

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Simulación de salto de partículas de polvo generado por
acción del viento utilizando Comsol Multiphysics®**

Ensayo o artículo académico

Vladimir Aleksey Benavides Jara
Ingeniería Química

Trabajo de titulación presentado como requisito para
la obtención del título de
Ingeniero Químico

Quito, 13 de mayo de 2016

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO CIENCIAS E INGENIERIAS

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**Simulación de salto de partículas de polvo generado por acción del viento
utilizando Comsol Multiphysics®**

Vladimir Aleksey Benavides Jara

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Andrea Landazuri, P.h.D.

Firma del profesor

Quito, 13 de mayo de 2016

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Vladimir Aleksey Benavides Jara

Código: 00107205

Cédula de Identidad: 171732058

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2016

RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo de salto de partículas en tres dimensiones generado mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) cuya aplicación puede extenderse en cualquier lugar geográfico y actividad que involucre una exposición directa de partículas hacia la atmósfera por acción del viento. El fenómeno de salto de partículas involucra la interacción de diversos procesos como: el movimiento de la partícula en el salto, las modificaciones del perfil de viento a través de la transferencia de momento entre el flujo de viento y las partículas en salto, y la colisión de partículas con el suelo que ocasionará la posterior salpicadura de partículas de la superficie en la corriente del fluido. Este modelo de dispersión describe el comportamiento del viento generado por distintas velocidades en dirección horizontal y el perfil formado por diferentes rugosidades del terreno. Además, incluye la trayectoria de movimiento de partículas debido a las fuerza de cizalladura del aire, gravedad, arrastre y efectos turbulencia debido al retardo del viento.

Palabras clave. Salto (saltación) de Partículas, Perfil de Viento, Modelo de Dispersión, CFD.

ABSTRACT

This paper presents a three-dimensional model of dust particles saltation generated by computational fluid dynamics (CFD) that could be applied in any geographical location and any activity that involves direct exposure of particles into the atmosphere by wind. The phenomenon of particles saltation is a consequence of the interaction of several processes like the motion of the particle during the jump, changes in the wind profile through momentum transfer between wind flow and the saltating particles, and particle collision with the ground that causes the splash of surface particles in the fluid stream. This dispersion model describes the behavior of wind generated at different speeds in the horizontal direction and the wind profiles at different terrain roughness. This model includes the motion of particles due to shear force, gravity, drag and the effect of turbulence due to the delay of wind.

Keywords. Saltating Particles, Wind Profile, Dispersion Model, CFD.

Simulación de salto de partículas de polvo generado por acción del viento utilizando Comsol Multiphysics®

Vladimir A. Benavides¹, Andrea C. Landázuri^{1*}

¹ Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias e Ingeniería - El Politécnico.
Departamento de Ingeniería Química, Calle Diego de Robles y Vía Interoceánica, Campus
Cumbayá, Edif. Newton. Casilla Postal 17-1200-841, Quito, Ecuador

* Autor corresponsal/ Corresponding autor, e-mail: alandazuri@usfq.edu.ec

Resumen

Este trabajo presenta un modelo de salto de partículas en tres dimensiones generado mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) cuya aplicación puede extenderse en cualquier lugar geográfico y actividad que involucre una exposición directa de partículas hacia la atmósfera por acción del viento. El fenómeno de salto de partículas involucra la interacción de diversos procesos como: el movimiento de la partícula en el salto, las modificaciones del perfil de viento a través de la transferencia de momento entre el flujo de viento y las partículas en salto, y la colisión de partículas con el suelo que ocasionará la posterior salpicadura de partículas de la superficie en la corriente del fluido. Este modelo de dispersión describe el comportamiento del viento generado por distintas velocidades en dirección horizontal y el perfil formado por diferentes rugosidades del terreno. Además, incluye la trayectoria de movimiento de partículas debido a las fuerza de cizalladura del aire, gravedad, arrastre y efectos turbulencia debido al retardo del viento.

Palabras clave. Salto (saltación) de Partículas, Perfil de Viento, Modelo de Dispersión, CFD.

Simulation of dust particles saltation generated by the action of the wind using Comsol Multiphysics®

Abstract

This paper presents a three-dimensional model of dust particles saltation generated by computational fluid dynamics (CFD) that could be applied in any geographical location and any activity that involves direct exposure of particles into the atmosphere by wind. The phenomenon of particles saltation is a consequence of the interaction of several processes like the motion of the particle during the jump, changes in the wind profile through momentum transfer between wind flow and the saltating particles, and particle collision with the ground that causes the splash of surface particles in the fluid stream. This dispersion model describes the behavior of wind generated at different speeds in the horizontal direction and the wind profiles at different terrain roughness. This model includes the motion of particles due to shear force, gravity, drag and the effect of turbulence due to the delay of wind.

Keywords. Saltating Particles, Wind Profile, Dispersion Model, CFD.

1.0 Introducción

El polvo arrastrado por el viento es uno de los factores responsables de la suspensión de partículas finas en la atmósfera, la creación de dunas de arena y la erosión característica de actividades geológicas. Por ejemplo, varios países como España, Reino Unido, Portugal, Cuba y varios países de la zona del caribe se han visto afectadas por nubes de polvo provenientes del desierto africano del Sahara [1]. Estas tormentas de polvo pueden provocar diversos efectos negativos sobre el medio ambiente y salud ya que podrían contribuir a la superación de los niveles de contaminación permitidos [1].

El material finamente particulado es conocido comúnmente como polvo y se presenta en tamaños que varían entre 1-1000 μm y su composición química varía en función de las características del material del cual se desprende [2]. El polvo causa serias molestias a las personas que se encuentran expuestas directamente y a las comunidades que se hallan dentro del área de influencia de operación, al disminuir la calidad del aire respirable [2]. Pequeñas partículas en suspensión en el aire son contaminantes relevantes para el ser humano. El viento puede transportar partículas ultra finas (es decir, aquellas partículas con diámetros menores a 1 μm), como metales y metaloides, que al ser aspiradas por personas y animales pasan por la tráquea y finalmente llegarán a los pulmones [3].

