

MODELO PARA SIMULACIÓN DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA DESAGREGADOS. COMPARACIÓN CON EL MÉTODO DE TALUD INFINITO

A MODEL FOR A DISRUPTED MASS MOVEMENT PROCESS SIMULATION. A COMPARISON
AGAINST THE INFINITE SLOPE METHOD

Mario Germán Trujillo Vela

Ing. Agrícola Universidad Surcolombiana. Estudiante Maestría en Hidrosistemas
Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia
mario12t@hotmail.com

Alfonso Mariano Ramos Cañón

Ing. Civil, Dr. Ing. Instituto Geofísico. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia
a-ramos@javeriana.edu.co

Fecha de recepción: 8 de junio de 2012

Fecha de aprobación: 30 de noviembre de 2012

RESUMEN

Como una forma alternativa a los métodos convencionales para analizar la estabilidad de taludes, este artículo implementa un procedimiento para modelar los flujos de material desagregado que parten de la mecánica de medios continuos (perspectiva Euleriana), propuesta por Iverson y Delinger [1]. Esta metodología supone el comportamiento de una mezcla de fluido newtoniano y sólido cuya interacción friccional se representa por la ley de fricción de Coulomb. La ecuación de momentum es simplificada de tal forma que permite generar una solución analítica, a la cual se le hizo un análisis de sensibilidad. Los resultados del análisis de sensibilidad muestran que los parámetros que más influyen en el modelo son: el ángulo de talud, el ángulo de fricción del lecho y la fracción de presión de poros, que a su vez, determinan la estabilidad del talud. Como ventaja adicional a los métodos usuales de estabilidad de taludes basados en equilibrio límite, el método implementado además de tener en cuenta el modo de deformación en campo, entrega el factor de seguridad, y lo más importante, calcula la velocidad de la masa deslizada y la distancia que recorre. Los resultados se pueden utilizar como insumo parcial para evaluar tanto la amenaza probabilística como la vulnerabilidad de infraestructura afectada por flujo de material desagregado.

Palabras clave: flujos de material desagregado, estabilidad de taludes, método talud infinito.

ABSTRACT

As an option against typical methods for slope stability analysis, this paper implements a procedure to model material flows from continuum mechanics (Eulerian approach), proposed by Iverson and Denlinger [1]. This methodology involves the behavior of a Newtonian fluid-and-solid mixture whose friction interaction is denoted by the Coulomb law. The momentum equation is simplified in such a way that generates an analytic solution, which was used to perform a sensitivity analysis. The sensitivity analysis shows the most relevant parameters in the model, i.e. slope angle, bedrock friction angle and pore pressure fraction, which govern the slope stability. As a further advantage compared against typical methods of slope stability based on limit equilibrium, the method implemented takes into account not only the field deformation mode but the safety factor, and most importantly, calculates the speed of the sliding mass and distance covered. The results may be used as a partial input to assess both hazard and vulnerability probabilistic of infrastructure impacted by a disrupted material flow.

Keywords: disrupted material flows, slope stability, infinite slope method.

INTRODUCCIÓN

Dentro de la clasificación de los movimientos en masa, se encuentran los flujos que pueden ser lentos o rápidos, dependiendo del contenido de humedad, de los tipos de material transportados y la pendiente de su trayectoria. De igual forma, según el tamaño del material transportado, se pueden clasificar en flujos de roca, flujos de detritos, flujos de suelos y flujos de lodos [2]. De una forma general, se denominarán flujos de material desagregado (FMD), los flujos de lodos, flujos de detritos y flujos de suelos que están compuestos por dos fases (sólida y fluida).

Cerca del 42% de desastres causados por movimientos en masa en Japón entre los años 1989 y 2007, han sido atribuidos a los flujos de detritos [3]. 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) [4]. En Colombia, están registrados de forma general todos los acontecimientos que comprenden 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 [5].

