

ANÁLISIS DE UMBRALES EMPÍRICOS DE LLUVIA PARA EL PRONÓSTICO DE MOVIMIENTOS EN MASA EN EL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA

EDIER ARISTIZÁBAL¹
TOMMY GONZÁLEZ²
JUAN DAVID MONTOYA³
JAIME IGNACIO VÉLEZ⁴
HERNÁN MARTÍNEZ⁵
ALEXÁNDER GUERRA⁶

RESUMEN

Los movimientos en masa son el producto de la reducción progresiva de la resistencia de los geomateriales de las vertientes por las intervenciones antrópicas o por procesos naturales, como la meteorización, y desencadenados por factores externos, como la precipitación o un sismo. Estos eventos han demostrado ampliamente a través de la historia su capacidad destructora, ocasionando cuantiosas pérdidas humanas y económicas, ante todo en zonas tropicales y de terrenos montañosos, como el valle de Aburrá. Por esta razón los estudios referentes al pronóstico de lluvias, el seguimiento en tiempo real y la definición de umbrales críticos de lluvia se han convertido en herramientas fundamentales para la implementación de sistemas de alerta temprana. El presente análisis de umbrales críticos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el valle de Aburrá se realizó

-
- 1 Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de Colombia; Magíster en Ingeniería, Universidad de Shimane, Japón. Doctor (c) en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Analista Ambiental, Isagén. Medellín, Colombia. evaristizabal@isagen.com.co
 - 2 Geólogo, Universidad EAFIT. Geólogo, Convenio Interinstitucional Universidad EAFIT-SIMPAD. Medellín, Colombia. tgonzalz@eafit.edu.co
 - 3 Ingeniero Geólogo y Magíster en Ingeniería Civil. Consultor, Subdirección Ambiental, Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Medellín, Colombia. juan.montoyad@metropol.gov.co
 - 4 Magíster Postdoctorado, Universidad Politécnica de Valencia. Profesor, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia. jivelez@unal.edu.co
 - 5 Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de Colombia; Maestro en Mecánica de Suelos, UNAM (México); Doctor en Geotecnia, Universidad de Brasilia. Profesor Adjunto, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Brasilia. Catedrático, Universidad Nacional de Colombia. carvajal@unb.br
 - 6 Ingeniero Geólogo y Magíster (c) en Ingeniería - Geotecnia, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Contratista, Grupo de Estabilidad y Geotecnia, Secretaría de Obras Públicas, Municipio de Medellín. Medellín, Colombia. Edwar.Guerra@medellin.gov.co

mediante un procedimiento empírico, en el cual se construyó una base de datos de movimientos en masa y se utilizó una base de datos de precipitación con registros de resolución temporal cada 15 minutos; y se estimó la lluvia acumulada o lluvia de corto plazo –LA– (1, 3, 5 y 7 días) y la lluvia acumulada antecedente o lluvia de largo plazo –LAA– (5, 10, 15, 30, 60 y 90 días) para cada movimiento en masa. Los resultados obtenidos reflejan que el mayor condicionante para la ocurrencia de movimientos en masa en el valle de Aburrá es la LAA. Los datos indican que los movimientos en masa utilizados para el análisis ocurrieron para LAA superiores a 60 mm para 30 días, a 160 mm para 60 días y a 200 mm para 90 días. Sin embargo, se considera necesario evaluar con detalle este tipo de análisis y umbrales ampliamente realizados en el mundo, sin duda sesgados, ya que por lo general no consideran los días de lluvia en que no se presentaron movimientos en masa, por lo cual nuevos estudios deberán emprenderse basados en el análisis de las series de lluvia y probabilidades de excedencia.

PALABRAS CLAVE: movimientos en masa; umbrales de lluvia; ambientes tropicales montañosos.

ANALYSIS OF EMPIRICAL RAINFALL THRESHOLDS FOR THE PROGNOSIS OF LANDSLIDES IN THE ABURRÁ VALLEY, COLOMBIA

ABSTRACT

Mass movements are the product of a progressive reduction of strength of slope geomaterials by human actions or natural processes, such as weathering, and triggered by external factors like rainfall or earthquakes. These events have demonstrated throughout history its destructive capacity, causing huge human and economic losses, especially in tropical and mountainous terrains, such as the Aburrá Valley. For this reason new studies on rainfall forecasting, real-time monitoring and the definition of critical rainfall thresholds have become essential tools for the implementation of early warning systems. This analysis of critical rainfall thresholds for landslides forecasting in the Aburrá Valley was performed by an empirical procedure, using a database of mass movements and a database of precipitation with 15-min temporal resolution. Accumulated rainfall for every mass movement was estimated for short-term –LA– (1, 3, 5 and 7 days) and long-term –LAA– (5, 10, 15, 30, 60 and 90 days). The results show that the major determinant for the occurrence of mass movements in the Aburrá Valley is the LAA. The data indicate that mass movements used in the analysis occurred for LAA over 60 mm for 30 days, 160 mm for 60 days and 200 mm for 90 days. However, it is necessary to evaluate in detail this type of analysis and thresholds, widely performed in the world, clearly influenced, due to they generally do not consider those rainy days when there were no mass movements. Therefore further studies should be carried out based on analysis of rainfall series and exceedance probabilities.

KEY WORDS: landslides, rainfall thresholds, tropical complex terrains.

ANÁLISE DE LIMIARES EMPÍRICOS DE PRECIPITAÇÃO PARA O PROGNÓSTICO DE MOVIMENTOS EM MASSA NO VALE DE ABURRÁ, COLÔMBIA

RESUMO

Os movimentos em massa são o produto da redução progressiva da resistência dos geomateriais das vertentes pelas intervenções antrópicas ou por processos naturais, como a meteorização, e detonados por fatores externos, como a precipitação ou um sismo. Estes eventos demonstraram largamente através da história a sua



capacidade destruidora, ocasionando cuantiosas perdas humanas e económicas, sobretudo em zonas tropicais e de terrenos montanhosos, como o vale de Aburrá. Por esta razão os estudos referentes ao prognóstico de chuvas, o seguimento em tempo real e a definição de limiares críticos de chuva se converteram em ferramentas fundamentais para a implementação de sistemas de alerta precoce. A presente análise de limiares críticos de chuva para o prognóstico de movimentos em massa no vale de Aburrá realizou-se mediante um procedimento empírico, no qual se construiu um banco de dados de movimentos em massa e se utilizou um banco de dados de precipitação com registos de resolução temporária a cada 15 minutos; e estimou-se a chuva acumulada ou chuva de curto prazo –LA– (1, 3, 5 e 7 dias) e a chuva acumulada antecedente ou chuva de longo prazo –LAA– (5, 10, 15, 30, 60 e 90 dias) para cada movimento em massa. Os resultados obtidos refletem que o maior condicionante para a ocorrência de movimentos em massa no vale de Aburrá é a LAA. Os dados indicam que os movimentos em massa utilizados para a análise ocorreram para LAA superiores a 60 mm para 30 dias, a 160 mm para 60 dias e a 200 mm para 90 dias. No entanto se considera necessário avaliar com detalhe este tipo de análise e limiares amplamente realizados no mundo, sem dúvida sesgados, já que geralmente não consideram os dias de chuva em que não se apresentaram movimentos em massa, pelo qual novos estudos deverão empreender-se baseados na análise das séries de chuva e probabilidades de excedência.

PALAVRAS-CÓDIGO: movimentos em massa; limiares de precipitação; ambientes tropicais montanhosos.

1. INTRODUCCIÓN

Los movimientos en masa son eventos potencialmente desastrosos, que han ocasionado cuantiosas pérdidas humanas y económicas alrededor del mundo, ante todo en zonas tropicales y países montañosos que, debido a sus características fisiográficas y socioeconómicas, presentan una alta susceptibilidad del terreno a desarrollar este tipo de procesos (Schuster, 1996). De acuerdo con las estadísticas presentadas por la CRED (2010), en el año 2009 se presentaron 335 desastres de origen natural alrededor del mundo, que afectaron 119 millones de personas y dejaron pérdidas económicas superiores a 41.300 millones de dólares. Del total de desastres ocurridos, el 53 % corresponden a eventos de origen hidrometeorológico que aportaron 57,3 millones de víctimas, lo cual significa un incremento del 27,4 % comparado con el año 2008. Del total de eventos hidrometeorológicos las inundaciones corresponden al 82,8 % y los movimientos en masa detonados por lluvias al 17,2 % (CRED, 2010). Estos datos permiten dimensionar la magnitud de la problemática, con el agravante de que una de las principales consecuencias asociadas al cambio climático está en el incremento en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos (IPCC, 2007).