El fenómeno de salto (o saltación) inicia cuando la velocidad del viento aumenta y genera que las partículas de polvo entre 70-500 μm de diámetro sean las primeras en moverse. Dependiendo de su volumen tienden a seguir diferente trayectoria: generalmente, partículas de 500 μm de diámetro solamente ruedan o se deslizan; partículas intermedias son levantadas y rebotan en una serie de saltos a lo largo de toda la superficie; y, partículas menores a 70 μm no son levantadas ya que sus fuerzas de atracción son mayores que la fuerza de cizalladura del viento [4]. Cuando las partículas en salto impactan contra el suelo pueden movilizar una amplia gama de partículas con diferentes tamaños; esto se da ya que al momento de impactar en el terreno parte del momento horizontal, ganado por acción del viento, es parcialmente convertido en momento vertical [4]. Durante el fenómeno de salto, el perfil de viento que se forma es clave ya que determinará la cantidad de momento que será transferida a dicha partícula en salto.

El viento es un fluido que si se mueve en dirección paralela a una superficie sufre un rozamiento continuo en la zona de contacto, este contacto produce una fuerza de cizallamiento por lo que el perfil de viento mantendrá una forma logarítmica [4]. En la Figura 1 se puede visualizar una representación esquemática para el fenómeno de salto de partículas y un perfil logarítmico de viento, $U_x(z)$.

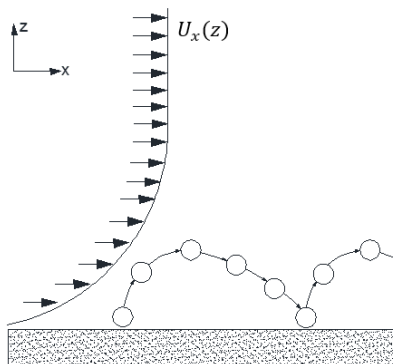


Figura 1. Representación esquemática de salto de partículas y perfil de viento.

2.0 Descripción del modelo

El modelo simula la interacción de tres procesos: el comportamiento del viento, la trayectoria de las partículas en salto y la transferencia de momento entre el flujo de viento y las partículas suspendidas. Es un modelo que realiza la simulación en tres dimensiones que incluye un modelo de flujo turbulento κ - ϵ , fuerza arrastre, gravedad e interacciones entre partículas y fluido. Rechaza la colisión entre partículas, las fuerzas electrostáticas y el giro de partículas sobre su propio eje (Magnus force). El modelo turbulento utilizado es una adaptación del modelo estándar de κ - ϵ tomando en cuenta constantes sugeridas por Richard & Hoxey [5].

2.1 Software

COMSOL MULTIPHYSICS 5.1® es utilizado para la creación de geometrías, generación de mallas, simulación el flujo turbulento de aire y el salto de partículas. Las simulaciones se realizaron en un sistema operativo Windows con procesador Intel® Core™ i5-4200U CPU @ 160GHz.

2.2 Geometría y mallado

El dominio de estudio es una caja que se extiende 2 m en el eje X, 0.5 m en Y y 0.5 m en Z como se muestra en la Figura 2. Adicionalmente, se generaron 10 capas 0.01 m de alto desde la base de la caja con el fin de obtener una mejor aproximación de flujo turbulento y del fenómeno de salto cerca del terreno (base) de la caja. La geometría utiliza un tipo de mallado de tetraedros libres (*free tetrahedral*) como se muestra en la Figura 3. En las superiores se estableció una malla normal (normal) y fina (fine), como se muestra en la Figura 3a y 3b, respectivamente. En las 5 capas inferiores se estableció una malla extra fina (*extra fine*) por ser una zona crítica donde se genera la mayor cantidad de saltos (Figura 3c). Comsol es un programa iterativo que según el

mallado genera diversos elementos para mejorar la solución final. Este tipo de mallado generó un total de 680 495 elementos en todo el dominio.

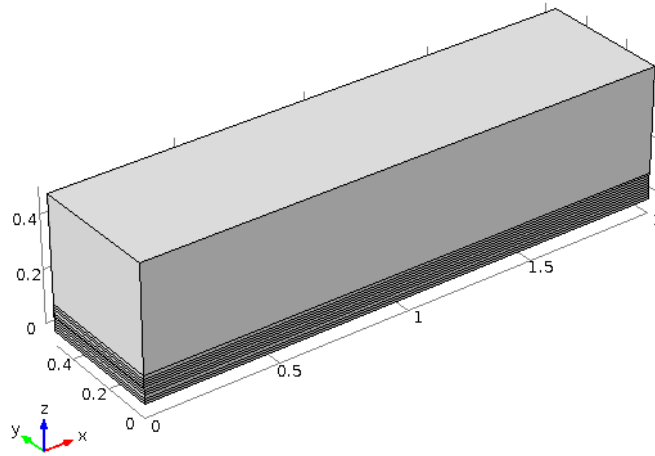


Figura 2. Geometría del dominio de estudio. La caja se extiende 2 m en X, 0.5 m en Y y 0.5 m en Z.

