Revista Unimar
Número 60
Julio-Diciembre, 2012, 43-54
ISSN 0120-4327
ISSN - E- 2216-0116

DINÁMICA DE FLUJO DE LODOS*

DINAMICS OF THE FLOWS OF MUDS

Jaime Efrén Insuasty Enríquez**
Docente Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Colombia.

Fecha de recepción:
14 de julio de 2012
Fecha de aprobación:
31 de octubre de 2012

Palabras clave:
Flujo de lodos, coeficiente de fricción, deslizamientos, simulación, planeamiento, vulnerabilidad.

RESUMEN

Los flujos de lodos o *lahares* son fenómenos que causan grandes catástrofes a nivel mundial. Su estudio muestra que las lluvias son las causantes principales de deslizamientos de tierra, que igual a las erupciones volcánicas, depositan material sólido en las corrientes de agua, que a su vez impactan en poblaciones con planeación territorial deficiente.

En este trabajo se presentan las condiciones de vulnerabilidad ante el flujo de lodos, analizando los diferentes parámetros que intervienen. Además, se describen algunos modelos para simularlos, lo cual permite evaluar su incidencia en determinadas zonas y establecer planes de gestión del riesgo ante estos eventos.

Como se puede observar, el planeamiento urbano de las ciudades es básico para la mitigación del riesgo que pueden generar los flujos de lodos.

Key words:
Flow of muds, coefficient of friction, slips, simulation, planningn, vulnerability.

ABSTRACT

The flows of muds or lahares are phenomena that cause big catastrophes at world level. The study of these phenomena shows that the rains are the causing ones main of earth, slips that similar to the volcanic eruptions, they deposit material been accustomed to in the currents of water, that they impact in populations with faulty territorial planning.

In this work the vulnerability conditions are presented before flow of muds, analyzing the different parameters that intervene. Furthermore, some models are described to simulate, allowing to evaluate its incidence one certain areas and to establish plans of administration of the risk before these events.

As can be observed, the urban planning of the cities is basic for the mitigation of the risk that they can generate the flows of muds.

* Artículo de Revisión Bibliográfica.

** Ingeniero Civil, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia; Estudiante Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Colombia.
Correo electrónico: jaiminsu@gmail.com

La revisión realizada sobre dinámica de flujo de lodos, está orientada inicialmente a registrar los eventos que han ocurrido en el mundo y las consecuencias que se han generado. En esta parte se identifican las causas que originan el fenómeno y que generalmente están ligadas al factor humano; luego se hace un análisis de la vulnerabilidad que se puede presentar ante un flujo de lodos, estudiando diferentes factores de incidencia; estos últimos tienen mucho que ver con nuestra región, al sur andino de Colombia, pues las condiciones geomorfológicas e hidrológicas de la zona, son similares a aquellas donde han ocurrido catástrofes, debido al impacto generado por los flujos de lodos.

Por consiguiente, se presentan algunos modelos que tratan de simular el fenómeno determinando, las características inícials y finales del flujo, estimando volúmenes de deslizamientos depositados en una corriente, espesores de flujo a determinadas distancias y tiempos, diagramas de velocidades y presión, a partir de modelos de mecánica de fluidos.

Es importante el estudio y el modelamiento de la dinámica de los flujos de lodos, porque puede servir de base a las entidades gubernamentales, principalmente en el momento de realizar planes de gestión del riesgo, ya que las emergencias generalmente producen improvisaciones que llevan a un ordenamiento urbano deficiente, arriesgando la vida de las personas.

El flujo de lodos se origina al combinarse el agua con sedimentos provenientes de deslizamientos de tierra o depósitos de materiales piroclásticos. Generalmente, predominan sedimentos de suelos con partículas finas como limo y arcilla en altas concentraciones, aunque también pueden transportarse grandes bloques o cantos de roca. El flujo se comporta como una suspensión homogénea con una onda frontal y una serie de pulsaciones (Suarez, 2009). A continuación, se realiza una mirada al estado del arte investigativo de dicho fenómeno.

1. **Antecedentes**

Los flujos son uno de los desastres naturales más catastróficos en cuanto a pérdidas económicas y dejan muchos lesionados y fallecidos en todo el mundo. Por ejemplo: La Figura 1, muestra un flujo de lodos que destruyó la ciudad de Carmen de Uría en el Estado Vargas en Venezuela en 1999; la ciudad de aproximadamente 2.500 habitantes, fue prácticamente borrada del mapa, el 50% de las edificaciones desaparecieron por la fuerza del torrente del flujo de lodos en el Río Uria y el 90% de las construcciones se consideraron inservibles por los daños estructurales causados. "El río se salió de su curso y abrió un cañón de 30 metros (m) de ancho y 7 m. de profundidad, en donde antes habían viviendas de una, dos y hasta tres plantas." (Rivero, 2009).

Figura 1. Flujo que destruyó la ciudad de Carmen de Uría, Estado de Vargas, Venezuela, año 2009.
Fuente: Suarez Díaz, J. (2009) *Deslizamientos Volumen 1: Análisis geotécnico.* Bucaramanga: División de Publicaciones Universidad Industrial de Santander, p. 173.

Los países más afectados por flujos en el mundo son los andinos: Perú, Colombia, Ecuador y Venezuela, situados en el área tropical (Suarez, 2009). Los flujos de lodos de origen volcánico se conocen como *"lahares"*, término indonesio para nombrar ese fenómeno (Suarez, 2009).

En Colombia se produjo un flujo de lodos que fue generado por el deshielo del cono del Volcán Nevado Del Ruiz, en noviembre de 1985, este arrasó con la ciudad de Armero en el departamento del Tolima. La erupción de este volcán nevado produjo cuatro *lahares*, que afectaron al Río Lagunilla porque alcanzó un volumen y una velocidad considerable, el paso del flujo cubrió el valle donde estaba ubicaba la ciudad, acabando con la vida de aproximadamente 25.000 personas de las 30.000 que allí vivían. Igual que en Carmen de Uría, Armero fue declarado campo santo.

