

## **CARACTERÍSTICAS, DINÁMICA Y CAUSAS DEL MOVIMIENTO EN MASA DEL BARRIO EL SOCORRO (31 DE MAYO DE 2008) EN MEDELLÍN**

ÉDIER ARISTIZÁBAL\*

### **RESUMEN**

El presente artículo describe las causas y dinámica del movimiento en masa del día 31 de mayo de 2008 en la parte alta del barrio San Pedro, sector Las Peñitas del municipio de Medellín, el cual dejó un saldo trágico de 27 personas muertas y 16 lesionadas, además de la destrucción de 20 viviendas del barrio El Socorro. Sumado a Rosellón (1927), Media Luna (1954), Santo Domingo (1974), Villatina (1987) y El Barro (2005), corresponde a uno de los eventos más trágicos que han golpeado el valle de Aburrá en toda su historia. Para la caracterización del área del evento se utilizaron estudios previos realizados por diferentes instituciones de reconocido prestigio; para la caracterización, descripción de la dinámica predominante del evento y sus causas se usaron evidencia de campo recolectada en recorridos sobre el terreno e inspección visual el mismo día en que ocurrió, de forma tal que no se modificara por las labores propias de rescate, y finalmente se recurrió a los datos de precipitación de diferentes estaciones hidrometeorológicas de Empresas Públicas de Medellín (EPM) y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), con el fin de evaluar la influencia de la lluvia como elemento desencadenante. El evento inicial fue clasificado como un deslizamiento rotacional simple en dirección noreste, con una longitud aproximada de 60 m, el cual, debido a la saturación del material, se transformó en un movimiento tipo flujo de escombros que avanzó 140 m en dirección SE y NE. Como causas del evento se encuentran las pobres condiciones geomecánicas del material fuente y la cantidad de lluvia acumulada precedente de los últimos 15 días y antecedente del día 30 de mayo, cuando en tan solo 2 horas y 30 minutos cayeron 83,3 mm sobre la ciudad.

**PALABRAS CLAVE:** deslizamiento rotacional; flujo de escombros; El Socorro; Medellín.

---

\* Ingeniero Geólogo, Magíster en Ingeniería, Shimane University. Candidato a Doctor en Ingeniería (Universidad Nacional de Colombia). Funcionario Coordinador de Prevención y Atención de Desastres del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. edier.aristizabal@metropol.gov.co

## CHARACTERISTICS, DYNAMICS AND CAUSES OF THE MOVEMENT IN MASS OF THE DISTRICT EL SOCORRO (MAY 31, 2008) IN MEDELLÍN

### ABSTRACT

The article presents the causes and dynamic of the mass movement which occurred on May 31, 2008 in the higher part of San Pedro settlement, called Las Peñitas, Medellín. This tragic event left 27 dead people, 16 injured people and 20 houses destroyed of El Socorro settlement. This event with Rosellón (1927), Media Luna (1954), Santo Domingo (1974), Villatina (1987) and El Barro (2005) represents one of the most tragic events in the Aburrá Valley history. For the characterization of the area of the event previous work from different recognized, prestigious institutions was used; for the characterization, description of the predominant dynamics of the event and its causes ground evidence collected on the terrain and visual inspection the same day when it occurred were used, so that it did not change due to proper rescue works. The data of rainfall hydrometeorological stations of Empresas Públicas de Medellín (EPM) and Colombian Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM) were used, with the purpose of evaluating the influence of rain like triggering element. The mass movement was classified as simple rotational landslide on NE direction, with a longitude around 60 m, which due to high saturation levels, it changed to an debris flow moving 140 m ahead on SE direction, and finally the mass turned NE. Triggering causes are associated to geomechanical properties of soil and antecedent rainfall of previous 15 days and very intense rainfall event during May 30, when 83.3 mm fell down for just 2 hours and 30 minutes along the central part of the valley.

KEYWORDS: rotational landslide; debris flow; El Socorro; Medellin.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los movimientos en masa son con frecuencia los responsables de pérdidas humanas y económicas considerables alrededor del mundo, cuyo impacto aumenta con el desarrollo urbano y los cambios del uso del suelo. Aunque en países en desarrollo como Colombia, las pérdidas económicas generadas por este tipo de eventos pueden ser relativamente pequeñas, el número de pérdidas humanas es, por lo general, mucho mayor en comparación con países desarrollados como Japón, donde dichos casos también ocurren con frecuencia (Alcántara-Ayala, 2002).

En particular en el valle de Aburrá las complejas condiciones físicas del territorio, sumadas a los altos índices de vulnerabilidad, han propiciado escenarios con un alto potencial de pérdidas humanas y económicas ante la ocurrencia de fenómenos de origen natural tales como movimientos en masa (Aristizábal y Gómez, 2007). Estos eventos recurrentes en el valle de Aburrá han estado asociados al origen y evolución del valle, lo que ha modelado y

permitido su actual configuración (Aristizábal, 2004; Aristizábal, Roser y Yokota, 2005).