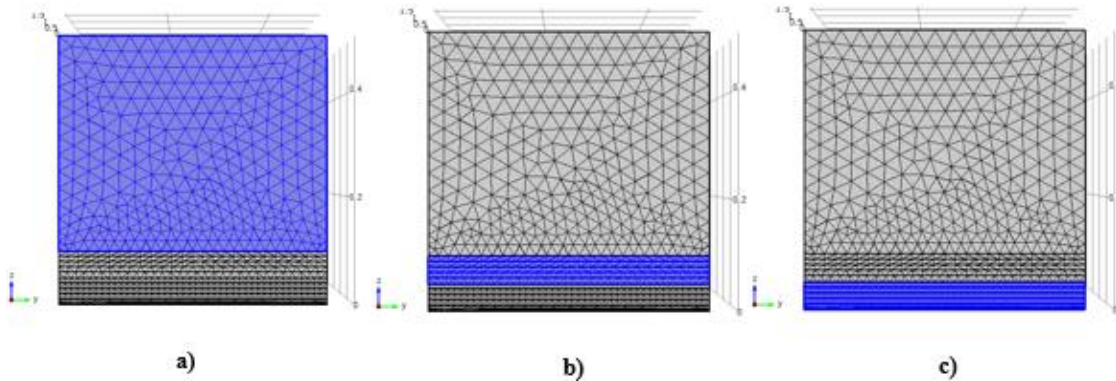


Figura 3. a) Malla normal (Normal mesh), b) Malla fina (Fine mesh), c) Malla extra fina (Extra fine mesh).

2.3 Perfil de viento

El perfil de viento es clave en el salto de partículas pues regula la cantidad de momento que se transfiere a la partícula en salto. La ecuación de perfil de viento adoptada para las simulaciones es logarítmica y en estado estacionario representada por la ecuación 1.

$$U_x(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0 + z}\right) \quad (1)$$

Donde z [m] es la distancia vertical desde la base, u^* [m/s] es la velocidad de cizalladura del viento, k es la constante de Von Karman y z_o [m] es la rugosidad de la superficie. La velocidad de cizalladura del viento puede ser calculada según la ecuación 2.

$$u^* = \frac{kU_h}{\ln \frac{h + z_o}{z_o}} \quad (2)$$

Donde U_h (m/s) es la velocidad de referencia a la altura de h [m].

Para el desarrollo del modelo en Comsol se utilizó el módulo de transporte de fluidos con la física de *Turbulent Flow*, κ - ε (*spf*). Este es un modelo de dos ecuaciones que sirve para simular las características de un fluido turbulento. La primera variable de transporte, κ , determina la energía cinética turbulenta y la segunda variable, ε , determina la disipación de energía turbulenta. Ambas variables están determinadas por las ecuaciones 3 y 4.

$$\kappa = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_u}} \quad (3)$$

Donde C_u es una constante del modelo igual a 0.013 [5].

$$\varepsilon = \frac{u^{*3}}{k(z + z_o)} \quad (4)$$

Para la simulación de partículas en salto se utiliza una velocidad de cizalladura del viento de 0.0441 m/s. Esta velocidad, a una altura de 10 m, es equivalente a 1 m/s y según la escala de Beaufort se describe como una ventolina en la cual el humo indica la dirección del viento [6]. Se utiliza la constante de Von Karman con un valor de 0.42 y un valor de z_o de 7.31×10^{-4} m que representa un valor equivalente a la rugosidad aerodinámica típica de un desierto [4].

Para la generación del perfil de viento se realizó un estudio en estado estacionario donde se definió una cara de ingreso (*inlet*) con la condición de velocidad en el eje X equivalente a la ecuación 2; una cara de salida (*pressure outlet*), con una condición de borde de presión igual a 1 atm; la cara superior se estableció una cara de frontera abierta donde no exista estrés viscoso; y, en las caras laterales se impuso una función de simetría, la cual describe que lo que sucede al interior de las paredes laterales sucede a su exterior. Dentro de los ajustes de terreno se utiliza

una función de pared (*wall functions*), en la cual se aplica una rugosidad equivalente, ε_r , y este valor se calcula con la ecuación 5.

$$\varepsilon_r = 20z_o \quad (5)$$

2.4 Trayectoria de partículas

El movimiento de las partículas en salto está determinado principalmente por la fuerza gravitacional y las fuerzas proporcionadas por el fluido propiamente. La principal fuerza que ejerce el fluido y afecta la trayectoria es la fuerza de arrastre (*drag force*), F_d . Esta fuerza está determinada por las ecuaciones 6, 7 y 8.

$$F_d = \frac{1}{\tau_p} m_p (u' - v) \quad (6)$$

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (7)$$

$$u' = u + \zeta \sqrt{\frac{2\kappa}{3}} \quad (8)$$

Donde τ_p [s] es el tiempo de respuesta de la velocidad de partícula, m_p [kg] es la masa, v [m/s] es la velocidad de las partículas, μ es la viscosidad dinámica del fluido [Pa·s], ρ_p [kg/m³] es la densidad de la partícula, d_p [m] diámetro de la partícula y u' [m/s] es la velocidad del fluido. Al utilizar un flujo con disipación turbulenta, el campo de velocidad del fluido se adapta a la ecuación 8.

Esta ecuación consta de dos términos: primero u [m/s] representa la velocidad media del fluido y el segundo término representa una fluctuación turbulenta donde κ [m²/s²] es la energía cinética turbulenta y ζ es un número aleatorio distribuido normalmente con media de cero y desviación estándar de uno. Estas ecuaciones son adaptaciones de la ley de arrastre establecida por George Gabriel Stokes con el modelo de flujos cargados de partículas. Este modelo se refiere a una clase de flujo de fluido de dos fases en el que una de las fases está conectado de forma continua (fase continua o vehículo) y la otra fase se compone de partículas pequeñas inmiscibles (fase dispersa o de partículas) [6].

Las partículas saltantes al encontrarse en el sistema gravitatorio terrestre sienten la fuerza de gravedad F_g determinada por la ecuación 9.

$$F_g = m_p g \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (9)$$

Donde g [m/s^2] es la aceleración de la gravedad y ρ [kg/m^3] es la densidad del aire.

