

**ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES CINEMÁTICAS EN UN FENÓMENO DE
REMOCIÓN DE MASA MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE
DESLIZAMIENTO TRIDIMENSIONAL SIMPLIFICADO Y UN MODELO DE
DESLIZAMIENTO EN BLOQUE**

**ELADIO SILVA ARDILA
MARIO FERNANDO REYES CHINCHILLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

**ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES CINEMÁTICAS EN UN FENÓMENO DE
REMOCIÓN DE MASA MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE
DESLIZAMIENTO TRIDIMENSIONAL SIMPLIFICADO Y UN MODELO DE
DESLIZAMIENTO EN BLOQUE**

**ELADIO SILVA ARDILA
MARIO FERNANDO REYES CHINCHILLA**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:
INGENIERO CIVIL

Director:

Gustavo Chio Cho

Doctor en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Codirector

Daniel Camilo Román Quintero

Ingeniero Civil

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

A mis padres, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como personal, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A Karol Reyes, por creer en mí, brindarme su mano de apoyo en todo momento, por su soporte espiritual, por ayudarme a encontrar siempre el rumbo correcto y sobre todo por su incondicional amor.

A mi hermano Santiago Reyes por compartir el proceso de formación universitaria, las risas y los buenos momentos, por su constante motivación y su plena compañía.

A todos aquellos que ayudaron a forjar un escalón en el desarrollo, investigación y escritura de esta tesis, agradezco todo su apoyo y el impulso en el desarrollo de mi formación profesional, todo este trabajo es gracias a ellos.

MARIO FERNANDO REYES CHINCHILLA

DEDICATORIA

A Dios por ser el guía de mi vida, darme la oportunidad de nacer en un hogar humilde, colmarme de sabiduría, serenidad y fortaleza para vencer las dificultades y obstáculos que se me han presentado en el camino.

A mi padre Hilario Silva Correa, a quien dedico principalmente este gran logro, por inculcarme desde muy niño el trabajo y el estudio. Para él fui su confidente y en conversaciones que sosteníamos me reiteraba: "Mijo a mí ya me quedan pocos años de vida y quiero que usted sea alguien en la vida, debe ser un profesional y darle ejemplo a sus hermanos", ahora estoy cumpliendo su anhelo para con migo, y sé que donde Dios en su santa gloria me lo tenga, estará feliz y orgulloso de mí porque le he cumplido a sus palabras.

A mi madre Elizabeth Ardila, por darme la vida e infundirme valores como la humildad, generosidad, decencia, honradez y respeto. Es ella mi mayor motivación para lograr las cosas que me he propuesto, y por quien me esfuerzo para ser mejor cada día.

A mis hermanos, por su apoyo moral a través de sus palabras y gestos al hablar con migo, y por permitirme mostrarles a través de mis acciones que podemos superarnos y alcanzar lo que nos proponemos.

A mi segunda gran Familia GÓMEZ CHAPARRO, por aceptarme como a alguien más que un hijo y brindarme su cariño, apoyo y confianza. Sé que gran parte de este título académico se lo debo a ellos porque me han facilitado mi estudio, y me han formado e inculcado valores y actitudes que he tomado y aplicado a mi vida personal.

Finalmente y con alto grado de gratitud, a cada uno de los amigos, profesores y personas que han estado acompañándome, aportándome experiencias y cosas positivas de una u otra forma a lo largo de mi camino.

ELADIO SILVA ARDILA

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado corresponde a la cima de un proyecto de investigación en donde hubo intervención de muchas personas, sin los que la realización del mismo no hubiese podido ser culminada. A todos ellos queremos hacer homenaje y agradecer infinitamente, no solo por contribuir a la elaboración del mismo, sino por aportar en la formación integral de los autores.

Agradecer al profesor Gustavo Chio Cho, por su guía, voz, escucha, enseñanza y su total disposición para que cada avance del proyecto se diera correctamente. Por otra parte agradecemos a nuestro codirector y amigo, el ingeniero Daniel Felipe Román Quintero por su completa y total ayuda, por toda la confianza depositada y experiencias adquiridas de su formación, por su dedicación y preocupación para que el proyecto tuviese los mejores resultados. Destacar también a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, en cabeza de sus profesores y personal administrativo que la conforma, por brindarnos las herramientas para la adquisición del conocimiento.

Finalmente agradecemos a Dios como principal guía en el camino de la sabiduría, por ser la luz y fortaleza en los momentos de debilidad y por llenarnos de bendiciones reflejadas en todos que hicieron que este proyecto culminara de manera gratificante.

ELADIOS SILVA ARDILA

MARIO FERNANDO REYES CHINCHILLA

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. MARCO TEÓRICO.....	17
1.1 MODELO UNIDIMENSIONAL DE IVERSON Y DENLINGER	17
1.2 MODELO DE DESLIZAMIENTO EN BLOQUE CON FRICCIÓN DE COULOMB	20
2. METODOLOGÍA.....	25
2.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	25
2.2 CASO DE ESTUDIO	27
3. RESULTADOS	34
4. CONCLUSIONES.....	37
BIBLIOGRAFIA.....	39
ANEXOS	41

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Esquema de un deslizamiento que ilustra el sistema de coordenadas locales y las variables dependientes $hx, y, t, vxx, y, t, vyx, y, t$, según Iverson y Denlinger.	18
Figura 2. Bloque deslizante, consideraciones dinámicas a) perfil de trayectoria. b) Geometría local del contacto. c) Diagrama de fuerzas.	20
Figura 3. Movilidad y distancia de viaje de un deslizamiento de masa.	21
Figura 4. (a) Comportamiento del modelo del servicio geológico colombiano para diferentes ángulos de fricción. (b) para diferentes ángulos de inclinación de la ladera.	26
Figura 5. Comportamiento del modelo simplificado unidimensional de Iverson y Denlinger para: (a) diferentes ángulos de fricción. (b) para diferentes ángulos de inclinación de la ladera. (c) Para diferentes densidades de mezcla. (d) Para diferentes espesores de flujos. (e) Para diferentes fracciones de volumen de fluido.	26
Figura 6. Ortomosaico deslizamiento Girón-Lebrija.	28
Figura 7. Carta de plasticidad de Casagrande.	29
Figura 8. Movimiento traslacional de tipo cuña vía Girón-Lebrija.	30
Figura 9. Gráfica modelo de deslizamiento en bloque. (a) velocidad respecto a posición. (b) Presión respecto a posición.	34
Figura 10. Gráficas del modelo simplificado unidimensional de Iverson y Denlinger. (a) Posición respecto al tiempo. (b) velocidad respecto al tiempo (c) Presión respecto a la posición	35
Figura 11. Ortomosaico (a) Longitud de viaje. (b) vista aérea.	36

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores de presiones límites según el tipo de estructura.....	24
Tabla 2. Límites de Atterberg	29
Tabla 3. Propiedades del flujo de material desagregado.....	31
Tabla 4. Factores de seguridad	33
Tabla 5. Errores relativos para distancias recorridas.....	36

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. RESULTADOS ENSAYOS DE LABORATORIO	41
ANEXO B. DESCRIPCIÓN PROGRAMA COMPUTACIONAL MODELO IVERSON & DENLINGER.....	46
ANEXO C. DESCRIPCIÓN PROGRAMA COMPUTACIONAL MODELO DE DESLIZAMIENTO EN BLOQUE	51

RESUMEN

TITULO: ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES CINEMÁTICAS EN UN FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASA MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE DESLIZAMIENTO TRIDIMENSIONAL SIMPLIFICADO Y UN MODELO DE DESLIZAMIENTO EN BLOQUE*

AUTORES: ELADIO SILVA ARDILA**
MARIO FERNANDO REYES CHINCHILLA**

PALABRAS CLAVE: DESLIZAMIENTO DE TIERRA, COEFICIENTE DE PRESIÓN DE POROS, AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA.

DESCRIPCION:

En el presente artículo se realiza la comparación de dos modelos para la estimación de las propiedades cinemáticas del flujo del fenómeno de remoción de masas. Los modelos que se comparan corresponden al modelo de deslizamiento en bloque y al modelo de flujo unidimensional de Iverson y Denlinger. La comparación de los modelos se realiza mediante la programación de la solución de los mismos, en una interfaz computacional que permite obtener los valores de alcance y velocidad de una masa deslizante, y a partir de la velocidad se estima la presión dinámica a lo largo del movimiento. También se muestran resultados obtenidos producto de un análisis de muestras de un caso de estudio. Las muestras de suelo se sometieron a ensayos de laboratorio con el fin de obtener las propiedades mecánicas del suelo necesarias como insumo para la simulación con los modelos matemáticos. Finalmente se presentan las gráficas de respuesta de cada modelo, y se hace una comparación con los datos obtenidos en el caso de estudio, tomados de levantamientos topográficos que reproducen el recorrido del deslizamiento. Esta comparación determinará qué modelo genera valores más confiables al momento de emplearlos como herramienta para la evaluación de amenaza por movimientos en masa.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Gustavo Chio Cho, Doctor en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Codirector Daniel Camilo Román Quintero, Ingeniero Civil.

ABSTRACT

TITLE: ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES CINEMÁTICAS EN UN FENÓMENO DE REMOCIÓN DE MASA MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE DESLIZAMIENTO TRIDIMENSIONAL SIMPLIFICADO Y UN MODELO DE DESLIZAMIENTO EN BLOQUE*

AUTHORS: ELADIO SILVA ARDILA**
MARIO FERNANDO REYES CHINCHILLA**

KEYWORDS: LANDSLIDE, PORE PRESSURE COEFFICIENT, THREAT BY MASS MOVEMENT.

DESCRIPTION:

The present article shows the comparison between two models for the estimation of kinematic properties in the phenomenon of mass removal. The models that are compared correspond to the block slip model and the one-dimensional flow model of Iverson and Denlinger. The comparison of the models is done by programming the solution of the same, in a computational interface that allows obtaining the values of range and speed of a sliding mass, and from the speed the dynamic pressure is estimated along the movement. Results obtained from a sample analysis of a case study are also shown. The soil samples were subjected to laboratory tests in order to obtain the mechanical properties of the soil needed as input for the simulation with mathematical models. Finally, the response graphs of each model are presented, and a comparison is made with the data obtained in the case study, taken from topographic surveys that reproduce the course of the landslide. This comparison will determine which model generates the most reliable values when using them as a tool for threat evaluation by mass movements.

