

Determination of the curves i-d of the precipitation that originated the debris flows in Puebla, México

Guillermo Cardoso-Landa ¹

¹ Instituto Tecnológico de Chilpancingo
Av. J. F. Ruiz Massieu # 5, Col. Villa Moderna, C. P. 39090, Chilpancingo, Gro., México
gclanda@prodigy.net.mx

Abstract. Of the physical processes that produce the movements of the land proposed by Cruden and Varnes, the one that acts of predominant way in the genesis of the debris flows are the extraordinary precipitation events. The empirical thresholds of precipitation are based on the historical analyses of the occurrence relation precipitation/debris flow, for example statistical analyses. At the present time a limited number of this type of empirical thresholds exists and have been used different diagrams to represent them, depending on the combinations of precipitation parameters more commonly used: antecedent precipitation, duration, accumulated intensity and rain, but the most commons are the obtained by Caine and Aleotti. An analytical presentation of the concept of threshold of precipitation of a debris flow was recently introduced by Iritanno et al. (1998), who introduced the called function of mobilization $Y(t)$, indirectly describing all the factors that contribute to trigger a process of landslides and that is dependent, in every moment of time t , the amount of water infiltrate on the ground before the time t . In the full article was applied the Iritanno's function of mobilization to the records of precipitation that produced the debris flows in the north of Puebla State, in the country of México, obtaining relationships intensity of rain-duration for these debris flows are greater from 3.43 to 2.1 times over empirical thresholds of precipitation generators of debris flows proposed by Caine and Aleotti in other regions of the world.

Keywords: Curves i-d, debris flows.

1. Introducción

Los flujos de derrubios son los movimientos rápidos de derrumbes de tierras, ocasionados por flujos hiperconcentrados de agua y sedimentos, que ocurren en una gran variedad de medios ambientes a lo largo de todo el mundo. Están formados de una mezcla de material fino (arena, limo y arcilla), material grueso (gravas y boleos) y una cantidad variable de agua, que forma un lodo, el cual se mueve hacia ladera abajo, generalmente en oleadas inducidas por la acción de la gravedad y el colapso repentino del material en el banco. Generalmente tienen lugar en laderas cubiertas por roca delgada no consolidada y suelo de derrubios (soil debris), especialmente donde la cubierta vegetal ha sido removida por deforestación o incendios.

Son particularmente peligrosos para la vida y las propiedades debido a sus altas velocidades y gran fuerza destructiva, abatiendo casas, caminos, puentes, árboles y cultivos, corrientes naturales y ecosistemas a lo largo de su trayectoria.

En cualquier flujo de derrubios se distinguen tres elementos fundamentales: el área de generación, la trayectoria principal y la zona de depósito. Estos flujos comúnmente siguen los escurrimientos del drenaje preexistentes y las trayectorias tienen una sección transversal rectangular o en forma de "V". Algunos de los derrubios (debris) gruesos serán acumulados al lado de la trayectoria para formar crestas laterales. Los depósitos de un flujo de derrubios son dejados donde la pendiente del canal disminuye o al pie de los frentes en la montaña. Una serie de oleadas sucesivas construirán al interior un abanico de derrubios (debris fan).

Algunos flujos de derrubios son fluidos excepcionalmente largos y pueden viajar grandes distancias más allá del área de generación. Los depósitos de estos flujos de baja viscosidad se extienden fuera en áreas de confinamiento disminuido para formar abanicos aluviales (Costa, 1984).

Los flujos de derrubios se presentan en la mayoría de los ambientes climáticos, desde desiertos hasta regiones alpinas y desde zonas árticas a áreas mediterráneas. Este tipo de

flujos son potencialmente una forma muy destructiva de movimiento de ladera en regiones montañosas, donde el aumento repentino de agua, generalmente proveniente de lluvia intensa o nieve derretida, puede movilizar los escombros o derrubios (debris) cubriendo las laderas e incorporando en su interior el flujo de derrubios, (Hutchinson, 1988).

En los ambientes desérticos los flujos de derrubios son un fenómeno natural muy común que produce abanicos de una gran extensión. El escombros o derrubio localizado sobre el fondo del valle en la parte más elevada de la cuenca es movilizad rápidamente por el escurrimiento siguiente a un aguacero y la cumbre del abanico frecuentemente llega a convertirse en un atrincheramiento por flujos sucesivos (Suwa & Okuda, 1980, 1983).