Recientes estudios sobre inventarios de desastres en el valle de Aburrá han permitido dimensionar la problemática de los movimientos en masa. Aristizábal y Gómez (2007) recopilan datos del periodo de 1880 al primer semestre del año 2007, incluyendo bases de datos anteriores realizadas por Hormaza (1991) y Saldarriaga (2003), registrando un total de 6.750 casos. Según dichos eventos, estos autores encuentran que para el valle de Aburrá las inundaciones representan el fenómeno de mayor recurrencia (42 %), seguido por los movimientos en masa (35 %), y los incendios forestales (15 %). En cuanto a los daños, los movimientos en masa han dejado un saldo trágico de 1.071 víctimas, que representan el 77% del total registrado, seguido por las avenidas torrenciales con el 13%, y las inundaciones con el 5%. Entre los movimientos en masa con mayores pérdidas asociadas ocurridos en el valle de Aburrá están: Rosellón (1927), Media Luna (1954), Santo Domingo Savio (1974), Villatina (1987) y El Barro (2005).

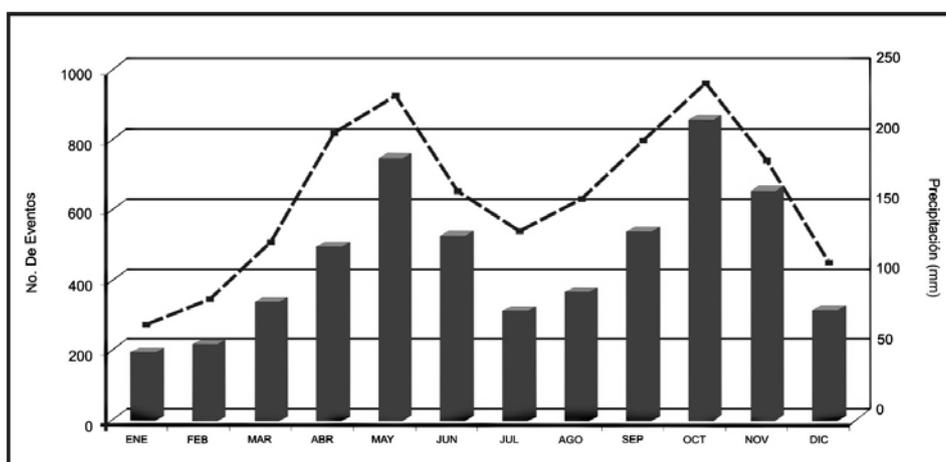


Los fenómenos de remoción en masa tienen múltiples causas, tales como geología, geomorfología, aspectos físicos y humanos; sin embargo, un solo factor, denominado como detonante, es considerado el estímulo externo que puede generar una respuesta casi inmediata de movilizar los materiales que conforman la vertiente, sea por el rápido incremento de los esfuerzos o por la reducción de la resistencia (Wang y Sassa, 2003; Crosta y Frattini, 2008). En ambientes tropicales, como el valle de Aburrá, un alto porcentaje de estos movimientos son desencadenados por precipitaciones intensas o largas (Aristizábal y Gómez, 2007), por lo que recientes investigaciones en Colombia han estudiado el rol de la lluvia como factor detonante (Paz y Torres, 1989; Gómez, 1990; Terlien, 1997; Arango, 2000; Echeverry y Valencia, 2004; Moreno *et al.*, 2006; Suárez, 2008).

Aristizábal y Gómez (2007) comparan el inventario de desastres y las estaciones de lluvia en el periodo 1880-2007, argumentando la estrecha relación entre la precipitación y la recurrencia de los eventos, con una tendencia bimodal y picos en los meses de mayo y octubre. De cada 10 casos que se presentan en el valle de Aburrá, 8 son de origen hidrometeorológico, ante todo, movimientos en masa e inundaciones (figura 1). Sin embargo, hacen un

llamado para el continuo levantamiento sistemático y detallado de los movimientos en masa que acontecen en el Valle de Aburrá, con el fin de realizar en el mediano plazo estudios y análisis en detalle de la relación lluvias contra movimientos en masa. Uno de los primeros pasos que pretende solucionar esta necesidad ha sido implementado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, entidad que ha venido actualizando día a día una completa base de datos sobre la ocurrencia de eventos de origen natural y antrópico en el valle (Aristizábal y Gómez, 2007).

No obstante, debido a que dicha base de datos solo pretende identificar las condiciones naturales del evento para su registro, son necesarios además reportes periódicos de los principales eventos ocurridos, elaborados por las entidades competentes y publicados en revistas científicas de amplia circulación nacional, que pueden en un futuro aportar información fundamental para nuevos estudios. Con tal concepto, este artículo pretende reportar, describir y discutir las causas y dinámica de uno de los más recientes sucesos en el valle de Aburrá, el ocurrido en el barrio San Pedro, sector Las Peñitas, pero en el cual, debido a su dinámica, los mayores perjuicios se presentaron en la parte baja, denominada barrio El Socorro, sector Piedra Lisa.



**Figura 1.** Distribución de eventos en el periodo 1880-2007 contra precipitación mensual media para el valle de Aburrá (tomado de Aristizábal y Gómez, 2007)

## 2. LOCALIZACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO

El área del deslizamiento se localiza en la microcuenca de la quebrada La Bolillala,

comuna 13, llamada San Javier, centro occidente del municipio de Medellín y parte central del valle de Aburrá, barrios San Pedro, sector Las Peñitas, y El Socorro, sector Piedra Lisa (figura 2).

