a causa de que al haber mayor cantidad de partículas, estas interfieren en su propia trayectoria libre de vuelo o salto, modificando su movimiento. En cuanto a la velocidad de las partículas se esperaba que ocurriera un fenómeno similar, pero se observó que para las concentraciones más bajas, 0.7% y 2.2%, la velocidad se ve incrementada, y al llegar a los 4.8% la velocidad disminuye por bajo la de las partículas que no consideran colisión entre partículas. Respecto a la rotación de las partículas, se observa

que el aumento en la intensidad del flujo provoca una disminución de este parámetro, independiente de la concentración de partículas que exista. Por otro lado, la rotación de las partículas se mantiene constante para concentraciones iguales o menores a 2.2%, pero al aumentar a 4.8% la rotación comienza a aumentar, debido a la cantidad de colisiones que provocan un cambio de momentum lineal y angular en las partículas inmediatamente después del choque.

En el análisis de recursos computacionales se observó que cuando no existe colisión entre partículas, la mayor cantidad de recursos computacionales se destina principalmente al cálculo de fuerzas en vuelo libre, es decir, a calcular la nueva posición de éstas para el siguiente delta de tiempo en la simulación. En cambio, cuando se incorpora el choque inter-partículas, y por ende se consideran concentraciones de partículas considerables, el tiempo dedicado al cálculo de velocidades post-colisión, se incrementa significativamente alcanzando valores mayores al 90% del tiempo. Esto se explica por el aumento en el número de partículas y las colisiones entre éstas que se multiplican. Este fenómeno se observa claramente en la Figura 4-4, en donde se aprecia que el incremento de colisiones versus el nivel de concentración es potencial de orden 2. Por lo tanto, la colisión entre partículas no solo afecta al movimiento de las partículas, sino que también afecta los recursos necesarios para la modelación, lo que obligó a la optimización del modelo SALTATE, de forma que aprovechara los recursos de la manera más eficiente posible, en este caso se optó por la paralelización del espacio y utilizar los procesadores disponibles en el servidor utilizado.

El análisis de la dispersión permite apreciar el comportamiento de las partículas en planta, y analizar los efectos de los factores que alteran el movimiento de las partículas. Las potenciales fuentes de difusión o dispersión de partículas son tres, las fluctuaciones de velocidad del flujo (cambios de trayectoria de la partícula inducidos por el flujo), las colisiones de las partículas con la pared (cambio de dirección en cada colisión), y finalmente la colisión entre partículas. Para indagar en la difusión de las partículas se consideraron cuatro concentraciones diferentes de partículas (por volumen) y cinco niveles de intensidades de flujo diferentes, representados en esfuerzos de corte adimensional.

Para el rango intermedio del modelo conceptual de Nikora et al. (2001, 2002) en el eje X (dirección del flujo) se obtuvo que la turbulencia aporta a la dispersión, a medida que los

esfuerzos de corte ejercidos por el flujo aumentan, el factor de dispersión también lo hace, generándose una difusión mayor. En cuanto a la concentración de partículas, para 0.7% y 2.2%, los factores de dispersión fueron los mismos, a diferencia de la modelación con 4.8% de partículas en el flujo que entrego una difusión mayor. Esto indica que a partir de cierta concentración existe un efecto positivo en la dispersión de partículas en el eje X producidos por las colisiones entre partículas.

Para el rango intermedio del modelo conceptual de Nikora et al. (2001, 2002) en el eje Z (dirección transversal al flujo) se obtuvo que la turbulencia tiene un efecto negativo en la dispersión de las partículas, generando una difusión cada vez menor, pero también existe un punto de inflexión en la dispersión, en donde hay un incremento en la dispersión para luego continuar con la tendencia a disminuir.

Cuando el número de partículas en el flujo aumenta, también lo hace la cantidad de choques entre sedimentos, tanto para el eje X como para el eje Z, en donde el aumento de la concentración de partículas genera una dispersión mayor en el eje X y menor en el eje Z para el rango intermedio.

REFERENCIAS

Board, M. Contaminated sediments in ports and waterways: Cleanup strategies and technologies. National Academies Press, 1997

Bombardelli F.A.; González, A.E.; Niño, Y. Computation of the particle Basset force with a fractional-derivative approach. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 134(10), 2008, pp. 1513-1520.

Crowe C, Sommerfeld M, Tsuji M. Multiphase flows with droplets and particles, CRC Press: Boca Raton, Florida, USA, 2011.

