

Bases para el análisis de confiabilidad de flujos de material desagregado

Bases for reliability analysis of disrupted materials flows

MARIO GERMÁN TRUJILLO-VELA

*Estudiante Maestría en Hidrosistemas
Pontificia Universidad Javeriana
mario.trujillo@javeriana.edu.co
Bogotá, Colombia*

ALFONSO MARIANO RAMOS-CAÑÓN

*Doctor en Ingeniería
Instituto Geofísico
Pontificia Universidad Javeriana
a-ramos@javeriana.edu.co
Bogotá, Colombia*

Fecha de recibido: 22/11/2012

Fecha de aceptado: 03/02/2014

Forma de citar: TRUJILLO, Mario y RAMOS, Alfonso. Bases para el análisis de confiabilidad de flujos de material desagregado. Rev.UIS. Ingenierías, 2014, vol13, n.2, p. 29-38.

RESUMEN

Como una forma alternativa a los métodos convencionales para realizar análisis de estabilidad de taludes usando la teoría de equilibrio límite, este artículo hace uso de un procedimiento para simular flujos de material desagregado que parte desde la mecánica de medios continuos (perspectiva Euleriana), conservación de masa y momentum. Ésta metodología supone el comportamiento de una mezcla de fluido Newtoniano y sólido cuya interacción friccional es representada por la ley de resistencia de Coulomb. La ecuación de momentum es simplificada para un caso idealizado de forma tal que permite generar una solución analítica de la velocidad y el desplazamiento del centro de masa. Este tipo de aproximaciones permite tener en cuenta el modo de deformación que se observa en campo en los deslizamientos superficiales, a diferencia de los métodos convencionales basado en equilibrio límite (dovelas – talud infinito), donde la suposición es de movimiento de cuerpo rígido. La solución analítica entrega las bases para ser usada como insumo para estimar el nivel de exposición a través la forma como varía la probabilidad de ocurrencia de un nivel de velocidad del flujo de material desagregado en función de la distancia de la fuente del material.

PALABRAS CLAVE: estabilidad de taludes, flujos de material desagregado, análisis de confiabilidad.

ABSTRACT

As an alternative to conventional methods for slope stability analysis using limit equilibrium theory, this paper uses a method to simulate material flows disrupted arising from the continuum mechanics (Eulerian perspective), conservation mass and momentum, proposed by Iverson and Denlinger (2001a). This procedure involves the behavior of a mixture of solid and Newtonian fluid whose interaction is represented by frictional resistance law of Coulomb. The momentum equation is simplified for an idealized case in order to obtain an analytical solution to generate the velocity and displacement of the center of mass. This type of approach allows taking into account the mode of deformation observed in field, unlike conventional methods based on equilibrium limit (slices – infinite slope), where the assumption is rigid body motion. The analytical solution is used as the basis for estimate the exposure of infrastructure within the framework of analysis based on reliability. The results show how varies the conditional probability of occurrence of a velocity depending on the distance of the source material.

KEYWORDS: slope stability, disrupted material flows, reliability analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Aproximadamente el 42% de desastres causados por movimientos en masa en Japón entre los años 1989 y 2007 son atribuidos a los flujos de detritos (Shrestha et al., 2008). De igual forma, los flujos de detritos representan el 32% de 252 casos de movimientos en masa de la cuenca vertiente al embalse de Rules (Granada-España) (Perálvarez et al., 2008). En Colombia están registrados de forma generalizada todos los acontecimientos que comprende el concepto de movimientos en masa. Entre enero de 2011 y enero de 2012 se reportaron en total 1.463 eventos de movimientos en masa en todo el país, que dejaron 266 muertos, 200 heridos, 251 desaparecidos y 85.260 viviendas destruidas (IDEAM, 2012).

Dentro de la clasificación de los movimientos en masa se encuentran los flujos, los cuales pueden ser lentos o rápidos dependiendo del contenido de humedad, de los tipos de material transportados y la pendiente de la trayectoria del flujo. De igual forma dependiendo del tamaño del material transportado durante el flujo, se puede clasificar en flujos de roca, flujos de detritos, flujos de suelos y flujos de lodos (Suárez, 1998). De una forma general se denominarán como flujos de material desagregado (FMD) a los flujos de lodos, flujos de detritos y flujos de suelos cuya composición presenta dos fases (sólida y fluida).

Una de las maneras para afrontar la evaluación de procesos de remoción en masa es a través de la generación de mapas de zonificación. Las dos aproximaciones más comunes son a. Heurística y b. basadas en la física (equilibrio límite). Dentro de lo que se podría clasificar como el método heurístico, Bogotá ha usado el denominado Sistema de Evaluación Semicuantitativo (SES) que evalúa ocho parámetros cualitativos cuyos pesos son producto de la experticia de los modeladores (Vargas, R.A., 2000). Dentro de los métodos basados en la física, se encuentran aquellos que realizan suposiciones como que el material es rígido, isotrópico, homogéneo, los efectos de borde son despreciables y el modo de falla es rotacional o traslacional (Suarez, J., 1998). Estas suposiciones no son siempre válidas dado que un porcentaje importante de los procesos de remoción en masa se presentan con un modo de falla desagregado. Ambas metodologías generales (métodos heurísticos y equilibrio límite) solo permiten establecer si el talud es estable o no. Sin embargo, información tan importante como ¿a qué velocidad se desplaza el flujo? o ¿cuál será la distancia que recorrerá desde el inicio de flujo hasta la deposición? no pueden ser

abordadas desde ninguna de las anteriores. Por lo tanto, es necesario abordar el problema de flujos de material desagregado (FMD) desde una perspectiva alternativa a las convencionalmente utilizadas con el objeto que permita sobrellevar las dificultades antes mencionadas de los métodos convencionales de estabilidad de taludes.