Para determinar las trayectorias se realizó un estudio dependiente del tiempo en intervalos de 0.01-0.001 s. En las propiedades de las partículas se fijó una densidad promedio de polvo igual a 2.5 g/cm^3 y se realizó el estudio para diámetros de partículas de 100, 250 y 500 μm . Se ingresaron 20 partículas dispersas por toda la cara frontal a diferentes alturas que serán arrastradas de acuerdo a las ecuaciones descritas en las secciones 2.3 y 2.4. En el terreno se mantiene la rugosidad establecida en la Sección 2.3 y se adiciona una opción de rebote. Las condiciones para la fuerza de arrastre como el campo de velocidad y la viscosidad dinámica van a depender del estudio estacionario de perfil de viento.

3.0 Resultados y Discusiones

Para ambos estudios se utilizó el solucionador de Comsol GMRS (generador de residuo mínimo) con un método segregado de dos etapas con una tolerancia de 1×10^{-4} . Se realizó un estudio de tolerancias en la malla para valores de 1×10^{-3} a 1×10^{-4} y 1×10^{-4} a 1×10^{-5} de los cuales se encontró errores menores al 10% y 5% respectivamente. El solucionador GMRS es un método iterativo, en el cual se requiere que se especifique el número de iteraciones que el solucionador llevará a cabo hasta que se reinicie (el valor predeterminado es 50).

3.1 Perfil de viento

En la Figura 4 se presenta varios cortes a lo largo del dominio de estudio, donde se puede percibir que en la zona de contacto se da la mayor cantidad de cizallamiento con el fluido. Para poder apreciar el perfil y determinar cómo varía la velocidad de viento según la altura y comprobar el comportamiento del mismo dentro del dominio de estudio se realizó un corte vertical (A1) como se muestra en la Figura 5.

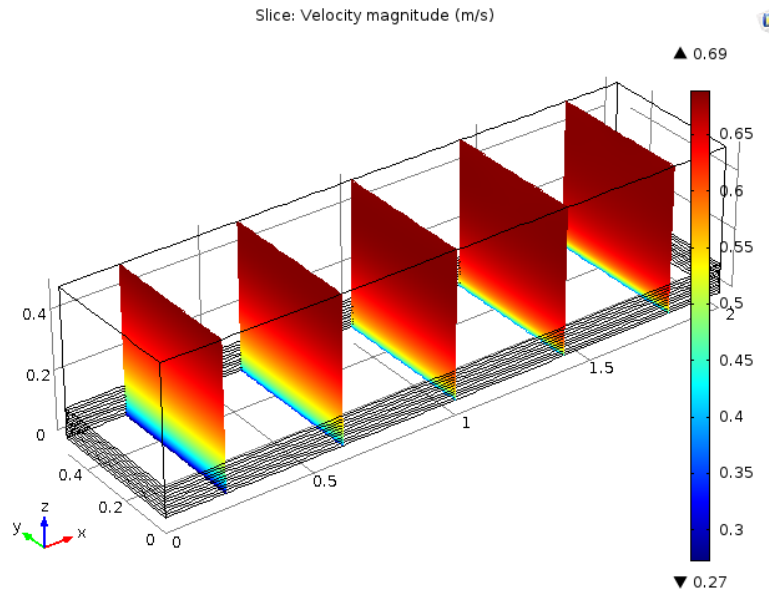


Figura 4. Corte de velocidades en el dominio de estudio.

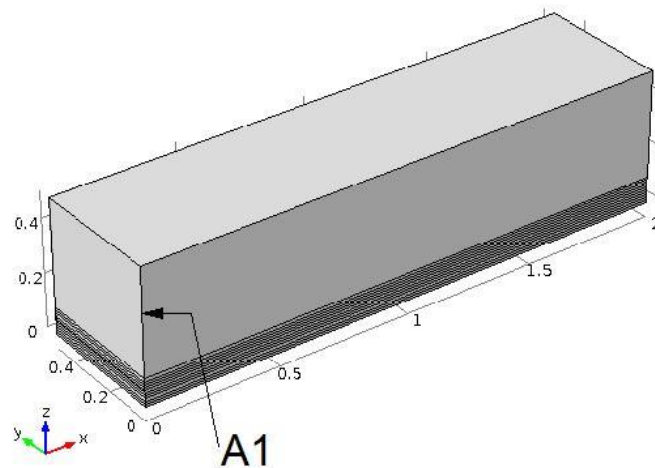


Figura 5. Corte A1 para determinación del perfil de viento.

La Figura 6 equivalente al corte A1, presenta la variación de la magnitud del viento en función de la altura. Se tiene un perfil de viento logarítmico el cual aparentemente sigue creciendo. El perfil no llega a estabilizarse a una velocidad constante ya que la altura del modelo fue truncado hasta una altura de 0.5 m. Generalmente, los valores de velocidad referenciales se toman a 10 m de altura pues la velocidad a esta altura ya tiene una tendencia estable [7]. A 10 m, la velocidad equivalente es de 1 m/s.

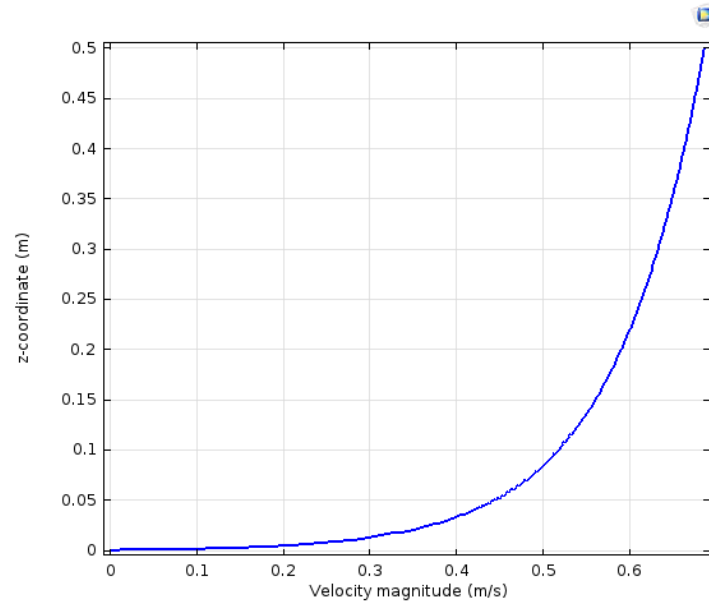


Figura 6. Perfil de velocidad en el corte A1.