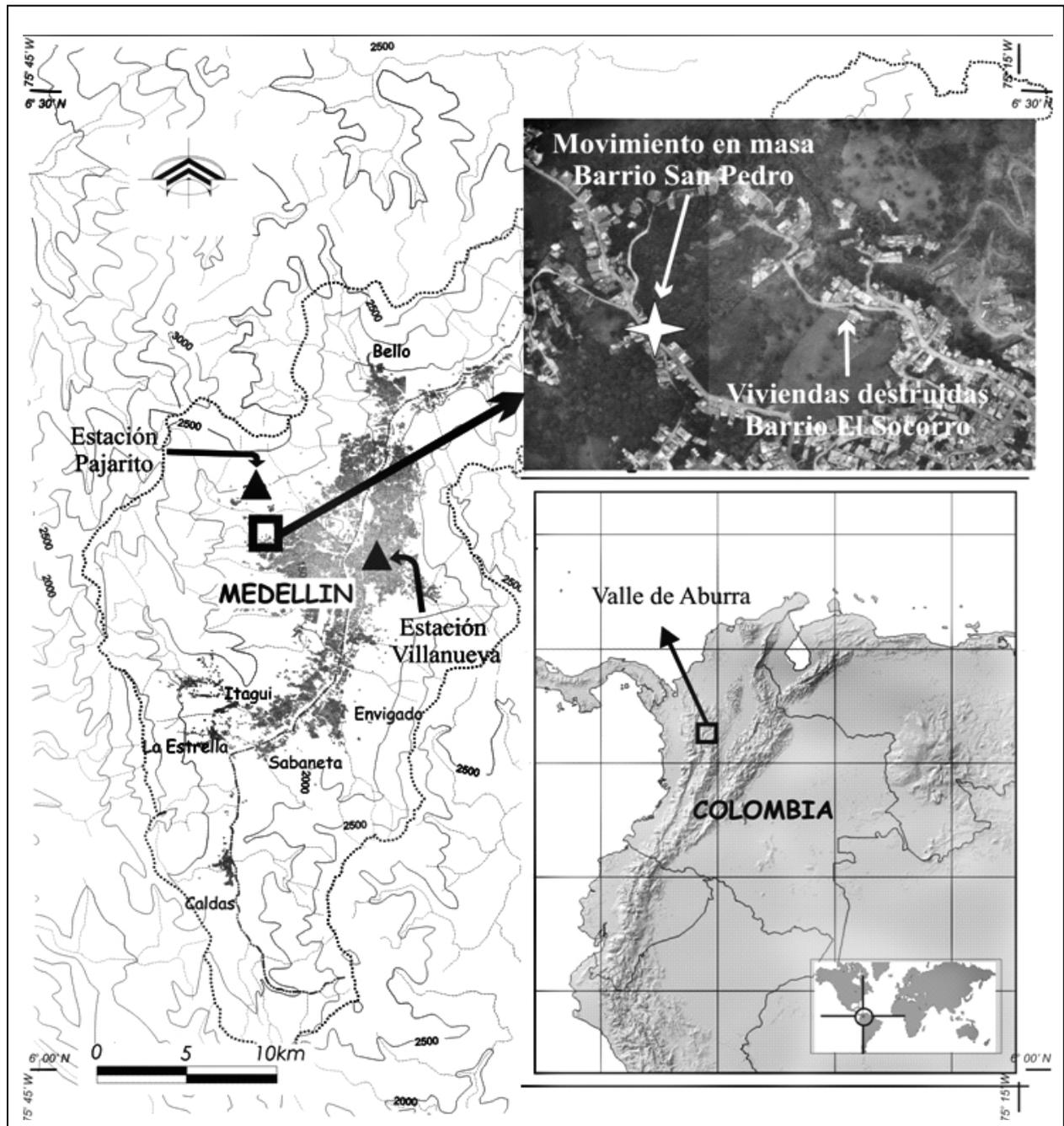


Figura 2. Localización del área afectada



De acuerdo con los datos de la Encuesta de Calidad de Vida para la ciudad de Medellín (Municipio de Medellín, 2006), la comuna 13 tiene 136.198 habitantes, que representan el 5,65 % de toda la población del municipio; habitan un total de 34.302 viviendas, con un promedio de 4 personas por vivienda. La población pertenece a los estratos 1 (bajo bajo) con el 37 %, estrato 2 (bajo) con el 29 %, y el estrato 3 (medio bajo) con el 28 %; el estrato 4 (medio) tan solo representa el 5 % del total. Con respecto al tipo de viviendas predominan estructuras de 1 a 3 pisos de mampostería con muros de ladrillo amarrados por vigas y losas que soportan las cargas, y en algunos casos muros confinados por vigas y columnetas, generalmente construidas por los mismos propietarios, con la asesoría en algunos casos de personas, tal vez con amplia experiencia en actividades de construcción, pero sin ningún tipo de formación técnica o profesional al respecto, lo cual permite suponer niveles de vulnerabilidad física considerables.