Existen diferentes aproximaciones propuestas en la literatura basadas en la física mecánica para modelar los FMD (Denlinger y Iverson, 2001; Iverson y Denlinger, 2001; Iverson, 2005; Pudasaini et al., 2005; Rickenmann et al., 2006; Quan Luna et al., 2012; Wang et al., 2008). Las leyes de la física son representadas por las ecuaciones de conservación de masa y conservación de momentum. El esfuerzo del fluido es evaluado por la mayoría de estos métodos por la ecuación de Navier-Stokes suponiendo que el fluido es Newtoniano. El esfuerzo entre los sólidos se evalúa con la ley de fricción de Coulomb. Estos métodos llegan a una serie de ecuaciones que se deben solucionar numéricamente, sin embargo el procedimiento desarrollado por Iverson y Denlinger (2001) permite obtener soluciones analíticas para algunos casos bajo condiciones de contorno especiales. Éste método describe el comportamiento del FMD desde el inicio hasta la deposición, y requieren como parámetros de entrada las condiciones iniciales de velocidad y desplazamiento, topografía de la trayectoria, ángulo de fricción del lecho, viscosidad del fluido, densidad de mezcla y la fracción de presión de poros.

2. ECUACIÓN DE MOVIMIENTO

La ecuación de conservación de momentum integrada en la profundidad, en la dirección principal del movimiento para un FMD se describe por Iverson y Denlinger (2001) como en la ecuación 1.

Donde ρ es la densidad de mezcla, \bar{v}_x y \bar{v}_y es la velocidad promedio en el centro de masa del flujo en la dirección y respectivamente, la función *sgn* designa el signo (+ o -) contrario al argumento (\bar{v}_x o $\partial\bar{v}_x / \partial y$), es el espesor del flujo, r_x es el radio de curvatura en la dirección x , n_f es la fracción de volumen de fluido, μ es la viscosidad dinámica del componente fluido, g_z es la gravedad, P_{bed} es la presión de poros en el lecho, $k_{act/pas}$ es el coeficiente de empuje lateral activo y pasivo. φ_{bed} y φ_{int} son los ángulos de fricción interna de la interfase entre el material deslizado y el material subyacente y el del material deslizado, respectivamente. El momentum en la dirección se obtiene por el intercambio de la variable ($x \leftrightarrow y$), y de subíndice ($x \leftrightarrow y$).

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}_x\bar{v}_y)}{\partial y} \right] \\
& = -sgn(\bar{v}_x) \left[\rho g_z h - P_{bed} \left(1 + \frac{\bar{v}_x^2}{\bar{v}_x g_z} \right) \right] \tan \varphi_{bed} - 3n_f \mu \frac{\bar{v}_x}{h} \\
& - hk_{a/p} \frac{\partial}{\partial x} (\rho g_x h - P_{bed}) - h \frac{\partial P_{bed}}{\partial x} - n_f \mu h \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial x^2} \\
& - sgn\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y}\right) h k_{act/pas} \frac{\partial}{\partial y} (\rho g_x h - P_{bed}) \sin \varphi_{int} + n_f \mu h \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial y^2} \\
& + \rho g_x h
\end{aligned} \quad (1)$$

El término del lado izquierdo de la Ecuación 1 es el componente advectivo, los términos en el lado derecho se agrupan por línea según el tipo de esfuerzo. La primera línea representa el esfuerzo cortante basal, la segunda línea representa el esfuerzo normal a la dirección del flujo, las tercera línea representan el esfuerzo cortante lateral en la dirección del flujo, y la cuarta línea representa la fuerza gravitacional que impulsa la masa.

2.1 Solución analítica

Se puede obtener la solución analítica de la ecuación no lineal, hiperbólica (1) para algunos casos especiales. El balance de momentum en la dirección x es inmaterial. Si se tiene una masa de mezcla uniforme, espesor de flujo H y presión de poros constante, descendiendo por un plano inclinado, sin gradientes de velocidad en la dirección x y y , lo que indica que el esfuerzo debido a las fronteras laterales es insignificante en comparación con el esfuerzo en el lecho, la ecuación de momentum en la profundidad promedio en la dirección x se simplifica a:

$$\rho \frac{\partial(H\bar{v}_x)}{\partial t} = -(\rho g_z H - P_{bed}) \tan \varphi_{bed} - 3n_f \mu \frac{\bar{v}_x}{H} + \rho g_x H \quad (2)$$

Después de algunas manipulaciones algebraicas y la normalización de la Ecuación 2 (dividiendo entre g_z), se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{d\bar{v}_x}{dt} + \frac{n_f \mu}{\rho H^2} \bar{v}_x = g_z \theta \quad (3)$$

Donde θ es:

$$\theta = \tan \theta - (1 - \lambda) \tan \varphi_{bed} \quad (4)$$

En la Ecuación 4, θ es el ángulo del talud, φ_{bed} es el ángulo de fricción del lecho, λ es la fracción de presión de poros definida como $(P_{bed}/\rho g H)$. La Ecuación 4 representa la fuerza motriz gravitacional normalizada menos la resistencia debido a la fricción basal. La Ecuación 3 (diferencial de primer orden) se puede

solucionar de forma analítica, resultando la ecuación de velocidad instantánea del flujo (EVIF) de material desagregado:

$$\bar{v}_x = \frac{\rho g_z H^2}{3n_f \mu} \theta \left[1 - e^{(-t/\frac{\rho H^2}{3n_f \mu})} \right] + \bar{v}_0 e^{(-t/\frac{\rho H^2}{3n_f \mu})} \quad (5)$$