3.2 Trayectoria de partículas

Para el estudio de salto de partículas se arrojaron 20 partículas a diferentes alturas sin velocidad inicial, esto quiere decir que ganaran momento netamente del perfil de viento descrito en la Sección 2.2. En la Figura 7. a) esta una representación de las 20 partículas en su posición inicial en la cara frontal. Las partículas están coloreadas en función a la velocidad que el viento transferirá de acuerdo a la altura.

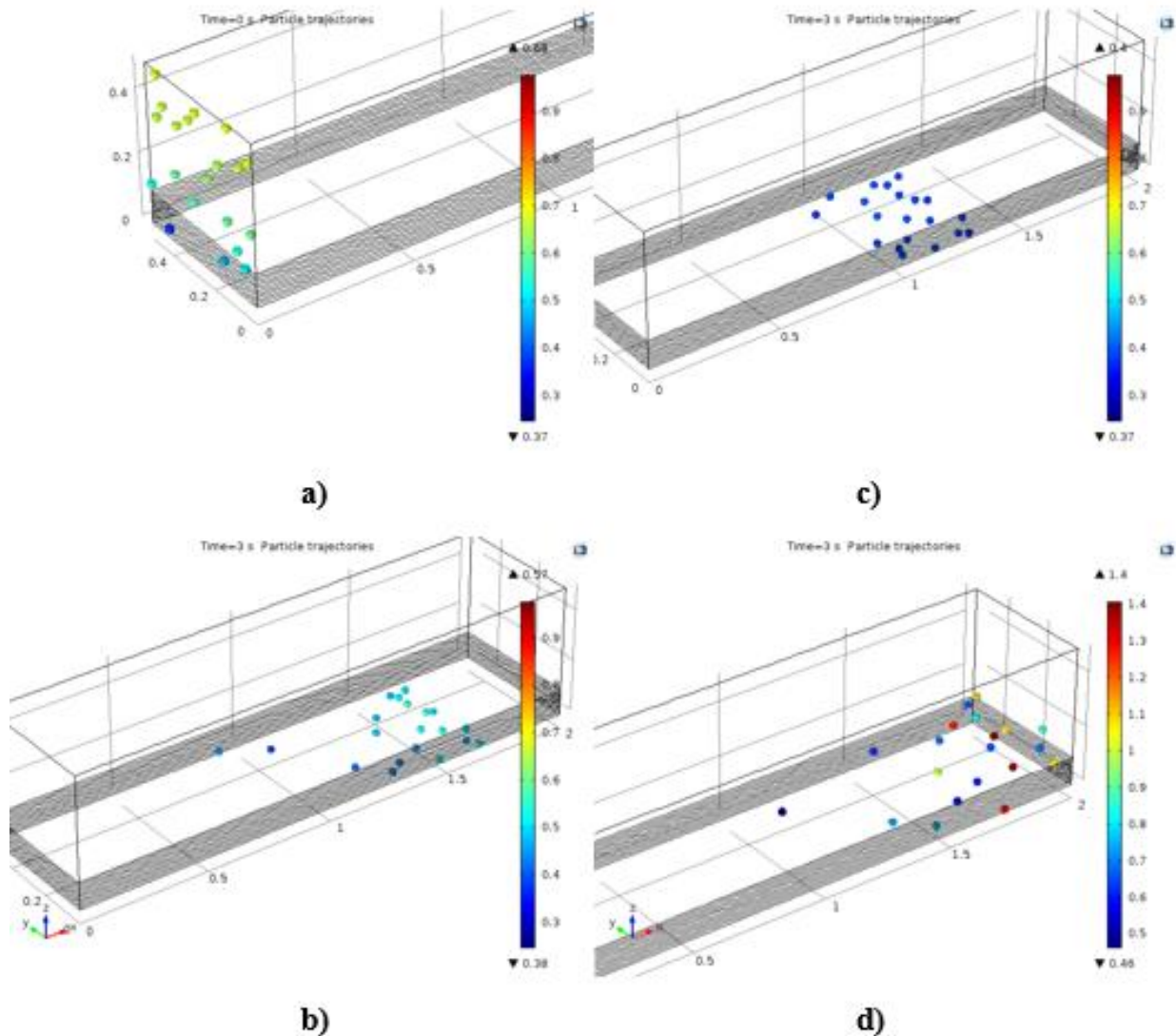


Figura 7. a) Posición inicial de partículas, b) Posición después de 3 (s), partículas de 100 μm de diámetro, c) Posición después de 3 (s), partículas de 250 μm de diámetro, d) Posición después de 3 (s), partículas de 500 μm de diámetro.

Ya que el terreno es casi ideal, no hay geometrías que obstaculicen la trayectoria y la velocidad del viento ingresa linealmente a lo largo del eje X. Las partículas de estudio casi no “sentirán” desviaciones en el eje Y. No obstante, éste modelo puede ser aplicado en dominios que sí incluyan efectos de obstrucciones y topográficos.

En la Figura 7b-d se observa la posición de las partículas después de 3 (s), en este punto se nota que todas las partículas están casi a nivel del suelo y con la mayor parte de su energía disipada.