El valle de Aburrá es un escenario altamente vulnerable a sufrir afectaciones por movimientos en masa, debido a sus características topográficas y a la progresiva y acelerada ocupación antrópica de las laderas que lo conforman (Aristizábal y Yokota, 2006). En el periodo comprendido entre 1880 y 2007 se registraron en el valle de Aburrá 6.750 desastres, entre los cuales los movimientos en masa ocupan el segundo lugar con el 35 % del total, solamente superados por las inundaciones con el 42 % (Aristizábal y Gómez, 2007).

Los movimientos en masa son el producto de la reducción progresiva de la resistencia de los geomateriales de las vertientes por procesos naturales, tales como meteorización y levantamientos tectónicos, y actividades humanas (Costa y Baker, 1981; Soeters y Van Westen, 1996), y son detonados por factores externos, como la precipitación o los sismos (Wang y Sassa, 2003).

La precipitación incide negativamente sobre la estabilidad de una vertiente de dos maneras. Las lluvias cortas e intensas reducen la resistencia al corte, debido a la disminución de la cohesión aparente, dando lugar generalmente a movimientos en masa superficiales (Iiritano *et al.*, 1998; Crosta, 1998). En tanto que las lluvias prolongadas y de menor

intensidad incrementan la presión de poros, generando movimientos en masa más profundos usualmente sobre superficies de falla preexistentes (Iritano *et al.*, 1998; Aleotti, 2004).

Collins y Znidarcic (2004) proponen dos distintos mecanismos de falla generados por la infiltración de la lluvia. En el primer mecanismo la falla ocurre por el aumento en la presión de poros positiva originando licuefacción del material, en tanto que en el segundo mecanismo la falla ocurre a presiones de poros negativas donde el material está aún en estado no saturado y la falla ocurre por reducción de la succión y la masa se comporta en forma similar a un cuerpo rígido. Los suelos de grano fino no tienden a desarrollar presiones de poros positivas y la falla ocurre en general por reducción de la resistencia al cortante causada por pérdida de succión. Por lo regular los movimientos en masa superficiales están asociados con el desarrollo de presiones de poros positivas, mientras que los movimientos más profundos están asociados a pérdida de succión (Collins y Znidarcic, 2004).

Los estudios referentes al pronóstico de lluvias, seguimiento en tiempo real de fenómenos potencialmente desastrosos y la definición de umbrales críticos de lluvia se han convertido en herramientas fundamentales para la implementación de los sistemas de alerta temprana (Aristizábal, Gamboa y Leoz, 2010). Las ventajas de sistemas de alerta temprana basados en umbrales críticos de lluvia se soportan en que las lluvias son relativamente simples y cuesta poco medirlas a lo largo de grandes áreas (IEWP, 2005). Tales sistemas señalan con anticipación la posibilidad de ocurrencia de un movimiento en masa que permite notificar y evacuar a las personas para proteger sus vidas (Larsen, 2008). Uno de los primeros sistemas fue desarrollado por la NOAA (National Atmospheric & Oceanic Administration) y el USGS (United States Geological Survey) en el área de la bahía de San Francisco entre los años de 1986 y 1995, utilizando pronósticos cuantitativos de lluvias generados por el NWS (National Weather Service); y estuvo formado por una red con más de 40 estaciones de lluvia en

tiempo real. Cuando las lecturas en tiempo real se acercan a los umbrales críticos, un mensaje de alerta se activa. Algunos otros sistemas similares han sido desarrollados desde entonces en Japón, China, Brasil, Nueva Zelanda, Hong Kong, Alemania y Malasia (Aristizábal, Gamboa y Leoz, 2010).

Con el propósito de reducir las pérdidas humanas y económicas ocasionadas por los movimientos en masa en el valle de Aburrá, el Sistema Municipal para la Prevención y Atención de Desastres (SIMPAD) del Municipio de Medellín, con el apoyo del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), ha implementado un Sistema de Alerta Temprana Ambiental (SIATA), el cual incluye el estado de alerta por movimientos en masa basado en umbrales empíricos de lluvia acumulada (Aristizábal, Gamboa y Leoz, 2010). Los niveles de alerta han sido definidos acogiendo los umbrales propuestos por Moreno *et al.* (2006) para el departamento de Antioquia, debido que no existen umbrales críticos de lluvia como desencadenantes de movimientos en masa para las condiciones particulares del Valle.

En este sentido, el presente artículo propone nuevos umbrales críticos de lluvia acumulada para el pronóstico de la amenaza por movimientos en masa en el valle de Aburrá, a partir de una completa base de datos de movimientos en masa reportados en las últimas dos décadas y registros de precipitación de la red de sensores de Empresas Públicas de Medellín (EPM), con el propósito de incorporarlos en el SIATA para la definición de alertas por movimientos en masa detonados por lluvias.

2. ANTECEDENTES DE UMBRALES DE LLUVIA PARA EL PRONÓSTICO DE MOVIMIENTOS EN MASA

Los umbrales de lluvia para el pronóstico de los movimientos en masa pueden ser definidos de dos maneras; (a) usando métodos empíricos o estadísticos, muy conocidos dentro de los sistemas de alerta temprana por su fácil implementación, y (b) a partir



de modelos físicos numéricos, de mayor complejidad en su definición y aplicación (Guzzetti *et al.*, 2008).

Reichenbach *et al.* (1998) definieron el término umbral como el nivel mínimo o máximo de alguna cantidad a partir de la cual un proceso ocurre. En el caso de los umbrales de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa, el umbral mínimo representa la cantidad de lluvia por encima de la cual la probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa se incrementa drásticamente, en tanto que el umbral máximo corresponde a la cantidad de lluvia en la cual ha ocurrido el mayor porcentaje de movimientos en masa (Glade, Crozier y Smith, 2000).

Los umbrales definidos por métodos empíricos o estadísticos están basados en datos históricos de lluvias y de movimientos en masa; en general estos métodos relacionan la ocurrencia del evento con la intensidad de la lluvia, la duración de la lluvia o la lluvia acumulada antecedente (Terlien, 1998). Por otro lado, los umbrales definidos por métodos físicos están basados en modelos numéricos que incorporan el resultado de análisis hidrológicos y geotécnicos que relacionan lluvias, infiltración, presiones de poros y estabilidad de vertientes; para desarrollar este tipo de umbrales se requiere información hidrológica, litológica, morfológica y las características de los suelos que controlan la activación de los movimientos en masa (Crosta, 1998; Aleotti, 2004).

De esta manera, cuando se dispone de un registro histórico confiable y de buena calidad de datos de lluvia y de movimientos en masa, los umbrales pueden definirse por métodos empíricos o estadísticos; de lo contrario, cuando alguna de estas informaciones es restringida o escasa, los modelos físicos son más recomendables (Terlien, 1998). Además los modelos físicos proporcionan información sobre la distribución espacial de la amenaza por movimientos en masa, a diferencia de los modelos empíricos, que solamente brindan información de la distribución temporal de los movimientos en masa. En este sentido la combinación de modelos empíricos con modelos físicos permite una adecua-

da caracterización de la amenaza en términos de probabilidades de ocurrencia en tiempo y espacio.

Los parámetros de la precipitación más investigados en la generación de los movimientos en masa son la lluvia total acumulada, la lluvia antecedente o preevento, la intensidad y la duración. A partir de estos parámetros y la combinación de ellos, los umbrales críticos se definen en función de: (a) la intensidad de la lluvia, (b) la duración de la lluvia, (c) la relación intensidad y duración, (d) la lluvia total acumulada en un periodo determinado, (e) la relación entre la lluvia antecedente o preevento y la lluvia diaria, y (f) la relación entre la lluvia total acumulada y la lluvia promedio anual (Guzzetti, Peruccacci y Rossi, 2005).

Guzzetti, Peruccacci y Rossi (2005) clasificaron los umbrales empíricos publicados por diferentes investigadores en función de la extensión del área geográfica para los cuales fueron definidos. En ese sentido los umbrales pueden ser divididos en globales, regionales y locales. Los umbrales globales intentan establecer un nivel mínimo general por debajo del cual la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa es baja, independiente de las condiciones regionales y locales de orden litológico, morfológico y de usos del suelo, así como del patrón o comportamiento histórico de las lluvias. Por su parte, los umbrales regionales han sido definidos para áreas que alcanzan hasta miles de kilómetros cuadrados, caracterizadas por presentar condiciones fisiográficas, geológicas y meteorológicas similares. Finalmente, los umbrales locales se han definido para áreas que comprenden desde pocos hasta cientos de kilómetros cuadrados, considerando principalmente el régimen climático y el entorno geomorfológico local.