La Ecuación 5 describe la velocidad del centro de masa del cuerpo. Integrando la Ecuación (5) se obtiene la expresión del desplazamiento instantáneo del flujo (EDIF) de material desagregado (Ecuación 6).

$$\begin{aligned}
x = x_0 + \frac{\rho g_z H^2}{3n_f \mu} \theta \cdot t + \frac{\rho H^2}{3n_f \mu} \left[\bar{v}_0 - \frac{\rho g_z H^2}{3n_f \mu} \theta \right] \\
\cdot \left[1 - e^{(-t/\frac{\rho H^2}{3n_f \mu})} \right] \quad (6)
\end{aligned}$$

La EVIF (Ecuación 5) de material desagregado está en capacidad de tener cuenta otros aspectos que hacen parte del proceso como: la fuerza unitaria que impulsa al flujo [densidad de la mezcla (ρ) por la gravedad (g_z)], el espesor del flujo (H), la fracción de volumen de fluido (n_f) y viscosidad dinámica del componente fluido (μ). Además se presenta la ecuación del desplazamiento instantáneo del flujo (EDIF) (6) que resulta de la integración de la EVIF, la cual proporciona una estimación de la posición del flujo en cualquier instante de tiempo o cual sería la distancia que recorre el flujo desde el inicio hasta la deposición. El desarrollo de las soluciones (Ecuaciones 5 y 6) se encuentran detalladamente en Trujillo-Vela (2012).

3. RESULTADOS

3.1 Aplicación y comparación del modelo

La ecuación de velocidad instantánea del flujo (EVIF) (5) y la ecuación de desplazamiento instantáneo del flujo (EDIF) (6) son aplicadas en un talud que ha presentado flujos de material desagregado. Para el análisis de estabilidad del talud se supone una pendiente de la superficie de falla con la horizontal de aproximadamente $\sim 20^\circ$, una vez inicia el flujo la masa se trasladará por una pendiente de unos $\sim 45^\circ$, una distancia de ~ 23 m, y posteriormente cambia a un ángulo de $\sim 0^\circ$ (Figura 1a).

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los valores de los parámetros y condiciones iniciales utilizados para simular el comportamiento de un flujo de material desagregado en el talud de interés. Estos valores de las variables y parámetros de la Tabla 1 están dentro de rangos establecidos como típicos por algunos autores que fueron revisados (Iverson, 1997; Denlinger y

Iverson, 2001; Iverson, 2005). Es importante mencionar el hecho que es un caso hipotético cuyos valores de los parámetros fueron determinados de forma tal que fueran creíbles para un geomaterial convencional. Primero se realiza un análisis de estabilidad de taludes con el método de talud infinito con infiltración y sin tener en cuenta cargas dinámicas. El factor de seguridad obtenido con el método de talud infinito que tiene infiltración a través del suelo y el nivel del agua freática coincide con la superficie del terreno es expresado con la Ecuación 7 (Das, 2001).

$$FS = \frac{(\gamma_{sat} - \gamma_f) \tan \phi_{bed}}{\gamma_{sat} \tan \theta} \quad (7)$$

Sin embargo, la Ecuación 7 puede ser expresada en términos de fracción de presión de poros (Para más detalles ver Apéndice B, Trujillo-Vela, 2012), de modo que:

$$FS = \frac{(\rho g H - \lambda \rho g H) \tan \phi_{bed}}{\rho g H \tan \theta} \quad (8)$$

$$FS = \frac{(1 - \lambda) \tan \phi_{bed}}{\tan \theta} \quad (9)$$

La ecuación 9 representa el factor de seguridad de un talud con infiltración en términos de fracción de presión de poros. Para el ejercicio de aplicación el resultado es:

$$FS = \frac{(1 - 0,583) \tan 28^\circ}{\tan 20^\circ} = 0,61$$

Lo que indica que el talud es inestable y éste sería el único resultado que entregaría el análisis convencional de talud infinito basado en equilibrio límite. A todas luces, se observa que este resultado es insuficiente para determinar si una infraestructura se encontraría amenazada debido a la generación del deslizamiento. No se puede determinar si la masa llega a una distancia determinada de la fuente del deslizamiento.

El análisis del talud por medio del método implementado en este trabajo entrega los siguientes resultados. La Figura 1b muestra como la masa se empieza a desplazar desde el reposo en un tiempo $t = 0s$ con una aceleración constante de $1,4 m/s^2$ sobre la superficie de falla con $\theta = 20^\circ$. En el instante de tiempo igual a $1s$ (señalado por la línea punteada) cambia a la pendiente de 45° y recorre una distancia de unos $23m$ en un intervalo de tiempo igual a $2,25s$ con una aceleración de $7,63 m/s^2$. En el instante de tiempo igual a $3,25s$ la pendiente cambia a 0° y comienza a desacelerarse en forma constantemente ($-2,18 m/s^2$) hasta llegar nuevamente al reposo, después

Mario Germán Trujillo-Vela, Alfonso Mariano Ramos-Cañón

de haber recorrido en total $\sim 103s$ en un tiempo de $\sim 12s$ (Figura 1c). La distancia total recorrida es medida de forma tangente a la pendiente del terreno desde el centro de masa en la posición inicial, hasta el centro de masa en la posición final o depósito.