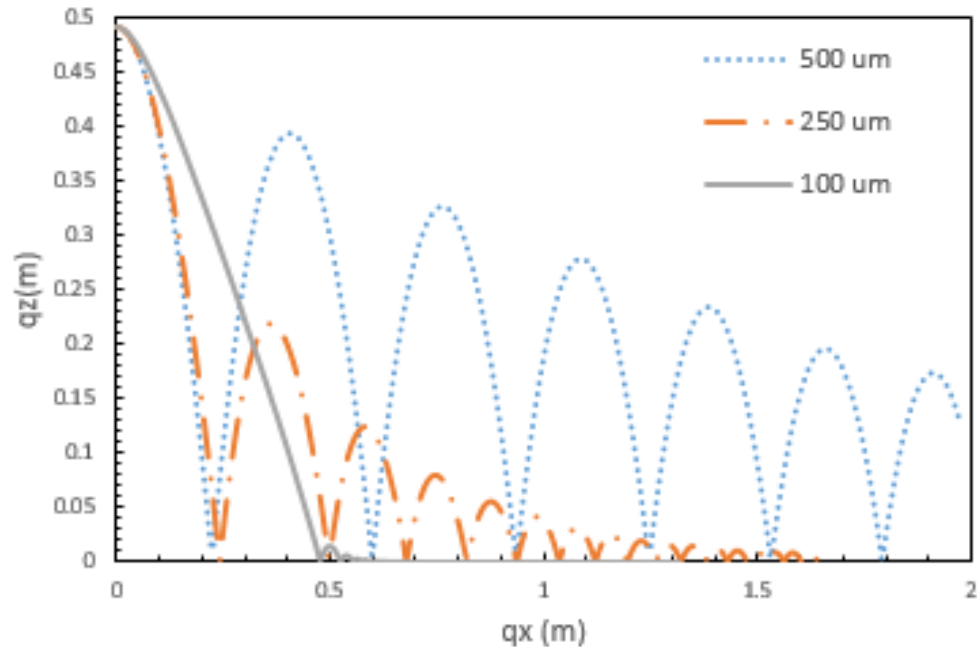


Figura 8. Trayectoria de partículas lanzadas a 0.49 m en el eje Y.

En la Figura 8 se representan partículas con diferentes diámetros a la misma altura en el eje $Y=0.49$ m que fueron lanzadas desde distintas alturas. Se puede apreciar que la energía de rebote de las partículas es directamente proporcional a su diámetro ya que partículas del $100\ \mu\text{m}$ tienden a caer y perder casi toda su energía inmediatamente. Por otro lado, partículas de $500\ \mu\text{m}$ de diámetro tienden a generar la mayor cantidad de saltos.

En la Figura 9 se observa las trayectorias y comportamiento de partículas $500\ \mu\text{m}$ de diámetro. Las partículas que fueron expulsadas desde una altura mayor tienden a generar una mayor serie de saltos.

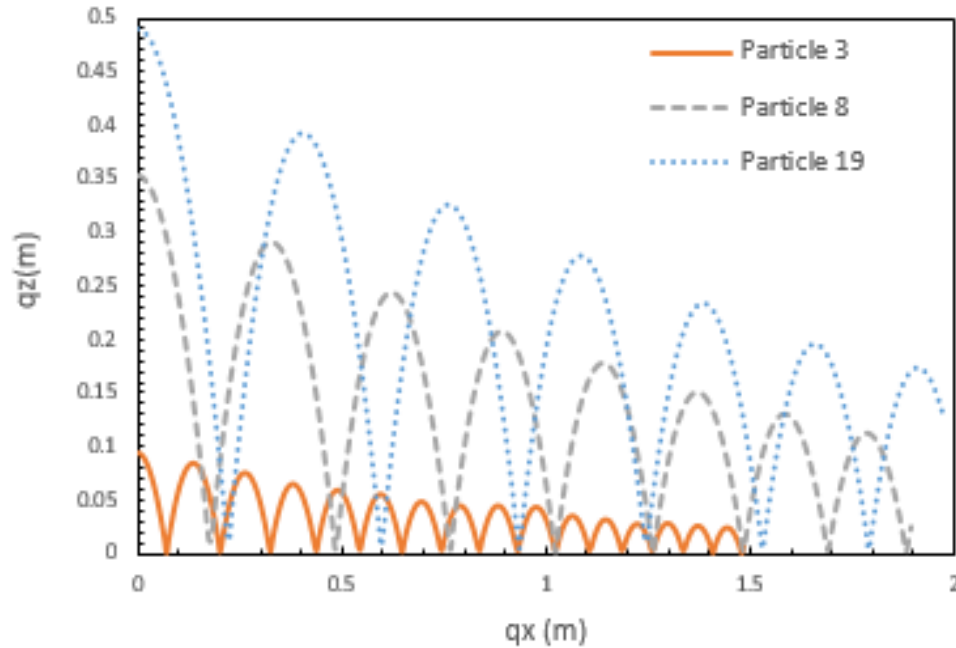


Figura 9. Trayectoria de partículas de 500 μm de diámetro lanzadas a diferentes alturas en el eje Y.

3.3 Validación

Para la validación del modelo se tomaron las condiciones y ajustes de contornos, tanto para el perfil de viento como para el salto de partículas, establecidas por Jasper F. Kok y Nilton O. Renno descritas en el modelo COMSAL [4]. El mencionado estudio utilizó una velocidad de cizallamiento igual a 0.4 m/s y una rugosidad equivalente representada por la ecuación 10.

$$z_o = d_p/30 \quad (10)$$

Además, las partículas fueron expulsadas desde la superficie con una rapidez inicial de 1 m/s y un ángulo de 40° desde la horizontal. Los datos obtenidos se representan en la Figura 10.