Aunque los umbrales críticos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa han sido ampliamente incorporados en los principales sistemas de alerta temprana por movimientos en masa que operan en el mundo, en Colombia, y específicamente en el valle de Aburrá, pocos estudios se han realizado

referentes a la influencia de la lluvia como factor desencadenante de movimientos en masa. Sólo a partir del año 2008, gracias a los trabajos de Moreno *et al.* (2006), los umbrales críticos de lluvia fueron incorporados en el SIATA (Aristizábal, Gamboa y Leoz, 2010).

En el nivel local, uno de los primeros estudios surge con Paz y Torres (1989), quienes estudiaron las precipitaciones y su influencia sobre los movimientos en masa ocurridos en las laderas del valle de Aburrá. Luego Gómez (1990) estudió la relación entre la infiltración y los movimientos en masa profundos, y entre las lluvias intensas locales y los movimientos en masa superficiales para la ciudad de Bucaramanga. Echeverri y Valencia (2004), utilizando información de 40 eventos ocurridos y registros de lluvia diaria, proponen para la cuenca de la quebrada La Iguaná de la ciudad de Medellín un umbral de 60 mm de lluvia acumulada antecedente de 3 días y 110 mm de lluvia precedente a ésta de 15 días. Y por fin, Suárez (2008) presenta un árbol de decisiones para la predicción y alerta de movimientos en masa activados por lluvia en la ciudad de Bucaramanga, considerando la intensidad del evento lluvioso, la lluvia acumulada de los últimos 15 días y la lluvia antecedente de las últimas 24 horas.

Quizás Manizales es la ciudad en donde se han realizado el mayor número de estudios enfocados a la influencia de la precipitación como factor desencadenante de movimientos en masa, estudios que les han permitido definir umbrales de lluvia empíricos. Como parte de estos estudios se destacan Van Westen y Terlien (1996), que establecieron relaciones entre los movimientos en masa y las lluvias diarias y acumuladas. Posteriormente Terlien (1998) ensayó combinaciones de lluvia diaria y lluvia acumulada antecedente de 2, 5, 15 y 25 días, propuso que 15 días de lluvia acumulada antecedente son suficientes para favorecer la ocurrencia de los eventos en esa ciudad; además recomendó que los umbrales empíricos se deban desarrollar para cada región de forma independiente. Arango (2000) estudió, también para Manizales, la relación entre los movimientos en masa y la lluvia diaria y lluvia

acumulada antecedente, para proponer la zonificación geotécnica de la comuna 2. Los resultados encontrados indican que la lluvia acumulada de los 30 días con un rezago aproximado de un mes es el indicador más adecuado para la determinación de alertas en la ciudad de Manizales.

En la región, Moreno *et al.* (2006) estudiaron los movimientos en masa inducidos por la lluvia en el departamento de Antioquia, empleando registros del periodo comprendido entre 1929 y 1999 del cual recopilaron 405 eventos ocurridos y 41 estaciones pluviométricas. A partir de dichos datos propusieron un umbral de 75 mm de lluvia acumulada de 3 días y 150 mm de lluvia acumulada antecedente de 15 días, umbral que ha sido implementado para el SIATA (Aristizábal, Gamboa y Leoz, 2010).

Para toda Colombia y usando análisis regionales, Castellanos (1996) y Castellanos y González (1996, 1997) estudiaron la relación de la precipitación y la ocurrencia de movimientos en masa, donde relacionan la lluvia crítica (LLc) con la lluvia anual (LLa) y la duración de la lluvia (Dc).

$$LLc (mm) = 51 + 0,41 LLa (mm);$$

$$Dc (días) = 3,3 (LLc (mm))^{0,42}$$

En este mismo nivel Mayorga (2003) presenta una metodología estadística usando regresión lineal para construir umbrales de lluvia críticos basados en lluvia acumulada y lluvia diaria para toda Colombia. En el ámbito oficial, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2002) implementó un modelo para el pronóstico en tiempo real de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia en Colombia, para el cual utilizan la lluvia acumulada antecedente de largo plazo de 1 a 180 días y la de corto plazo de 1 a 24 horas, información que es publicada diariamente en su página web (www.ideam.gov.co).

Finalmente, Vélez *et al.* (2004) desarrollan, a diferencia del resto de autores, un modelo físico, en el cual acoplan un modelo hidrológico con un modelo geotécnico de talud infinito, sin embargo no logran implementarlo para una cuenca o área específica.



3. DATOS Y METODOLOGÍA

El análisis de umbrales críticos de lluvia para el pronóstico de la amenaza por movimientos en masa en el valle de Aburrá se realizó mediante un procedimiento empírico, en el cual se construyó una base de datos de movimientos en masa y se usó una base de datos de precipitación con registros de resolución temporal cada 15 minutos; posteriormente a cada movimiento en masa se le asignó una serie de precipitación histórica correspondiente a la estación de lluvia que comprendiera el área de influencia del lugar donde ocurrió el evento, finalmente se calcularon la lluvia acumulada (1, 3, 5 y 7 días) y la lluvia acumulada antecedente (5, 10, 15, 30, 60 y 90 días) para cada movimiento en masa.

La distribución intraanual de los movimientos en masa presenta las mismas tendencias reportadas por Echeverri y Valencia (2004), Moreno *et al.* (2006) y Aristizábal y Gómez (2007) donde los dos periodos lluviosos anuales de la región, los cuales corresponden a los trimestres de marzo-abril-mayo (MAM) y septiembre-octubre-noviembre (SON), tienen una influencia directa sobre el número promedio de movimientos en masa ocurridos cada mes. La figura 1 ilustra el comportamiento intraanual de los movimientos en masa utilizados para la definición

de umbrales críticos de lluvia en el Valle de Aburrá, coincidente con el comportamiento bimodal de los periodos lluviosos en la región.

3.1 Base de datos de movimientos en masa

Se construyó una base de datos de movimientos en masa detonados por lluvia ocurridos en el Valle, a partir de la base de datos sobre desastres implementada por el AMVA, la cual emplea el software DesInventar. La base de datos del AMVA registra eventos reportados por diferentes medios e instituciones a partir del año 1880 y sólo en el periodo 1950-2008 se encuentran registrados 2368 movimientos en masa.

Dicha base de datos se depuró usando cuatro criterios: (a) eventos ocurridos entre los años 1989 y 2008, ya que dicho periodo presenta mayor asiduidad en la recolección de los datos, debido al aumento de fuentes de información, (b) eventos en los cuales aparece como causa asociada la precipitación, (c) eventos con información espacial precisa que permita localizarlos geoespacialmente a nivel de manzana o precisión de 100 m, y (d) eventos con información temporal precisa de la fecha de su ocurrencia.

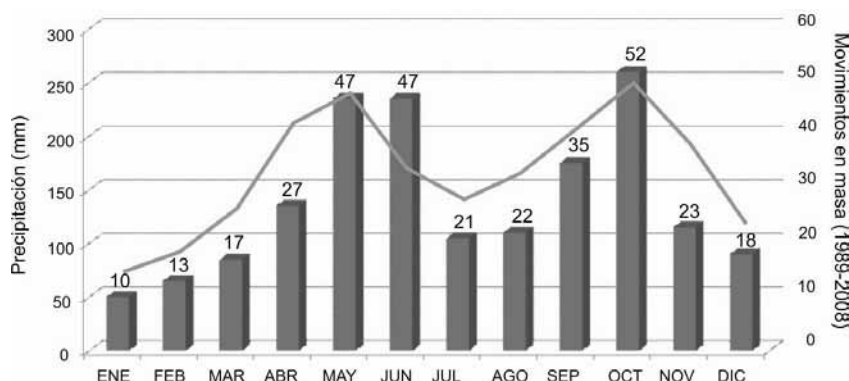


Figura 1. Relación entre la precipitación media mensual en el valle de Aburrá (EPM, 2005) y los movimientos en masa del periodo 1989-2008

Aplicando estos cuatro criterios los 2368 movimientos en masa de la base de datos del AMVA se redujeron a 408 que cumplían satisfactoriamente los criterios de depuración descritos. De esta manera se procedió a georreferenciar los 408 movimientos en masa utilizando el aplicativo ArcMap de la herramienta ArcGIS. La figura 2 muestra la concentración de los movimientos en masa según el área

de influencia asociadas a cada estación de lluvia. En esta figura, cada polígono representa el área de influencia de una estación de lluvia, en tanto que el tono e intensidad del color indica la concentración de los movimientos, los tonos más oscuros representan un mayor número de movimientos en masa asociados al área de influencia de dicha estación de lluvia.