Tabla 1. Valores de las propiedades físicas del flujo de material desagregado

| Parámetro | Símbolo (unidades) | Valor |
|--------------------------------|------------------------|-------|
| Condiciones iniciales | | |
| Tiempo | $t(s)$ | 0 |
| Velocidad inicial | $\bar{v}_0 (m/s)$ | 0 |
| Posición inicial | $x_0 (m)$ | 0 |
| Ángulo de talud | $\theta(^{\circ})$ | 20 |
| Propiedades de la mezcla | | |
| Densidad de mezcla | $\rho (kg/m^3)$ | 1768 |
| Espesor del flujo | $H (m)$ | 1,5 |
| Ángulo de fricción del lecho | $\phi_{bed}(^{\circ})$ | 28 |
| Fracción de volumen de fluido | n_f | 0,4 |
| Fracción de volumen de sólidos | n_s | 0,6 |
| Fracción de presión de poros | λ | 0,583 |
| Propiedades del fluido | | |
| Densidad del fluido | $\rho_f (kg/m^3)$ | 1030 |
| Viscosidad dinámica del fluido | $\mu (pa/s)$ | 0,1 |
| Propiedades de los sólidos | | |
| Densidad de sólidos | $\rho_s (kg/m^3)$ | 2260 |
| Ángulo de fricción del lecho | $\phi (^{\circ})$ | 28 |

En el primer intervalo de tiempo (0-1s) la masa apenas inicia a desplazarse por la pendiente de 20° recorriendo unos $0,7m$. En el segundo intervalo de tiempo (1 - 2,25s) el flujo desciende por una pendiente de 45° una distancia aproximada a los $23m$ y al cambiar de pendiente a 0° , durante el tercer intervalo de tiempo (2,25-12s) la masa empieza a desacelerar hasta llegar al reposo, recorriendo unos $\sim 80m$. En total, la masa recorrería 103 metros hasta que se detiene (Figura 1c).

Se observa que la distancia de $80m$ puede ser muy alta para un espesor de flujo de $1,5m$. Dicho resultado se podría explicar por la suposición que las variables como la densidad de la mezcla, el espesor de flujo, la fracción de volumen de fluido, la fracción de presión de poros y el ángulo de fricción de lecho son constantes en el tiempo y en el espacio, dadas las condiciones para encontrar la solución analítica a la Ecuación 1. Esta suposición no se observa en la realidad, ya que durante el proceso puede haber pérdida del componente fluido, disminución del

espesor del flujo y ligeros cambios en la pendiente. Los procesos mencionados hacen que aumente los esfuerzos cortantes por los sólidos y consecuentemente disminuya la velocidad.

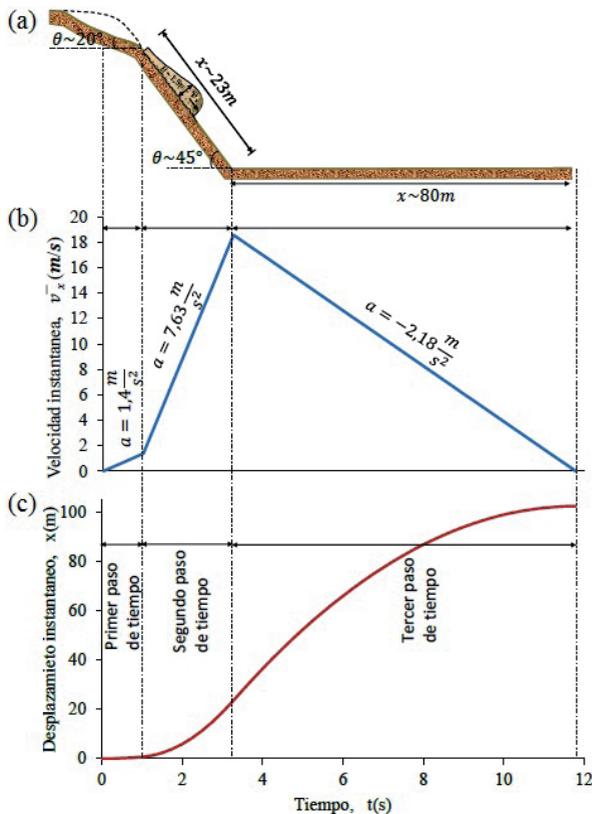


Figura 1. (a) Topografía de la trayectoria del flujo. (b) Velocidad del flujo de material desagregado en función del tiempo. (c) Desplazamiento del flujo de material desagregado en función del tiempo

Con esto se puede ver que mientras que el método de talud infinito solamente permite determinar si el talud es estable o inestable a través del factor de seguridad, la implementación de la metodología propuesta por Iverson y Denlinger (2001) permite no solamente calcular la estabilidad del talud, sino que en caso de ser inestable y producirse un flujo de material desagregado, se puede conocer la velocidad en cada instante de tiempo del centro de masa del flujo. También la ecuación de desplazamiento permite conocer la posición del centro de masa del flujo en un instante de tiempo determinado y la distancia que recorrerá la masa desde el inicio de flujo hasta la deposición.