De manera similar, este tipo de fenómenos se presentan en el sur de Colombia, más específicamente en la vereda Moncayo del municipio de La Cruz (departamento de Nariño); allí, el 12 de diciembre de 2012, una avalancha en el Río Mayo produjo un flujo de lodos que sepultó tres viviendas y dejó 15 personas desaparecidas. Además, la ciudad de San Juan de Pasto, en los últimos años, también se ha visto afectada por estos flujos generados por el desbordamiento

de los cauces de las quebradas Mijitayo y Guachucal, lo que ha causado desastres, ante todo económicos; la Figura 4, muestra una inundación de la carrera 27 entre calles 13 y 14 por desbordamiento de aguas de la quebrada Mijitayo.

La Quebrada Mijitayo, nace en las estribaciones del Volcán Galeras, entra a la ciudad y la recorre de occidente a oriente hasta su desembocadura en el Río Pasto. Generalmente ocurren deslizamientos de tierra en la parte alta de la quebrada, generando un flujo de lodos que transita por este canal natural. Además, se debe considerar la influencia del volcán, que en sus erupciones puede depositar material piroclástico generando *lahares*.

Antes de entrar a la ciudad, a la altura de las instalaciones de la planta de potabilización de agua de la Empresa de Obras Sanitarias de Pasto (Empopasto), la quebrada se encauza por un canal rectangular cerrado llamado *box culvert*. Cuando se genera un flujo de lodos considerable, el *box culvert* se tapona con los sólidos transportados, y éste comienza a correr sobre las calles dispersándose de tal manera que causa inundaciones en los barrios que están ubicados en la entrada de la ciudad, afectando a un gran número de habitantes, y a instituciones importantes como: la Planta de Agua Potable Mijitayo, el Colegio San Felipe Neri, el Colegio Filipense, el Instituto Nacional de Educación Media, INEM, entre otros, (ver Figura 2).

Figura 2. Flujo de lodos en el sector de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Empopasto, San Juan de Pasto, Colombia.
Fuente: cortesía Ingeniero Juan Carlos Narváez.

Como muestran los antecedentes, los flujos de lodos impactan considerablemente a la población, con la pérdida de vidas humanas y por ende con consecuencias económicas considerables. El estudio de los *lahares* cobra mucha importancia en la ciudad de San Juan de Pasto (Nariño, Colombia), ya que este fenómeno puede presentarse en cualquier momento, y la mitigación de sus efectos obedece, ante todo a una acertada planificación de la ciudad, pues en cuanto a la dinámica geomorfológica se refiere, existe una estrecha relación entre la naturaleza y el ser humano (Alvarado, Durán, Fallas & Hernández, 2006).

Los procesos de urbanización ejercen efectos negativos en las laderas y, por lo tanto: "Las medidas de prevención y mitigación contra los efectos de los desastres deben considerarse como parte fundamental de los procesos de desarrollo integral a nivel regional y urbano, con el fin de reducir el nivel de riesgo existente" (Burón, 2003). El planeamiento urbano debe, entonces, ayudarse en el empleo de metodologías que permitan establecer el riesgo. Las avenidas torrenciales pueden analizarse incluso con métodos cualitativos basados en factores topográficos, geográficos y geomorfológicos que se pueden confrontar con evidencias históricas de los eventos (Montoya, Silva & González, 2009).

Adicionalmente debe pensarse también en la instalación de redes geodésicas, que permiten modelar el comportamiento de los flujos de agua en las corrientes hídricas, es decir, modelar los comportamientos de los cauces en diferentes situaciones (Bastidas, Cárdenas, Ramírez & García, 2004). Los procesos hidrológicos en las cuencas deben analizarse considerando diferentes indicadores: precipitación, tipos de suelos, elevación, interceptación, infiltración, escorrentía, red de drenaje, entre otros, (Quesada & Marsik, 2007). También deben tenerse en cuenta los mapas de inventarios de procesos geodinámicos que son una herramienta básica para evaluar los riesgos en una determinada región (Moreiras, Lenzano & Riveros, 2008).

2. **Caracterización de eventos generados por flujo de lodos**

A nivel mundial se han caracterizado las posibles causas de los flujos de lodos y la dinámica que estos han desarrollado al desplazarse por la topografía local. El Volcán Temascalcingo, en México, produjo una avalancha de escombros que se desplazó 7 kilometros (km), cubrió un área de 23 km^2 y depositó un volumen mínimo de 0.8 km^3 de material (Roldan, Aguirre & Castañeda, 2011). Otro proceso de deslizamiento en laderas producido por intensas lluvias, fue el ocurrido en Teziutlán, Puebla, México, éste ocasionó la pérdida de vidas de más de 100 personas y muchos daños en la infraestructura local (Flores & Alcántara, 2002).

En Nicaragua, en el año 1998, ocurre un *lahar* en el Volcán Casita, ubicado en la cordillera de los Maribios, cerca a la capital Managua, zona altamente volcánica y perteneciente al cinturón de fuego. El *lahar* se origina por las precipitaciones que trae consigo un huracán. La avalancha de flujos de lodos inicial envolvió un flanco del volcán, llegando a la base del volcán con una concentración de sedimentos menor al 60% en volumen. Sin embargo, el flujo entre los 3 y 5 km, ya tenía la suficiente cantidad de sedimentos para ser considerado un flujo de lodos, el que alcanzó hasta 6 km aguas abajo, con un ancho entre 1 y 2 km y espesores o tirantes de flujo de 3 a 6 m. El flujo de lodos ocasionó 2.500 muertes de personas y arrasó casi completamente las localidades de El Porvenir y Rolando Rodríguez (Scott, Vallance, Kerle, Macias, Strauch & Devoli, 2004).

El 4 de octubre de 2005, debido a las lluvias asociadas al Huracán Stan, el nivel del agua del Río Coatán, que recorre el sector occidental de la ciudad de Tapachula en Chiapas, México, se desbordó produciendo un flujo de lodos, dejando 2.000 casas desaparecidas, 100.000 personas damnificadas y la destrucción de la red ferroviaria y de cuatro puentes. La precipitación en la zona duró 6 días; la catástrofe ocurrió en al tercer día. La carga de agua en el río, inundó las terrazas más bajas y erosionó la base de otras que estaban conformadas por depósitos jóvenes en los que se encontraron fragmentos de plástico, tela, vidrio y alambre. A lo largo del río, aún se encuentran zonas urbanizadas que son vulnerables a inundaciones; las lluvias alcanzaron periodos de retorno de 20 años, con precipitaciones hasta de 240 milimetros (mm) (Murcia & Macias, 2009).