El basamento rocoso lo conforman rocas pertenecientes al stock de Altavista, el cual se caracteriza como un cuerpo granítico de composición cuarzo-diorítica, con horizontes de meteorización promedio de 15 m, limoarcillosos de color claro, seguido por un saprolito limoarenoso altamente susceptible a la erosión (Área Metropolitana del Valle de Aburrá-AMVA-, 2007). También se observan depósitos de vertiente, de tipo de flujos de escombros y lodos, sobre la parte baja de las vertientes, algunos de ellos con extensiones laterales que sobrepasan los 100 m de longitud y espesores estimados entre 5 y 10 m. El relieve generado sobre estas rocas se caracteriza por vertientes largas (> 100 m) y pendientes desde moderadas (40-60 %) a fuertes (60-100 %), con filos de formas sinuosas y puntas de formas suavizadas. La vegetación que predomina en el área son pastos altos, rastrojos y arbustos aislados de mediana altura.

Sobre las laderas se observan procesos de erosión laminar en la margen izquierda de la cuenca y cicatrices de movimientos en masa sobre la margen derecha. Los procesos de reptación son comunes

en todas las vertientes. Se observan algunos movimientos de menor extensión colgados en la parte media de las laderas, que siguen siendo activos con movimientos lentos. La mayor parte de las vertientes presenta procesos de reptación, acelerados y agudizados por sobrepastoreo, algunos de ellos con desgarres pequeños que han evolucionado a movimientos en masa.

### 3. CAUSAS DEL EVENTO

La precipitación como factor detonante en la ocurrencia de movimientos en masa ha sido estudiada por numerosos autores (Caine, 1980; Finlay, Fell y Maguire, 1997; Montgomery y Dietrich, 1994; Crosta, 1998; Crozier, 1999; Iverson, 2000). Las lluvias como detonantes de movimientos en masa, de ordinario, originan movimientos superficiales de suelo y flujos de lodos, los cuales se inician por una pérdida transitoria de la resistencia al cortante, resultado de un incremento de la presión de poros, causado por intensas lluvias que percolan en suelos permeables superficiales que se localizan sobre roca u horizontes menos permeables (Reichenbach *et al.*, 1998). El incremento en la presión de poros puede estar directamente relacionado con la infiltración de la lluvia y con el proceso de percolación o puede ser el resultado del aumento de los niveles de saturación desde los horizontes inferiores, por acumulación de agua debido al contacto menos permeable, lleno antrópico-suelo residual para este caso (Terlien, 1998).

Aunque es conocida la lluvia antecedente como un factor importante que predispone las condiciones de inestabilidad de una ladera, su influencia es difícil de cuantificar, ya que depende de diferentes factores, entre ellos la heterogeneidad de los suelos y las variaciones regionales del clima. Rahardjo *et al.* (2001) estudian la influencia de la lluvia antecedente en la estabilidad de las vertientes y encuentran que reduce la succión de la matriz en el suelo, causando que el coeficiente de permeabilidad en el suelo se incremente, lo que se traduce en una mayor

permeabilidad a la infiltración del suelo; como resultado la resistencia al cortante se reduce y, en consecuencia, el factor de seguridad también se reduce durante la lluvia. Concluyen que la lluvia diaria y la lluvia antecedente tienen ambas un papel importante en la generación de los movimientos, sin embargo, resaltan que la importancia de la lluvia antecedente en la estabilidad de la vertiente depende de las condiciones locales, tales como las propiedades de los suelos, las condiciones superficiales y la variabilidad climática. Lan *et al.* (2003) encuentran que la lluvia antecedente genera pérdida de succión del suelo o incremento en la presión de poros positiva, y puede acortar el tiempo de respuesta de la presión de poros; también concluyen que los perfiles con alta permeabilidad necesitan situaciones de lluvia más intensa y de mayor duración para que acontezcan los movimientos, con una tendencia a ocurrir a mayores profundidades.

Para evaluar las causas del movimiento en masa del barrio El Socorro, en el cual las fuertes lluvias tuvieron un papel desencadenante, es necesario primero evaluar las variables condicionantes que predispusieron a la ocurrencia de dicho movimiento. Estos factores condicionantes están asociados a la acumulación de un gran volumen de escombros, material de construcción y basuras en la parte alta del barrio San Pedro-Las Peñitas, margen derecha de la carrera 110. Dicho material altamente heterogéneo, debido a la ausencia de un manejo técnico de la escombrera, se había depositado durante un periodo superior a los cinco años sin ningún tipo de permiso o autorización. Gracias a las continuas quejas interpuestas por la comunidad y a las acciones tomadas por el Municipio, por fin se logró cerrar dicha escombrera; sin embargo, no se tomaron medidas sobre el gran volumen de material acumulado sobre esa vertiente, que permitieran mantener unas condiciones mínimas de estabilidad del talud libre conformado hacia la parte baja de la cuenca, con una altura superior a los 30 m y un ángulo estimado de 30°.

Los materiales que típicamente constituyen un lleno se caracterizan por sus pobres condiciones geotécnicas, asociadas a un bajo peso específico, unos 15 kN/m<sup>3</sup>, baja cohesión y un gran volumen de vacíos, los cuales durante las lluvias captan y acumulan agua entre su estructura, aumentando de modo considerable el peso de la masa. Por lo demás, estos materiales, debido a su alta porosidad, propician las condiciones para el aumento del nivel freático del área, aumentando la susceptibilidad a los movimientos en masa.