*Bachelor Thesis

** Physic-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director. Gustavo Chio Cho, Civil Engineer M.Sc. Ph.D. Co-Director Daniel Camilo Román Quintero, Civil Engineer.

INTRODUCCIÓN

En el transcurso de los últimos años se han presentado gran cantidad de eventos de movimientos en masa en distintas regiones del país que han cobrado la vida de decenas de personas y han destruido los hogares de centenares de familias. En la actualidad es común encontrar reportes del IDEAM que emiten estados de alerta en distintas zonas del país sobre posibilidades altas de ocurrencia de eventos de movimientos en masa, razón por la cual se ve necesaria la implementación de modelos preventivos que ayuden a la mitigación del riesgo ante deslizamientos en zonas consideradas como críticas.

“Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra; esto debido a que generalmente se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia: el relieve, la sismicidad, la meteorización y las lluvias intensas”¹, dichos factores están presentes en la zona andina colombiana, lugar donde se concentra la mayor parte de la población, que por crecimiento urbano se han establecido en zonas críticas. La Secretaría Distrital de Salud de Bogotá menciona ², el proceso de urbanización incluye la construcción de viviendas, edificaciones para equipamientos, tuberías enterradas, postes, vías, entre otras, aumentando en gran medida la exposición urbana a movimientos en masa, lo que se convierte en los siguientes efectos cuando este tipo de eventos se presentan: daños físicos en viviendas y demás elementos expuestos, pérdidas económicas, afectaciones a la población, heridos y pérdidas de vidas humanas,

¹ SUAREZ DÍAZ, Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga: Publicaciones UIS, 1998. p. 1. ISBN 958-33-0800-5.

² SECRETARÍA DISTRITAL DE SALUD DE BOGOTÁ. Documento de análisis de situación de salud con el modelo de los determinantes sociales de salud para el Distrito Capital. [En línea]. Bogotá D.C. 2016. (Recuperado en 12 Marzo 2016.) Disponible en <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/ED/PSP/asis-distrital-2016-bogota.pdf>.

disfuncionalidad de equipamientos y obstrucción parcial o total de vías de acceso. “A partir de la expedición de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012), todos los municipios del país deben realizar estudios de riesgos naturales como parte esencial de las políticas encaminadas a la planificación del desarrollo seguro y a la gestión ambiental territorial sostenible”³, dicha ley fue creada con el fin de mitigar desastres.

El Servicio Geológico Colombiano ha propuesto una ecuación para estimar variables cinemáticas, como son: la velocidad y la distancia que recorre un proceso de remoción de masa; fundamentada bajo el modelo de deslizamiento en bloque. Por otra parte “Iverson y Denlinger proponen un modelo matemático que predice el comportamiento de una mezcla de fluido newtoniano y sólido cuya interacción friccional se representa por la ley de fricción de Coulomb”⁴. Analizando modelos matemáticos, la pregunta a resolver sería: ¿Cuál es el modelo óptimo para determinar la velocidad y distancia de recorrido en un evento de remoción de masas?

3 SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia, 2015. p.11. ISBN: 978-958-99528-5-6.

4 TRUJILLO VELA, Mario Germán y RAMOS CAÑÓN, Alfonso Mariano. Modelos para simulación de procesos de remoción en masa desagregados. Comparación con el método de talud infinito. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Diciembre, 2012, vol. 22 no. 2., p. 25-37.

1. MARCO TEÓRICO

Para la identificación del alcance y velocidad de movimientos en masa se encuentra una gran cantidad de modelos en la literatura científica, los cuales pueden ser clasificadas en dos bloques determinados: modelos empíricos y modelos analíticos; siendo los primeros basados en observaciones realizadas en campo, por lo que se requiere recopilar gran cantidad de información para clasificar y obtener estimaciones. Por otra parte se encuentran los métodos analíticos, definidos como aquellos en los que interviene cualquier herramienta matemática que tenga como base la mecánica de sólidos y de fluidos, entre los cuales se ubican los dos modelos previamente mencionadas, el denominado modelo de deslizamiento en bloque o modelo con fricción de Coulomb adoptado por el Servicio Geológico Colombiano y el modelo unidimensional propuesto por Iverson y Denlinger.

1.1 MODELO UNIDIMENSIONAL DE IVERSON Y DENLINGER

La ecuación diferencial de conservación de momentum en la profundidad en dirección x del movimiento, como se observa en la Figura 1, para un flujo de material desagregado que describe Iverson y Denlinger ⁵ de forma tridimensional corresponde a la ecuación (1).

$$\rho \left[\frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}_x\bar{v}_y)}{\partial x} \right] = -sgn(\bar{v}_x) \left[\rho g_z h - P_{bed} \left(1 + \frac{\bar{v}_x^2}{r_x g_z} \right) \right] \tan \varphi_{bed} - 3n_f \mu \frac{\bar{v}_x}{h} - hk_{\frac{act}{pas}} \frac{\partial}{\partial x} (\rho g_z h - P_{bed}) - h \frac{\partial P_{bed}}{\partial x} - n_f \mu h \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial x^2} \quad (1)$$

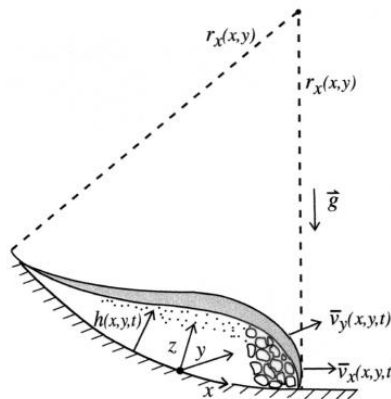
$$-sgn \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} \right) hk_{\frac{act}{pas}} \frac{\partial}{\partial y} (\rho g_z h - P_{bed}) \sin \varphi_{int} + n_f \mu h \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial y^2} + \rho g_x h$$

⁵ IVERSON, Richard M. y DENLINGER, Roger P. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory. En: Journal of Geophysical Research. Enero, 2001, vol. 106 no. B1., p. 544.

Donde ρ compete a la densidad promedio ponderada de la mezcla del fluido y sólidos ($\rho = \rho_f n_f + \rho_s n_s$), v_x, v_y la velocidad promedio en cada dirección en el centro de masa del flujo, r_x corresponde al radio de curvatura en dirección x , n_f la fracción de volumen de fluido, μ la viscosidad dinámica del componente fluido, g_z la gravedad, P_{bed} 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, finalmente h corresponde al espesor del flujo.

Por otra parte Iverson y Denlinger ⁶, presentan al lado derecho de la ecuación (1) cuatro filas, las cuales corresponden en orden al esfuerzo cortante basal, el esfuerzo normal a la dirección del flujo, el cortante lateral a la dirección del flujo y finalmente la fuerza gravitacional que impulsa la masa deslizando.

Figura 1. Esquema de un deslizamiento que ilustra el sistema de coordenadas locales y las variables dependientes $h(x, y, t)$, $\bar{v}_x(x, y, t)$, $\bar{v}_y(x, y, t)$, según Iverson y Denlinger



Fuente: Iverson y Denlinger, 2001, p. 541.

⁶ Ibíd., p. 545.

Para obtener la solución analítica de dicha ecuación diferencial no lineal hiperbólica (1) es necesario definir unos casos especiales en donde no hay presencia de momentum en la dirección y , la masa de mezcla que desciende por un plano inclinado debe ser uniforme, con un espesor de flujo constante en conjunto a la presión de poros, ver Figura 1. Logrando así obtener el modelo simplificado a una sola dimensión presentado a continuación en la ecuación (2).

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

Que mediante reducciones algebraicas y normalizándola al dividir entre la gravedad, Iverson y Denlinger obtienen la expresión presentada en la ecuación (3).

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

En donde H corresponde al espesor del flujo y Θ definido mediante la ec. (4)

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

Donde θ corresponde al ángulo de inclinación de la ladera, φ_{bed} el ángulo de fricción de la cama y λ es la fracción de presión de poros ($\lambda = \rho_f g h / \rho g h$). La ecuación (4) corresponde a la fuerza motriz gravitacional normalizada sustrayendo la resistencia debido a la fricción basal.

La solución de la ecuación diferencial (3) de los autores Iverson & Denlinger corresponde a la ecuación de velocidad instantánea del flujo del material dado por la ecuación (5).

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

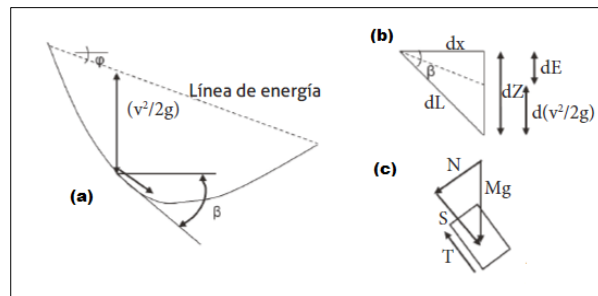
La solución presentada en la ecuación (5) describe la velocidad del centro de masa del cuerpo deslizando en función del tiempo, y mediante la integración de la misma se obtiene la expresión matemática para el desplazamiento instantáneo del flujo.

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

1.2 MODELO DE DESLIZAMIENTO EN BLOQUE CON FRICCIÓN DE COULOMB

Por otra parte los físicos E. Müller-Bernet y Albert Heim describieron los deslizamientos de tierra mediante el teorema de trabajo y energía cinética, utilizando un bloque de masa M que se desliza sobre una trayectoria curva, con ángulo de pendiente y con fricción de Coulomb constante.

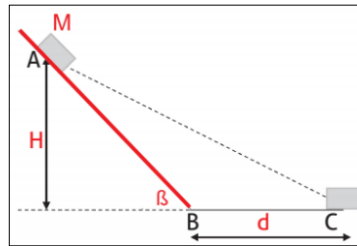
Figura 2. Bloque deslizando, consideraciones dinámicas a) perfil de trayectoria. b) Geometría local del contacto. c) Diagrama de fuerzas



Fuente: Ávila et al., 2015, p. 80.