Una de las maneras para afrontar la evaluación de procesos de remoción en masa, es generar 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 [6]. 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 [2]. Estas suposiciones no siempre son 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), sólo permiten establecer si el talud es o no estable. Sin embargo, información tan importante como ¿a qué velocidad se desplaza el flujo? o ¿cual será la distancia que recorrerá desde el inicio del flujo hasta la deposición? No pueden ser estudiadas desde alguna de las anteriores. Por lo tanto, es necesario tratar el problema de flujos de material desagregado (FMD), desde una perspectiva alternativa (mecánica de medios continuos), a las convencionalmente utilizadas, con el objeto de poder sobrellevar las dificultades mencionadas de los métodos convencionales de estabilidad de taludes.

Existen diferentes aproximaciones propuestas en la literatura, basadas en la física mecánica y en reglas matemáticas para modelar los FMD [1, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. 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 [1], permite obtener soluciones analíticas para algunos casos bajo condiciones de contorno especiales. Este método describe el comportamiento del FMD desde el inicio hasta la deposición, y requiere 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.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1. ECUACIÓN DE MOVIMIENTO

La ecuación de conservación de momentum integrada en la profundidad, en la dirección principal del movimiento x para un FMD, la describe Iverson y Denlinger [1], como:

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

Donde ρ es la densidad promedio ponderada de la mezcla del fluido y sólidos ($\rho = \rho_f n_f + \rho_s n_s$), \bar{v}_x y \bar{v}_y es la velocidad promedio ponderada del fluido y sólidos [$v = (\rho_f n_f v_f + \rho_s n_s v_s)/\rho$] en el centro de masa del flujo en la dirección x y y respectivamente, la función sgn designa el signo (+ o -), contrario al argumento (\bar{v}_x o $\partial \bar{v}_x / \partial y$), h 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 y , se obtiene por el intercambio de la variable ($x \leftrightarrow y$), y de subíndice ($x \leftrightarrow y$).

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, la tercera línea representa el esfuerzo cortante lateral en la dirección del flujo, y la cuarta línea representa la fuerza gravitacional que impulsa la masa.

1.2. SOLUCIONES ANALÍTICAS

Se puede obtener la solución analítica de la ecuación no lineal, hiperbólica (1) para algunos casos especiales. El balance de momentum en la dirección y 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 cual indica que el esfuerzo debido a las fronteras laterales es insignificante en comparación con el esfuerzo en el lecho, y 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:

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

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:

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

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).

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

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El objetivo del análisis de sensibilidad es identificar los parámetros de entrada que más contribuyen a la variabilidad en la velocidad del flujo. Para evaluar el comportamiento del modelo analítico, se supone como condición inicial velocidad, distancia y tiempo igual a cero. Los demás parámetros considerados se suponen constantes en el tiempo y en el espacio, lo cual describe una masa estática de volumen y geometría específica que está a punto de descender en una pendiente de inclinación constante.

$$\bar{v}_x(x, y, 0) = 0 \quad x = (x, y, 0) = 0 \quad t = 0 \quad (7)$$

La Figura 1 presenta el análisis de sensibilidad del modelo analítico de la Ecuación 5. Dicho análisis se realizó para asignar el impacto del cambio de los parámetros de entrada sobre la velocidad de la masa con lo cual se obtienen los parámetros con poca influencia en la respuesta. Conociendo lo anterior, se puede especificar los parámetros que se determinan con mayor cuidado, ya que la incertidumbre en los valores redundará en cambios significativos en la respuesta. Para el análisis de sensibilidad, los parámetros se mantuvieron constantes (Tabla 1), excepto el parámetro elegido para la sensibilidad [12]. Los resultados se ven en la Figura 1.