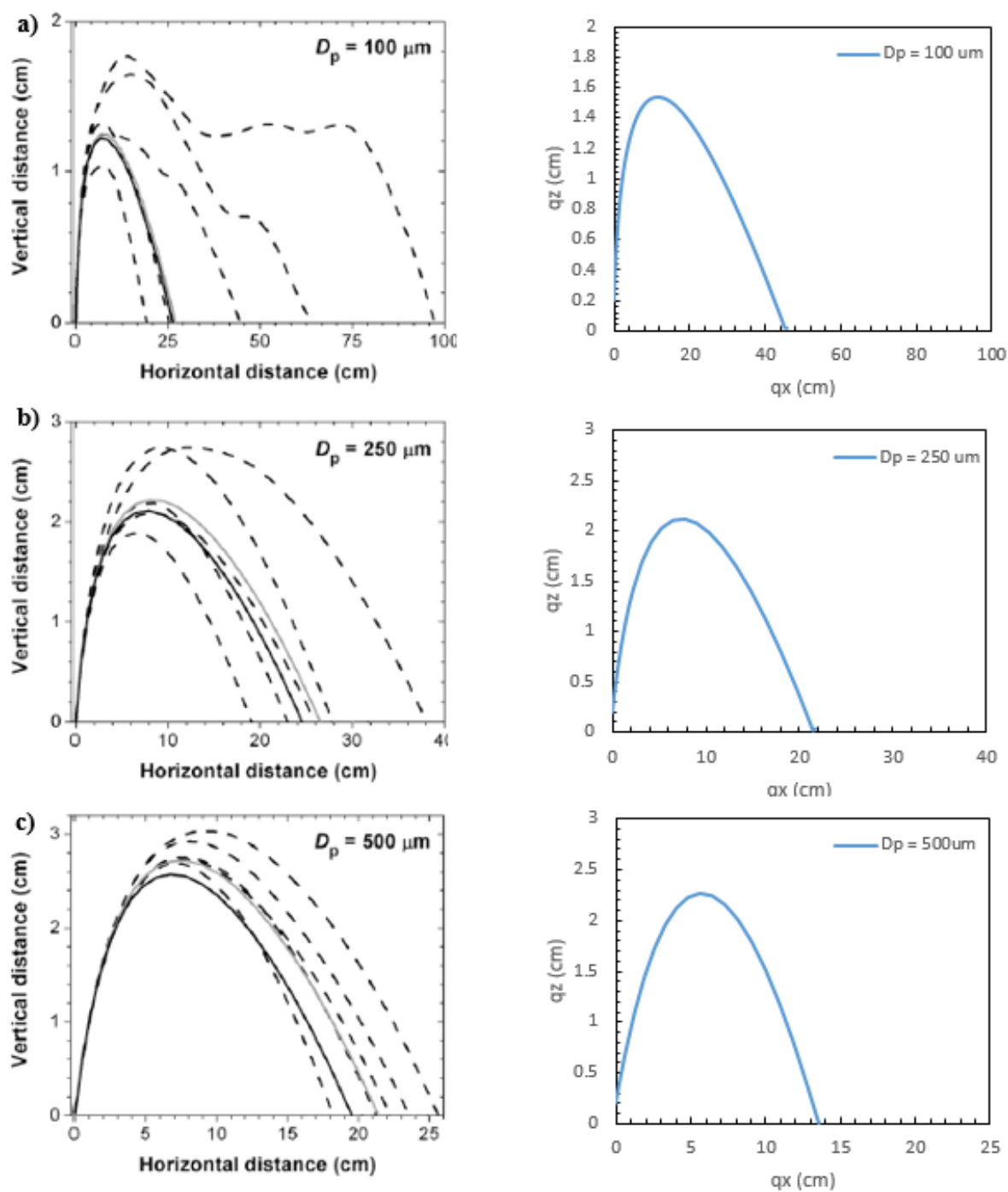


Figura 10. Trayectoria de partículas con diámetros de (a) $100 \mu\text{m}$, (b) $250 \mu\text{m}$ y (c) $500 \mu\text{m}$. Las figuras de la derecha representan los resultados obtenidos en esta investigación. Las figuras de la izquierda fueron reproducidas con el permiso del autor, Jasper Kok [4].

En el lado izquierdo de la Figura 10 representan los resultados obtenidas por medio del modelo COMSALT [4] y en el lado derecho las trayectorias con el modelo descrito en este trabajo. Para el modelo establecido por J. Kok y N. Renno [4] las líneas solidas denotan el movimiento despreciando las fuerzas de turbulencia del vientos y la rotación de partículas en su propio eje (fuerza Magnus); las líneas grises si incluyen la fuerza Magnus y las líneas punteadas son muestran cinco experimentos estocásticos que incluyen ambas fuerzas (Magnus y turbulencia del viento). Las trayectorias descritas en el modelo COMSALT se validaron con datos experimentales.

Las trayectorias obtenidas en el modelo descrito en este trabajo de investigación muestran un comportamiento semejante. Las partículas más pequeñas descritas en la Figura 10a tienden a viajar distancias mayores en el eje horizontal. Por otro lado las partículas de mayor tamaño ganan más momento vertical pero al tener una mayor masa son mayormente afectadas por la fuerza de gravedad por lo que tienden a caer más rápido.