Almuñécar es una población de la provincia de Granada en la Comunidad autónoma de Andalucia, España, allí en el año 2007 se presentó un fenómeno hidrológico denominado "gota fría" y tiene que ver con una Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA), se generaron lluvias torrenciales que alcanzaron niveles inusuales. Sólo en Almuñecar el número de damnificados fue de 2.500 personas y las pérdidas económicas fueron cuantiosas. La catástrofe tuvo como factores claves: la ocupación de las llanuras inundables; y de la desembocadura de los ríos, la disposición en pendiente de las viviendas de la parte vieja de la ciudad; el estrechamiento y desvió de los canales fluviales por las construcciones aledañas; y, la excesiva confianza que entregaba un cauce que generalmente permanecía seco (Olmedo & Villacreces, 2007).

En este caso, el ordenamiento urbano de este municipio y de otros que se vieron afectados en la provincia de Granada, por las lluvias del 21 de septiembre de 2007, no fue el adecuado al permitir construcciones en zonas de protección ambiental y donde los ríos desarrollaban su curso natural. El gobierno local tuvo entonces, mucha responsabilidad en las consecuencias finales que produjeron el flujo de lodos, generado por el desbordamiento de los ríos y que destruyó muros de contención, arrastró vehículos y afectó considerablemente la zona costera, donde se depositaron finalmente los escombros que trajo la corriente.

Los tsunamis pueden ser inducidos por movimientos en masa junto con la acción sísmica. Estos fenómenos han producido muchas muertes y daños al generar flujo de lodos de grandes volúmenes, que a la vez aumentan su efecto cuando ocasionan remociones en masa en las laderas de las riberas de los ríos. Estos procesos fueron novedosos en la zona produciendo confusión y errores en el manejo de la emergencia. Las catástrofes enunciadas anteriormente, indican que el flujo de lodos puede ocurrir en cualquier parte del mundo y causar grandes catástrofes. La ciudad de San Juan de Pasto en Colombia, presenta características geomorfológicas, hidrológicas y topográficas muy similares, a las de los ejemplos mostrados. La Figura 3, muestra la ubicación del Volcán Galeras, la Quebrada Mijitayo y dicha ciudad. Esta fotografía es una cortesía del Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas), y sirve para detallar la zona de afectación, por lo que es necesario realizar un modelo matemático en la zona de mayor vulnerabilidad, que es el sector por donde la Quebrada Mijitayo entra a la ciudad (Narváez & Rosero, 2005).

Figura 3. Zona de mayor vulnerabilidad para flujo de lodos en Pasto – Colombia.
Fuente: Narváez, C., Rosero, N. (2005) *Modelamiento del Control Topográfico Ejercido por el Valle de Atríz sobre los Flujos de Lodo Provenientes de la Quebrada Mijitayo*. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño, p. 23.

3. **Vulnerabilidad respecto a los flujos de lodos**

La vulnerabilidad es la posibilidad de sufrir daños por efecto de un fenómeno, en este caso natural. Con respecto al flujo de lodos, dependerá de muchos factores, como: las características de los suelos que pueden sufrir deslizamientos, la geomorfología de las laderas, la hidrología de la zona, el caudal de los ríos depositarios de los suelos deslizados, la geometría de la sección del cauce del río, la topografía del lecho del cauce y de las zonas aledañas, así como también de los asentamientos humanos que se ubiquen en la zona de afectación.

Por otra parte, con respecto a las características de los suelos, son importantes los ángulos de fricción interna y el ángulo de fricción basal que estos presenten, el ángulo de fricción interna se define como la fricción que se produce en la interacción entre partículas del material que fluye y se mide como la pendiente que se puede formar cuando el material colapsa por su propio peso, al ser colocado en una superficie plana. El ángulo de fricción basal es otra medida de la interacción entre partículas y es equivalente a la pendiente que se forma con la horizontal cuando el material comienza a deslizarse naturalmente desde su posición estática (TITAN2D manual del usuario 2010). La Tabla 1, presentada por Stinton, Williams y Sheridan (2004) muestra valores de los ángulos mencionados (García et al, 2011).

Tabla 1. ***Coeficientes de fricción basal y ángulos de fricción basal, según Stinton et al. (2004).***

Material / Superficie	Coeficiente de fricción basal	Ángulos de fricción basal
Hielo glaciar y nieve	0.037-0-50	2-26°
Depósitos aluviales	0.10-0.20	6-11°
Pendientes con vegetación	0.21-0.75	12-37°
Depósitos glaciofluviales	0.15-0.30	9-17°
Roca fresca	0.38-0.95	21-44°

Fuente: Stinton, Williams y Sheridan (2004).

Los valores que corresponden al Volcán Galeras, se ajustan a depósitos glaciofluviales según el estudio realizado para el análisis de flujos piroclásticos de dicho volcán (García et al, 2011).

Se considera que la fricción es baja, cuando los ángulos de fricción están entre 20 a 27° (Suarez, 2009). Considerando este aspecto se puede establecer que los taludes del Volcán Galeras son susceptibles a deslizamientos, por lo que la vulnerabilidad de la zona es alta.

Otro parámetro importante para evaluar la posibilidad de deslizamiento de un talud es el ángulo de reposo, con el que se puede determinar el valor máximo de la inclinación que puede tener un talud (Rodas &. Rousé, 2010).

La relación de Poisson, es la deformación lateral que se produce en un cuerpo al aplicarle cargas verticales. La experimentación ha mostrado que ésta se reduce en el subsuelo por la alta intensidad de las fuerzas laterales generadas en los deslizamientos de suelos (Abdoullah & Khodashenas, 2009). La saturación de los suelos es un factor de alerta en cuanto al inicio de deslizamientos en las laderas. La saturación es producto de la infiltración. Las propiedades del suelo que influyen en la infiltración son la conductividad hidráulica y la pendiente del talud junto con la intensidad y duración de la lluvia (Mora & Rojas, 2009).

En cuanto a la geomorfología de las laderas mucho de los deslizamientos se han producido por particularidades de este factor presentes en los sistemas montañosos del mundo. El fracturamiento de la tierra obedece generalmente a movimientos sísmicos que generan movimientos rototraslativos y caída de bloques (Arreygue et al., 2002). Las zonas donde se detecten estos fenómenos merecen importante atención porque pueden ser susceptibles a deslizamientos.