De acuerdo a Yue ⁷, aplicando las leyes de Newton para la condición en donde $\beta \geq \phi$ y considerando que la energía potencial total del deslizamiento es MgH se obtienen las siguientes ecuaciones para los espacios AB-BC.

Figura 3. Movilidad y distancia de viaje de un deslizamiento de masa



Fuente: Ávila et al., 2015, p. 80.

$$\begin{cases} Mg\sin\beta - Mg\cos\beta\tan\phi = Ma(t) & \text{de A a B} \\ -Mg\tan\phi_p = Ma(t) & \text{de B a C} \end{cases} \quad (7)$$

Siendo M la masa deslizada, g la aceleración de la gravedad, β la inclinación del talud, ϕ el ángulo de fricción interna del lecho del talud de A-B, ϕ_p el ángulo de fricción interna de la zona plana del terreno y $a(t)$ la aceleración desarrollada por la masa.

Para poder hallar la expresión que permita determinar la velocidad generada en el tramo A-B, se recurre al teorema de trabajo y energía cinética ⁸, el cual establece que el cambio de la energía cinética de un cuerpo en movimiento, es igual al trabajo neto sobre dicho cuerpo. Es necesario aclarar que el marco de referencia debe estar en el centro de gravedad de la masa deslizando, no entre la zona de origen y sus

⁷ YUE, Zhong-qi Quentin. Dynamics of large and rapid landslides with long travel distances under dense gas expanding power. En *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*. Springer, Cham, 2014. p. 234.

⁸ SERWAY, Raymond A y JEWETT, John W. Física para ciencias e ingeniería. Vol. 1, 7 ed. México D.F.: Cengage Learning Editores, 2008. p.174. ISBN-13: 978-607-481-357-9.

depósitos. El teorema de trabajo y energía se enuncia en términos infinitesimales como:

$$dE_k = dW_n = FdL \quad (8)$$

Luego:

$$d\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = FdL \quad (9)$$

Donde v es la velocidad y F hace referencia a la fuerza neta que se deduce a partir de la Figura 2c, en donde a partir diagrama de equilibrio de fuerzas mostrados allí resulta:

$$S = Mg \sin \beta; \quad N = Mg \cos \beta; \quad T = N\mu; \quad \mu = \tan \phi$$

Siendo S el componente horizontal de la fuerza gravitacional, N el componente vertical de la fuerza gravitacional, T la fuerza de rozamiento que se opone al movimiento descrita por Coulomb ⁹, μ corresponde al coeficiente de fricción entre las superficies.

De acuerdo a la teoría, se sabe que las únicas fuerzas que generan trabajo son aquellas que tienen dirección paralela al desplazamiento, y que en el caso actual corresponderían a S y T , por ende:

$$F = Mg \sin \beta - N\mu = Mg \sin \beta - Mg \cos \beta \tan \phi = Mg(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi)$$

Y

$$d\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = Mg(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi)dL \quad (10)$$

Integrando, se obtiene la expresión de la velocidad para el tramo A-B:

⁹ COULOMB, Charles. Théorie des machines simples. En: Histoire de l'Académie Royale des Sciences avec Mémoires de Mathématique et Physique. Paris 1781. p. 161-332.

$$\int d \left(\frac{Mv^2}{2} \right) = \int Mg(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi) dL \quad (11)$$

$$V_{AB} = \sqrt{2gL(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi)} \quad (12)$$

Este modelo asume que no existen pérdidas de energía debido a impactos ¹⁰, razón por la cual en la transición drástica de pendiente al cambiar la dirección de la velocidad, la distancia de viaje está dada por la expresión (13).

$$d = \left(1 - \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \right) \frac{H}{\tan \phi_p} = \left(1 - \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \right) \frac{L \cos \beta}{\tan \phi_p} \quad (13)$$

Finalmente la velocidad para el tramo plano se determina mediante la ecuación (14).

$$V_{BC}^2 = V_B^2 - 2g \tan \phi_p d \quad (14)$$

La Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa ¹¹, una vez conocidas la velocidad y densidad del flujo, propone la siguiente ecuación para determinar la presión ejercida por la masa deslizando.

$$p = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (15)$$

Y a su vez presenta la Tabla 1 con los valores límites de presión que podría soportar una estructura según sea su tipología, dado el caso que el deslizamiento impacte sobre la misma

¹⁰ SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Op. cit., p. 81.

¹¹ Ibíd., p. 103.

Tabla 1. Valores de presiones límites según el tipo de estructura

TIPOLOGÍA		PRESIÓN LÍMITE DE LA ESTRUCTURA (KPa)
F	Construcciones simples	1
E	Estructuras ligeras	5
D	Estructuras con confinamiento deficiente	8
C	Mampostería reforzada	11
B	Edificaciones reforzadas	18
A	Edificaciones con reforzamiento especial	20

Fuente: Du et al., 2014.

2. METODOLOGÍA

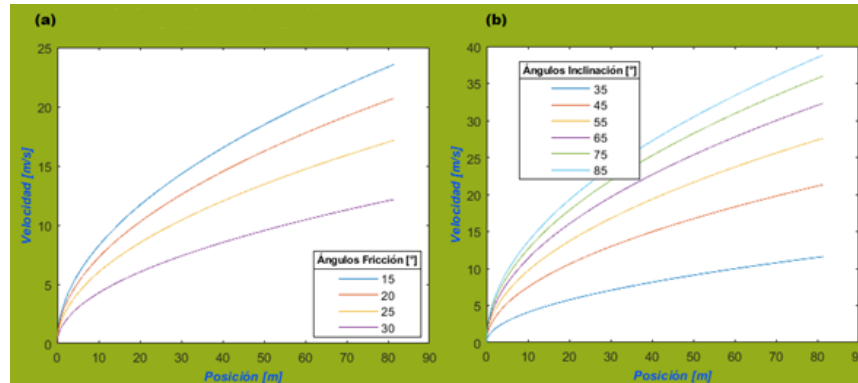
Como primera medida se presenta un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros que más influyen en los resultados generados por cada modelo; para modelar la sensibilidad se emplean los valores obtenidos de los ensayos realizados al suelo de la ladera a estudio (ver Tabla 3), variando los parámetros principales presentes en los modelos. Al momento de aplicar los dos modelos se ha considerado que la ladera se encuentra saturada y en reposo, razón por la cual la fracción de presión de poros está dada por la relación entre la densidad del fluido y la densidad de la mezcla $\lambda = \rho_f / \rho$. Por otra parte se ha considerado que el tipo de suelo durante todo el deslizamiento es el mismo por ende se mantienen constantes las propiedades mecánicas del mismo.

2.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En la Figura 4 se presenta el comportamiento del modelo de deslizamiento en bloque ante la variación del ángulo de fricción del suelo y el ángulo de inclinación de la ladera, observándose una relación inversamente proporcional, dado que al aumentar el ángulo de fricción se observa una reducción de la velocidad, caso contrario a lo que sucede al incrementar el ángulo de inclinación.

Por otra parte, respecto a la expresión matemática del modelo de deslizamiento en bloque, existe una restricción referente a los parámetros evaluados en la gráfica anterior, ya que el ángulo de fricción no debe ser superior al ángulo de inclinación de la ladera, dado que si esto sucede indicaría que la ladera es estable, y por ende en esta condición no ocurrirá ningún desprendimiento de material.

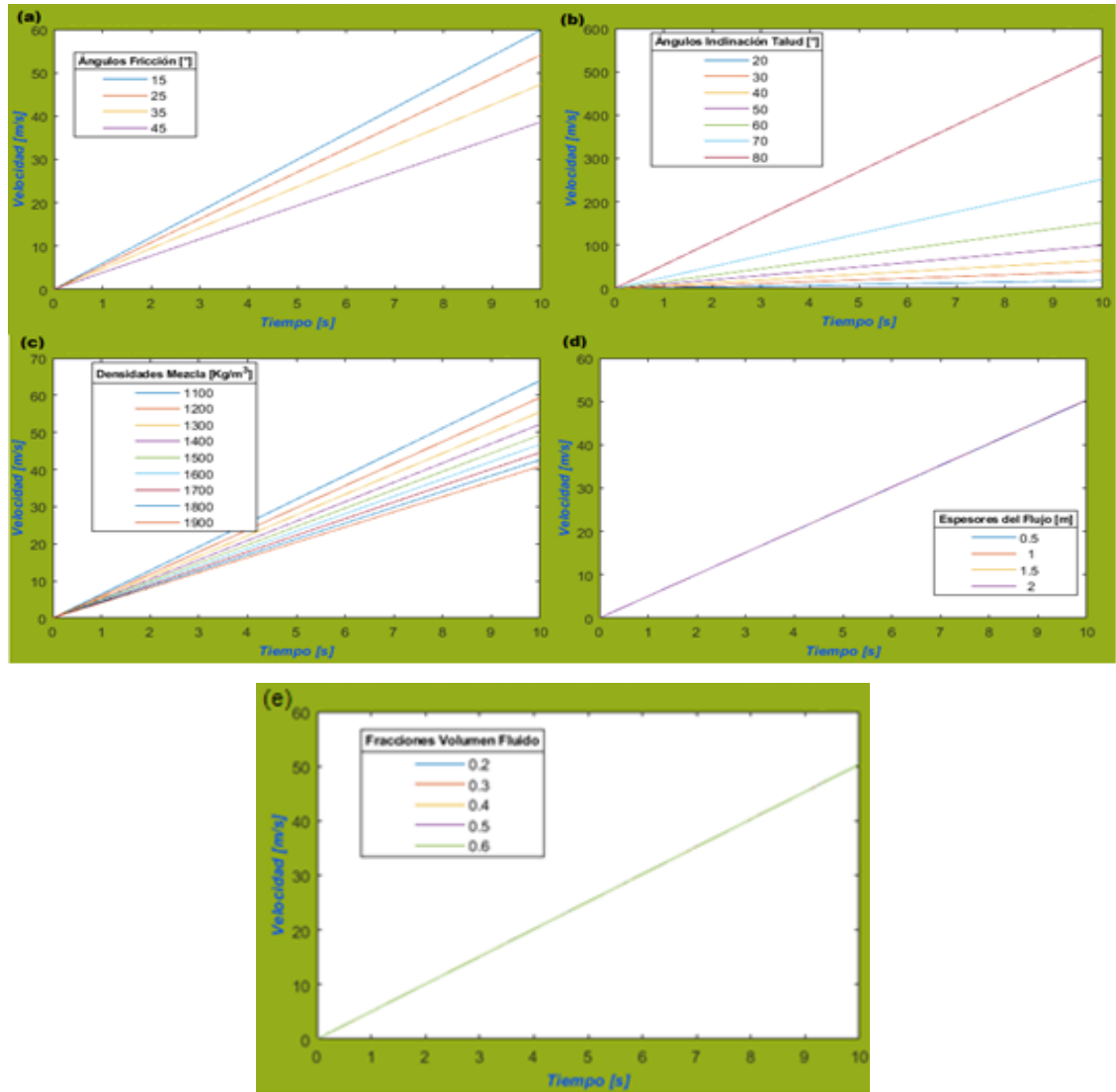
Figura 4. (a) Comportamiento del modelo del servicio geológico colombiano para diferentes ángulos de fricción. (b) para diferentes ángulos de inclinación de la ladera