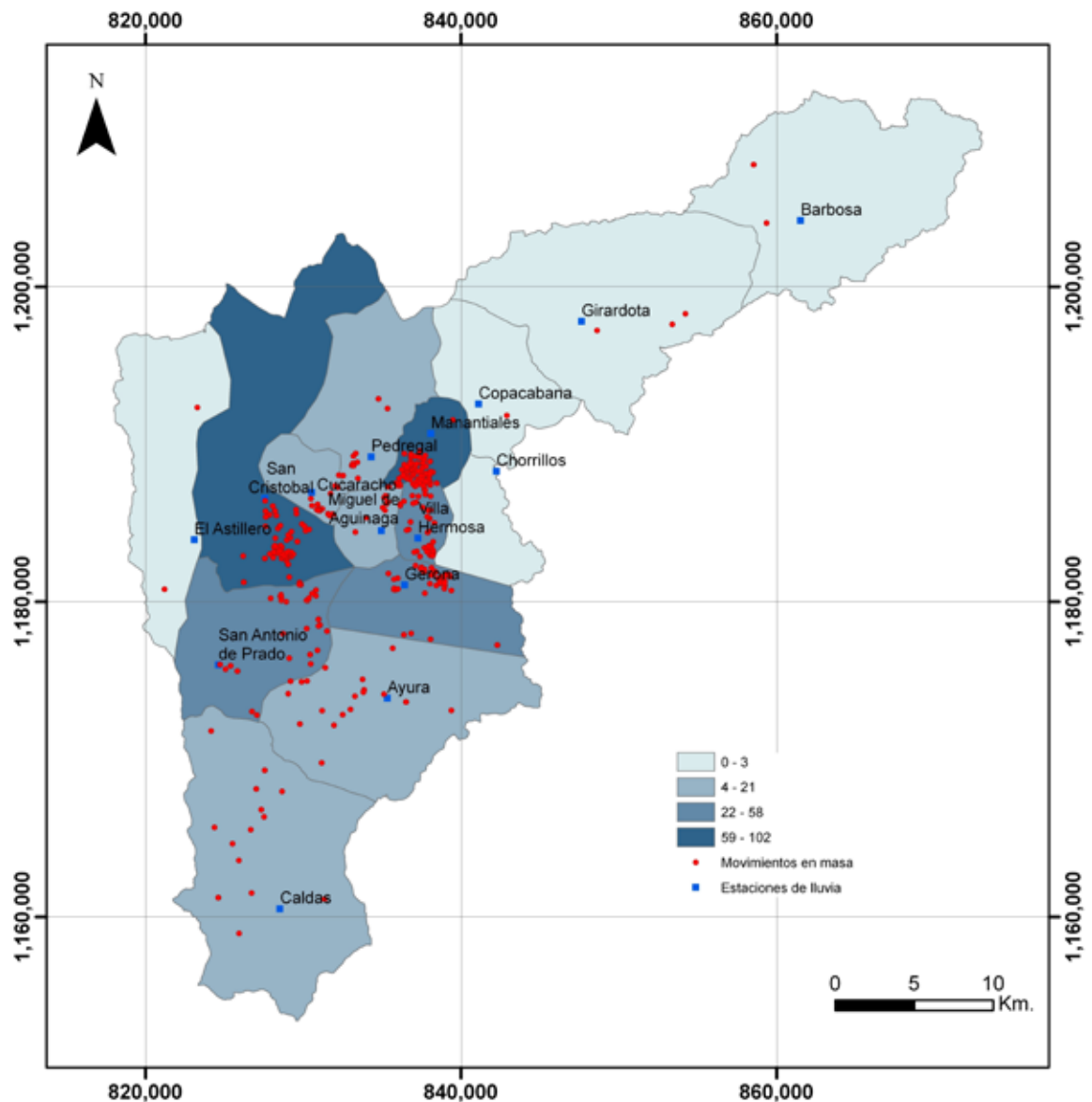


Figura 2. Concentración de los movimientos en masa según el área de influencia de las estaciones hidrometeorológicas



3.2 Base de datos de precipitación

Las series de precipitación histórica se construyeron a partir de los registros obtenidos de la red hidrometeorológica de la cuenca del río Porce perteneciente a EPM, con información de 15 estaciones de seguimiento instaladas a lo largo del valle de Aburrá. El registro de cada estación suministra información sobre el año, mes, día, hora, minuto y calidad del dato; todas las estaciones presentan registros acumulados con resolución temporal cada 15 minutos (96 datos por día), de manera que la tabla de lluvia diaria en cada estación se generó sumando los 96 registros diarios comprendidos entre las 00:00 y las 24:00 horas de cada día.

Así como los movimientos en masa, se georreferenciaron las 15 estaciones de lluvia y se determinó su área de influencia (ver figura 2). Dentro de cada uno de los polígonos de influencia, se considera homogénea la distribución de lluvias e igual a la de la estación en la que se mide. Esta hipótesis simplificadora es en rigor una fuente de error en la capacidad de predicción de los umbrales encontrados, la cual es motivo de investigación en trabajos que se desarrollan como parte de una tesis de doctorado en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia y una tesis de maestría en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Brasilia. Para la determinación del área de influencia de cada estación de lluvia se utilizó la aplicación *ArcToolbox* de *ArcGis*, con la cual se crearon polígonos de Thiessen; sin embargo, teniendo en cuenta la inconveniencia de este método de interpolación para definir áreas de influencia en regiones montañosas, se procedió a modificar estos polígonos considerando principalmente las características topográficas del Valle a partir de la construcción de un modelo de elevación digital (DEM) de la región, así como las isoyetas de precipitación media anual de cada una de las estaciones de seguimiento. A partir de esas consideraciones se obtuvo la versión modificada de los polígonos de Thiessen.

A partir del procesamiento de los datos de lluvia para cada una de las estaciones de la red hidrometeorológica, la cantidad de movimientos en masa para analizar la lluvia acumulada antecedente se redujo de 408 a 332. Es decir, 76 movimientos en masa de la base de datos construida fueron descartados debido a la baja calidad del registro histórico de lluvias anterior a la fecha de ocurrencia del evento. Vale la pena destacar que la mayoría de los movimientos en masa descartados ocurrieron entre 1989 y 1995, periodo en el cual los pluviómetros instalados, las mediciones y lecturas (directas o análogas) de los datos de lluvia eran menos precisos y confiables y, por tanto, los códigos de calidad de los datos sugerían baja calidad, repetición o ausencia del registro. Teniendo en cuenta esta limitación, los 76 movimientos en masa se excluyeron considerando que podrían afectar o distorsionar el proceso de definición de los umbrales críticos de lluvia acumulada.

3.3 Limitaciones de los datos

Aunque se realizó un trabajo exhaustivo en la depuración de la información de movimientos en masa y precipitación, existen limitaciones importantes que deben ser consideradas para interpretar y valorar los resultados. Entre estas limitaciones sobresalen las incertidumbres asociadas a la calidad de los datos de lluvia, a la localización de los movimientos en masa, al área de influencia de las estaciones de seguimiento y a la subjetividad de los métodos empíricos utilizados.

Los movimientos en masa considerados en el estudio se suponen como detonados por lluvia, no obstante otros componentes, principalmente el antrópico, también están asociados a su ocurrencia.

La localización de los movimientos en masa en coordenadas geográficas de latitud y longitud no necesariamente corresponde al lugar exacto donde ocurrió el evento; en el área urbana de los municipios la localización corresponde a un margen de error del orden de una hectárea, mientras tanto en el área rural corresponde a las coordenadas geográficas del

centroide de la vereda donde tuvo lugar el evento, por lo tanto, para estos casos la localización real puede variar significativamente.

El área de influencia correspondiente a cada estación de la red hidrometeorológica está determinada en gran medida por métodos de interpolación (polígonos de Thiessen) que no tienen en cuenta la elevación del terreno; estas áreas se ajustaron a la topografía del Valle y a las isoyetas de precipitación media anual de la región; sin embargo, no consideran estrictamente las características hidrometeorológicas locales o la variabilidad espacial de las lluvias en la región, elemento fundamental para determinar con precisión el área de influencia de las estaciones.