En un análisis de la evolución geomorfológica del Valle de Aburra (Aristizábal & Shuichiro, 2008) se concluye que para la ocurrencia de eventos de remoción en masa ha existido intervención humana inapropiada. Sin embargo, estos eventos obedecen sobre todo, a las características geomorfológicas del valle que muestra un alto grado de removilización de depósitos de vertiente, que tienen que ver con el origen y la conformación del mismo. El predominio de estructuras geológicas plegadas, con alternación de rocas de distintas competencias, son indicativos de posibles procesos de remoción en masa (Capra, Lugo & Zamorano, 2006). Estas características son frecuentes también en la región de Zacapoaxtla en Puebla, México (Hernández, Garduño & Alcántara, 2007).

Los complejos morfolitológicos que se caracterizan por formar taludes se ven influenciados por la erosión lineal (Montiel et al., 2007). Al faltar la cobertura vegetal, el agua puede permear fácilmente en el suelo aumentando la vulnerabilidad ante deslizamientos. Generalmente los asentamientos humanos ocurren en estos lugares de alta peligrosidad.

Además, la morfología del cause se puede afectar por los depósitos de troncos arrastrados por los deslizamientos (Andreoli, Carlig, Comiti & Iroumé, 2007); estos depósitos pueden causar represamientos y disminuir la sección del canal natural.

La susceptibilidad de los deslizamientos aumenta por una alta complejidad tectónica y diferentes propiedades físicas que contribuyen a la disminución de la resistencia al corte de los suelos y rocas (Almaguer, 2005). "Los fenómenos geológicos de deslizamiento de laderas, se presentan en todos los países del mundo que tienen una morfología de tipo montañoso y escarpado, incluyendo Estados Unidos, Canadá, México, Centro y Sudamérica, Europa y Asia" (Cuanalo, Quezada, Aguilar, Olivan & Barona, 2006).

La hidrología de la zona es un factor preponderante en el fenómeno de flujo de lodos, ya que las lluvias son generalmente, las que inician los procesos de remoción en masa. Es usual que los pronósticos hidrológicos presenten fallas que son debidas a los modelos empleados para su representación (Barrios & Olaya 2007), esto representa un grave problema cuando se elaboran mapas de riesgo y de mitigación de impactos de lluvias. De igual manera, fenómenos climáticos como el del niño, dificultan los pronósticos de lluvias, ya que alteran los registros históricos de pluviometría en esta zona del continente.

Los fenómenos del niño y de la niña también han ejercido una influencia importante en lo concerniente a deslizamientos. En un estudio sobre la relación entre la lluvia y los deslizamientos de suelos en Antioquia, Colombia, (Moreno et al., 2006), se muestra cómo los deslizamientos aumentan en la fase húmeda (fenómeno de la niña), ya que los suelos que se han secado en la fase seca (fenómeno del niño), se saturan fácilmente. Se propone un umbral para la ocurrencia de deslizamientos que es una lluvia antecedente de tres días y precedente de 15 días, siendo esta última la que genera deslizamientos. Sin embargo, el umbral presentado necesita refinamiento para poder establecer un sistema de alerta temprana en un proyecto de prevención del riesgo ante deslizamientos.

El caudal de los ríos y quebradas que reciben el material deslizado convirtiendo el fluido en un flujo de lodos, depende directamente del régimen de lluvias en la zona. En un análisis de flujo de lodos generado por lluvias intensas en junio de 2003 en el flanco sur del Volcán Pico de Orizaba en Citlaltépetl, México (Rodríguez et al., 2006), se muestra como una lluvia de 150 mm/hora registrada en la parte baja del Río Chiquito y que de por sí es un valor alto, no produjo flujo de lodos. A pesar de esto, una precipitación del orden de 50-100 mm/h, ocurrida en la parte alta del río, generó un flujo de lodos que inundó las zonas bajas produciendo daños cuantiosos, incluso se rompió un poliducto que cobró vidas humanas. Aunque se dice que una lluvia de 50 a 100 mm/h, ya produce flujo de lodos, la entidad gubernamental encargada de la hidrología registró lluvias del orden de 260 mm, generando un caudal de 350 m^3/s.

El análisis de la topografía del cauce y de las zonas aledañas, muestra la influencia de éstas en la constitución y desplazamiento del flujo de lodos. Los ríos y quebradas con pendientes grandes, tienen una velocidad de flujo más alta y por lo tanto, para una sección transversal del canal natural, transportará un caudal mayor. El cálculo de la velocidad se lo determina analíticamente utilizando la ecuación de Manning, donde la velocidad depende de manera directamente proporcional del radio hidráulico (relación entre el área mojada y el perímetro mojado de la sección), y de la pendiente del fondo del canal que es inversamente proporcional a la rugosidad del canal. Los *lahares* también pueden modelarse con la ecuación mencionada de manera aproximada. Las pendientes de la Quebrada Mijitayo fueron calculadas en promedio en 10.2° (Dawn, 2010).

La actividad volcánica es una fuente natural de contaminación y aporta mucho material contaminante en especial a la atmósfera (Rivera, Santos & Cedillo, 2005). Como se dijo anteriormente, los *lahares* son flujo de lodos que arrastran materiales provenientes de los volcanes; se activan generalmente cuando se produce una erupción volcánica que produce el deshielo de los casquetes en los volcanes nevados, o cuando el material piroclástico se deposita a lo largo del curso de un río o quebrada como puede ser el caso de la ciudad de San Juan de Pasto, (al sur de Colombia), donde el sistema volcánico Galeras,

puede afectar los cursos de los ríos que nacen en él, y que pueden afectar varias poblaciones aledañas dentro del área circunvalar a sus cráteres.

4. **Modelos para analizar el flujo de lodos**

Los flujos de lodos desencadenan casi siempre eventos catastróficos que pueden causar daños económicos y sobre todo poner en peligro la vida humana. Es necesario entonces, implementar modelos matemáticos que representen el fenómeno, indicando su potencial de daño y el área de cobertura que pueden alcanzar al propagarse por determinada topografía.

Un flujo de lodos es un flujo esencialmente bifásico: la fase líquida está conformada por agua y la fase sólida son los depósitos de suelos de deslizamientos de laderas o de erupciones volcánicas. La mecánica de fluidos y la mecánica de suelos, estudian cada aspecto por separado sin detenerse en los flujos bifásicos. Por lo tanto, se ha recurrido a modelos experimentales para determinar el comportamiento de estos flujos, con base en diferentes parámetros.