Los flujos de derrubios en ambientes alpinos están compuestos de material grueso, el cual ha caído en el interior del área de generación por la acción mecánica de los agentes atmosféricos. Éstos subsecuentemente forman trayectorias alargadas significantes con cordilleras laterales. En los ambientes alpinos el derretimiento de la zona congelada (cercano al límite más bajo del derretimiento discontinuo) también ha sido considerado un área de generación de flujos de derrubios.

En la ladera de un volcán se originan flujos de derrubios que contienen materiales piroclásticos y son llamados lahares, los cuales pueden ocurrir en cualquier tiempo, ya sea antes, durante o después de una erupción del volcán, cuya consistencia es material caliente o frío (Dikau, 1996).

De los procesos físicos que producen los movimientos del terreno propuestos por Cruden y Varnes (1996), el que actúa de manera predominante en la génesis de los flujos de derrubios son los eventos de precipitación extraordinarios.

2. Metodología

Los flujos de derrubios son producidos comúnmente por una inusual presencia de agua. Existen tres fuentes potenciales de exceso de agua: lluvia intensa, movimiento de nieve rápido y aunque raros, flujos de glaciares o lagos con material movilizad no consolidado en su corriente (Innes, 1983; Costa, 1984; Selby, 1993). La intensidad y duración de la lluvia, aunada a las condiciones de lluvia antecedente y contenido de humedad del suelo, son factores fuertes para el surgimiento de los flujos de derrubios.

La influencia de la precipitación sobre los flujos de derrubios difiere substancialmente dependiendo de las dimensiones del flujo, dinámica, material involucrado, etc. Las fallas superficiales son disparadas generalmente por tormentas de intensidad baja (Campbell, 1975, Lumb, 1975, Brand et al., 1984, Cancelli and Nova, 1985, Cannon and Ellen, 1985, Wiczoreck, 1987, Guzzetti et al., 1992, Polloni et al., 1992, Morgan et al., 1992, Crosta, 1998, Corominas and Moya, 1999, Flentje et al., 2000, Paronuzzi et al., 2002), mientras que los flujos de derrubios a mayor profundidad están afectados por una variación grande en la precipitación anual registrada en los últimos años (Bonnard and Noverraz, 2001).

2.1 Umbrales de precipitación

El término 'umbral' (threshold) define el nivel mínimo o máximo (crítico) de alguna cantidad necesaria para que tenga lugar un proceso (Reichenbach et al., 1998).

Una disertación analítica del concepto de umbral de precipitación de un flujo de derrubios fue presentada recientemente por Iritanno et al. (1998), quienes introdujeron la llamada función de movilización $Y(t)$, que indirectamente describe todos los factores que contribuyen a disparar un proceso de remoción en masa y que es dependiente, en cada instante de tiempo t , de la cantidad de agua infiltrada en el suelo antes del tiempo t :

$$Y(t) = f[I(u)] \text{ con } -\infty < u \leq t \quad (1)$$

donde $[I(u)]$ es la intensidad de infiltración en el tiempo t .

Si se define $P[L_t]$ como la probabilidad de ocurrencia de un proceso de remoción en masa en el tiempo t y estableciendo Y_1 como el coeficiente de movilización con el cual la probabilidad de ocurrencia del fenómeno es diferente de cero y Y_2 como el coeficiente de movilización con el cual la probabilidad de ocurrencia del fenómeno es de cierto valor, la siguiente hipótesis alternativa puede ser derivada:

$$P[L_t] = 0 \text{ si } Y(t) < Y_1 \quad (2a)$$

$$P[L_t] = g[Y(t)] \text{ si } Y_1 \leq Y(t) \leq Y_2 \quad (2b)$$

$$P[L_t] = 1 \text{ si } Y(t) > Y_2 \quad (2c)$$

donde $g[Y(t)]$ es una función genérica, definida en el intervalo $[Y_1; Y_2]$ y que tiene un codominio $[0,1]$. La ecuación (2a) indica la movilización imposible debido a la precipitación, mientras que, por otro lado, la ecuación (4.2c) indica cierta movilización.