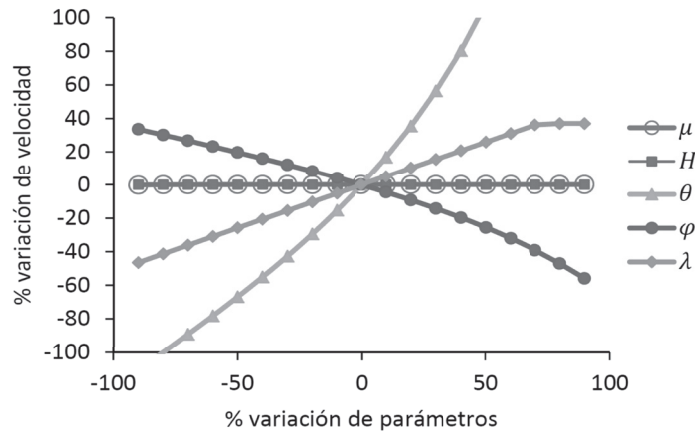


Figura 1. Variación del porcentaje de la velocidad respecto del porcentaje de cambio de los parámetros más influyentes en la EVIF para un tiempo de 1,5s

La sensibilidad se cuantificó como el porcentaje del cambio en la salida en función de la variación de los parámetros de entrada (ejemplo: porcentaje de cambio de la fracción de presión de poros). Se encontró que los parámetros que más influyen en la velocidad, son el ángulo de talud, el ángulo de fricción del lecho y la fracción de presión de poros, mientras que el espesor del material deslizado y la viscosidad no tienen mayor influencia en la respuesta de la velocidad. De lo anterior se deduce que es posible hacer una estimación gruesa de estas dos variables y la respuesta no se verá muy afectada.

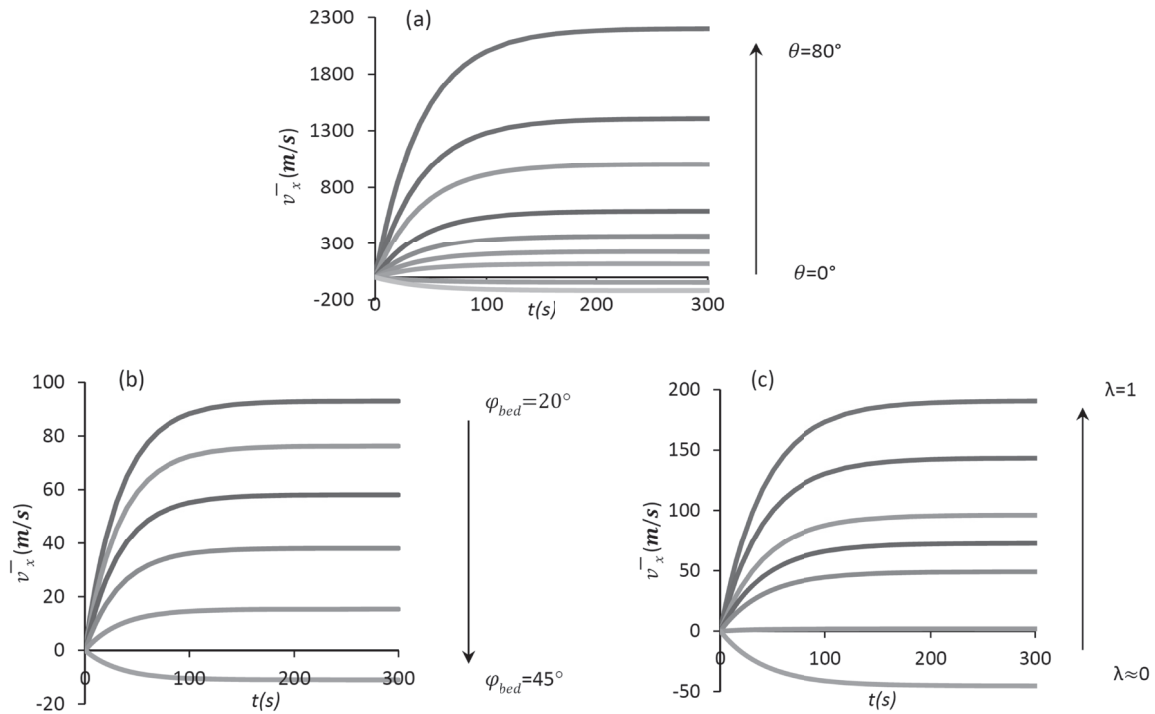


Figura 2. (a) Comportamiento de la EVIF para diferentes valores de ángulo de talud (θ), (b) para diferentes valores de ángulo de fricción del lecho y (c) para diferentes valores de fracción de presión de poros, con valores de parámetros:

$$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3, \quad g_z = 9,81 \text{ m/s}^2, \quad H = 1 \text{ m}, \quad \mu = 40 \text{ Pa} \cdot \text{s}, \quad n_f = 0,4$$