En lo que concierne al modelo propuesto por Iverson y Denlinger, en las gráficas 5a y 5b se presenta un comportamiento similar al modelo de deslizamiento en bloque, observándose que a medida que el ángulo de fricción disminuye la velocidad se incrementa, por otra parte, se denota que el ángulo de la ladera corresponde al parámetro más influyente de la ecuación, generando cambios bruscos en los valores de la velocidad. Respecto a la gráfica 5c, se aprecia que la densidad de la mezcla es un parámetro con un grado de sensibilidad importante, en el cual a menor valor, mayor es la velocidad alcanzada, y viceversa. Finalmente de acuerdo a la figuras 5d y 5e, tanto el espesor del flujo como la fracción de volumen del fluido al variarlos no alteran significativamente los resultados de velocidad del movimiento en masa.

Figura 5. Comportamiento del modelo simplificado unidimensional de Iverson y Denlinger para: (a) diferentes ángulos de fricción. (b) para diferentes ángulos de inclinación de la ladera. (c) Para diferentes densidades de mezcla. (d) Para diferentes espesores de flujos. (e) Para diferentes fracciones de volumen de fluido

Figura 5. (Continuación)



2.2 CASO DE ESTUDIO

Para aplicar y comparar los modelos con eventos ocurridos en la vida real, se propone simular un evento desarrollado en la vía Girón-Lebrija, lugar del cual se realizó un muestreo para determinar las propiedades mecánicas del suelo, además de un levantamiento topográfico mediante el uso de un escáner láser terrestre y la ayuda de un dron, el cual consiste en realizar múltiples estaciones para irradiar una

nube de puntos representando el objeto escaneado en una vista de 360°, bajo la ayuda de una cámara fotográfica que recolecta mayor información del escaneo. El levantamiento se realiza con el fin de obtener alturas, longitudes y ángulos de la ladera a estudiar. De esta nube de puntos y la fotogrametría del dron se obtiene la ortofoto referenciada con coordenadas para tomar las medidas mencionadas.

Figura 6. Ortomosaico deslizamiento Girón-Lebrija.



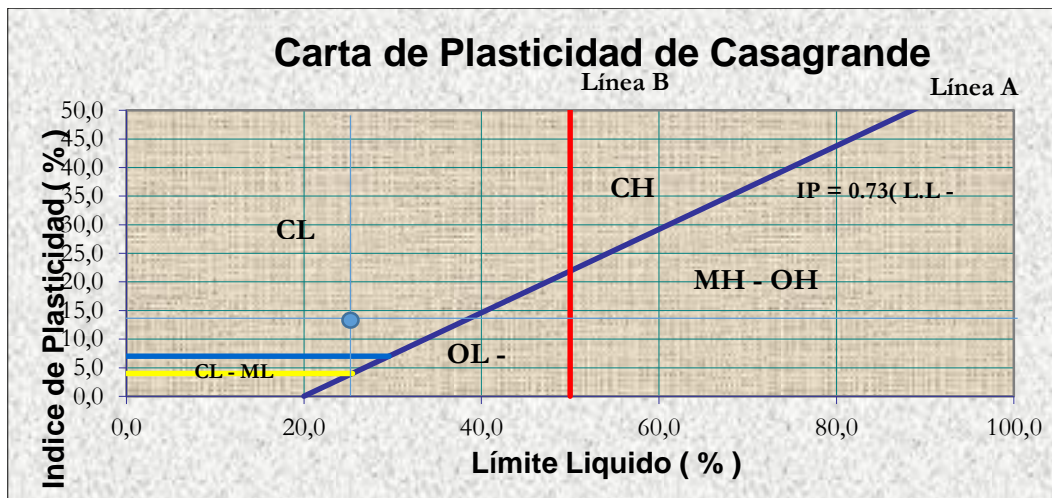
Para poder obtener una estimación de los parámetros necesarios para ingresar a las ecuaciones, se realizaron los ensayos de densidad o masa unitaria del suelo en el terreno mediante el método del cono de arena I.N.V.E -161, la determinación de la resistencia al corte mediante el método de corte directo (CD) I.N.V.E-154 para hallar el ángulo de fricción en el lecho.

Como complemento, se determinaron los correspondientes límites de Atterberg: el límite líquido de los suelos (I.N.V.E-125) y el límite plástico e índice de plasticidad de suelos (I.N.V.E-126), ensayos que permitieron realizar la clasificación del suelo mediante la carta de plasticidad de Casagrande, dando como resultado una arcilla arenosa (CL), tal como evidencia la Tabla 2 y la Figura 7.

Tabla 2. Límites de Atterberg

Límites de consistencia		
Límite Líquido	LL	25,29%
Límite Plástico	LP	14,44%
Índice de Plasticidad	IP	10,85%
Tipo de suelo	CL	

Figura 7. Carta de plasticidad de Casagrande



El evento desarrollado en esta zona corresponde al de un movimiento traslacional de tipo cuña como se ve en la **Figura 8**, el cual describe Suarez ¹², como aquel movimiento en el que el cuerpo del deslizamiento está delimitado por dos planos de discontinuidad que se intersecan entre sí e intersecan la cara del talud o la ladera, razón por la cual el cuerpo se desplaza siguiendo la dirección de la línea de intersección de ambos planos o por el buzamiento de alguno de ellos.

¹² SUAREZ. Op. cit., p. 18.

Figura 8. Movimiento traslacional de tipo cuña vía Girón-Lebrija



El procedimiento realizado en campo correspondió al de la toma de muestras tanto alteradas como inalteradas, con el fin de realizar los ensayos previamente mencionados, se efectuaron dos muestreos de campo para determinar densidades, único ensayo realizado in situ, estas dos muestras fueron tomadas en el cuerpo principal y en la cabeza del talud con el fin de tener un estimado de la densidad en campo. Por otra parte se tomó una muestra inalterada de la superficie de falla la cual se empleó para clasificar y determinar el ángulo de fricción de la ladera mediante el ensayo de corte directo.

En campo se observó que el deslizamiento ya había sido removido, razón por la cual se dificultó la documentación del depósito de material transportado, para esto se necesitó de la ayuda de un dron que generara fotografías aéreas y lograr denotar una geoforma final que sirvió para determinar la posible distancia de viaje y lograr comparar los modelos frente al evento ocurrido.

A continuación en la Tabla 3 se muestran los resultados de las propiedades del suelo de la ladera evaluada, en donde los valores de fracción de volumen de sólidos

y fluidos fueron tomados de la literatura, como valores típicos que recomienda Iverson ¹³.

Tabla 3. Propiedades del flujo de material desagregado

Parámetro	Símbolo	Valor
Condiciones iniciales		
Tiempo	t(s)	0
Velocidad inicial	V_0 (m/s)	0
Posición inicial	X_0 (m)	0
Ángulo de ladera	θ	34,6
Altura de ladera	m	46.3
Longitud de la ladera	m	81.51
Propiedades de la mezcla		
Densidad de mezcla	ρ (kg/m ³)	1462
Espesor del flujo	H(m)	1,2
Ángulo de fricción del lecho	ϕ_{bed} (°)	30,85
Fracción de volumen de fluido	n_f	0,4
Fracción de volumen de sólidos	n_s	0,6
Fracción de presión de poros	λ	0,70451436
Propiedades del fluido		
Densidad del fluido	ρ_f (kg/m ³)	1030
Viscosidad dinámica del fluido	μ (Pa/s)	0,1
Propiedades de los sólidos		
Densidad de sólidos	ρ_s (kg/m ³)	1354
Ángulo de fricción del lecho	ϕ (°)	30,85

¹³ IVERSON, Richard M. (1997). The physics of debris flows. Reviews of Geophysics. 1997, pp.245-96.

Se procede a realizar un análisis de estabilidad de la ladera, mediante cualquiera de las metodologías ofrecidas por la literatura conocida. Para este caso se emplea el denominado método del talud infinito, como se encuentra en Suarez ¹⁴, en donde está expresado en términos de la presión de poros, valor estimado mediante la expresión:

$$\lambda = \frac{(\rho_f)}{(\rho)} = \frac{1030\text{kg/m}^3}{1462\text{kg/m}^3} = 0.704$$

Conociendo el ángulo de fricción y el ángulo de la ladera se estima el factor de seguridad como:

$$FS = \frac{(1 - \lambda)\tan\varphi_{bed}}{\tan\theta} = \frac{(1 - 0.7)\tan30.85^\circ}{\tan34.6}$$

$$FS = 0.256$$

Observando los valores establecidos por el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, en su título H presenta la Tabla 4. Estos valores deberán ser superiores a 1.5 en condición estática y agua subterránea normal, y superior a 1.05 en condición pseudo-estática con agua subterránea normal. Razón por la cual se establece que la ladera a estudiar corresponde a una ladera que no cumple los factores de seguridad y por ende es altamente inestable y su amenaza es alta.