Proponiendo $Y_1 = Y_2 = Y_{TH}$, puede introducirse un esquema de umbral ('threshold'), libre de cualquier conexión probabilística, en la cual el evento $L(t)$ puede considerarse alternativamente imposible (ecuación 3a) o cierto (ecuación 3b):

$$P[L_t] = 0 \text{ si } Y(t) \leq Y_{TH} \quad (3a)$$

$$P[L_t] = 1 \text{ si } Y(t) > Y_{TH} \quad (3b)$$

De esta manera, pueden establecerse dos tipos de umbrales para un proceso de remoción en masa debido a la precipitación, que son los siguientes.

Los umbrales empíricos están basados en los análisis históricos de la relación de ocurrencia precipitación/flujo de derrubios (por ejemplo, análisis estadísticos), (Campbell, 1975; Caine, 1980; Crozier and Glade, 1999; Aleotti, 2004). En la actualidad existe un número limitado de este tipo de umbrales empíricos y han sido empleados diferentes diagramas para representarlos, dependiendo de las combinaciones de parámetros de precipitación más comúnmente utilizados: precipitación antecedente, duración, intensidad y lluvia acumulada.

Caine (1980), utilizando datos de 73 eventos de deslizamientos superficiales y flujos de derrubios, encontró una relación de umbral entre la intensidad de lluvia (I) y la duración de la lluvia (D), que es la siguiente:

$$I = 14.82D^{-0.39} \quad (4)$$

en la cual, I está expresada en mm/h y D en h.

Aleotti (2004) obtuvo las expresiones siguientes para relacionar las variables de precipitación de los flujos de derrubios presentados en la región Piedmont, al noroeste de Italia, empleando cuatro eventos desde 1996 hasta 2000, a través de los umbrales empíricos:

$$I = 19D^{-0.50} \quad (5)$$

donde las variables tienen el mismo significado y unidades presentados en la ecuación de Caine. Por otro lado, Aleotti también obtuvo las ecuaciones:

$$NI = 0.76D^{-0.33} \quad (6a)$$

$$NI = 4.62D^{-0.79} \quad (6b)$$

en las que NI representa la intensidad crítica normalizada, en % y D la duración del evento crítico, en horas.

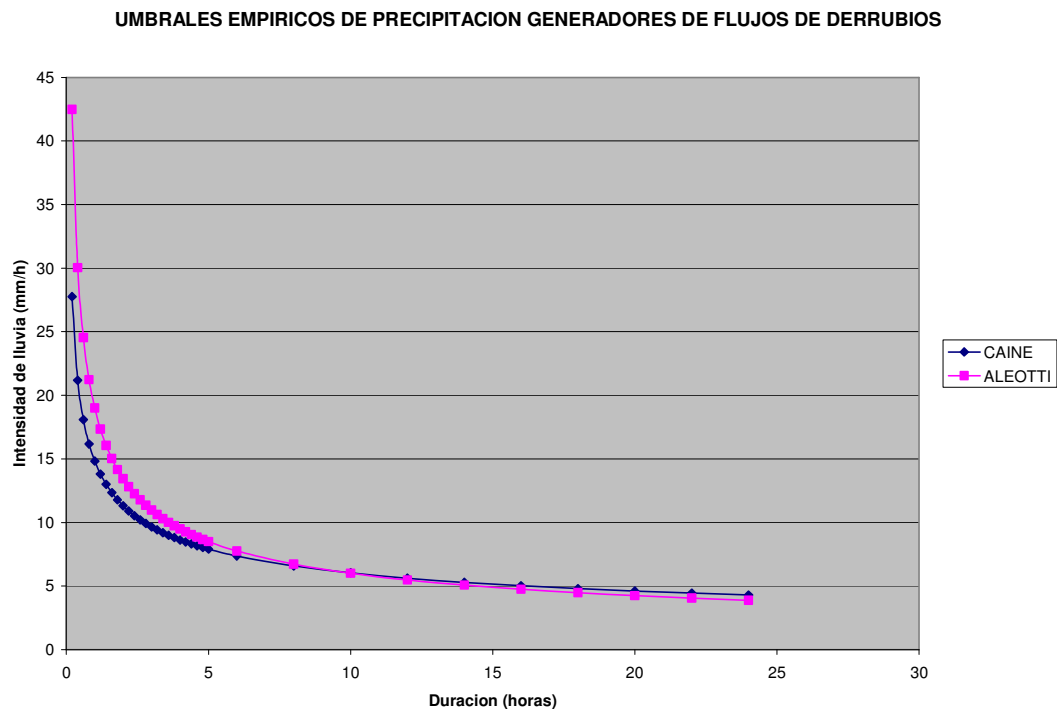


Figura 1. Umbrales empíricos de precipitación para flujo de derrubios de Caine (1980) y Aleotti (2004).