La lluvia acumulada evaluada para cada movimiento en masa se supone como una aproximación que no necesariamente representa la acumulación real de lluvia antecedente que generó el evento, ya que en realidad representa la lluvia precipitada en el punto donde se localiza el sensor de lluvia y en ningún momento la lluvia en el punto donde ocurrió el movimiento en masa.

Los umbrales críticos de lluvia se determinaron visualmente a partir de los patrones de dispersión de los movimientos en masa, obtenidos de las diferentes combinaciones de lluvia acumulada y lluvia antecedente, de manera que fuera posible establecer la relación entre la ocurrencia de los eventos y la lluvia antecedente. Trabajos recientes de Jaiswal y Van Westen (2009) propusieron procedimientos estadísticos que permiten mejorar la definición de dichos umbrales, sin embargo, son necesarios mayores esfuerzos en implementar desarrollos estadísticos.

Como limitación final es importante destacar que el presente análisis solamente considera los días en los cuales ocurrieron movimientos en masa. No se consideran aquellos días en los cuales, superados los umbrales, no se presentaron movimientos en masa.

4. DEFINICIÓN DE UMBRALES CRÍTICOS DE LLUVIA

Las figuras 3, 4, 5 y 6 presentan las posibles combinaciones de lluvia acumulada de 1, 3, 5 y 7 días contra la lluvia acumulada antecedente de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días, evaluadas para cada uno de los 332 movimientos en masa. La Lluvia Acumulada (LA), o lluvia del corto plazo, representa la cantidad de lluvia caída en los días inmediatamente previos a la ocurrencia del evento, incluyendo las 24 horas del día de su ocurrencia, mientras que la Lluvia Acumulada Antecedente (LAA), o lluvia del largo plazo, corresponde a la cantidad de lluvia caída en los días precedentes a los que se consideraron en la Lluvia Acumulada (LA).

La LA de 1 día presenta un umbral máximo de 30 mm para todas las combinaciones de LAA (ver figura 3). En tanto que la LAA presenta un máximo que se incrementa a partir de 100 mm para la LAA de 5 días hasta 640 mm para la LAA de 90 días. A partir de la LAA de 30 días se logra diferenciar un umbral mínimo alrededor de los 60 mm, por debajo del cual unos pocos movimientos en masa ocurren, y de 160 mm para la LAA de 60 días, reduciéndose un poco el porcentaje de eventos dentro de los umbrales, pero conservándose muy bajo el número de casos que ocurren por debajo del umbral mínimo, el cual representa el peor escenario para un pronóstico, ya que corresponde a eventos que ocurren sin alcanzar aún el umbral de lluvia crítica. La LAA de 90 días presenta un umbral mínimo de 200 mm.

La LA de 3 días presenta un umbral máximo de lluvia de 80 mm, por debajo del cual ha ocurrido más del 90 % de los movimientos en masa (ver figura 4). A partir de la LAA de 30 días se marca un umbral mínimo, alrededor de los 100 mm, es mucho más claro para 60 días, en que aumenta a 160 mm, y a 240 mm para la LAA de 90 días, pero en este último caso aumentando levemente la dispersión y, por lo tanto, disminuyendo el porcentaje de eventos dentro de los umbrales (80,1 %).

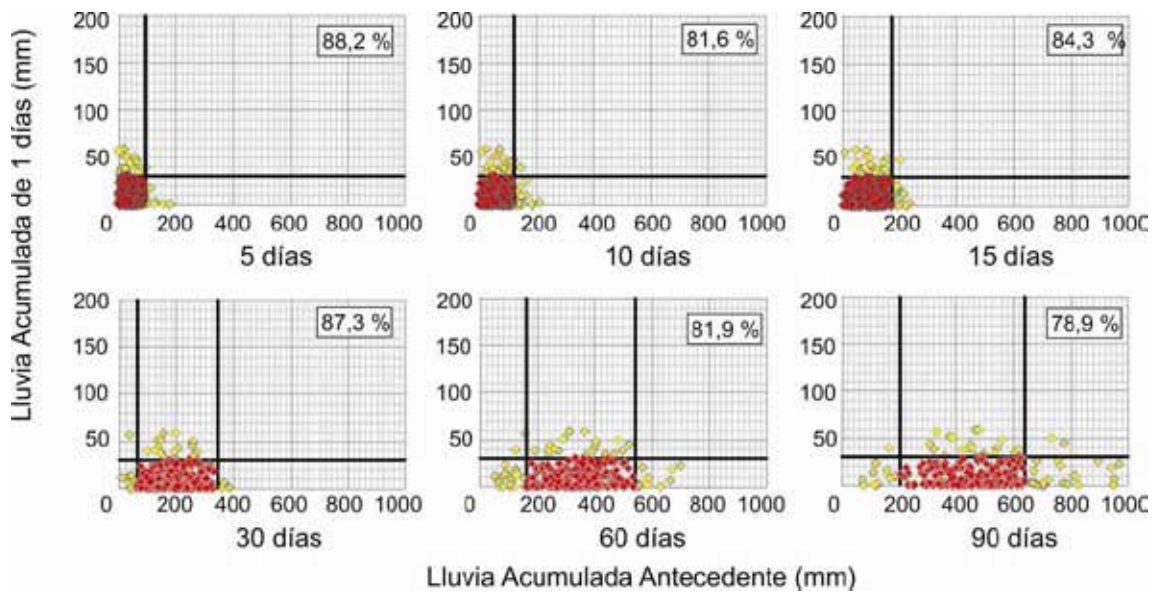


Figura 3. Lluvia Acumulada (LA) de 1 día contra Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días a la Lluvia Acumulada (LA) de 1 día. Las líneas oscuras representan los umbrales máximos y mínimos de lluvia ajustados visualmente, a partir de los cuales se presenta el mayor número de movimientos en masa o hasta el cual ya se han presentado la mayor parte de movimientos en masa. En el cuadro superior derecho se presenta el porcentaje con respecto al número total de movimientos en masa que se encuentran dentro del umbral.

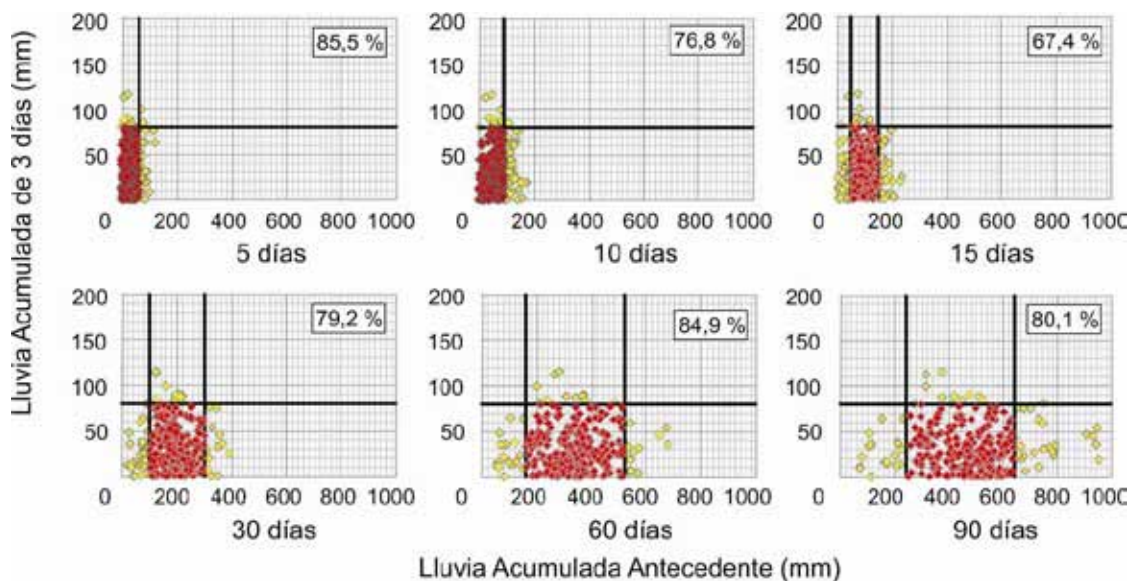


Figura 4. Lluvia Acumulada (LA) de 3 días contra Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días a la Lluvia Acumulada (LA) de 3 días. Las líneas oscuras representan los umbrales máximos y mínimos de lluvia ajustados visualmente, a partir de los cuales se presenta el mayor número de movimientos en masa o hasta el cual ya se han presentado la mayor parte de movimientos en masa. En el cuadro superior derecho se presenta el porcentaje con respecto al número total de movimientos en masa que se encuentran dentro del umbral.