¹⁴ SUAREZ. Op. cit., p. 146.

Tabla 4. Factores de seguridad

Condición	F_{SBM}		F_{SBUM}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

(*) Nota: Los parámetros sísmicos seudo estáticos de Construcción serán el 50% de los de Diseño

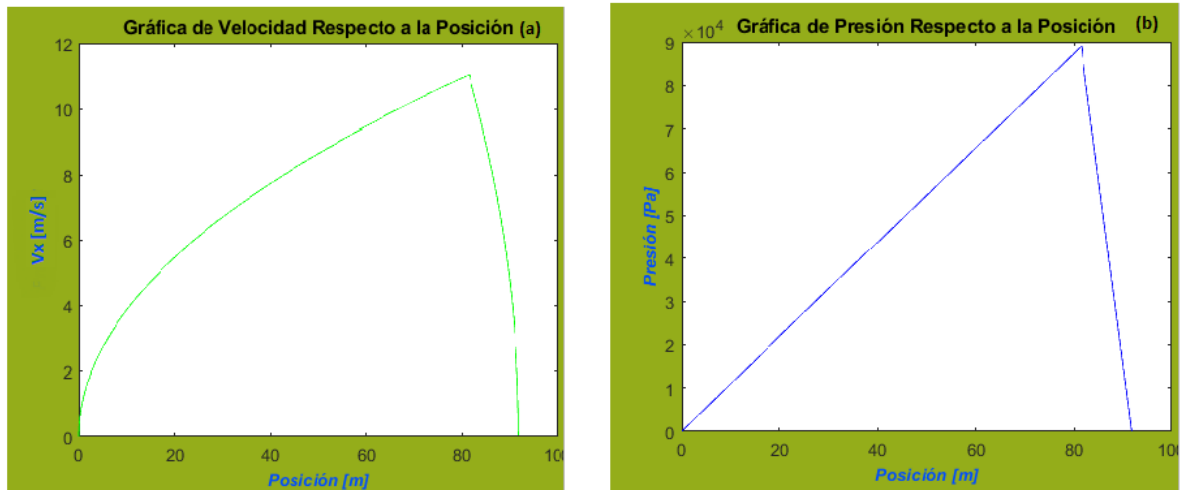
Fuente: NSR 10, 2010.

3. RESULTADOS

Una vez realizado este análisis se procede a emplear los dos modelos con el fin de obtener distancias y velocidades de viaje del deslizamiento presentado.

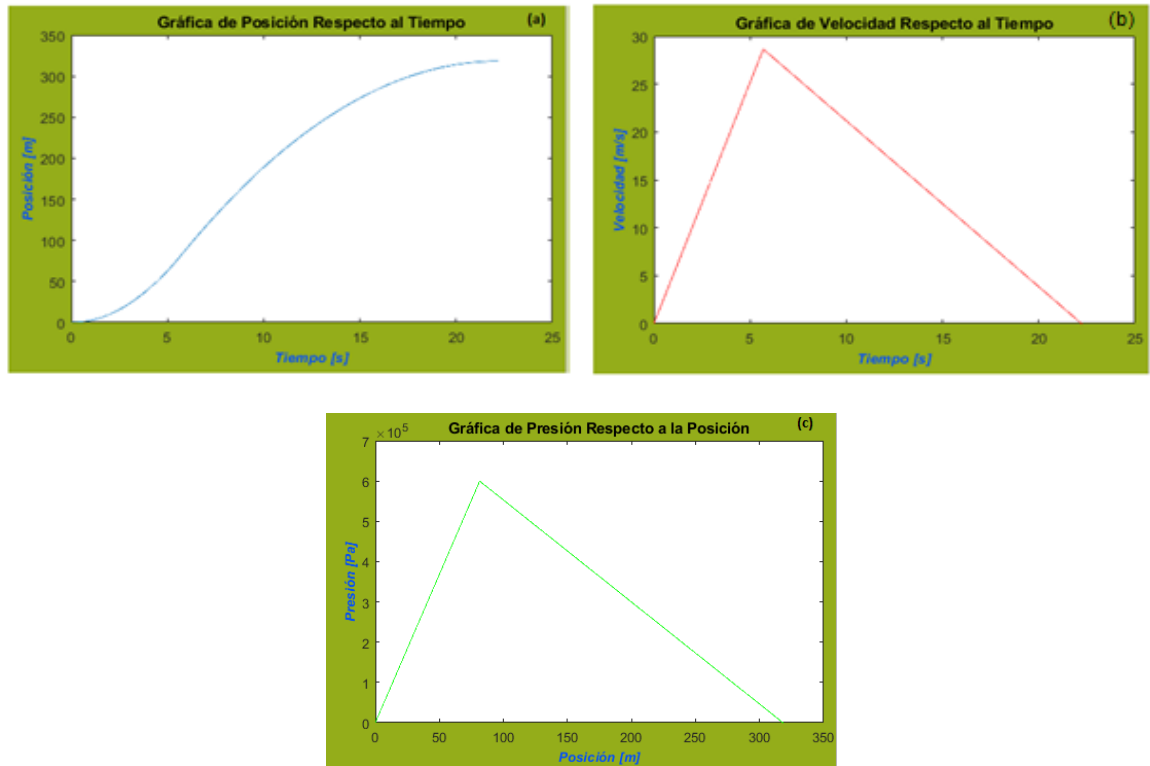
A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el modelo empleado por el SGC en donde se presentan las gráficas para desplazamiento, velocidad y presión a lo largo del recorrido de la masa deslizante, observándose una velocidad máxima de 11.038 [m/s] y un desplazamiento total de la masa de 91.906 [m], mientras que la distancia desde el pie hasta el punto en que se detiene el flujo es de 10.396 [m].

Figura 9. Gráfica modelo de deslizamiento en bloque. (a) velocidad respecto a posición. (b) Presión respecto a posición.



Por otra parte, para el modelo simplificado presentado por Iverson y Denlinger se obtuvo una velocidad máxima equivalente a 28.65 [m/s] y un desplazamiento total de la masa deslizada de 236.881[m], en adición se presenta la gráfica con las presiones debidas a las velocidades a lo largo del deslizamiento.

Figura 10. Gráficas del modelo simplificado unidimensional de Ivernson y Denlinger. (a) Posición respecto al tiempo. (b) velocidad respecto al tiempo (c) Presión respecto a la posición



Para poder realizar la comparación de los dos modelos es necesario retomar información del deslizamiento del levantamiento realizado, para esto se empleó el ortomosaico tridimensional para medir distancias, en donde se obtiene un valor aproximado de la geoforma una vez ocurrido el deslizamiento equivalente a 130 metros de distancia, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Ortomosaico (a) Longitud de viaje. (b) vista aérea.



Se procede a comparar los dos modelos frente al valor real mediante la Tabla 5, en donde se observa gran variación entre estas, obteniendo valores poco confiables mediante la ecuación del modelo de deslizamiento en bloque, a la hora de realizar estudios de amenaza, mientras que la metodología propuesta por Iverson y Denlinger presenta valores que superan a la realidad y generan longitudes más extensas al momento localizar las zonas de amenaza.

Tabla 5. Errores relativos para distancias recorridas

Modelo	Distancia recorrida [m]	Error relativo [%]
Deslizamiento en bloque.	91.906	29.303
Iverson y Denlinger unidimensional.	318.391	144.916
Geoforma	130	

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron determinar la exactitud de cada metodología frente al evento ocurrido en la vía Girón-Lebrija, observando que el modelo de Iverson y Denlinger genera mayor área de afectación, dado que el alcance hallado por este modelo es superior al real, mientras que el empleado por el Servicio Geológico Colombiano muestra valores ya afectados por el flujo, es decir, sitúa la distancia de viaje del deslizamiento mucho antes de lo mostrado en la realidad. Por tal razón se deja a criterio de quien realice el análisis de amenaza qué modelo implementar y se recomienda calibrar el modelo de Iverson y Denlinger para generar valores próximos a la realidad.

Se observa a través del análisis de sensibilidad de los dos modelos que los parámetros de mayor incidencia al momento de evaluar la velocidad y la distancia de viaje del movimiento en masa, son esencialmente el ángulo de inclinación del talud y el ángulo de fricción del lecho, notándose entre ellos una relación inversamente proporcional sobre el resultado de la velocidad, ya que al aumentar el ángulo de fricción se observa una reducción en ésta, caso contrario a lo que sucede al incrementar el ángulo de inclinación. Adicional a lo mencionado en el modelo de Iverson y Denlinger, se destaca la influencia de la densidad de la mezcla, generando mayores velocidades a menores densidades.

Es importante destacar que el modelo propuesto por Iverson y Denlinger, está contemplado para evaluar movimientos en masa rápidos, como los flujos. En el caso en que el deslizamiento no sea rápido, los resultados generados por el modelo no son confiables y poseen un alto grado de incertidumbre debido a los tiempos observados del viaje del material generados del programa desarrollado.

Los movimientos en masa rápidos pueden llegar a producir enormes impactos y cargas de desplazamiento sobre las estructuras, debido a que poseen valores altos

de momentum y energía cinética, por ende sus ocurrencias suelen ser dramáticas y devastadoras para los seres humanos. Es aquí en donde radica la importancia de los dos modelos al permitir calcular la velocidad a lo largo del trayecto de la masa deslizante, ya que con ella se puede establecer la presión que puede llegar a ejercerse sobre una determinada vivienda situada dentro de la zona de influencia del deslizamiento, generada por la zonificación de la amenaza.

Finalmente en la Tabla 5 se denota el cumplimiento del objetivo general del proyecto de investigación en donde se comparan los modelos de Iverson y Denlinger y el adoptado por el Servicio Geológico Colombiano denominado Modelo de deslizamiento en bloque con fricción de Coulomb, frente al deslizamiento ocurrido en la vía Girón-Lebrija. Por otra parte todos los resultados presentados en la metodología corresponden al cumplimiento de los objetivos específicos en donde mediante la adopción de las ecuaciones de los modelos se presentaron resultados tomados de la programación computacional desarrollada.

BIBLIOGRAFIA.