Los umbrales físicos están basados en modelos numéricos que toman en consideración la relación entre precipitación, presión de poro y la estabilidad del talud, a través del acoplamiento de modelos hidrológicos y de estabilidad (Montgomery and Dietrich, 1994; Wilson and Wieczoreck, 1995; Crosta, 1998; Terlien, 1998). Este tipo de umbrales físicos no han sido desarrollados ampliamente hasta la fecha, ya que generalmente requieren un detallado conocimiento de las condiciones de frontera, las cuales están disponibles mediante

ensayos de campo con equipo especializado (por ejemplo, medidores de precipitación, piezómetros, tensiómetros, etc.). Se han propuesto intentos recientes a escala regional mediante el empleo de modelos distribuidos (Borga et al., 1998; Aleotti et al., 2003; Crosta et al., 2003).

3. Aplicación a los flujos de derrubios de Puebla, México

El conocimiento del mecanismo en el proceso de inicio de los flujos de derrubios es fundamental para la mitigación de los peligros asociados a este tipo de flujos y un requisito necesario para implementar medidas tendientes a disminuir los efectos desastrosos que ellos producen. Entender este proceso puede proporcionar una guía para clasificar las áreas potencialmente peligrosas, donde se requieran proponer métodos y estructuras de protección. Por otro lado, también puede incrementar el conocimiento de las situaciones críticas de estas zonas y servir como un criterio para enviar información de prevención a tiempo para que las personas puedan ser evacuadas de esos lugares de alto riesgo (Cheng & Tseng, 2003).

Uno de los flujos de derrubios más recientes en nuestro país es el que se presentó los días 4 y 5 de octubre de 1999, debido a precipitaciones muy intensas, sobre la ciudad de Teziutlán, Puebla, desarrollándose alrededor de 30 flujos de derrubios y deslizamientos de suelo superficial de distinta magnitud y tipo, que produjeron 150 personas fallecidas y una gran cantidad de pérdidas económicas. Las precipitaciones extraordinarias observadas durante la primera semana de octubre en esta región se debieron a diferentes sistemas atmosféricos. La depresión tropical 11, que se originó en el Golfo de México, fue la causa fundamental de estas lluvias anormales. Al mismo tiempo, corrientes de aire húmedo del Océano Pacífico y del Golfo de México incrementaron la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, lo que resultó en lluvia intensa en los estados de Puebla, Veracruz e Hidalgo. Finalmente, la onda tropical 35 tuvo también efecto sobre las precipitaciones del día 4 de octubre. En la Figura 2 se muestran los valores de precipitación diaria en los primeros días del mes de octubre de 1999, así como los valores de lluvia para el mes de octubre de 1997 en la misma zona, con propósitos de comparación.