La LA de 5 días presenta la menor dispersión con los mayores porcentajes de movimientos en masa dentro de los umbrales máximos y mínimos (ver figura 5), conservando la tendencia de aumentar 20 mm el umbral máximo de LA (100 mm). A partir de la LAA de 30 días se empieza a definir claramente un umbral mínimo de lluvia alrededor de los 60 mm, a partir del cual ocurre el mayor porcentaje de movimientos en masa (>97 %); éste aumenta a 160 mm considerando la LAA de 60 días, y a 200 mm para la LAA de 90 días.

La LA de 7 días conserva las tendencias y presenta un umbral máximo de 120 mm. De igual forma, a partir de la LAA de 30 días se diferencia un umbral mínimo, en este caso de 60 mm, el cual aumenta progresivamente hasta alcanzar 160 mm para 60 días antecedentes, y 200 mm para 90 días antecedentes (ver figura 6).

En términos generales, el umbral máximo de Lluvia Acumulada (LA) o lluvia del corto plazo varía entre 30 mm cuando se considera 1 día y 120 mm cuando se consideran 7 días, aumentando gradualmente 20 mm a partir de 3 días, del día 1 al día 3 se observa un incremento mayor de 50 mm. Sin embargo, no se logra establecer en ninguna de las combinaciones un umbral mínimo de LA; se presentan movimientos en masa desde los 0 mm hasta los 190 mm.

El umbral máximo de Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) o lluvia del largo plazo varía desde 60 mm, cuando se consideran 5 días, hasta 620 mm cuando se consideran 90 días, independientemente de la LA de 1 a 7 días.

Otro elemento importante para destacar es que las combinaciones de lluvia que consideran días de LAA inferiores a 15 días no logran establecer

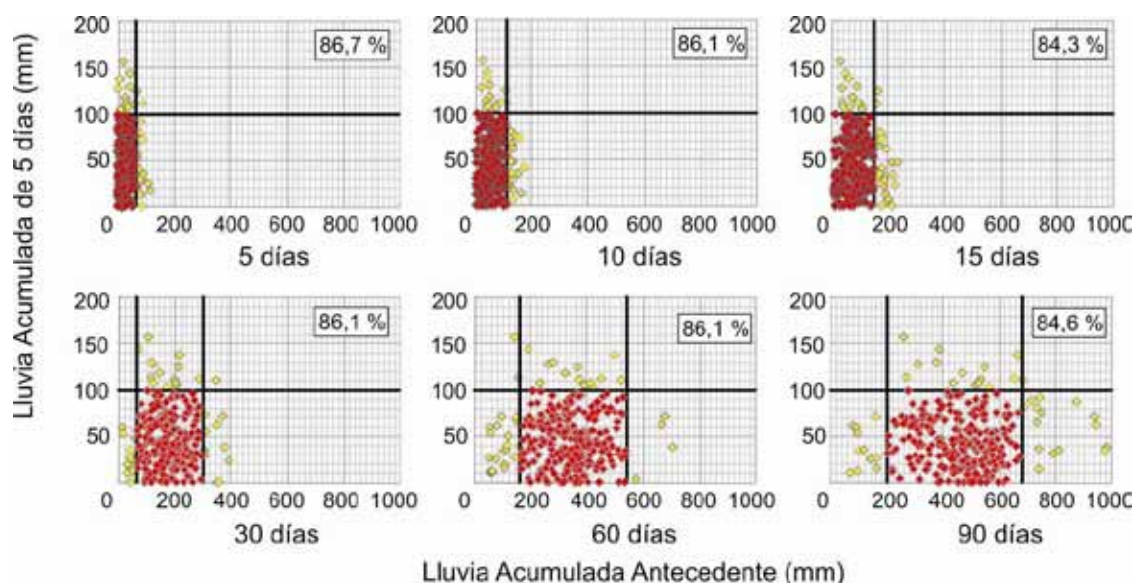


Figura 5. Lluvia Acumulada (LA) de 5 días contra Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días a la Lluvia Acumulada (LA) de 5 días. Las líneas oscuras representan los umbrales máximos y mínimos de lluvia ajustados visualmente, a partir de los cuales se presenta el mayor número de movimientos en masa o hasta el cual ya se han presentado la mayor parte de movimientos en masa.

En el cuadro superior derecho se presenta el porcentaje con respecto al número total de movimientos en masa que se encuentran dentro del umbral.



un umbral mínimo de lluvia; solamente cuando se consideran periodos mayores, a partir de 30 días, se diferencia un umbral mínimo similar para todas las combinaciones de lluvia; 60 mm cuando se consideran 30 días de LAA, 160 mm si se toman en cuenta 60 días de LAA, y 200 mm cuando se consideran 90 días de LAA.

Los mayores porcentajes de movimientos en masa localizados dentro de los umbrales máximos y mínimos se presentan para LA de 5 días, todos por encima de 84 %. En tanto que la LA de 3 días presenta los menores porcentajes de movimientos en masa dentro de los mismos umbrales y, por tanto, las mayores dispersiones.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

La definición de amenaza comprende un elemento fundamental: la probabilidad, en términos de tiempo y espacio. Estos umbrales empíricos o

estadísticos, como son conocidos en la literatura, son un excelente indicador del tiempo, ya que pretenden responder a la pregunta de cuándo ocurrirán los movimientos en masa, sin embargo, no intentan responder al segundo elemento en términos espaciales, dónde ocurrirán. Para la aplicación de umbrales de lluvia empíricos es fundamental, además de encontrar los umbrales propios para cada región de acuerdo con sus condiciones locales, combinarlos con cartografía detallada de las condiciones de amenaza y vulnerabilidad de la región para la cual fueron definidos. Con estas herramientas sería posible con antelación tomar acciones preventivas y de mitigación que logren minimizar los impactos generados por la ocurrencia de los movimientos en masa.

En general, se observa de los resultados obtenidos que la lluvia antecedente de los días más recientes a la ocurrencia del movimiento en masa permite diferenciar umbrales de lluvia máximos; mientras tanto los umbrales de lluvia mínimos

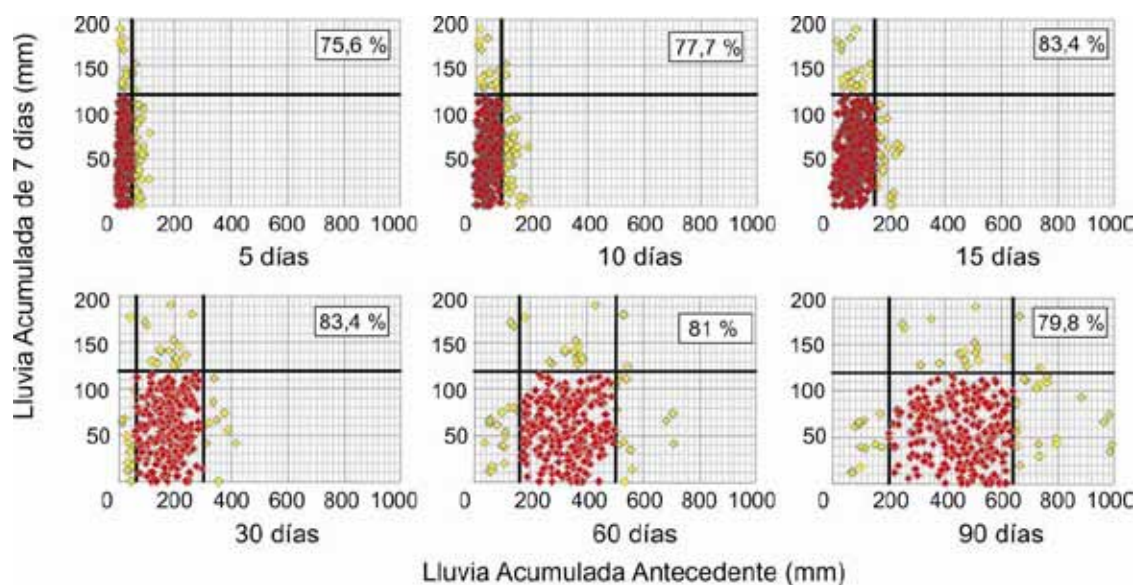


Figura 6. Lluvia Acumulada (LA) de 7 días contra Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días a la Lluvia Acumulada (LA) de 7 días. Las líneas oscuras representan los umbrales máximos y mínimos de lluvia ajustados visualmente, a partir de los cuales se presenta el mayor número de movimientos en masa o hasta el cual ya se han presentado la mayor parte de movimientos en masa. En el cuadro superior derecho se presenta el porcentaje con respecto al número total de movimientos en masa que se encuentran dentro del umbral.