Como ya se mencionó en la Sección 1.0 las partículas con mayor diámetro son las causantes que partículas menores entren en salto y en la Figura 8 se muestra como estas partículas generan la mayor cantidad de saltos a los largo de una superficie ya que al obtener una mayor cantidad de momento vertical generan una mayor energía potencial que generará que puedan realizar una mayor cantidad de saltos a lo largo de la superficie en comparación a partículas con menor masa. Además, se realizó un análisis de conservación de energías en diferentes puntos se puede determinar la cantidad de energía perdida en cada rebote. La ecuación para determinar la energía perdida esta dad en la ecuación 11.

$$E_{Ma} = E_{Mb} + W_{FNC} \quad (11)$$

Donde E_{Ma} y E_{Mb} es la energía mecánica en el punto a y b respectivamente, los puntos a y b son elegidos aleatoriamente entre cada rebote que realiza la partícula, y W_{FNC} es el trabajo de las fuerzas no conservativas que en este caso será la energía perdida por fricción en cada contacto de la partícula con la superficie. La energía mecánica está representada por la suma entre la energía cinética (E_k) y potencial (E_p) en cada punto respectivamente.

$$E_k = \frac{1}{2} m_p v^2 \quad (12)$$

$$E_p = m_p gh \quad (13)$$

Donde v es la velocidad de la partícula y h la altura en la que se encuentra la partícula en un estado determinado.

Se realizó un estudio de conservación de energía tomando en cuenta el antes y después de cada salto para la partícula 19, representada en la Figura 9, ya que es la que más energía potencial tiene y da la mayor cantidad de saltos a lo largo de la superficie. En cada salto realizado por la partícula hay una pérdida promedio del $15 \pm 5\%$ en cada salto.

4.0 Conclusiones

Se ha realizado un modelo dinámico en tres dimensiones que incluye las ecuaciones y los parámetros más relevantes para el estudio de salto de partículas por acción del viento debido a las fuerzas gravitacionales y de arrastre. El modelo desarrollado es general e incluye una porción de terreno muy pequeña con características casi ideales. Al ser un modelo generalizado con la posibilidad de realizar adaptaciones a problemas similares con condiciones físicas distintas; el modelo puede ser llevado a grandes escalas que incluyan una geografía, condiciones ambientales, caracterización del terreno y una distribución y características de partículas reales. Este tipo de estudios es importante ya que se puede predecir el impacto ambiental que se podría generar durante ciertas actividades. Por ejemplo en el Ecuador no se cuenta con información precisa del estado de la calidad del aire en término de material particulado en función de tamaño, y la gestión en este ámbito es de origen creciente [8]. Canteras y minas a cielo abierto han sido identificados como fuentes considerables de material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) según el estudio de del “Plan Nacional de la Calidad del Aire” [9].

Adicionalmente, existe falta de información precisa sobre la ubicación de actividades mineras, la operación y tipos de equipos utilizados. Esto hace que sea difícil determinar su impacto en las zonas aledañas y sobre todo en zonas pobladas. Los principales riesgos en la industria de la minería incluyen la exposición a partículas en el aire que va a depender de los parámetros de las minas y canteras (por ejemplo, profundidad), la composición del mineral y la roca circundante, y los métodos de explotación [10]. Se ha encontrado que los promedio anuales de $PM_{2.5}$ ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para el período 2005 hasta agosto del 2007 son prácticamente constantes en todas las estaciones y rebasan el límite máximo permisible de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire siendo además, el valor referencial recomendado por la OMS de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [11].

Para la realización de proyectos futuros en la simulación de salto de partículas se puede incluir efectos de topografía, análisis bajo diferentes velocidades y direcciones de viento y caracterización de la composición del suelo para describir un modelo de dispersión reales que puede ser aplicado en cualquier lugar geográfico y cualquier actividad que involucre una exposición de material particulado hacia la atmósfera.

5.0 Agradecimientos

Esta investigación fue financiada mediante el Chancellor Grant 2015 de la Universidad San Francisco de Quito-USFQ. Los autores agradecen además al Departamento de Ingeniería

Química y al Colegio de Ciencias e Ingenierías por apoyar las iniciativas que involucran simulaciones asistidas por computadora.

6.0 Referencias Bibliográficas

- [1] Fernández, A. (8 de Mayo de 2014). Nubes de polvo del Sahara: cómo nos afectan. Obtenido de Eroski Consumer:
http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/naturaleza/2014/05/08/219856.php
- [2] García, H. (Agosto de 1998). UPME. Obtenido de Guía Ambiental para Minería de Carbón a Cielo Abierto (MCCA):
http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/guias/min_cab/contenid/medidas2.htm
- [3] CCSSO. (18 de Abril de 2002). Efectos del polvo en los pulmones. Obtenido de Recurso nacional Canadiense de seguridad y salud ocupacional.
- [4] Kok, J. F., & Renno, N. O. (2009). A comprehensive numerical model of steady state saltation (COMSALT). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(17).
<http://doi.org/10.1029/2009JD011702>
- [5] P.J Richards, R.P Hoxey, Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-[epsilon] turbulence model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volumes 46-47, Proceedings of the 1st International on Computational Wind Engineering, August 1993, Pages 145-153, ISSN 0167-6105, DOI: 10.1016/0167-6105(93)90124-7.
- [6] Maxey, M. R. & Riley, J. J. 1983 Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow. *Phys. Fluids* 26 (4), 883–889.
- [7] Sail & Trip. (28 de Diciembre de 2014). ESCALA BEAUFORT. LA INTENSIDAD DEL VIENTO. Obtenido de <http://sailandtrip.com/escala-beaufort/>
- [8] GeoEcuador. (2008). Informe sobre el estado. Quito: GeoEcuador.
- [9] Ministerio del Ambiente. (2010). PLAN NACIONAL DE LA CALIDAD DEL AIRE. Quito: República del Ecuador.
- [10] Tarras-Wahlberg, H., Flachier, A., Frediksson, G., Lane, S., Lundberg, B., & Sangfords, O. (2000). *Environmental Impact of Small-scale and Artisanal Gold Mining in Southern Ecuador*. Suiza: Springer.

[11] CORPAIRE. (2005). Plan de Manejo de la Calidad del Aire del Distrito Metropolitano de Quito. Periodo 2005-2010. Cooperacion para el Mejoramiento del Aire de Quito y Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Quito: República del Ecuador.