El objetivo de una simulación es encontrar los perfiles de velocidad y de presión, en función de la distancia y el tiempo en que ocurre un flujo bifásico (Mendoza et al., 2004). Es decir, de acuerdo a las condiciones iniciales en que se produce el flujo como son: volumen del deslizamiento o del depósito de material piroclástico, ángulos de fricción interna, basal y el ángulo de reposo, caudal del río, altura inicial del agua, topografía y sección del canal natural, concentración de sólidos, características del material arrastrado, entre otros; se emplea una ecuación de propagación de fluidos para establecer las condiciones señaladas en un determinado tiempo y espacio.

Iverson, Logan, Lahusen y Berti, (2010), hacen una colección de 28 experimentos que muestran las características de un flujo de lodos, para cada prueba; la mezcla de lodos saturados se compuso principalmente de arena y arena gruesa, descargado desde un depósito y descendiendo 95 m hasta formar un depósito horizontal cuando está cerca a detenerse. Con sensores se midieron espesores de flujo, tensiones normales basales, y las presiones de poro basal. Las presiones del flujo demuestran que los flujos de lodos en todos los subconjuntos desarrollados, se dilatan, forman granos toscos o gruesos y altas cabezas de fricción.

Huang y García, (1998), elaboran un modelo bidimensional (*software*) de un depósito de lodos y su circulación como flujo de lodos sobre pendientes relativamente empinadas. El lodo en consideración tiene las propiedades reológicas de un fluido tipo Herschel–Bulkley: el fluido tiene un bajo número de Reynolds y forma frentes de ondas a una larga distancia abajo de la pendiente. Debido a que las características reológicas son no lineales, se plantean ecuaciones diferenciales parciales no lineales para resolver el problema de la trasiente que se forma. Las ecuaciones de espesor continuo y momento son derivadas aplicando el método de integración de *momentum* de Von Karman. Los resultados encontrados teóricamente con experiencias prácticas son razonables. Al final se muestra que el modelo debe pararse cuando se deposita en forma alargada y con poco espesor.

Hernández (2011), desarrolla un método de análisis que permite calcular los empujes en un muro de gravedad afectado por el movimiento de una masa viscoplástica, además del cálculo de los desplazamientos, velocidad y aceleración que desarrollaría la masa. El método también permite determinar la longitud crítica de la masa en movimiento que conduzca al desbordamiento del muro. El método de análisis se basa en la integración de las ecuaciones constitutivas del suelo y la superficie de falla junto con la ecuación de movimiento de Newton, y su solución numérica se plasmó en el programa GeoCtVp. El programa calcula y grafica los desplazamientos, velocidades, aceleraciones, empujes de la masa, además de la variación del perfil del terreno.

Sin embargo, aunque el modelo matemático del presente caso corresponde a flujos bifásicos, también existen modelos que permiten establecer parámetros de alimentación. Botero y Romo, (2006), proponen un nuevo método para evaluar la estabilidad de una gran variedad de estructuras, estableciendo la variabilidad espacial del factor de fricción en la interfaz del deslizamiento.

Betancourt, Palacio, Rodríguez y Fuentes del Río, (2007), usan una analogía de flujo compresible para analizar el comportamiento de aguas de poca profundidad en canales. Mediante un enfoque histórico, lógico y de experimentación pasiva, se proponen también recomendaciones para el desarrollo de pronósticos de concentraciones de sólidos en lodos. (Mariño, Falcón, Sales & Almenares, 2007).

Del Valle, Arjona, Bueno y Oleschko, (2009), diseñan e implementan una herramienta de simulación interactiva para evaluar parámetros hídricos del suelo:

infiltración, ascenso capilar, evapotranspiración y escurrimiento superficial. Hacen énfasis en la eficiencia computacional de los algoritmos numéricos para solucionar las ecuaciones diferenciales no lineales planteadas en el problema. El sistema se ha validado en diferentes escenarios con diferentes valores potenciales de efectos del agua. Códigos computacionales como "Retraso", hacen simulaciones transportando fluidos disueltos y gaseosos con problemas de saturación e instauración. (Saaltink, Ayora, Carrera & Olivella 2004).

Murillo y García, (2012), construyen un modelo de discretización de datos fuente, basándose en las leyes de conservación hiperbólicas, usando para resolver el sistema de ecuaciones generadas el método de Riemann aumentado, considerando las aproximaciones necesarias. La técnica es aplicada a las ecuaciones en agua poco profundas con contrapendientes y condiciones de fricción con el enfoque discreto.

Loaiza y Casamitjana, (2008), aplican un modelo hidrológico llamado Toplats (*Based Land Surface-Atmosphere Transfer Scheme*), que alimenta con información topográfica, de tipo y usos de suelos, meteorológica y de vegetación correspondientes, a las subcuencas de Canalda y Cogulersdelas, cuencas de la Ribera Salada en el municipio de Solsona, en Cataluña, España. Los resultados encontrados demuestran que el modelo debe ser calibrado con datos reales porque de lo contrario no es viable. Esta consideración es importante, ya que el objetivo final de la modelación, en este caso, es entregar un mapa de riesgos generados por el modelamiento de flujo de lodos. Weinhart, Thornton y Luding, (2011), presentan un estudio en el que establecen cuáles son los regímenes mejores para aplicar el método de partículas discretas en flujos granulares.

Uno de los modelos usados en el mundo para modelar el flujo de lodos y de *lahares*, es el código Titán 2D. Ejemplo de ello son los trabajos realizados por Williams (2006), en el Volcán Cotopaxi (Ecuador); García (2011), en el Volcán Galeras (Colombia); Williams, Stinton y Sheridan en el Valle Vazcún en un flanco del Volcán Tungurahua (Ecuador) entre otros.

El código Titan 2D, se alimenta con datos característicos de la zona, como son los coeficientes de fricción, topografía, tamaño de la pila, entre otros. (Titán 2d, *Manual del usuario*, 2010). El modelamiento de flujos se inicia utilizando el modelo de Coulomb, que es el mejor para analizar la mecánica de los flujos de lodos (Iverson, 2003). El programa Titán 2D, utiliza este modelo, el cual se asimila al modelo de Bingham y se rige por la siguiente ecuación (Suarez, 2009):

$$\tau = C + \sigma_n \tan\emptyset + n_c \left(dV/dy\right)$$

Donde:

⌀ = Resistencia al cortante en la base del flujo.