solamente se diferencian cuando se consideran combinaciones de LLA superiores a 30 días, y estos permanecen constantes para cualquier combinación de LA. Los umbrales máximos son de poca utilidad para sistemas de alerta temprana, ya que sólo indican el umbral por debajo del cual ya ha ocurrido el gran porcentaje de movimientos en masa. La situación es diferente para los umbrales mínimos, los cuales son determinantes para los sistemas de alerta temprana, ya que estos indican la cantidad de lluvia por encima de la cual se incrementan de modo drástico las probabilidades de ocurrencia de movimientos en masa. Por ello se convierten en herramientas fundamentales cuando se vigila continuamente la precipitación en una región específica, ya que señalan que, cuando dichos umbrales han sido superados, es necesario emitir las alertas debido a la inminente ocurrencia de movimientos en masa.

El hecho de que no se logre diferenciar umbrales de lluvia mínimos para la LA y se presenten movimientos en masa desde valores de LA cercanos a los cero milímetros (0 mm) aparentemente indica una mayor influencia de la LAA. Es decir, la lluvia de los días inmediatamente previos a la ocurrencia de un movimiento en masa parece no ser determinante en la ocurrencia de los eventos en el Valle de Aburrá. El elemento fundamental en la ocurrencia de los movimientos en masa parece estar controlado por la lluvia estacional, es decir, la cantidad de lluvia que ha caído en el mes anterior (30 días de LAA), los dos meses anteriores (60 días de LAA) y los tres meses anteriores (90 días de LAA). Sin embargo, es necesario ser prudentes con estos resultados; se requieren mayores análisis que sustenten dicha conclusión, ya que se esperaría que las lluvias del largo plazo generen movimientos en masa profundos, lo cual no se observa en la realidad, ya que predominan los movimientos superficiales. Un elemento que podría responder a estas observaciones está en que los movimientos en masa utilizados para el presente análisis provienen de una base de datos histórica, alimentada esencialmente de periódicos locales y nacionales, en la

cual es probable que predominen los eventos de gran volumen y mayores afectaciones.

En este punto vale la pena aclarar que tanto los valores de LA como de LAA son calculados según las series de lluvia correspondientes a los días anteriores a cada suceso analizado, es decir, ambos valores podrían tener o no umbrales mínimos cercanos a cero. La distribución de precipitación media mensual mostrada en el histograma de la figura 1 no tiene relación de ninguna clase con el cálculo de LAA, es decir, no son los valores de lluvia del mes calendario anterior a la ocurrencia del evento los que se consideran en el cálculo de los 30 días de LAA, sino la suma aritmética de los treinta días anteriores. Esta discusión es relevante porque, en caso de considerar para el cálculo de la LAA la lluvia ya acumulada del mes calendario anterior, el inicio de las series no estaría en cero y, por lo tanto, cualquier valor acumulado de uno o más meses tendrá un valor acumulado mayor de cero. De esta forma el umbral mínimo de LAA estaría sesgado por los valores de lluvia acumulados en los meses calendario anteriores.

Los umbrales máximos de LA, para todas las combinaciones de lluvia antecedente, aparentemente indican la poca influencia de la lluvia inmediatamente anterior al evento. La combinación de 1 día de LA y 5 días de LAA (ver figura 3) correspondería a la combinación que debe mostrar la influencia de la LA, ya que los días de lluvia antecedente considerados son muy pocos; en caso de existir una fuerte influencia de la LA o de la cantidad de lluvia que cae en sólo un evento, se deberían observar puntos en la margen superior izquierda de la gráfica con registros de LA para 1 día muy altos. Por el contrario se presenta un umbral máximo alrededor de 30 mm, lo cual en términos generales no representa un evento de lluvia capaz de incrementar por sí solo las presiones de poros positivas o reducción de la succión lo suficiente para que sea detonado un movimiento en masa. Menos del 10 % de los movimientos en masa ocurrieron bajo condiciones de lluvia mayores de 30 mm, es decir, probablemente tan solo este



número de movimientos en masa, relativamente muy bajo, fue detonado por lluvias intensas en solo un día, sin importar la lluvia antecedente o las condiciones previas de presión de poros de la ladera. Es necesario también en este caso evaluar con detalle los resultados, ya que 30 mm en 24 horas podría no ser críticos, pero en términos de intensidad, es decir, en periodos más cortos, podrían ser eventos con la suficiente capacidad de detonar movimientos en masa sin importar las condiciones antecedentes.

De otra parte se destaca el hecho de que la combinación de lluvia acumulada de 3 días y 15 días, la cual fue propuesta por Chleborad (2003) y por Chleborad, Baum y Godt (2006) para la ciudad de Seattle en Washington y ha sido retomada por Moreno *et al.* (2006) y Echeverri y Valencia (2004) para definir los umbrales de lluvia en Antioquia y la cuenca de la quebrada La Iguaná en la ciudad de Medellín, presentan los menores porcentajes de movimientos en masa dentro de los umbrales, y por lo tanto, las mayores dispersiones. Específicamente la combinación de 3 días contra 15 días presenta el menor porcentaje de todas las combinaciones posibles realizadas (67,4 %). Esto indica, como lo manifiesta Crosta (1998), que las combinaciones de días acumulados y días antecedentes son propias para cada región, y depende de múltiples variables físicas e hidrológicas, por lo cual no pueden ser repetidas en áreas diferentes.

De acuerdo con los porcentajes de movimientos en masa dentro de los umbrales de lluvia establecidos, se propone que las combinaciones de lluvia que consideran la LA de 5 días son las que mejor pueden representar los umbrales de lluvia, específicamente las combinaciones de LA de 5 días y LAA de 30, 60 y 90 días, que se mantienen constantes sin importar el número de días de LA considerados. De esta forma los resultados indican un umbral crítico mínimo, a partir del cual ocurre el mayor porcentaje de movimientos en masa detonados por lluvias; alrededor de los 60 mm para 30 días de LAA, 160 mm para 60 días de LAA y 200 mm para 90 días de LAA.

Y de acuerdo con la menor dispersión de las diferentes combinaciones de la LA de 5 días y con el hecho de que se logre diferenciar claramente un umbral crítico mínimo de lluvia, se resalta la combinación de 5 días de LA contra 60 días de LAA (5 contra 60) como la combinación que aparentemente mejor indica las condiciones propicias para la ocurrencia de movimientos en masa detonados por lluvia en el valle de Aburrá. Analizando en detalle dicha combinación se puede establecer que sólo el 6,3 % de los eventos reportados ocurrieron por debajo de 160 mm en los 60 días antecedentes, tan sólo el 1,2 % de los eventos ocurrieron para días con lluvias antecedentes superiores a 540 mm, y el 6,3 % de los eventos reportados ocurrieron para días con lluvias acumuladas superiores a los 100 mm.

6. CONCLUSIONES

El presente estudio presenta un análisis clásico para la definición de umbrales críticos de lluvia por métodos empíricos, usando movimientos en masa y estaciones de lluvia dentro del valle de Aburrá. Los resultados obtenidos indican que el mayor condicionante para la ocurrencia de movimientos en masa en el valle de Aburrá es la lluvia acumulada antecedente (LAA) o lluvia de largo plazo. Los datos indican que los movimientos en masa empleados para el análisis ocurrieron para Lluvias Acumuladas Antecedentes (LAA) superiores a los 60 mm para 30 días, 160 mm para 60 días y 200 mm para 90 días.

Estos datos podrían proponerse como nuevos umbrales para el valle de Aburrá, sin embargo, las limitaciones propias del método y de los datos exigen más investigaciones y trabajos de campo que verifiquen o rechacen las observaciones obtenidas a partir de los datos usados o de nuevas bases de datos. Este tipo de análisis, ampliamente realizados en el mundo, en los cuales no se consideran los días de lluvia en que no se presentaron movimientos en masa, limitan en gran medida las observaciones y conclusiones realizadas, ya que son claramente sesgados desde el punto de vista de los movimientos en masa, y no

permiten conocer en realidad la importancia de los umbrales, pues no estiman el número de casos fallidos, en los cuales se supera el umbral y no se presentan movimientos en masa, es decir, el porcentaje de error o capacidad de predicción, elemento fundamental para un sistema de alerta temprana.