Los parámetros que tienen mayor influencia en la respuesta de velocidad, se seleccionaron para observar su variación en el tiempo. Se encontró que para ciertos valores de ϕ_{bed} , λ , θ se obtienen resultados de velocidad negativos (Figura 2). Velocidad negativa significa que el talud es estable, dado que las fuerzas que generan el movimiento son menores a las que resisten. El paso de velocidad positiva a velocidad negativa ($\bar{v}_x = 0$), puede semejar al momento cuando el factor de seguridad es igual a 1 en los métodos clásicos de estabilidad de taludes (equilibrio límite).

La Figura 2a muestra que a medida que la inclinación del talud disminuye, la velocidad del flujo pasa de tener valores positivos (inestabilidad), a velocidades negativas (talud estable). La Figura 2b muestra que a menor ángulo de fricción del lecho, mayor velocidad. La Figura 2c muestra que a mayor fracción de presión de poros, mayor velocidad. En las Figuras 2a, b, y c se observa que la variación de cada parámetro puede llevar al talud de comportarse estable a tener un comportamiento inestable cuando la velocidad es mayor que cero.

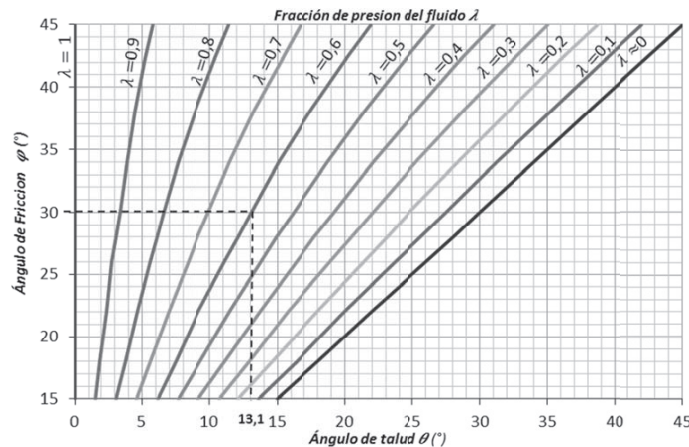


Figura 3. Isolíneas de factor de seguridad igual a 1 para el método de talud infinito obtenida mediante la implementación del método de Iverson y Denlinger [1]

En la Figura 3, se presenta la convolución de los tres parámetros más importantes en la variación de la velocidad del flujo de material desagregado (φ_{bed} , λ , θ). En esta Figura, se presenta el juego de valores φ_{bed} , λ , θ que hacen que la masa tenga velocidad cero. Si se ingresa en la Figura 3 con un ángulo de fricción y se interseca con una línea de fracción de presión de poros, se puede determinar cuáles son los ángulos de inclinación de talud θ en donde se presenta movimiento. Por ejemplo: si se tiene un ángulo de fricción de 30° y una fracción de presión de poros de 0,6; los ángulos del talud en donde existe flujo de material desagregado, son aquellos que cumplen $\theta \geq 13,1^{\circ}$. Cuando el ángulo de inclinación del talud sea $< 13,1^{\circ}$, el talud es estable. Cada una de las rectas mostradas en la Figura 3, está asociada con el momento cuando el análisis de talud infinito con presión de poros basado en equilibrio límite, presenta factor de seguridad igual a 1. Esto quiere decir que el método implementado en este trabajo, además de entregar los mismos resultados que el método convencional de equilibrio límite, puede obtener información adicional de la física del problema, tal como la velocidad y el desplazamiento del flujo de material desagregado.