C= Cohesión.

⌀ = Ángulo de fricción interna.

n_c = Coeficiente de viscosidad.

La Tabla 2 presenta modelos de fluido de acuerdo con el tipo de flujo, determinando parámetros de trabajo como viscosidad, porosidad, concentración y peso unitario.

Tabla 2. ***Modelos de fluido de acuerdo con el tipo de flujo.***

Flujo	Característica	Fluido	Porosidad	Concentración en volumen	Peso unitario
De lodos	Viscoso	Bingham	0.3- 0.8	> 20%	1.0 – 1.6
Hiper-concentrado granular	Viscoso	Bingham o Manning	0.6- 1.0	0-40%	1-0 – 1.8
	No viscoso	Manning	0.7 – 1.0	0- 30%	1.0 – 1.7
Turbulento de residuos	Inercial (No viscoso)	Manning o Bagnold/ Takahashi	0.25 – 0.7	> 30%	1.6 – 2.0
	Viscoso	Bagnold/ Takahashi	0.1- 0.6	>40%	1.7 – 2.2
Laminar de residuos		Bingham	< 0.1		

Fuente: Suarez Díaz, J. (2009) *Deslizamientos*, Volumen 1: Análisis geotécnico. Bucaramanga: División de Publicaciones Universidad Industrial de Santander, p. 182.

El perfil de velocidades del fluido Bingham se puede asimilar como un tapón que se mueve en una zona de flujo laminar. En la parte alta del flujo no existe un movimiento relativo importante y el flujo se mueve hacia adelante como un solo cuerpo sobre un fluido Bingham (Suarez, 2009) (ver Figura 4).

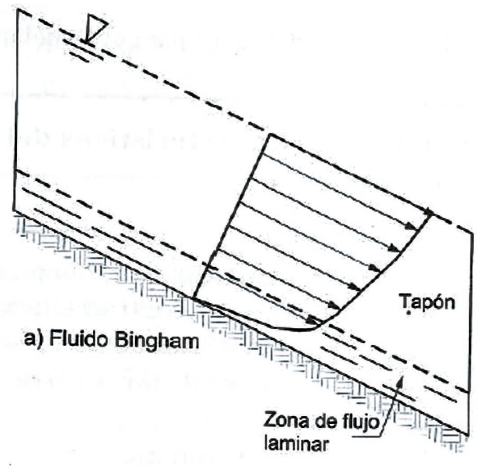

Figura 4. Perfil de velocidades fluido Bingham.
Fuente: Suarez Díaz, J. (2009) *Deslizamientos*, Volumen 1: Análisis geotécnico. Bucaramanga: División de Publicaciones Universidad Industrial de Santander, p. 179.

En este caso el flujo hiperconcentrado turbulento Newtoniano, se ha transformado en flujo laminar, con el que se puede modelar el flujo de lodos, determinando en diferentes puntos y tiempos, el espesor del flujo (tirante), la presión dinámica ejercida y el área de cobertura. Se deben establecer los límites para caracterizar el tipo de flujos granulares de barros y escombros, el laminar (macro-viscoso) o el dispersivo con disipación predominantemente colisional (Aguirre, Moncada & Olivero, 2000).

Las modelaciones previas realizadas en la zona con Titán 2D (García, 2011), permiten realizar la calibración del modelo, para estimar un nivel de confianza adecuado mediante la comparación de datos.

La percepción remota es importante en el estudio de *lahares* que se origina en los volcanes nevados. La fotogrametría digital es una rama de la percepción remota que permite el estudio de la interacción glaciares/actividad volcánica mediante el empleo de *software* especializado, orientado al tratamiento de imágenes a partir de fotografías aéreas, gracias a ellas se obtiene en poco tiempo información confiable, que posibilita el monitoreo de la evolución de los procesos y en consecuencia, la evaluación de peligros (Julio & Delgado, 2003).

CONCLUSIONES

Los flujos de lodos y *lahares* ocasionan movimientos en masa que por lo general son catastróficos, generan pérdidas económicas y acaban con la vida de muchas personas.

Los flujos de lodos están ligados íntimamente con las lluvias, ya que éstas saturan los suelos produciendo deslizamientos de laderas con grados de inclinación pronunciados.

Los *lahares* son típicos en las cordilleras del continente americano y han causado grandes catástrofes arrasando con ciudades enteras.

Generalmente la pérdida de vidas humanas obedece a una deficiente planeación del territorio que permite asentamientos en zonas vulnerables a los flujos de lodos. Este aspecto se evidencia en todos los eventos revisados, donde se observa que las malas condiciones económicas de la población, los obliga a exponerse a eventos muy peligrosos.

La simulación de flujo de lodos se hace a través del estudio de flujos bifásicos (líquido- sólido). Para este fin existen diferentes modelos que los representan. Sin embargo, es importante validar con datos reales dichos modelos, para evitar resultados erróneos que impidan construir planes de ordenamiento territorial adecuados.

El código Titán 2D ha sido utilizado en la zona, por lo que una modelación de la dinámica de los flujos de lodos puede ser validada de manera adecuada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdoullah, N. & Khodashenas, A. (2009) Análisis Experimental, Analítico y Teórico de Estabilidad. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 27, 71-78. Recuperado el 16 de abril de 2012, de: http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=169516257006.

Aguirre, J., Moncada, A. & Olivero, M. (2000) Soluciones del Flujo Bifásico Granular. *Revista Ciencia e Ingeniería*, *21*(2). Universidad de los Andes, Venezuela.

Almaguer, Y. (2005) Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento punta gorda. *Minería y Geología*, *22*(2), 1-45. Holguín, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Dr. Antonio Nuñez.

Alvarado, M., Durán, D., Fallas, K. & Hernández, L. (2006) Amenazas y vulnerabilidad: el caso de los ríos Reventado y Toyogres, Cartago. *Revista Reflexiones*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica. Recuperado el 16 de anril de 2012, de http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=72920817022

Andreoli, A., Carlig, G., Comiti, F. & Iroumé. A. (2007) Residuos leñosos de gran tamaño en un torrente de la Cordillera de los Andes, Chile: su funcionalidad e importancia. *Revista Bosque*, *28*, 83-96. Chile: Universidad Austral de Chile. Recuperado el 16 de abril de 2012, de http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=173113288001

Aristizábal, E. & Shuichiro, Y. (2008) Características, Dinámica y Causas del Movimiento en Masa del Barrio el Socorro (31 De Mayo De 2008). *Revista EIA*, (10), 19-29. Medellín, Colombia: Escuela de Ingeniería de Antioquia.