Por ello, deberán emprenderse nuevos trabajos en este sentido que permitan evaluar los umbrales críticos de lluvia basados en las series de lluvia, probabilidades de excedencia, y corroborando los días de evento o no evento en las bases de datos de movimientos en masa, este puede ser un mejor acercamiento a la realidad de los umbrales de lluvia críticos definidos por método empíricos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, las Empresas Públicas de Medellín, el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA), la Universidad EAFIT y la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo y colaboración brindados a la presente investigación.

REFERENCIAS

- Aleotti, P. (2004). "A warning system for rainfall-induced shallow failures". *Engineering Geology*, vol. 73, No. 3-4 (June). pp. 247-265.
- Arango, J. *Relaciones lluvia-deslizamiento y zonificación geotécnica de la comuna 2 de la ciudad de Manizales*. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2000.
- Aristizábal, E.; Gamboa, M. F. y Leoz, F. J. (2010). "Sistema de alerta temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia para el valle de Aburrá, Colombia". *Revista EIA*, No. 13, pp. 155-169.
- Aristizábal, E. y Gómez, J. (2007). "Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá originados por fenómenos naturales y antrópicos en el período 1880-2007". *Revista Gestión y Ambiente*, vol. 10, No. 2 (agosto), pp. 17-30.
- Aristizábal, E. y Yokota, S. (2006). "Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburrá". *Revista Dyna*, vol. 73, No. 149 (julio), pp. 5-16.
- Castellanos, R. 1996. *Lluvias críticas en la evaluación de amenazas de eventos de remoción de masa*. Tesis de Maestría (Geotecnia). Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, 1996. 270 p.
- Castellanos, R. y González, A. 1996. *Relaciones entre la lluvia anual y la lluvia crítica que dispara movimientos en masa*. IX Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Santafé de Bogotá, pp. 4.62-4.70.
- Castellanos R. y González, A. 1997. Algunas relaciones de precipitación crítica - duración de lluvias que disparan movimientos en masa en Colombia. 2nd Panamerican Symposium on Landslides - ABMS, vol. 2. Río de Janeiro (10-14 November), pp. 863-878.
- Costa, J. E. and Baker, V. R. *Surficial geology. Building with the Earth*. New York: John Wiley & Sons, 1981. 510 p.
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)/UCL/WHO. Annual disaster statistical review 2009, the numbers and trends. Vos, Femke; Rodriguez, Jose; Below, Regina and Guha-Sapir, D. (eds.). Brussels, 2010. 38 p.
- Chleborad A. F. 2003. *Preliminary evaluation of a precipitation threshold for anticipating the occurrence of landslides in the Seattle, Washington, area*. U.S. Geological Survey Open-file report 03-463.
- Chleborad A. F.; Baum R. L. and Godt J. W. 2006. *Rainfall thresholds for forecasting landslides in the Seattle, Washington, area: exceedance and probability*. U.S. Geological Survey Open-file Report 2006-1064.
- Collins B. D. and Znidarcic D. (2004). "Stability analyses of rainfall induced landslides". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, No. 4, pp. 362-372.
- Crosta, G. (1998). "Regionalization of rainfall threshold: An aid for landslide susceptibility zonation". *Environmental Geology*, vol. 35, No. 2-3, pp. 131-145.
- Echeverri, O. y Valencia, Y. (2004). "Análisis de los deslizamientos en la cuenca de la quebrada La Iguaná de la ciudad de Medellín a partir de la integración lluvia-pendiente-formación geológica". *Dyna*, vol. 71, No. 142, pp. 33-45.
- Empresas Públicas de Medellín (EPM) (2005). *Revista Hidrometeorológica, cincuenta años de hidrometeorología en Empresas Públicas de Medellín*. Vol. 1, No. 1 (noviembre). 150 p.



- Glade, T.; Crozier, M. and Smith, P. (2000). "Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical «antecedent daily rainfall model»". *Pure and Applied Geophysics*, vol. 157, (August), No. 6-8, pp. 1059-1079.
- Gómez, S. *Predicción de niveles freáticos a partir de la precipitación y su influencia en la estabilidad de taludes (caso de aplicación en la meseta de Bucaramanga)*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1990.
- Guzzetti, F.; Peruccacci, S. and Rossi, M. *Definition of critical threshold for different scenarios*. RISK-Advance Weather Forecast System to Advice on Risk Events and Management, 2005. 36 p. Available in: <http://palpatine.irpi.cnr.it/Geomorphology/projects1/completed/riskaware/doc/report_wp1_16.pdf/view>.
- Guzzetti F.; Peruccacci S.; Rossi M. and Stark C. P. (2008). "The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update". *Landslides*, vol. 5, No. 1, pp. 3-17.
- Iiritano, G.; Versace, P. and Sirangelo, B. (1998). "Real-time estimation of hazard for landslides triggered by rainfall". *Environmental Geology*, vol. 35, No. 2-3, pp. 175-183.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2002. Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamientos en tiempo real. Primer Simposio Latinoamericano de Control de Erosión, Bucaramanga (18-22 marzo).
- International Early Warning Programme (IEWP). 2005. Dedicated to Reducing Disasters through Effective People-Centred Early Warning Systems, World Conference on Disaster Reduction, Kobe, Hyogo, Japan.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)*, 2007. In: Parry, M. L.; Canziani, O. F., Palutikof, J. P.; Linden, P. J. v. d. and Hanson, C. E. (eds.) *Fourth Assessment Report of the IPC*
- Jaiswal, P. and Van Westen C. J. 2009. Rainfall-based temporal probability for landslide initiation along transportation routes in Southern India. In: *Landslide processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling*. France. pp. 139-143.
- Larsen, M. C. (2008). "Rainfall-triggered landslides, anthropogenic hazards, and mitigation strategies". *Advances in Geosciences*, vol. 14 (January), pp. 147-153.
- Mayorga, M. R. 2003. *Determinación de umbrales de lluvia detonantes de deslizamientos en Colombia*. Tesis de posgrado Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2003, p. 223.
- Moreno, H. A.; Vélez, M. V.; Montoya, J. D. y Rhenals, R., L. (2006). "La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: Análisis de su ocurrencia en las escalas inter-anual, intraanual y diaria". *Revista EIA*, No. 5, pp. 59-69.
- Paz, C. I. y Torres A. M. *Precipitación y su influencia sobre algunos deslizamientos ocurridos en las laderas del Valle de Aburrá*. Tesis pregrado, Universidad Nacional de Colombia, 1989. 174 p.
- Reichenbach, P.; Cardinali, M.; De Vita, P. and Guzzetti, F. (1998). "Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (Central Italy)". *Environmental Geology*, vol. 35, No. 2-3, pp. 146-159.
- Schuster R. L. *Socioeconomic significance of landslides*. In: Turner, A. K. and Schuster, R. L. (eds.). *Landslides investigation and mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247. Washington, D. C.: National Academy Press, 1996, pp. 129-177.
- Soeters, R. and Van Westen, C. J. *Slope instability recognition, analysis and zonation*. In: Transportation Research Board, National Research Council, Turner, A. K. and Schuster, R. L. (eds.). *Landslides investigation and mitigation*. Special Report 247. Washington, D.C.: National Academy Press, 1996, pp. 129-177.
- Suárez D. J. *Árbol de decisiones para la predicción y alerta de deslizamientos activados por lluvias*. XII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá, 2008. 6 p.
- Terlien, M. T. J. (1998). "The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds". *Environmental Geology*, vol. 35, No. 2-3, pp. 124-130.
- Van Westen, C. J. and Terlien, M. T. J. (1996). "An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS. A case study from Manizales (Colombia)". *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 21, No. 9 (September), pp. 853-868.
- Vélez, J., I.; Villarraga, M., R.; Álvarez, O. D.; Alarcón, J., E. y Quintero, F. *Modelo distribuido para determinar la amenaza de deslizamiento superficial por efecto de tormentas intensas y sismos*. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, Brasil, 2004.
- Wang, G. and Sassa, K. (2003). "Pore pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: Effects of grain size and fine-particle content". *Engineering Geology*, vol. 69, No. 1-2 (April), pp. 109-125.