ALMAGUER-CARMENATES, Yuri; GUARDADO-LACABA, Rafael. Tipología de movimientos de masas desarrollados en el territorio de Moa, Cuba. *Minería y Geología*, 2006, vol. 22, no 1.

COULOMB, Charles. Théorie des machines simples. En: *Histoire de l'Académie Royale des Sciences avec Mémoires de Mathématique et Physique*. Paris 1781. p. 161-332

IVERSON, Richard M. y DENLINGER, Roger P. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory. En: *Journal of Geophysical Research*. Enero, 2001, vol. 106 no. B1., p. 537-552.

MORGENSTERN, N. R. Toward Landslide Risk Assessment in practice” Proceeding of the International Workshop of Landslide Risk Assessment, Honolulu, Hawaii. USA, 1997, vol. 96, p. 15-23.

RAMOS, Alfonso M.; TRUJILLO VELA, Mario Germán y PRADA, Luis Felipe. Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá. *Obras y proyectos*, 2015, no 18, p. 63-75.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia, 2015. p.11. ISBN: 978-958-99528-5-6.

SERWAY, Raymond A y JEWETT, John W. Física para ciencias e ingeniería. Vol 1, 7 ed. México D.F.: Cengage Learning Editores, 2008. 721 p. ISBN-13: 978-607-481-357-9.

SUAREZ DÍAZ, Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga: Publicaciones UIS, 1998. ISBN 958-33-0800-5.

TRUJILLO VELA, Mario Germán y RAMOS CAÑÓN, Alfonso Mariano. Modelos para simulación de procesos de remoción en masa desagregados. Comparación con el método de talud infinito. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Diciembre, 2012, vol. 22 no. 2., p. 25-37.

YUE, Zhong-qj Quentin. Dynamics of large and rapid landslides with long travel distances under dense gas expanding power. En Landslide Science for a Safer Geoenvironment. Springer, Cham, 2014. p. 233-240.

ANEXOS

ANEXO A. RESULTADOS ENSAYOS DE LABORATORIO

Tabla A1. Ensayo de densidad de campo mediante el método del cono de arena I.N.V.E -161

ENSAYO DE DENSIDAD IN-SITU CONO DE ARENA		
FECHA	14/10/2017	
Prueba		DATO
1	Peso de la arena + frasco (gr)	4666
2	Peso de la arena sobrante + frasco (gr)	2900
3	Peso de la arena en el hoyo + cono (1-2)	-
4	Peso de la arena en el cono (gr)	-
5	Peso de la arena en el hoyo (gr) (3-4)	1766
6	Densidad de la arena gr/cm ³	1,33
7	Volumen del hoyo (cm ³) (5/6)	1327,81955
8	Peso del suelo húmedo total +recipiente (gr)	1941,1
9	Peso del recipiente (gr)	0
10	Peso total del suelo húmedo (8-9)	1941,1
11	Peso del suelo húmedo (gr)	-
12	Densidad de la grava	-
13	Volumen del suelo húmedo (11/12)	-
14	Peso del suelo húmedo total (gr) (10-11)	
15	Volumen del suelo húmedo total (7-13)	1327,81955
16	Densidad húmeda del suelo total (gr/cm ³)(10/15)	1,46187033
17	Densidad seca del suelo (gr/cm ³)(16/18)	
CONTENIDO DE HUMEDAD HORNO		
18	Peso del suelo húmedo+ recipiente (gr)	1959,5
19	Peso del suelo seco +recipiente (gr)	1827,7
20	Peso del agua (gr) (17-18)	131,8
21	Peso del recipiente	28,8
22	Peso del suelo seco (18-20)	1798,9
23	Contenido de humedad (%)	7,32669965
RESULTADOS		
24	Densidad seca del suelo total	1,35477746
25	Curva de DENSIDAD VS HUMEDAD	
26	Optimo contenido de humedad (%)	
27	Máxima densidad seca (gr/cm ³)	
28	Porcentaje de compactación (19/22)*100	

Tabla A2. Límites de Atterberg, límite líquido de los suelos (I.N.V.E-125) y el límite plástico e índice de plasticidad de suelos (I.N.V.E-126) zona baja de la ladera

<i>Proyecto :</i>		Deslizamiento Giron-Lebrija zona baja						
<i>Proyectistas :</i>		Eladio Silva Ardila Mario Fernando Reyes Chinchilla						
Ensayo :		LIMITES DE ATTERBERG						
LÍMITE LÍQUIDO		Norma :		I.N.V.E 125				
LÍMITE PLÁSTICO		Norma :		I.N.V.E 126				
Fecha de Muestreo :		14/01/2018						
LIMITES DE ATTERBERG								
		LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO			Límites de Consistencia
Tara Número	Unidades	1	2	3	1	2		
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	18,10	21,10	24,70	9,30	11,30		Límite Líquido: LL = 25,29%
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	15,50	18,70	20,50	8,80	10,60		Límite Plástico: LP = 14,44%
Peso de la Tara	Gr	4,60	8,30	5,50	5,50	5,50		Índice de Plasticidad : IP = 10,85%
Peso de la Muestra Seca	Gr	10,90	10,40	15,00	3,30	5,10		Tipo de suelo CL
Peso del Agua	Gr	2,60	2,40	4,20	0,50	0,70		
Contenido de Humedad	%	23,85	23,08	28,00	15,15	13,73		
Número de Golpes		28	35	18	Promedio :		14,44	
		<div style="text-align: center;"> <h3>LÍMITE LIQUIDO</h3> </div>						
Número de Golpes	Contenido de Humedad (%)							
28	23,85							
35	23,08							
18	28,00							
25	25,287							

Tabla A4. Determinación de la resistencia al corte por método de corte directo I.N.V.E-154

Datos de la muestra					
#	Peso [Kg]	Área [cm ²]	Velocidad	Esfuerzo Normal [Kg/cm ²]	Esfuerzo Cortante [Kg/cm ²]
1	265,9	28,2743339	1[mm/min]	0,28294212	0,68967142
2	243,2	31,1724531	1[mm/min]	0,51327369	0,8212379
3	244,5	31,1724531	1[mm/min]	1,02654738	1,13241008

Gráfica A1. Determinación de la resistencia al corte método de corte directo I.N.V.E-154