Arreygue, E., Garduño, V., Canuti, P., Casaglie, N., Iotti, A. & Chiesa, S. (2002) Análisis Geomecánico de la Inestabilidad del Escarpe la Paloma , en la Ciudad de Morelia , Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas Universidad Nacional Autónoma de México*, *19*(2), 91-106. Recuperado de: rmcg@geociencias.unam.mx

Barrios, M. & Olaya, E. (2007) Cálculo y Análisis de Hidrogramas para el Flujo Torrencial del 22 de Junio de 2006 Ocurrido en la Microcuenca «El Salto», Ibagué – Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*. (16), 31-40. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Bastidas, M., Cárdenas, J., Ramírez, C. & García, J. (2004) Red geodésica de alta precisión para la optimizacion de la modelación matemática del Río Cauca. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (1), 50-55. Recuperado el 17 de abril de 2012, de http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=231117826007.

Betancourt, F., Palacio, A., Rodríguez, A. & Fuentes, D. (2007) Uso de la analogía de flujo compresible para elaborar un modelo numérico de aguas someras. Avances en Recursos Hidráulicos. Recuperado el 17 de abril de 2012, de http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=145016872002

Botero, E. & Romo, M. (2006) Modelo bidimensional no lineal para el análisis del comportamiento dinámico de estructuras térreas. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (74), 1-32. Mexico: Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria. Recuperado el 17 de abril de 2012, de: http://redalyc.uaemex.mx

Burón, C. (2003) Los Desastres Nunca Serán Naturales. *Boletín del Instituto de la Vivienda*. *18*, 41-53. Chile, Santiago de Chile: Universidad de Chile. Recuperado el 17 de abril de 2012, de invi@abello.dic.uchile.cl

Capra, L., Lugo, J. & Zamorano, J. (2006) La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: el caso de totomoxtla, Sierra Norte de Puebla, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *58*. Mexico: Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Campus Juriquilla, Queretaro, Qro. Recuperado el 17 de abril de 2012, de http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=94320213005

Cuanalo, O., Quezada, P., Aguilar, A., Olivan, A. & Barona, E. (2006) Sismos y Lluvias, Factores Detonantes de Deslizamientos de Laderas en las Regiones Montañosas de Puebla, México. *Revista Digital Científica y Tecnológica: e-GNOSIS*, (4), 1-14. Mexico: Universidad Autónoma de Estado de Mexico. Recuperado el 17 de abril de 2012, de egnosis@cencar.udg.mx

Dawn, M. (2010) *Vulnerability Assessment For The Mijitayo Creek Water Treatment Facility*. New York, Estates Unites of the American: University at Buffalo.

Flores, P. & Alcántara, I. (2002) Cartografía Morfogenética e Identificación de Procesos de Ladera en Teziutlán, Puebla. *Investigaciones Geográficas*, *49*, 7-26. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de Mexico Recuperado el 17 de abril de 2012, de edito@igiris.igeograf.unam.mx

García, A., Agudelo, H. & Cortés, G. & Laverde, C. (2011) Simulación de Flujos Piroclásticos en el Volcán Galeras Con El Código Titan2d. *Geología Colombiana*, *36*(1). Manizales, Colombia.

Hernández, V., Garduño, V. & Alcántara, I. (2007) Estudio Geológico para Entender los Procesos de Remoción en Masa en la Región de Zacapoaxtla, Puebla, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. *59*(2), 147-162. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de Mexico.

Hernández, F. (2011) *Contención de taludes en estado viscoplástico*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Huang, X. & García, M. (1998) A Herschel–Bulkley Model For Mud Flow Down A Slope. Fluid Mech. *Cambridge University Press*. *374*, 305-333.

Iverson, R. (2003). The Debris-Flow Rheology Myth. U. S. Geological Survey, Vancouver, Washington USA. *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. 303-314.

Iverson, R., Logan, M., LaHusen, R. & Berti, M. (2010) The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. *Journal of Geophysical Research*, *64*(50), 979.

Loaiza, J. & Casamitjana, M. (2008) Caracterización del Caudal en Dos Subcuencas de Montaña Mediterránea, Estudio de Aplicabilidad de un Modelo Hidrológico. *Avances en Recursos Hidráulicos,* (18), 15-24. Recuperado el 18 de abril de 2012, de http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=145012856002

Mariño, A., Falcón, J., Sales, G. & Reyes, S. (2007) Nuevo Enfoque para el Pronóstico de la Concentración de Sólidos en Lodos Obtenidos por Sedimentación Gravitacional. *Minería y Geología*, *23*(3), 1-16. Holguín, Cuba. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. Antonio Nuñez Jiménez. Recuperado el 18 de abril de 2012, de http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=223515979007

Miranda, J., Delgado, P. & Granados, H. (2003) Fast Hazard Evaluation Employing Digital Photogrammetry: Popocatépetl Glaciers, Mexico. *Geofísica Internacional*, *42* (2), 275-283.

Montoya, L., Silva, S. & González, J. (2009) Evaluación de Zonas de Amenaza por Avenidas Torrenciales Utilizando Metodologías Cualitativas. Caso de Aplicación a la Quebrada Doña María. *Revista de Ingenierías*, *8*, 11-29. Recuperado el 19 de abril de 2012, de http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=75012333003

Montiel, K., González, Y., Loaiza, C. & Gouveia, E. (2008) Inestabilidad de Laderas en el Barrio Cerros de Marín, Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela. *Revista Terra Nueva Etapa*, *24*(36), 13-53. Recuperado el 19 de abril, de http://redalyc.uaemex.mx

Moreiras, S., Lenzano, M. & Riveros, N. (2008). Inventario de procesos de remoción en masa en el Parque Provincial

Aconcagua, provincia de Mendoza–Argentina. *Multequina*, (17), 129-146. Recuperado el 19 de abril de 2012, de redalyc. uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=42801710

Moreno, H., Vélez, M., Montoya, J. & Rhenals, R. (S.F.) La Lluvia y los Deslizamientos de Tierra en Antioquia: Análisis de su Ocurrencia en las Escalas Interanual, Intraanual y Diaria. *Revista EIA*, (5), 59-69. Medellin, Colombia. Escuela de Ingeniería de Antioquia Recuperado el 19 de abril de 2012, de http://redalyc. uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=149216902004

Murcia, H. & Macías, J. (2005) Registro Geológico de Inundaciones Recurrentes e Inundación del 4 de Octubre de 2005 en la Ciudad de Tapachula, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 26*(1), 1-17. México. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 19 de abril de 2012, de http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57214935002

Murillo, J. & García, P. (2012) Wave Riemann Description of Friction Ferms in Unsteady Shallow Flows: Application to Water and Mud/Debris Floods. *Journal of Computational Physics. Fluid Mechanics, C.P.S*. Recuperado el 15 de abril de 2012, de: www.els evier.com/locate /jcp.