Así, la EVIF (Ecuación 5), de material desagregado, permite no solamente determinar la estabilidad del talud, sino también, en el caso de que el talud sea inestable (velocidad positiva), la EVIF 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 cuál sería la distancia que recorre el flujo desde el inicio hasta la deposición.

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. Este talud se encuentra ubicado en la avenida circunvalar con calle 42 en la localidad de Chapinero de la ciudad de Bogotá. Para el análisis de estabilidad del talud, se supone una pendiente de la superficie de falla con la horizontal de $\sim 20^\circ$; una vez inicia el flujo, la masa se trasladará por una pendiente de unos ~ 45 , una distancia de $\sim 23^\circ$ m, y luego cambia a un ángulo de $\sim 0^\circ$ (Figura 4a).

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

Parámetro	Símbolo (unidades)	Valor	Valores típicos
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	~ 2000 [7][9][13]
Espesor del flujo	$H(m)$	1,5	0,01-10 [9]
Ángulo de fricción del lecho	$\varphi_{bed} (^{\circ})$	28	28-42 [7]
Fracción de volumen de fluido	n_f	0,4	0,2-0,6 [13]
Fracción de volumen de sólidos	n_s	0,6	0,6-0,8 [13]
Fracción de presión de poros	λ	0,583	
Propiedades del fluido			
Densidad del fluido	$\rho_f(kg/m^3)$	1030	1000-1200 [13]
Viscosidad dinámica del fluido	$\mu(Pa/s)$	0,1	0,1-50 [9]
Propiedades de los sólidos			
Densidad de sólidos	$\rho_s(Kg/m^3)$	2260	2400-3000 [13]
Ángulo de fricción del lecho	$\varphi (^{\circ})$	28	28-42 [7]

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. Si se supone que inicialmente el talud está saturado y en reposo, la fracción de presión de poros está dada por la relación entre densidades del fluido y densidad de la mezcla:

$\lambda = (\rho_f gh)/(\rho gh) = \rho_f/\rho = (1030 \text{ kg/m}^3)/(1768 \text{ kg/m}^3) = 0.583$. Adicionalmente, se muestran los valores típicos recopilados de la literatura técnica, tanto de análisis de laboratorio como de deslizamientos en campo.

Primero, se hace un análisis de estabilidad de taludes con el método de talud infinito con infiltración (en términos de fracción de presión de poros). El factor de seguridad según la ecuación (8) sería:

$$FS = \frac{(1 - \lambda) \tan \varphi_{bed}}{\tan \theta} = \frac{(1 - 0.583) \tan 28^\circ}{\tan 20^\circ} \quad (8)$$

$$FS = 0.61$$

Esto indica que el talud es inestable y sería el único resultado que entregaría el análisis convencional de talud infinito basado en equilibrio límite.

Por otra parte, el análisis del talud por medio del método implementado en este trabajo, entrega los siguientes resultados: la Figura 4b muestra cómo la masa se empieza a desplazar desde el reposo en un tiempo $t = 0s$, con una aceleración constante de $1,4 \text{ m/s}^2$ 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 $7,63 \text{ m/s}^2$. En el instante de tiempo igual a $3,25s$, la pendiente cambia a 0° y comienza a desacelerarse en forma constante ($-2,18 \text{ m/s}^2$), hasta llegar nuevamente al reposo, después de haber recorrido en total $\sim 103m$ en un tiempo de $\sim 12s$ (Figura 4c).

En el primer intervalo de tiempo ($0-1s$), la masa apenas comienza 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 es de 103 metros hasta detenerse.

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 de 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 en consecuencia disminuya la velocidad.