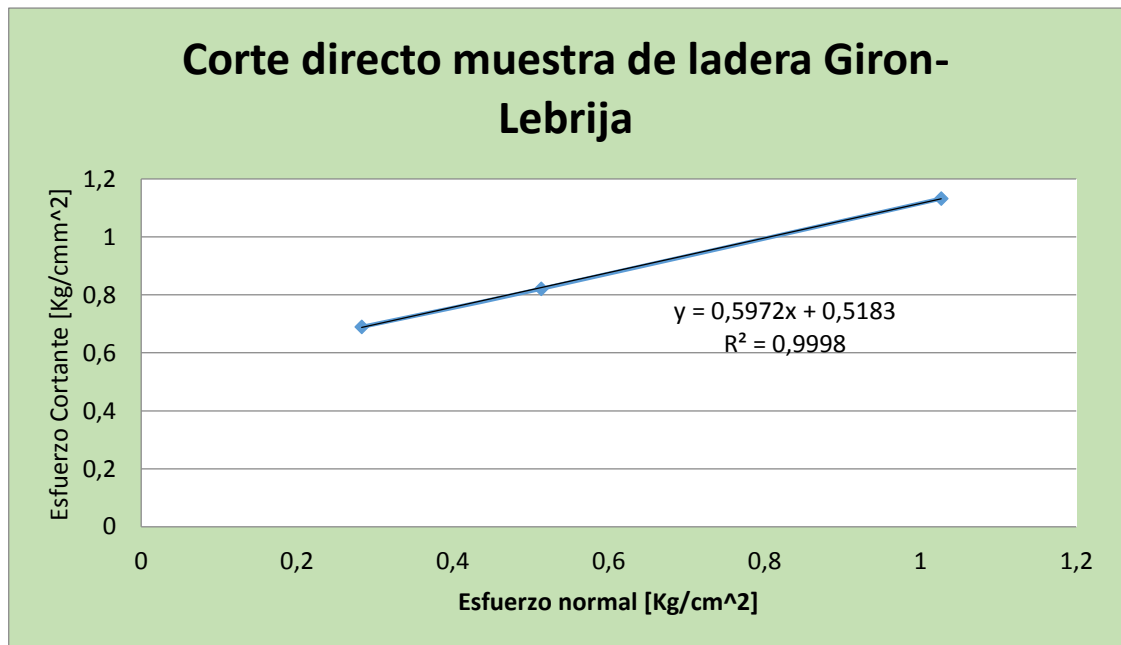


Figura A1. Escarpe principal deslizamiento Girón-Lebrija



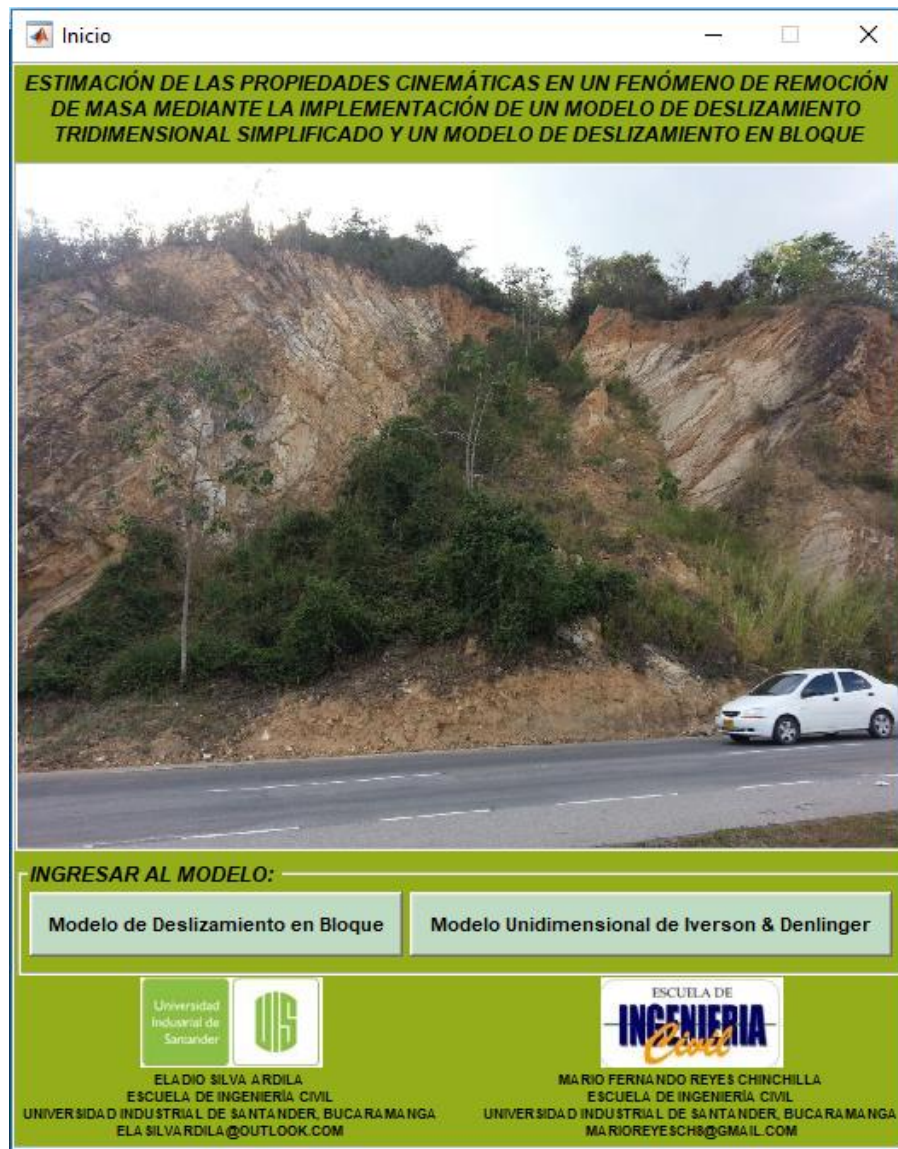
Figura A2. Deslizamiento en cuña vía Girón-Lebrija.



ANEXO B. DESCRIPCIÓN PROGRAMA COMPUTACIONAL MODELO IVERSON & DENLINGER

En la Figura B1, se muestra la interfaz del inicio del programa, que contiene dos botones con los respectivos nombres de los modelos, los cuales al dar click sobre ellos dirigen directamente al modelo seleccionado.

Figura B1. Interfaz del Inicio del programa



La interfaz del programa cuenta con una imagen del deslizamiento y una serie de text box para que el usuario ingrese los valores correspondientes al deslizamiento de estudio, una vez completada esta información el usuario podrá obtener resultados mediante un botón designado como Calcular (Ver Figura B2.)

Figura B2. Interfaz modelo de Iverson & Denlinger

DATOS	
Posición Inicial	0 [m]
Velocidad inicial	0 [m/s]
Ángulo de Fricción de la Cama	30.85 [°]
Densidad del Fluido	1030 [Kg/m ³]
Densidad de la mezcla	1462 [Kg/m ³]
Espesor del Flujo	1.2 [m]
Fracción de Volumen del Fluido	0.4
Ángulo de Inclinación del Talud	34.6 [°]
Viscosidad Dinámica del Fluido	0.1 [Pa/s]
Longitud del Talud	81.51 [m]

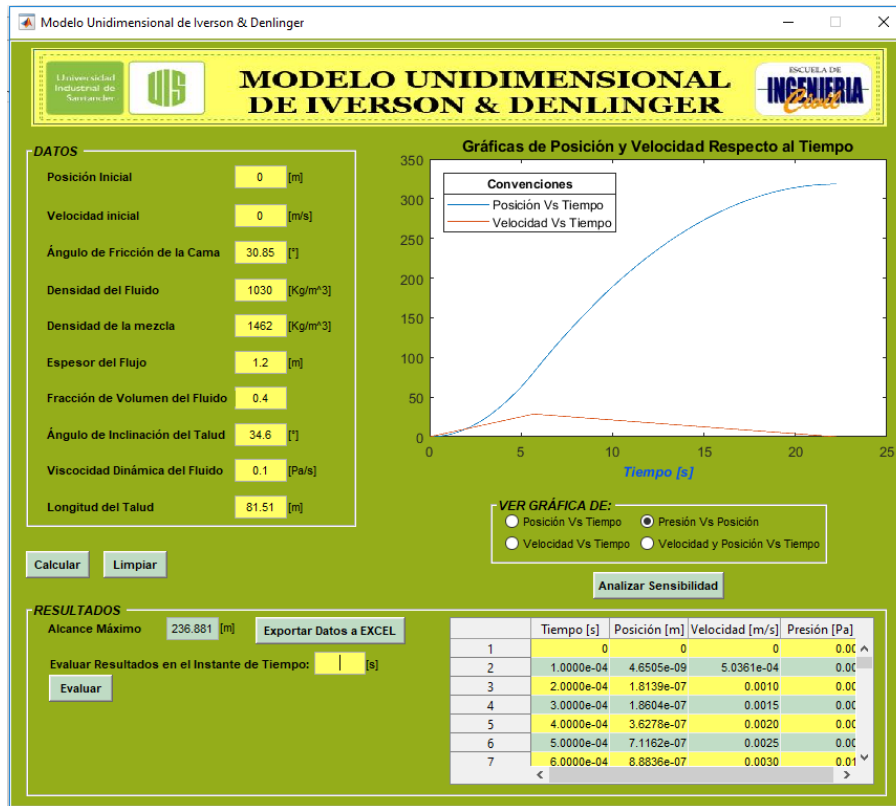
Calcular Limpiar

RESULTADOS

Al correr este se presentan las gráficas a estudio mediante radio botones los cuales serán a selección del usuario con el fin de diferenciar y tabular las gráficas de manera individual. Por otra parte se encuentra la respectiva tabla de respuesta presentando tiempo, posición, velocidad y presión, estos datos se pueden exportar a Excel mediante el botón Exportar Datos a EXCEL. El programa ofrece la respuesta del alcance máximo en un text box y le permite al usuario definir en qué punto desea

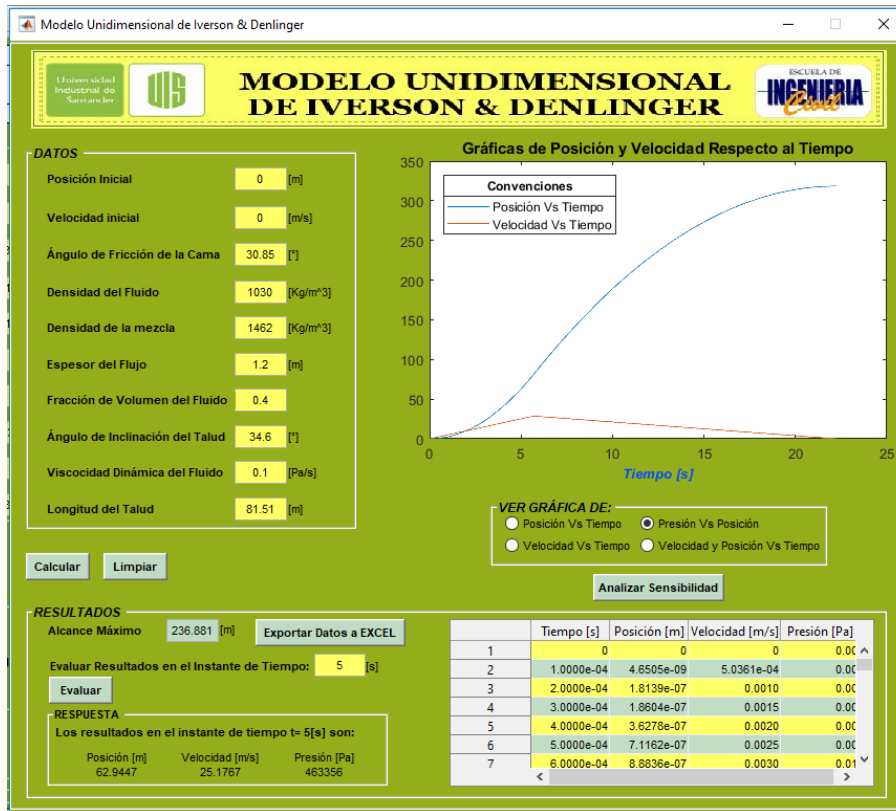
evaluar las propiedades cinemáticas a lo largo del tiempo en que se desarrolla el deslizamiento (Ver Figura B3.)

Figura B3. Interfaz Iverson & Denlinger al dar click sobre el botón calcular



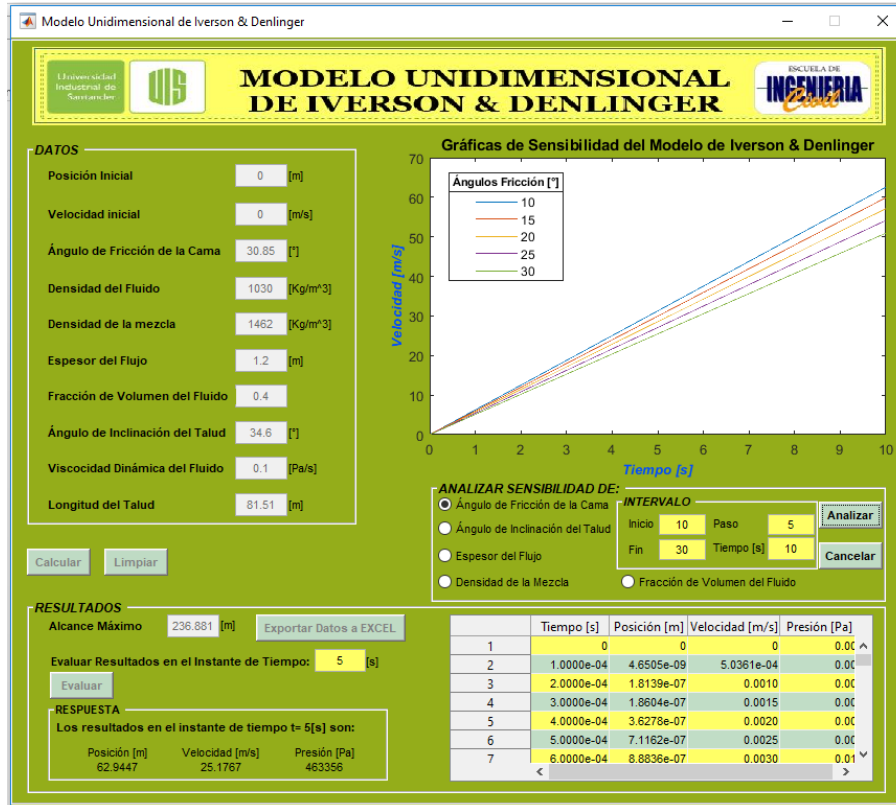
En la Figura B4, se pueden apreciar los resultados en un determinado instante de tiempo, habiendo dado click previamente sobre el botón Evaluar.