Naranjo, J., Arenas, M., Clavero, J. & Muñoz, O. (2009) Mass Movement-Induced Tsunamis: Main Effects During The Patagonian Fjordland. Andean Geology. *Servicio Nacional de Geología y Minería Chile*, *36*(1), 137-145. Santiago de Chile, Chile. Recuperado el 19 de abril de 2012, de http://redalyc. uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=173914379011

Narváez, C. & Rosero, N. (2005) *Modelamiento del Control Topográfico Ejercido por el Valle de Atríz Sobre los Flujos de Lodo Provenientes de la Quebrada Mijitayo*. San Juan de Pasto, Colombia: Universidad de Nariño.

Olmedo, J. & Villacreces. Á. (2007) Episodio de Lluvias Torrenciales del 21 de Septiembre de 2007. Las Inundaciones de Almuñécar. *Cuadernos Geográficos*. Granada, España: Universidad de Granada. Recuperado el 19 de abril de 2012, de http://redalyc. uaemex.mx/ src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=17112052006

Ortiz, M. & González, R. (2009) Análisis del Efecto del Humedecimiento en la Falla de Talud en el Km 240 + 000 del Cuerpo a de la Autopista Cuernavaca – Acapulco. I*ngeniería Revista Académica*, *13*(3), 17-28. Recuperado el 20 de abril de 2012, de http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=46712187003

Paredes, G., Salazar, A., Vázquez, J., Ramos, E. & Espinosa, G. (2004) Modelo Promedio de Dos Regiones para el Flujo Bifásico Sólido- Líquido Horizontal con un Lecho Móvil. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *3*, 273-286. Recuperado el 19 de abril de 2012, de amidiq@xanum.uam.mc.

Quesada, M. & Marsik, M. (2007) Indicadores Físico-Geográficos en el Análisis de Cuencas Hidrográficas y su Aplicación a la Microcuenca Estero, Costa Rica. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (15), 11-22. Medellin, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 18 de abril de 2012, de http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=145016897002

Rivera, A., Yañez, A. & Cedillo, L. (2005) Emisión de Ceniza Volcánica y Sus Efectos. *Ecosistemas Revista de la Asociación Española de Ecología Terrestre Alicante*, *14* (3), 107-115. Recuperado el 17 de abril de 2012, de http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=140&Id_Categoria=2&tipo=portada

Rivero, A. (2009) Una Crónica: La Tragedia de Carmen de Uría. Departamento de Objetos Perdidos. Recuperado el 18 de abril de 2012, de http://arturoriveroh.wordpress.com/2009/02/15/una-cronica-la-tragedia-de-carmen-de-uria/

Rodas, R. & Rousé, P. (2010) Análisis Comparativo de Métodos para la Medición del Ángulo de Reposo de Suelos Granulares. *Revista de la Construcción*, *9(1),* 98-106. Santiago de Chile, Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado el 15 de abril de 2012, de http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=127619214011

Rodríguez, S., Mora, I. & Murrieta, J. (2006) Flujos de Baja Concentración Asociados con Lluvias de Intensidad Extraordinaria en el Flanco Sur del Volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Número Especial de Geología Urbana. 223-236.

Roldán, J., Aguirre, G. & Rodríguez, J. (2011) Depósito de Avalancha de Escombros del Volcán Temascalcingo en el Graben de Acambay, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, *28*(1), 118-131. México. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 19 de abril de 2012, de http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57220090009

Saaltink, M., Batlle, F., Ayora, C., Carrera , J. & Olivella, S. (2004) Retraso, A Code For Modeling Reactive Transport In Saturated And Unsatured Porous Media. *Geologica acta: an international earth science journal*, *2*, 235-251. Recuperado el 19 de abril de 2012, de geologica-acta@ija.csic.es

Scott K., Vallance, J., Kerle, N., Macias, J., Strauch, W. & Devoli, G. (2004) Catastrophic Precipitation-triggered Lahar At Casita Volcano, Nicaragua: Occurrence, Bulking and Transformation. Earth Surface Processes and Landforms Earth Surf. Process. *Landforms*, *30*(1), 59–79.

Suarez, J. (2009) *Deslizamientos Volumen 1: Análisis geotécnico*. Bucaramanga, Colombia: División de Publicaciones Universidad Industrial de Santander.

Titan2d Guía del Usuario. (2010) Geophysical Mass Flow Group (GMFG). State University of New York at Buffalo, Unites States of the American, Release 2.0.0, 2007.07.09. Recuperado el 20 de abril de 2012, de http://vhub.org/resources/425/download/Parte4de4.pdf

Valerio, V., García, A., López, C. & Galván, A. (2007) Geología y Procesos de Remoción en Masa Asociados a un Domo Volcánico Tipo Couleé: Cerro El Tenayo, Tlalnepantla, Estado de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. *59*(2), 183-201. México. Sociedad Geológica Mexicana. Recuperado el 22 de abril de 2012, de http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=94320236006

Weinhart, T., Thornton, A., Luding, S. (2011) Closure Relations for Shallow Granular Flows from Particle Simulations. *Granular Matter*, *14*(4), 531–552.

Williams, R. (2006) *Modeling Lahars Using Titan2d For The Southern Drainage Of Volcán Cotopaxi: Impact On The City Of Latacunga By Rebecca Williams Master of Science Department of Geology*. United States of the America: Buffalo University.

Williams, R., Stinton, A., & Sheridan, M. (2008) Evaluation of the Titan2D two-phase flow model using an actual event: Case study of the 2005 Vazcún Valley Lahar. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *177* (4), 762-768. United States. Elsevier.