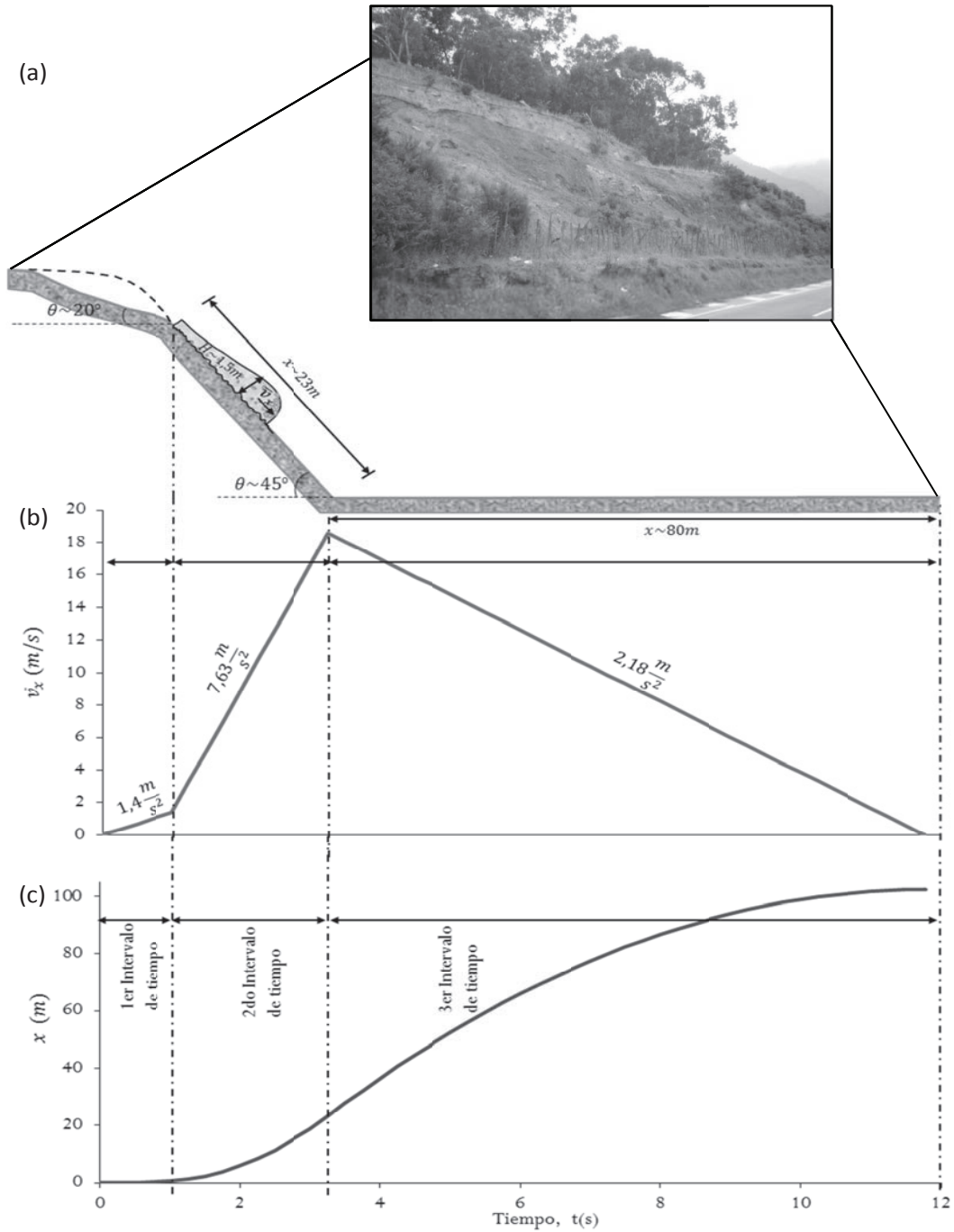


Figura 4. (a) Topografía de la trayectoria del flujo. (b) Velocidad del flujo de material desagregado en función del tiempo. (c) Desplazamiento del flujo de material desagregado en función del tiempo

Con esto se puede ver que mientras el método de talud infinito solamente permite determinar si el talud es estable o no mediante el factor de seguridad, la implementación de la metodología propuesta por Iverson y Delinger [1], permite no sólo 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. La ecuación de desplazamiento también permite conocer la posición del centro de masa del flujo en un instante de tiempo determinado, y la distancia que la masa recorrerá desde el inicio de flujo hasta la deposición.