Como factor desencadenante se encuentran las fuertes precipitaciones de las últimas semanas. La distribución de lluvias anuales en la región se caracteriza por dos periodos lluviosos, con picos en el mes de mayo (229 mm) y octubre (238 mm); entre los meses de enero y abril caen en promedio 478 mm (EPM, 2005).

Aunque según reportes del IDEAM (2008), los primeros meses del año se vieron influenciado por el fenómeno de La Niña en fase de debilitamiento, datos específicos de las estaciones de lluvia del IDEAM llamadas Pajarito y Villanueva, localizadas en el occidente y centro del valle respectivamente, presentan valores por debajo de la media para los 4 primeros meses del año con un total de 437,4 mm para la estación Pajarito, y 427,7 mm para la estación Villanueva. No obstante, durante el mes de mayo, las lluvias estuvieron un 40% por encima de la media, con 343 mm de precipitación media para la ciudad, lo que representó el mes de mayo más lluvioso desde 1909 cuando llovieron 445 mm. De igual forma, mayo del 2008 fue el mes más lluvioso desde octubre de 1936, cuando cayeron en la ciudad 404 mm, de acuerdo con datos de EPM publicados en el Boletín del Sistema de Alerta Temprana.

Los días anteriores al desastre se caracterizaron por la alta pluviosidad, como consecuencia de una onda tropical que afectó la parte norte de Suramérica, en particular Colombia (IDEAM, 2008).



Durante los 18 días antecedentes al evento habían caído sobre la región un total de 213,9 mm y 258 mm en las estaciones Pajarito y Villanueva, para el caso de Villanueva muy por encima del total histórico promedio de todo el mes de mayo. La víspera, la ciudad de Medellín registró el día más lluvioso y la precipitación de mayor intensidad, en tan solo 2 horas y 30 minutos, entre las 4:30 y las 7:00 p. m., la estación Villanueva registró un total de 83,3 mm.

### 3.1 Umbral crítico de lluvia para el evento

Chleborad (2000) analiza datos de precipitación asociados con eventos históricos en Seattle para identificar umbrales de precipitación por movimientos en masa. El umbral definido, considerando solamente periodos en que se han presentado tres o más movimientos de masa, se establece a partir de la cantidad de lluvia antecedente de los 3 días anteriores al movimiento contra la cantidad de lluvia acumulada de los 15 días anteriores a los 3 días considerados. Chleborad (2003) confirma dicho umbral con datos del periodo 2000-2003 en esa área. La U.S. Geological Survey (USGS) tiene en operación una red de pluviómetros en tiempo real, la cual, según los umbrales definidos por Chleborad combinados con umbrales de intensidad, indica aquellos periodos más propensos a la ocurrencia de movimientos en masa de forma continua.

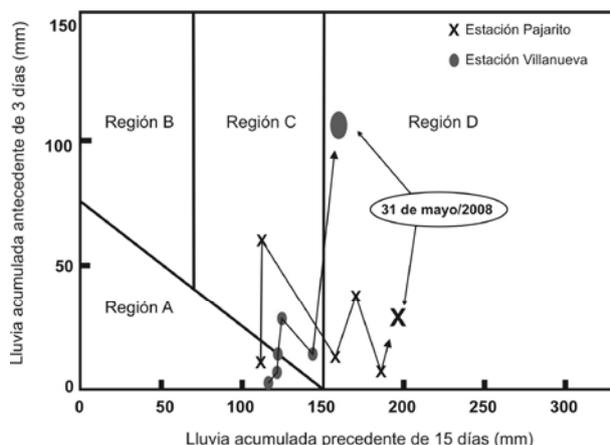
Moreno *et al.* (2006), basados en la metodología desarrollada por Chleborad, estudian la relación entre la ocurrencia de movimientos en masa y la lluvia antecedente de 3 y 15 días para el departamento de Antioquia, proponiendo 4 regiones representativas de lluvias antecedentes, con umbrales críticos de 150 mm para la lluvia acumulada de los 15 días precedentes y 70 mm para la lluvia acumulada antecedente de los 3 días, resultados que ahora se utilizan para la definición de niveles de alerta amarilla y naranja en el municipio de Medellín por el Sistema de Alerta Temprana (SIATA).

La figura 3 presenta los resultados obtenidos con datos de las estaciones Pajarito y Villanueva para el evento del barrio El Socorro, de acuerdo con las regiones y umbrales propuestos por Moreno *et al.* (2006). La estación Pajarito supera considerablemente el umbral  $P_{15}$ , graficado en la región D, caracterizada como la más crítica y donde ocurre el 55 % de los movimientos utilizados por los autores; en tanto que la estación Villanueva se encuentra levemente por encima del umbral crítico y presenta una mayor cantidad de lluvia precedente acumulada de los 3 días. En la figura 3 se puede observar la evolución del umbral de lluvia en los 5 días previos al evento. Para la estación Pajarito el umbral de los 15 días continuamente aumenta, partiendo desde 114 mm para el 25 de mayo hasta 197 mm para el 30, víspera del evento; en tanto las lluvias de los 3 días precedentes aumentaban y disminuían hasta alcanzar 31 mm para el 30 de mayo, sin embargo, se notan periodos con mayores lluvias precedentes, como para el día 27 de mayo con 68 mm, el doble de la lluvia de los 3 días precedentes al evento. La estación Villanueva presenta una tendencia diferente, en general una lluvia antecedente baja, con 13 mm para el 29 de mayo y se dispara el día previo a la ocurrencia del evento a 104 mm; con respecto a la lluvia antecedente de los 15 días aumentó en forma paulatina, partiendo de 131 mm para el 25 de mayo hasta 152 mm para la víspera del evento.