Garcia, M.H. (Ed.). Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice. American Society of Civil Engineers, 2008

González AE. Coupled numerical modeling of sediment transport near the bed using a two-phase flow approach. Ph.D. Thesis, University of California, Davis, 2008, p. 188.

Julien, P.Y. Erosion and Sedimentation, 2ºnd Edition. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2010.

Lee HY, Hsu IS. Investigation of saltating particle motions. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 120, 1994, pp. 831-845.

Lee HY, Chen YH, You JY, Lin T. 2000. Investigations of continuous bed load saltating process. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 126(9), 2000, pp. 691-700.

Lee HY, Lin YT, You JY, Wang HW. On three-dimensional continuous saltating process of sediment particles near the channel bed. Journal of Hydraulic Research 44(3), 2006, pp. 374-389.

Meritt, W.S.; Letcher R.A.; Jakeman A.J. A review of erosion and sediment transport models. Environmental Modelling & Software 18, 2003, pp. 761-799.

Moreno, P.A.; Bombardelli, F.A. 3D Numerical Simulation of Particle-Particle Collisions in Saltation Mode near Stream Beds. Acta Geophysica, 60, 2012, pp. 1661-1688.

Moreno-Casas, P.A.; Bombardelli, F.A. Computation of the Basset force: recent advances and environmental flow applications. Environmental Fluid Mechanics, 16(1), 2016, pp. 193-208.

Moreno-Casas, P.A.; Toro, J.P.; Bombardelli, F.A. Generalized algorithms for particle motion and collision with streambeds. International Journal of Sediment Research. Under Review, 2017

Moser et al. Optimal LES formulations for isotropic turbulence. Journal of Fluid Mechanics, 398, 1999, pp. 321-346.

Nikora, V.; Heald, J.; Goring, D.; McEwan, I. Diffusion of saltating particles in unidirectional water flow over rough granular bed. Journal of Physics A: Mathematical and General, 34(50), 2001, pp. L743-L749.

Nikora, V.; Habersack, H.; Huber, T.; McEwan, I. On bed particle diffusion in gravel bed flows under weak bed load transport. Water Resources Research, 31(6), 2002, p. 1081.

Niño Y.; Garcia M.H. Gravel saltation. 2. Modeling. Water Resources Research 30 (6), 1994, pp. 1915-1924.

Niño, Y.; Garcia, M.H. Experiments on saltation of sand in water. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 124(10), 1998, pp. 1014-1025.

Patricio Moreno-Casas. Two-Phase Flow, Three-Dimensional Approach for Saltating Particles near the Bed at Finite Reynolds Numbers. Ph.D. Thesis, University of California, Davis, 2014.

Prosperetti, A.; Tryggvason, G. Computational methods for multiphase flow. Cambridge University press, 2007

Schmeeckle M, Nelson J, Pittlick J, Bennett J. Interparticle collision of natural sediment grains in water. Water Resources Research 37, 2001, pp. 2377-2391.

Schmeeckle y Nelson. Direct numerical simulation of bedload transport using a local, dynamic boundary condition, Sedimentology, 50, 2003, pp. 279–301.

Tanaka T, Tsuji Y. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in a vertical pipe: On the effect of inter-particle collision. In: D. Stock, Y. Tsuji, J. Jurewizc, M. Reeks, and M. Gautam, eds., Gas-Solid Flows, FED-121, ASME, 1991, pp. 123-128.

Tsuji Y, Oshima T, Morikawa Y. Numerical simulation of pneumatic conveying in a horizontal pipe. KONA 3, 1985, pp. 38-51.

Tsuji Y, Morikawa T, Tanaka T, Nakatsukasa N, Nakatani M. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in a two-dimensional horizontal channel. International Journal of Multiphase Flow 13, 1987, pp. 671-684.

Wiberg P., Smith JD. A theoretical model for saltating grains in water. Journal of Geophysical Research, 9, 1985, pp. 7341-7354.

Yamamoto Y, Potthoff M, Tanaka T, Kajishima T, Tsuji Y. Large-eddy simulation of turbulent gas-particle flow in a vertical channel: effect of considering inter-particle collisions. Journal of Fluid Mechanics 442, 2001, pp. 303-334.

Yen, B.C. Sediment fall velocity in oscillating flow, Water Resources, Environmental Engineering Resources, Report 11, Dept. of Civil Eng., University of Virginia, 1992.