Los resultados de los métodos convencionales para análisis de estabilidad de taludes basados en equilibrio límite, se pueden utilizar como insumo para determinar la amenaza (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 sólo para evaluar la amenaza (probabilidad de ocurrencia de velocidad mayor que cero), sino para evaluar la probabilidad de ocurrencia de cierta magnitud de velocidad condicionada a una distancia, lo cual quiere decir, que se puede usar como insumo para determinar la vulnerabilidad probabilística de una infraestructura.

3. CONCLUSIONES

La investigación incluyó 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 y Delinger [1], se basa en la capacidad de simular el modo de deformación que usualmente se presenta en campo.

Se encontraron isolíneas de factor de seguridad igual a 1 para el método de talud infinito obtenido mediante la implementación del método de Iverson y Delinger [1]. Esto demuestra que el método está en capacidad de reproducir los resultados del talud infinito en el punto de equilibrio límite, y mostrar las características del proceso de remoción en masa, una vez empieza a moverse.

Los parámetros que más influyen en la estabilidad de un talud que presenta flujo de material desagregado, son el ángulo de talud, el ángulo de fricción del lecho y la fracción de presión de poros. Se encontró además, que dichos parámetros son determinantes en la estabilidad del talud.

La ecuación de velocidad instantánea del flujo (EVIF), y la ecuación de desplazamiento instantáneo del flujo (EDIF), se pueden utilizar como insumo para evaluar amenaza probabilística y vulnerabilidad por flujos de material desagregado. Este último aspecto no se puede conseguir con los métodos convencionales basados en equilibrio límite.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece a la Maestría en Hidrosistemas de la Pontificia Universidad Javeriana por el apoyo como asistente de investigación. El segundo autor agradece el apoyo económico a la Pontificia Universidad Javeriana por medio del proyecto 004711 “Estudio experimental de la licuación por flujo”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Iverson R.M., y Denlinger R.P., (2001). Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain 1. Coulomb mixture theory. En: *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106(B1), pp. 537-552.
- [2] Suárez J., (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 540p.
- [3] Shrestha B.B., Nakagawa H., Kawaike K., and Baba Y., (2008). Numerical simulation on debris-flow deposition and erosion processes upstream of a check dam with experimental verification. En: *Annual of Disas. Prev. Res. Inst.*, Issue 51 B, pp. 613-623.
- [4] Perálvarez J.D., Chacón J., El Hamdouni J., e Irigaray C., (2008). Análisis de susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de Rules, Granada. Madrid, pp.15-27.
- [5] IDEAM (2012). Informe de predicción climática y alertas. En: <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/jsp/loader.jsf?IServicio=Publicaciones&ITipo=publicaciones&IFuncion=loadContenidoPublicacion&id=895> (marzo 7 de 2012).
- [6] Vargas R.A., (2000). Seminario estudios de riesgos por fenómenos de remoción en masa; Bogotá D.C. Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Santa Fe de Bogotá.
- [7] Denlinger R.P., and Iverson R.M., (2001). Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain 2. Numerical predictions and experimental test. En: *Reviews of Geophysics*, Vol. 106, pp. 553-566.
- [8] Pudasaini S.P., Wang Y., and Hutter K., (2005). Modelling debris flows down general channels. En: *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol. 5, pp. 799-819.
- [9] Iverson R.M., (2005). Debris-flow mechanics. En: *Debris-flow hazards and related phenomena*, pp. 105-134.

- [10] Rickenmann D., Laigle D.M.B.W., and Hübl J., (2006). Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. En: *Computational Geosciences*, Vol. 10(2), pp. 241-264.
- [11] Wang C., Li S., and Esaki T., (2008). GIS-based two-dimensional numerical simulation of rainfall-induced debris flow. En: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 8, pp. 47-58.
- [12] Quan Luna B., Remaître A., Van Asch Th.W.J., Malet J.P., and Van Westen C.J., (2012). Analysis of debris flows behavior with a one dimensional run-out model incorporating entrainment. En: *Engineering Geology*, Vol. 128, pp. 63-75.
- [13] Iverson R.M., (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35 (3), pp.245-96.