Adicionalmente, Moreno *et al.* (2006) proponen un índice de riesgo ( $R$ ) para la ocurrencia de los movimientos en masa, que sumado con el umbral crítico de los 15 días antecedentes puede utilizarse como un nivel de alerta para la ocurrencia de movimientos en masa:

$$R = P_3 + 0,5P_{15} - 75 \text{ para } -75 < R < \infty$$

- Cuando  $0 < P_{15} < 150$  mm y  $R > 0$  (regiones B y C de la figura 3), debe existir un nivel de alerta ante posibles movimientos.
- Cuando  $P_{15} > 150$  mm se dan las condiciones críticas para que una pequeña lluvia acumulada de los tres días detone un movimiento.



**Figura 3.** Lluvias precedentes de los 3 días y antecedentes de los 15 días para las estaciones Pajarito y Villanueva a partir del 24 de mayo, según los umbrales propuestos por Moreno *et al.* (2006).

$R$  puede variar entre  $-75$  e infinito. Un valor negativo de  $R$  implica la condición de no superación del umbral de lluvia, es decir, un bajo riesgo. Por el contrario, un valor positivo de  $R$  significa un riesgo para la ocurrencia de un movimiento en masa.

Para la estación Pajarito se obtiene un valor de  $R = 44$  y  $P_{15} = 197$  mm, y para la estación Villanueva, un valor de  $R = 29$  y  $P_{15} = 152$  mm. Acorde con esta información, para el evento del 31 de mayo ambas estaciones indicaban estados de alerta con riesgo a la ocurrencia de un movimiento en masa.

#### 4. DESCRIPCIÓN DEL EVENTO

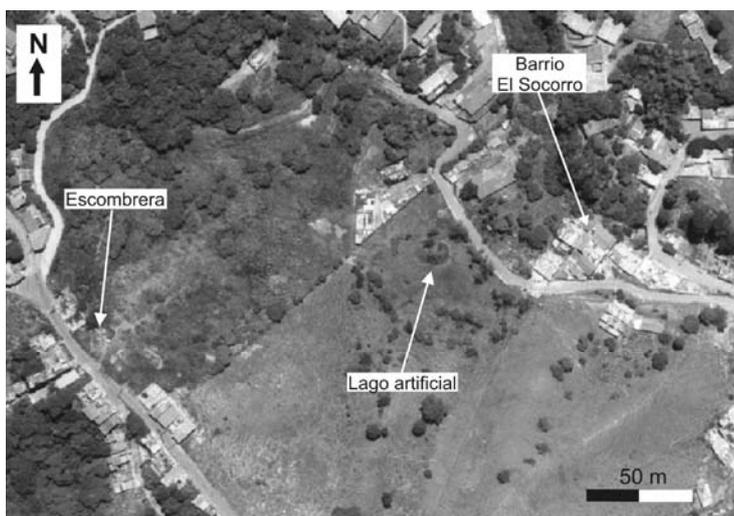
De acuerdo con las versiones de la comunidad, a las 5:50 de la mañana se originó el suceso. La masa inicial, en la parte alta del barrio San Pedro, sector Las Peñitas, por reducción del esfuerzo efectivo y de la resistencia al cortante de la masa, se desplazó como un deslizamiento rotacional simple, con una superficie de falla muy definida, parte de la cual afloró alcanzando 8 m de altura. La masa inicial, expresó la comunidad, se desplazó generando ondas superficiales, con una velocidad entre 3 m/s y 5 m/s en dirección  $N60^{\circ}E$  por una longitud

de 110 m, en cuyo extremo la masa desplazada chocó contra un pequeño filo alargado con orientación aproximada  $S60^{\circ}-70^{\circ}W$ , el cual reorientó el material hacia el  $S40^{\circ}E$ . En este punto, la masa inicialmente desplazada como deslizamiento se transformó en un movimiento tipo flujo. Wang y Sassa (2003) han estudiado en detalle la fluidización de este tipo de movimientos, denominada licuefacción y definida como el proceso por el cual los suelos pierden de forma repentina y drástica la resistencia al cortante debido a la generación de una alta presión de poros. Estos autores encuentran que la presión de poros, después del evento inicial, continúa aumentando, lo que condiciona y aumenta la velocidad del movimiento, alcanzando para el caso de El Socorro una velocidad extremadamente rápida, superior a 5 m/s. En esta dirección y como flujo de lodos se desplazó por una longitud de unos 100 m hasta encontrarse con el talud derecho de la vía, el cual modificó nuevamente la dirección del flujo hacia  $N30^{\circ}W$ , recorriendo los últimos 40 m hasta llegar al cauce de la quebrada La Bolillala.