Figura B4. Interfaz Iverson & Denlinger al dar click sobre el botón Evaluar



Finalmente como se observa en la Figura B5, el programa permite realizar el respectivo análisis de sensibilidad para los parámetros que defina el usuario, teniendo en cuenta que trabaja con 5 parámetros que pueden generar influencia en los resultados, esta acción se realiza mediante un botón denominado Analizar Sensibilidad, una vez seleccionado, el usuario definirá mediante radio botones que parámetros desea modelar mediante las opciones: Ángulo de fricción de la cama, Ángulo de inclinación del Talud, Espesor de flujo, Densidad de mezcla y Fracción de Volumen del Fluido; estas 5 opciones contarán con un intervalo de inicio, paso y fin que el usuario definirá según los parámetros que desee calibrar para estimar la sensibilidad.

Figura B5. Interfaz Iverson & Denlinger al dar click sobre el botón Analizar Sensibilidad



ANEXO C. DESCRIPCIÓN PROGRAMA COMPUTACIONAL MODELO DE DESLIZAMIENTO EN BLOQUE

La interfaz presentada en la Figura C1 es muy parecida a la del modelo de Iverson y Denlinger en donde se aprecia el uso de text box para completar la información necesaria para modelar mediante el botón calcular. Una vez corrido el programa este genera la respectiva respuesta en una tabla que ofrece resultados de distancia recorrida, velocidad y presión, por otra parte el programa permite obtener la respuesta en formato de gráficas, las cuales podrán ser seleccionadas mediante radio botones por el usuario para así tener las dos respuesta correspondientes a Velocidad vs Posición y Presión vs Posición.

Figura C1. Interfaz modelo de deslizamiento en bloque

Modelo de Deslizamiento en Bloque

Universidad Industrial de Santander

ESCUELA DE INGENIERIA

MODELO DE DESLIZAMIENTO EN BLOQUE

DATOS

Densidad de la Mezcla	1462 [Kg/m ³]
Ángulo de Fricción del Talud	30.85 [°]
Ángulo de Fricción Zona Plana	30.85 [°]
Ángulo de Inclinación del Talud	34.8 [°]
Longitud del Talud	81.51 [m]

Calcular Limpiar

RESULTADOS

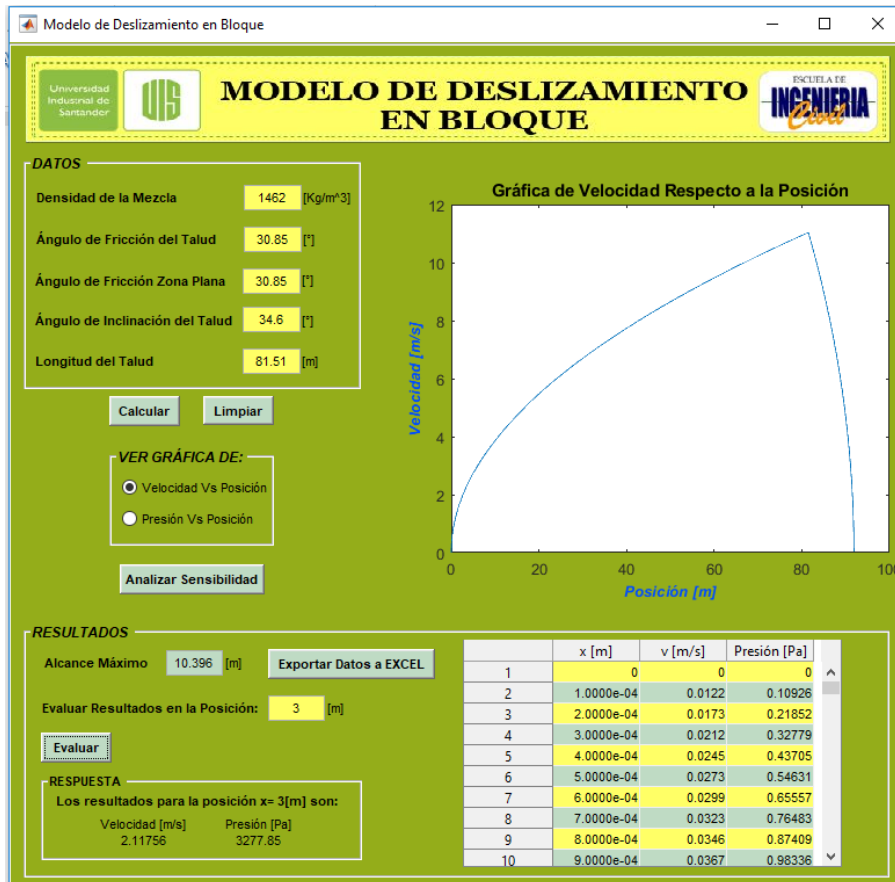
Al igual que en la programación de Iverson & Denlinger el programa del modelo de deslizamiento en bloque ofrece la respuesta del alcance máximo mediante un text box y permite que el usuario conozca los resultados para las propiedades cinemáticas mediante el ingreso de la posición en un text box que genera la respuesta de velocidad y presión mediante un botón denominado Evaluar, como se muestra en la Figura C2.

Figura C2. Interfaz modelo de deslizamiento en bloque al dar click sobre el botón calcular



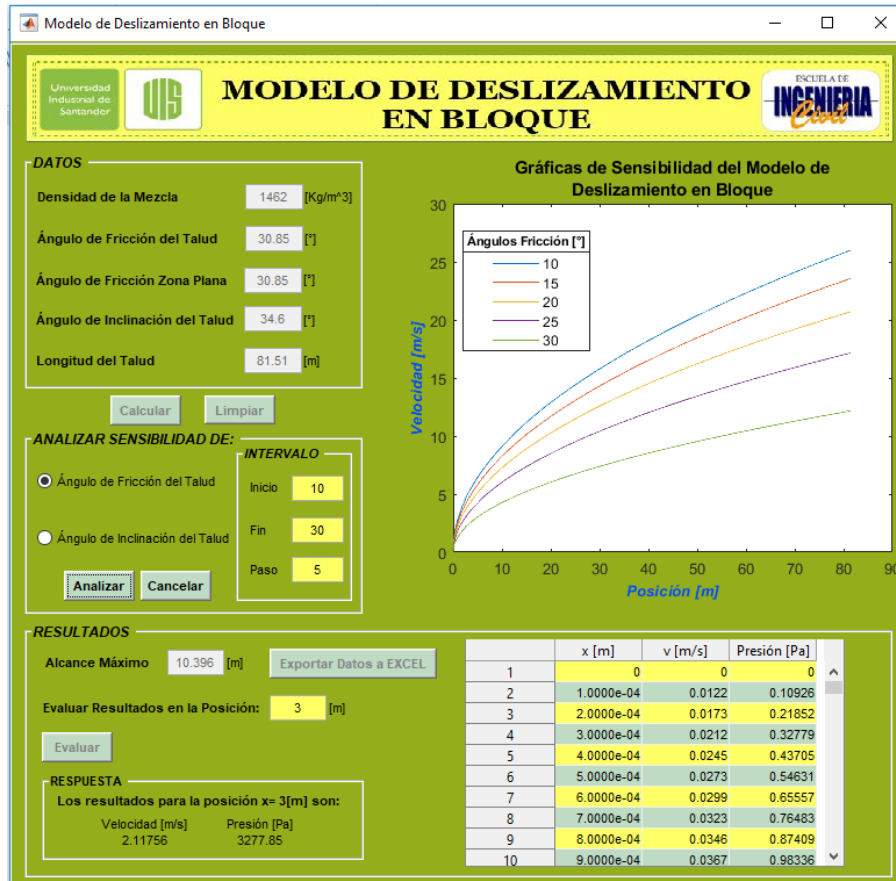
En la Figura C3, se pueden apreciar los resultados en una determinada posición, habiendo dado click previamente sobre el botón Evaluar.

Figura C3. Interfaz modelo de deslizamiento en bloque al dar click sobre el botón Evaluar



Por otra parte cuenta con un botón denominado Analizar Sensibilidad con el que el usuario podrá realizar los respectivos análisis de sensibilidad de los parámetros que más influyen en el modelo, esto mediante el uso de dos radio botones denominados Ángulo de Fracción del Talud y Ángulo de Inclinación del talud, una vez seleccionado alguno el usuario contará con tres text box en los cuales ingresara valores para inicio, fin y paso del parámetro que desee evaluar, completada esta información se grafica el respectivo análisis mediante el botón Analizar generando respuesta tanto en tabla como gráfica, como se evidencia en la Figura C4.

Figura C4. Interfaz modelo de deslizamiento en bloque al dar click sobre el botón Analizar sensibilidad



Toda la información generada al correr el programa podrá ser exportada a Excel mediante el botón Exportar Datos a EXCEL el cual abrirá una ventana de guardado la cual mediante text box le pedirá al usuario ingrese el nombre del archivo que desea guardar y la correspondiente dirección donde desea crear el archivo .xls una vez completados estos campos el usuario podrá guardar su respectivo archivo para trabajar directamente desde Excel, como se muestra en la Figura C5.

Figura C5. Interfaz modelo de deslizamiento en bloque al dar click sobre el botón Exportar Datos a EXCEL