3.2 Análisis de confiabilidad de flujos de material desagregado

Los resultados de los métodos convencionales para análisis de estabilidad de taludes basados en equilibrio límite se pueden utilizar como insumo para determinar la probabilidad de obtener un factor de seguridad menor a uno. Sin embargo, la ecuación de velocidad instantánea del flujo de material desagregado se puede utilizar como insumo, no solamente, para evaluar la probabilidad de ocurrencia de velocidad mayor que cero (análogo al factor de seguridad menor a uno), sino también para evaluar la probabilidad de ocurrencia de cierta magnitud de velocidad condicionada a una distancia. La Ecuación 6 permitirá obtener la probabilidad que el material deslizado tenga contacto con una infraestructura a una distancia dada. Por lo anterior, permitirá evaluar el nivel de exposición de la infraestructura.

El análisis de confiabilidad se desarrollará por medio del método denominado estimación puntual (Rosenblueth, 1975). Rosenblueth (1975) propone un método simple para obtener los momentos de la función de desempeño por medio de la evaluación de la función de desempeño en un juego de puntos discretos. La aproximación propuesta por Rosenblueth es una extensión del método de la cuadratura de Gauss para ubicar los puntos óptimos para evaluar una integral y los pesos correspondientes a los puntos en el método de elementos finitos. En este caso, los puntos óptimos para evaluar los momentos de la función de densidad de probabilidad para cada variable aleatoria es el valor promedio más o menos la desviación estándar. El método de Rosenblueth se utiliza en los casos que se necesita estimar los momentos estadísticos de una función de n variables aleatorias sin necesidad de conocer la función de densidad de probabilidad de las variables individuales (Sánchez-Silva, 2010). Existen diferentes variaciones del método original de Rosenblueth. El que se desarrolla en el presente trabajo tiene el siguiente procedimiento (Sánchez-Silva, 2010). La función objetivo se define de la siguiente manera,

$$y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (10)$$

Donde $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ son variables aleatorias de la función objetivo y . De cada variable X_i se conoce el valor medio μ_{X_i} y la desviación estándar σ_{X_i} . Posteriormente

se definen $2n + 1$ puntos de interés que serán las realizaciones de la función objetivo. El primer punto es la función evaluada en los valores medios de la función objetivo

$$y_0 = f(\mu x_1, \mu x_2, \mu x_3, \dots, \mu x_n) \quad (11)$$

Los $2n$ puntos restantes corresponden a la función objetivo evaluada de la siguiente manera

$$y_i^+ = f(\mu x_1, \mu x_2, \mu x_i + \sigma x_i, \dots, \mu x_n) \quad (12)$$

$$y_i^- = f(\mu x_1, \mu x_2, \mu x_i - \sigma x_i, \dots, \mu x_n) \quad (13)$$

En cada punto y_i , todas las variables j , donde $j \neq i$ son evaluadas en la media mientras que la variable X_i se evalúa en la media más una desviación estándar (punto y_i^+) y en la media menos una desviación estándar (punto y_i^-). Una vez calculadas las $2n + 1$ realizaciones de la función objetivo, se procede a calcular los estadísticos de primer orden y de segundo orden.

En este caso, las funciones objetivos son las obtenidas para la velocidad instantánea del flujo (Ecuación 5) y el desplazamiento de la masa (Ecuación 6). En la Tabla 2 se presentan las variables aleatorias del modelo con los respectivos coeficientes de variación. Los coeficientes de variación de las variables aleatorias mostradas en la Tabla 2 fueron extractados de las referencias Ang y Tang (2007) y Baecher y Christian (2003).

Tabla 2. Variables aleatorias del modelo con los respectivos coeficientes de variación

| Parámetro | Unidad | Valor medio | Coef. de variación |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------|--------------------|
| Densidad de sólidos | ρ_s (Kg/m ³) | 2260 | 0,1 |
| Ángulo de fricción del lecho | φ_{bed} (°) | [15°-40°] | 0,25 |
| Densidad del fluido | ρ_f (Kg/m ³) | 1030 | 0,1 |
| Espesor del flujo | H (m) | 1,5 | 0,3 |
| Fracción de volumen de fluido | n_f | 0,4 | 0,1 |
| Viscosidad dinámica del fluido | μ (Pa/s) | 0,1 | 0,7 |
| Ángulo de talud | θ (°) | [0°-45°] | 0,1 |
| Fracción de presión de poros | λ | [0-1] | 0,4 |

Para realizar un análisis de riesgo por un flujo de material desagregado es necesario hacer la evaluación

de la amenaza y la vulnerabilidad. La amenaza se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento adverso en un espacio y un tiempo determinado. La vulnerabilidad de un elemento dado se puede entender que es directamente proporcional a la exposición al evento amenazante e inversamente proporcional a la resistencia. En este trabajo se hace énfasis en dos aspectos. 1. Evaluación de la amenaza (Probabilidad de generación de flujo de material desagregado) y 2. Aportes para calcular la vulnerabilidad por medio de la evaluación del nivel de exposición cuantificando la probabilidad de tener velocidad mayor que cero dada una distancia. Si la velocidad es mayor que cero, quiere decir que el elemento (infraestructura) está expuesto.

Para análisis de amenaza probabilística, es necesario conocer la probabilidad de ocurrencia del flujo de material desagregado. Por lo que se evaluará la probabilidad que la velocidad sea mayor a cero condicionado a $x = 0$; $t = 0$. Esto con el fin de poder comparar con la probabilidad que el factor de seguridad sea menor que 1, ya que esta comparación no sería posible utilizando otros valores iniciales en la ecuación de velocidad.

$$[P(\bar{v}_x > 0 / (x = 0; t = 0))] \quad (14)$$

El procedimiento para calcular $P(\bar{v}_x > 0)$ es la explicada en las Ecuaciones 10-13, que es la explicación del procedimiento de estimación puntual. La función de distribución de probabilidad que se seleccionó para determinar la $P(\bar{v}_x > 0)$ con base en el primer y segundo momento estadístico obtenido de estimación puntual fue del tipo Gaussiana. Un aspecto interesante a desarrollar en futuros trabajos es la determinación de la función de distribución de probabilidad de tipo empírica.