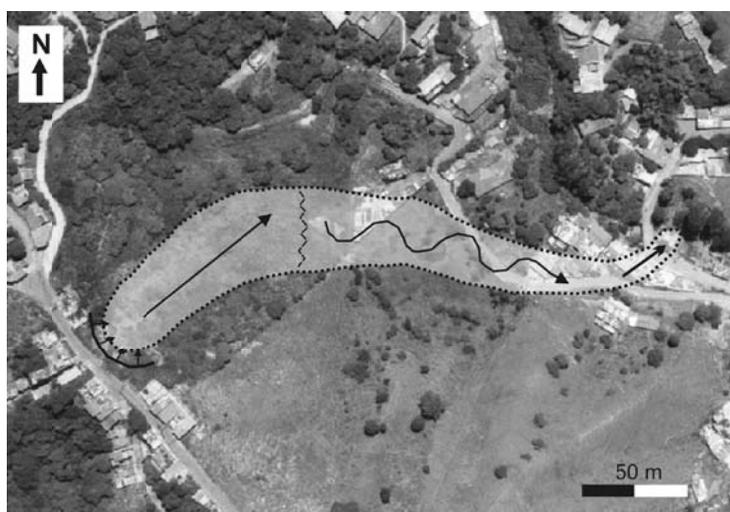
Según la clasificación de Cruden y Varnes (1996), el alud del barrio El Socorro corresponde a un movimiento complejo tipo deslizamiento rotacional simple-flujo de escombros, ya que se generó en dos secuencias y a velocidades diferentes.

Con respecto a los daños generados, en el tramo inicial el deslizamiento derribó dos viviendas, y más tarde el flujo de lodos destruyó 17 casas, hasta la margen derecha de la quebrada La Bolillala donde tumbó una última vivienda localizada sobre el retiro de la quebrada. En total el suceso dejó un saldo de 20 viviendas destruidas y 7 más estructuralmente comprometidas, en las cuales perecieron un total de 27 personas y resultaron afectadas 16 personas que habitan estas viviendas.

La figura 4 presenta una fotografía aérea del año 2002, antes del desastre. En la figura 5 pueden observarse el desplazamiento del movimiento y el área afectada.



**Figura 4.** Fotografía aérea del año 2002 anterior al evento



**Figura 5.** Desplazamiento y área afectada por el movimiento en masa. La línea recta indica el primer movimiento tipo deslizamiento, la línea sinuosa indica el comportamiento tipo flujo a partir de dicho punto

#### 4.1 Características del evento y geometría

De acuerdo con las dimensiones de la fuente del movimiento, se calculó el volumen inicialmente desprendido como la mitad del volumen de un elipsoide (Beyer, 1987 en Cruden y Varnes, 1996) igual a:

$$\text{Vol} = \frac{1}{6} \pi (\text{ancho} \times \text{longitud} \times \text{profundidad})$$

$$\text{Vol} = 6.283 \text{ m}^3$$

Tomando un porcentaje de dilatación promedio propuesto por Nicoletti y Sorriso-Valvo (1991) en Cruden y Varnes (1996) del 33%, se determinó que el material desplazado tuvo un volumen aproximado de 8.400 m<sup>3</sup>. Es necesario además considerar el material incorporado al movimiento por erosión y arrastre de la masa inicialmente desplazada, lo cual permite estimar un volumen total depositado alrededor de los 9.000 m<sup>3</sup>.

## 5. CONCLUSIONES

Las características, dinámica y causas del movimiento de masa ocurrido el 31 de mayo de 2008 sobre la zona centro occidental del municipio de Medellín se han discutido. Se clasificó como un movimiento complejo tipo deslizamiento rotacional simple-flujo de escombros, que se desplazó con velocidades superiores a 5 m/s, asociado al continuo aumento de la presión de poros y rápida disminución de la resistencia al cortante luego del primer movimiento de tipo circular, sin permitir la disipación de la presión. Estas altas velocidades, sumadas al gran volumen de material movilizado e incorporado en el recorrido, son los principales causantes del alto número de víctimas.

Los movimientos en masa son procesos morfodinámicos altamente complejos con un alto componente antrópico en áreas con las características urbanas del valle de Aburrá. Sin embargo, basados en inspección de campo y análisis de las series de lluvia en la ciudad de Medellín, se consideran como principales causas del evento las pobres condiciones geomecánicas del material que conformaba el talud fallado y las condiciones

hidrometeorológicas en los 15 días precedentes y 3 días antecedentes al día del evento en la ciudad, confirmando los umbrales de lluvia críticos propuestos para el departamento de Antioquia por Moreno *et al.* (2006), y los cuales utiliza el Sistema Municipal para la Prevención y Atención de Desastres de la ciudad de Medellín (SIMPAD) para la definición de alertas por movimientos en masa.