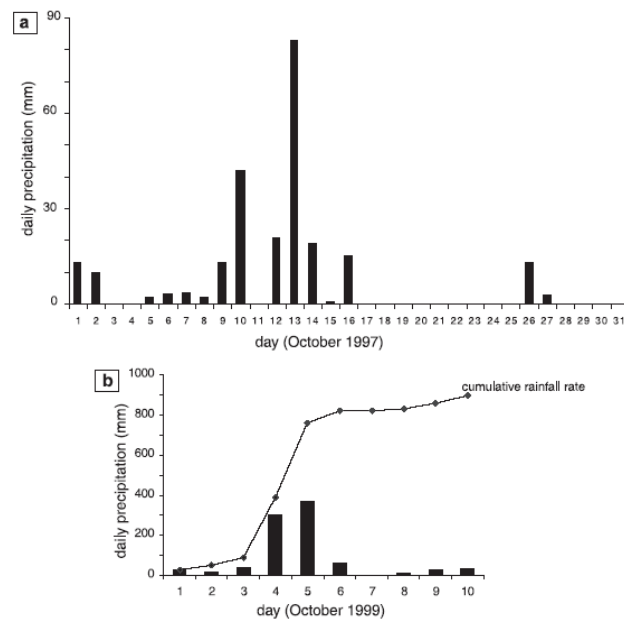
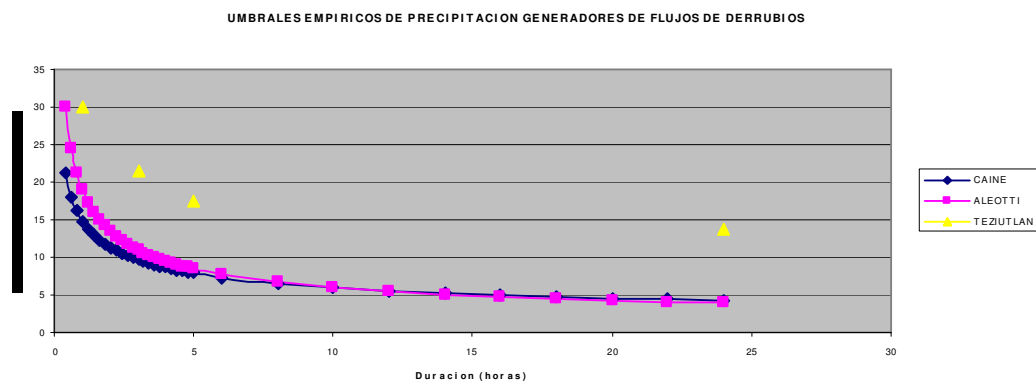


Figura 2 Registros de precipitación diaria para los primeros días de octubre de 1999 y para el mes de octubre de 1997 como comparativo, (Capra et al.).

4. Conclusiones

Utilizando la relación de umbral propuesta por Caine (ecuación 4) y por Aleotti (ecuaciones 5, 6a y 6b) y aplicando la función de movilización de Iritanno a los registros de precipitación presentados en la Figura 2, la cual originó, entre otros factores, los flujos de derrubios ocurridos en Teziutlán, Pue., se obtuvieron los siguientes resultados:



En donde se aprecia claramente como las relaciones intensidad de lluvia-duración para el evento del flujo de derrubios ocurrido en Teziutlán, Pue., los días 4 y 5 de octubre de 1999 son mayores desde 3.43 hasta 2.1 veces con respecto a los umbrales empíricos de precipitación generadores de flujos de derrubios propuestos por Caine y Aleotti.

Consideramos importante la continuación de este trabajo con el propósito de desarrollar umbrales empíricos de precipitación para una mayor cantidad de flujos de derrubios ocurridos en nuestro país durante recientes años, que permitan tener una comparación más amplia con los umbrales conocidos de Caine y Aleotti y que conlleven a generar los umbrales de precipitación para flujos de derrubios en México.

4. Referencias

- Anderson, S. A., and Sitar, N. "Analysis of rainfall-induced debris flows". **Journal of Geotechnical Engineering**, 121(7), 544-552, 1995.
- Reid, M. E., Lahusen, R. G., Iverson, R. M. "Debris flow initiation experiments using diverse hydrologic triggers". Proceedings of the **First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation**, ASCE, 1-11, 1997.
- Takahashi, T. "Debris flow initiation and termination in a gully". Proceedings of the 1993 **National Conference on Hydraulic Engineering**, ASCE, 1756-1761, 1993.
- Wieczorek, G. F. "Effect of rainfall intensity and duration on debris flow in Central Santa Cruz Mountains, California". **Geol. Soc. of América, Rev. in Engineering Geology**, 7, 93-104, 1987.
- Wilson R. C. "Normalizing rainfall/debris-flow thresholds along the U.S. Pacific Coast for long-term variations in precipitation climate". Proceedings of the **First International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation**, ASCE, 32-43, 1997.
- Ze-Yi, C. "A preliminary study of the relationship between heavy rainfall and serious debris flows". Proceedings of the **International Symposium on Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions**, IAHS, 201-206, 1992.