En la Figura 2 se presenta los resultados de la probabilidad de tener velocidades mayores a cero variando los valores medios de las tres variables del modelo de flujo de material desagregado que tienen mayor influencia en el modelo θ , φ_{bed} , λ (Trujillo-Vela y Ramos, 2012). Se mantuvo constante la dispersión y los valores medios para el resto de variables aleatorias de acuerdo a la Tabla 2.

Se observa en la Figura 2 que uno de los aspectos que tiene mayor peso en la probabilidad de ocurrencia de velocidades mayores a cero es el ángulo del talud sobre el ángulo de fricción. Para las mismas condiciones, se observa que la fracción de presión de poros λ es relevante. Cuando $\lambda = 1$, la probabilidad de obtener velocidades mayores a cero para ángulos de fricción

menores a 25 grados y ángulos de talud mayor a 10 grados es aproximadamente igual a uno.

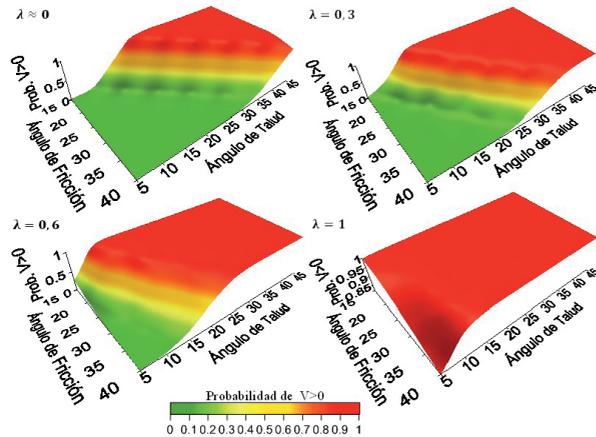


Figura 2. Probabilidad de obtener velocidades mayores que cero en función del ángulo del talud (θ), ángulo de fricción (φ_{bed}) y fracción de la presión de poros (λ)

Por otro lado, se calcula la probabilidad de falla con base en la ecuación de factor de seguridad de un talud infinito por el método de estimación puntual tomando como base la Ecuación 9 y la incertidumbre están dadas por los datos consignados en la Tabla 2. Es decir, se busca la probabilidad que el factor de seguridad sea menor que 1 para que el talud falle.

$$[P(FS < 1)] \tag{15}$$

Es importante mencionar que las condiciones que se necesitan para que se produzca la falla usando el umbral de velocidad mayor que cero (Ecuación 14) y factor de seguridad menor que uno (Ecuación 15) son iguales en términos del ángulo de fricción, inclinación del talud y relación de presión de poros para el caso específico de tiempo igual a cero. Sin embargo, las probabilidades de falla son diferentes debido a que las dos aproximaciones utilizadas para determinar la estabilidad del talud son distintas (velocidad mayor que cero $[P(\bar{v}_x > 0)/(x = 0; t = 0)]$ o factor de seguridad menor que uno $P(FS < 1)$), estas dos aproximaciones producen la mismas probabilidades de falla siempre y cuando se trate del momento inicial en que la masa está estática para un $x=0, t=0$ (Figura 3b).

Se observa en la Figura 3a que para probabilidades de falla menores que 0.5 la formulación más crítica es la obtenida con factor de seguridad, en tanto que para probabilidades de falla mayores a 0.5, la formulación crítica es la de tener velocidades mayores a cero, a pesar que la formulación de factor de seguridad igual a uno colapsa en la formulación de conservación de masa y

momentum propuesta por Iverson y Denlinger (2001) en condiciones estáticas.

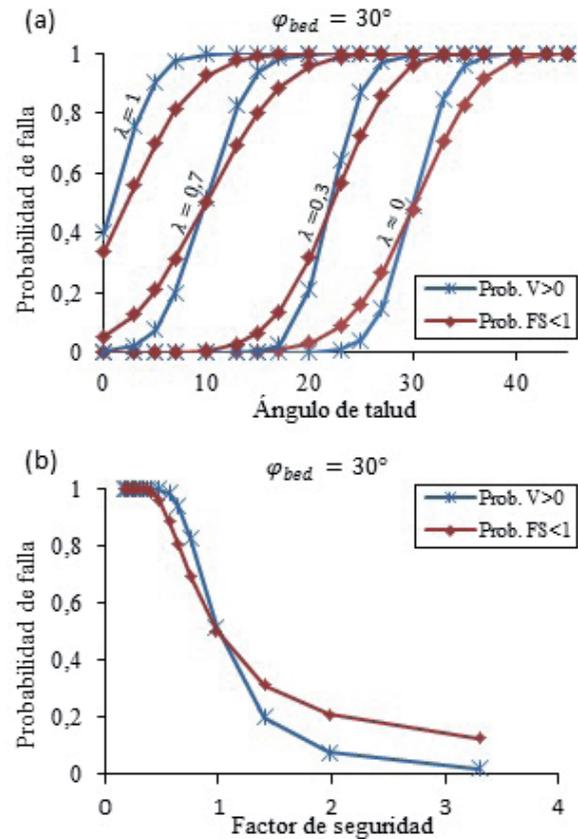


Figura 3. Probabilidad de falla en términos de $[P(\bar{v}_x > 0)/(x = 0; t = 0)]$ y de $[P(FS < 1)]$ (a) Para diferentes relaciones de presiones de poros (λ) en función del ángulo de inclinación del talud. (b) en función del factor de seguridad