Debido a los altos costos humanos y económicos que le significan los movimientos en masa al desarrollo de la región, es necesario emprender y fortalecer en el nivel local nuevas investigaciones que permitan entender la lluvia como factor detonante de movimientos en masa en ambientes tropicales. Solo el conocimiento profundo de estas condiciones y la construcción de bases de datos adecuadas y sistemáticas por las entidades competentes facilitará mejorar y definir umbrales de lluvia críticos para las condiciones locales del Valle de Aburrá y demás regiones del departamento de Antioquia, lo que permitirá implementar sistemas de alerta temprana por movimientos en masa y, de esta forma, lograr reducir las consecuencias generadas por estos trágicos eventos.

## REFERENCIAS

- Alcántara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology* 47, p. 107-124.
- Arango, J. (2000). Relaciones lluvia-deslizamiento y zonificación geotécnica de la comuna 2 de la ciudad de Manizales. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). (2007). Microzonificación sísmica detallada de los municipios del Valle de Aburrá. Consorcio Microzonificación 2006. Informe interno.
- Aristizábal, E. (2004). Geomorphological evolution of the Aburrá Valley, northern Colombian Andes, and implications for landslide occurrence. Tesis de Maestría, Universidad de Shimane (Japón), 156 p.
- Aristizábal, E. y Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el valle de Aburrá originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007. *Revista Gestión y Ambiente*, Vol. 10 No. 2, p. 17-30.
- Aristizábal, E.; Roser, B. and Yokota, S. (2005). Tropical chemical weathering of hillslope deposits and bedrock source in the Aburrá Valley, northern Colombian Andes. *Engineering Geology* (Elsevier) No. 81. p. 389-406.
- Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler*, 62A (1-2). p. 23-27.
- Chleborad A. F. (2000). Preliminary method for anticipating the occurrence of precipitation-induced landslides in Seattle, Washington. U.S. Geological Survey open-file report 00-469.
- 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.
- Crosta, G. (1998). Regionalization of rainfall threshold: an aid for landslide susceptibility zonation. *Environmental Geology*, 35, (2-3), 131-145.
- Crosta, G. and Frattini, P. (2008). Rainfall-induced landslides and debris flows. *Hydrological Processes* 22, 473-477.
- Crozier, M. (1999). Prediction of rainfall-triggering landslides: a test of the antecedent water status model. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, p. 825-833.
- Cruden, D. M. and Varnes, D. J. (1996). Landslides types and processes. In: *Landslides investigation and mitigations*. Transportation Research Board Special report 24. Turner y Shuster (eds.), p. 36-75.
- 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, Universidad Nacional de Colombia, p. 33-45.
- Empresas Públicas de Medellín –EPM– (2005). *Revista Hidrometeorológica, cincuenta años de hidrometeorología en Empresas Públicas de Medellín*. Vol. 1, No. 1 (nov.). Medellín, 150 p.
- Finlay, P. J.; Fell, R. and Maguire, P. K. (1997). The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal* 34, p. 811-824.
- Gómez, S. (1990). 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, Medellín.



- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM–. (2008). Informe No 159. <http://www.ideam.gov.co:8080/informe/historico.shtml> (mayo, 2008).
- Lan, H.; Zhou, C.; Lee, C. F.; Wang, S. and Wu F. (2003). Rainfall-induced landslide stability analysis in response to transient pore pressure- a case study of natural terrain landslide in Hong Kong. *Science in China*, Vol. 46 (Suppl.), p. 52-68.
- Hormaza, M. (1991). Investigación preliminar de las causas probables de deslizamientos en las laderas de Medellín. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, 529 p.
- Iverson, R. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 7, p. 1897-1910.
- Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control of shallow landsliding. *Water Resource Research* 30, p. 1153-1171.
- 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 interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, No 5, p. 59-69.
- Municipio de Medellín. (2006). Encuesta de Calidad de Vida del Municipio de Medellín del año 2006. [www.medellin.gov.co](http://www.medellin.gov.co).
- Paz, C. I. y Torres A. M. (1989). Precipitación y su influencia sobre algunos deslizamientos ocurridos en las laderas del Valle de Aburrá. Tesis pregrado, Universidad Nacional de Colombia. 174 p.
- Rahardjo, H.; Li, X. W.; Toll, D. G. and Leong, E. C. (2001). The effect of antecedent rainfall on slope stability. *Geotechnical and Geological Engineering* 19, p. 371-399.
- Reichenbach, P.; Cardinalli, M.; De Vita, P. and Guzzetti, F. (1998). Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (Central Italy). *Environmental Geology* 35 (2-3), p. 146-159.
- Saldarriaga, R. (2003). Inventario y sistematización de los desastres naturales reportados en los municipios del Valle de Aburrá, entre los años 1900 y 2002. Trabajo de grado. Universidad EAFIT, 120 pp.
- Sistema de Alerta Temprana (SIATA). (2008). Boletín meteorológico del 3 de junio de 2008. Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Municipio de Medellín.
- Suárez D. J. (2008). Árbol de decisiones para la predicción y alerta de deslizamientos activados por lluvias. XII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá, 6 p.
- Terlien, M. T. J. (1997). Hydrological landslide triggering in ash-covered slopes of Manizales (Colombia). *Geomorphology* 20, p. 165-175.
- Terlien, M. T. J. (1998). The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. *Environmental Geology* 35 (2-3), p. 124-130.
- 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, p. 109-125.