La Figura 3b muestra que para un mismo valor de probabilidad de falla, equivale a dos factores de seguridad que pueden ser muy distintos si se evalúan con las ecuaciones 8 y 9. Dicha diferencia se acentúa especialmente para valores bajos de probabilidad de falla. Este rango de probabilidades de falla es el que se considera para fines de diseño basado en confiabilidad. Por lo anterior, la consideración de la incertidumbre epistémica de los dos modelos entra a jugar un papel predominante en la toma de decisiones. Como se mencionó, a pesar que ambos modelos colapsan en formulación comparable en el momento en que se presenta la falla en términos de ángulos de fricción, los dos modelos entregan probabilidades de falla distinta si se tiene en cuenta la incertidumbre aleatoria. Para tomar una decisión por cual de los dos resultados se adopta para propósitos de diseño, se debe evaluar a cual de los dos se le asigna, al menos cualitativamente, menos incertidumbre epistémica.

Los altos valores de la probabilidad de falla $P(\bar{v}_x > 0; FS < 1)$ para un ángulo de inclinación 0° , se debe a la función de distribución de probabilidad asumida (de tipo normal). Este aspecto puede ser abordado usando cualquier función de distribución de probabilidad que esté definida únicamente para valores positivos de la variable aleatoria. Sin embargo, el procedimiento propuesto tiene la misma validez para el análisis de confiabilidad.

Los autores del presente estudio consideran que el modelo de talud infinito no refleja el modo de deformación en campo de un flujo de material desagregado, indicando mayor incertidumbre epistémica y por lo que se asignará mayor incertidumbre a la evaluación de la probabilidad de $FS < 1$. Si se supone que la incertidumbre aleatoria y epistémica son independientes entre sí, la incertidumbre conjunta es mayor que la incertidumbre de cada componente. Por lo que necesariamente la probabilidad de falla con FS de la Figura 3b será mayor para factores de seguridad grandes. Se espera que la incertidumbre epistémica de la curva de probabilidad de falla con $V > 0$ sea menor que la correspondiente a la de probabilidad de $FS < 1$ dado que el modelo de deformación es más acercado a la realidad. Como resultado neto, si se adiciona la incertidumbre epistémica a la evaluación de la probabilidad de falla, se tendrán menores valores con la evaluación de velocidad mayor que cero para factores de seguridad altos. Las probabilidades bajas son las que se asocian a índices de confiabilidad altos y son los indicadores que establecen las exigencias del diseño basado en confiabilidad.

De la propuesta anterior, se tiene la probabilidad de ocurrencia del flujo de material desagregado (amenaza), sin embargo, este aspecto no es suficiente para tomar decisiones ya que es necesario establecer si el flujo es capaz de generar afectación en la infraestructura. Se puede generar un evento de deslizamiento de grandes dimensiones con gran potencial de destrucción, pero si éste no afecta a ningún elemento, el riesgo es nulo. Por lo anterior, y como insumo adicional a la evaluación de riesgo, se propone obtener una parte de la evaluación de la vulnerabilidad a través del grado de exposición del elemento por medio de la evaluación de la probabilidad que llegue la masa con una velocidad determinada a una distancia dada que afecte la infraestructura.

En la Figura 4 se presenta el perfil de velocidad del flujo de material desagregado para las condiciones mostradas en la Figura 1a. Adicionalmente se calcula la incertidumbre de la velocidad representada en la desviación estándar con el método de estimación

Mario Germán Trujillo-Vela, Alfonso Mariano Ramos-Cañón

puntual. Para la evaluación de la incertidumbre reflejada en la desviación estándar de la velocidad, se supone que todas las variables aleatorias incluidas en el análisis presentan independencia estadística. Se observa que a medida que el material se aleja de la fuente, la incertidumbre del valor medio de la velocidad aumenta.

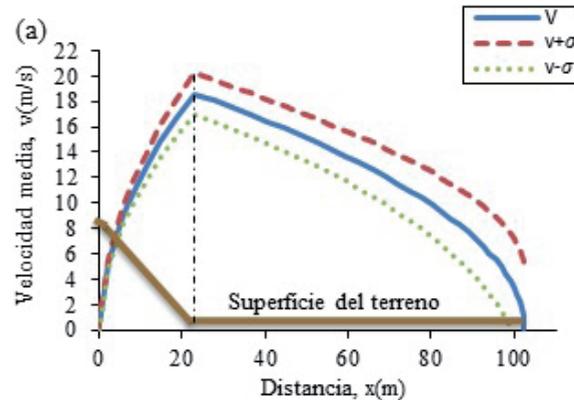


Figura 4. Perfil de velocidad del flujo en función de la distancia. Se incluye la incertidumbre aleatoria reflejada en la desviación estándar

Las Figura 4 presenta los insumos necesarios para determinar la probabilidad de ocurrencia de la velocidad dada condicionada a una distancia y a un tiempo, o lo que es lo mismo representa la amenaza debido a un flujo de material desagregado para un tipo de infraestructura que se encuentra ubicada a diferentes distancias de la fuente del material. Este aspecto se relaciona directamente con la exposición. A manera de ejemplo, si la infraestructura está a una distancia mayor a 100 metros la probabilidad que el flujo de material desagregado impacte va a ser menor a 0.5 (indicado por el signo más + en la Figura 2), dado que la media se encuentra en cero. Esto aun cuando la probabilidad de falla en términos de velocidad mayor que cero en la fuente de material es aproximadamente uno (indicado por el asterisco * en la Figura 2).

4. CONCLUSIONES

Se presenta la implementación de un método para describir el comportamiento de flujo de material desagregado. A diferencia de los métodos basados en equilibrio límite, el modelo de Iverson and Denlinger (2001) está en capacidad no solamente de reproducir los resultados del talud infinito en el punto de equilibrio límite, sino que también muestra las características del desplazamiento de la masa como la velocidad y la posición en cada instante de tiempo.

La ecuación de velocidad instantánea del flujo de material desagregado se puede utilizar como insumo, no solamente, para evaluar la amenaza, sino también para evaluar la probabilidad de ocurrencia de cierta magnitud de velocidad condicionada a una distancia.

Uno de los aspectos que tiene mayor peso en la probabilidad de ocurrencia de velocidades mayores a cero es el ángulo del talud sobre el ángulo de fricción. Para las mismas condiciones, se observa que la fracción de presión de poros es relevante.

Para un mismo valor de probabilidad de falla, se presentan dos factores de seguridad que pueden ser muy distintos. Dicha diferencia se acentúa especialmente para valores bajos de probabilidad de falla. La diferencia entre los dos resultados surge de la incertidumbre epistémica de los modelos considerados y entra a jugar un papel predominante en la toma de decisiones.

5. REFERENCIAS

- ABKOWITZ, F. EIGER, A. SCHMIDT, B. T., JOHNSON, P. (1988). "Geotechnical Engineering". *Geotechnical Science* 17(1): 450-465.
- ANG, A. H.-S., TANG, W. H., 2007. *Probability concepts in engineering: emphasis on applications in civil & environmental engineering*. segunda ed. New York: Wiley.
- BAECHER, G. B., CHRISTIAN, J., 2003. *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. segunda ed. New York: J. Wiley
- DAS, B. M., 2001. *Fundamentos de Ingeniería y Geotécnica*. México D.F.: Thomson Editores S.A.
- DENLINGER, R.P. IVERSON, R.M., 2001. Flow of Variably Fluidized Granular Masses Across Three-Dimensional Terrain 2. Numerical Predictions and Experimental Test. *Reviews of Geophysics*, 106, pp.553-66.
- IDEAM, 2012. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales. [Online] Available at: <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Publicaciones&lTipo=publicaciones&lFuncion=loadContenidoPublicacion&id=895> [Accessed 7 Marzo 2012].
- IVERSON, R. M., 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, August, 35(3), pp. 245-296.
- IVERSON, R.M., 2005. Debris-flow mechanics. In Jakob, M. y Hungr, O. *Debris-flow hazards and related phenomena*. Berlin, Heidelberg, Alemania: Springer Berlin Heidelberg. Ch. 6. pp.105-34.
- IVERSON, R.M. y Denlinger, R.P., 2001. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research*, 106(B1), pp.537-52.
- PERÁLVAREZ, J. et al. 2008. Análisis de susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de Rules, Granada. In Conferencia ESRI España 2008. Madrid, 2008.
- PUDASAINI, S; WANG, Y; Hutter, K. 2005. Modelling Debris Flows Down General Channels. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, pp.799-819.
- QUAN L. et al., 2012. Analysis of Debris Flows Behavior with a one Dimensional run-out Model Incorporating Entrainment. *Engineering Geology*, 128, pp.63-75.
- RICKENMANN,D; LAIGLE, D.M.B.W. y Hübl, J., 2006. Comparison of 2D Debris-Flow Simulation Models with Field Events. *Computational Geosciences*, 10(2), pp.241-64.
- ROSENBLUETH, E., 1975. Points estimates for probability moments. *Proceedings, National Academy of Science*, 23(3), pp.470-72.
- SÁNCHEZ, M., 2010. *Introducción a la confiabilidad y evaluación de riesgos: teoría y aplicaciones en ingeniería*. segunda ed. Bogotá D.C.: Ediciones Uniandes.
- SHRESTHA, B.B. et al. 2008. Numerical simulation on debris-flow deposition and erosion processes upstream of a check dam with experimental verification. *Annual of Disas. Prev. Res. Inst.*, (51 B), pp.613-23.
- SUAREZ, J; 1998. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga, Santander, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- TRUJILLO, M.G., 2012. *Modelación matemática para flujos de material desagregado*. Trabajo de titulación (Ingeniero Agrícola). Neiva, Colombia: Universidad Surcolombiana y Pontificia Universidad Javeriana.

TRUJILLO, M; RAMOS, A.M. 2012. Modelo para simulación de flujos de material desagregado. comparación con el método de talud infinito. Enviado a la revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina. En evaluación.

VARGAS, R. 2000. Seminario estudios de riesgos por fenómenos de remoción en masa. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia: Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Santa Fe De Bogotá.

WAN, C; LIS, S; ESAKI, T. 2008. GIS-Based Two-Dimensional Numerical Simulation of Rainfall-Induced

Mario Germán Trujillo-Vela, Alfonso Mariano Ramos-Cañón

Debris Flow. Natural Hazards and Earth System Sciences, 8, pp.47-58.

6. AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo de la Maestría en Hidrosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana por medio de la asistencia de investigación. El segundo autor reconoce el apoyo económico de la Pontificia Universidad Javeriana con el proyecto de investigación “Estudio numérico y experimental de la inestabilidad difusa en materiales granulares” propuesta No 00004705.