

GEOMORFOLOGÍA APLICADA A LA OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS EN EL VALLE DE ABURRÁ

GEOMORPHOLOGY APPLIED TO LANDSLIDE OCCURRENCE IN THE ABURRÁ VALLEY

EDIER ARISTIZÁBAL

Area Metropolitana del Valle de Aburrá. edier.aristizabal@metropo l.gov.co

SHUICHIRO YOKOTA

Department of Geoscience. yokota@riko.shimane-u.ac.jp

Recibido para revisar 10 de Mayo de 2005, aceptado 5 de Septiembre de 2005, versión final 18 de Octubre de 2005

Resumen: Las consideraciones geomorfológicas son esenciales en el análisis de la ocurrencia de deslizamientos, por lo que las características del terreno y los procesos que modelan la superficie deben ser entendidos. Los procesos de vertiente son parte integral de la geomorfología dinámica como variables que controlan la evolución del paisaje. En los últimos años, el crecimiento de la población y la expansión de asentamientos humanos sobre áreas inestables han incrementado el impacto de los desastres naturales, especialmente en países en vía de desarrollo como Colombia, y localmente en el Valle de Aburrá, el cual es clasificado como una de las áreas más afectadas por deslizamientos en Colombia. El alto índice de urbanización y la morfología del valle han forzado a numerosas personas a vivir sobre laderas susceptibles a deslizamientos, por lo que numerosos estudios acerca de la ocurrencia de deslizamientos han sido realizados en el valle. Algunos de ellos han reportado la necesidad de estudios que permitan el entendimiento de la dinámica de las laderas y su relación con la ocurrencia de deslizamientos. La evolución del paisaje ofrece la mejor explicación de la sensibilidad de los elementos del paisaje por intervenciones antrópicas. En este sentido, es importante identificar no solamente la amenaza creada o acentuada por la expansión urbana, sino también aquella asociada a las condiciones geológicas y geomorfológicas de acuerdo a su localización. El objetivo de este artículo está enfocado en la relación entre la evolución del paisaje y la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburrá, además de discutir un esquema geomorfológico que permita una adecuada evaluación de la susceptibilidad y amenaza.

Palabras clave: Geomorfología, deslizamientos, Valle de Aburrá, evolución del paisaje

ABSTRACT: Geomorphological considerations are essential in landslide occurrence analysis, and thus terrain attributes and modelling processes occurring over the surfaces need to be understood. Slope processes are an integral part of dynamic geomorphology; they are part of the variables controlling long-term landscape evolution. In recent years, growing population and expansion of settlements over hazardous areas have greatly increased the impact of natural disasters, especially in developing countries such as Colombia, and locally the Aburrá Valley, which is classified as one of the areas most affected by landslides in Colombia. The high rate urbanization and the morphology of the valley, have forced many people to live on landslide-prone slopes. The ancient and recent history of the Aburrá Valley has been characterized by occurrence of numerous landslides, which have caused great economic losses and casualties. Consequently, numerous studies about landslide occurrence in the Aburrá Valley have been carried out. Some of them have reported the need of studies concerning the understanding of slope dynamic and its relationship to landslide occurrence. Long-term landscape evolution offers the best explanation of the relative sensitivities of landscape elements to anthropogenic intervention. Accordingly, it is very important to identify not only the hazard created or accentuated by encroaching urban sprawl, but also that connected to geomorphological and geological conditions associated with its location. The objective of this paper is focused on the link between landscape evolution and landslide occurrence in the Aburrá Valley, and discuss a geomorphological framework that will permit accurate assessment of landslide susceptibility and hazard.

Keywords: Geomorphology, landslides, Aburrá Valley, landscape evolution.

1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son el producto de diversos elementos, entre ellos, la configuración morfológica y evolución de las laderas juegan un papel determinante (Brunsden, 2002; Griffiths y otros, 2002; Hutchinson, 1995). Los movimientos de masa constituyen una de las más frecuentes causas de desastres alrededor del mundo. Las pérdidas socioeconómicas evaluadas son millonarias y aumentan debido a los desarrollos humanos que se extienden sobre laderas inestables bajo la presión del rápido crecimiento de la población (Schuster, 1996).

Un gran número de países en vía de desarrollo, en los que se encuentra Colombia, están localizados en el denominado Anillo del

Pacífico, el cual se caracteriza por la intensidad y variedad de desastres naturales que ocurren. La distribución espacial de los desastres presenta una tendencia a ocurrir en estos países, y aunque por sus condiciones económicas las pérdidas materiales son mucho menores, las pérdidas humanas son muy superiores a países desarrollados (Alcantara-Ayala, 2002; Ernst, 2001). En Colombia, y especialmente en el Valle de Aburrá, los deslizamientos han causado considerables pérdidas económicas y humanas (Tabla 1). El barrio Villatina en 1987 fue afectado por un deslizamiento que con tan sólo un volumen aproximado de 30.000 m³ causó la muerte a más de 500 personas (Flórez et al., 1996).

Tabla 1. *Mayores* deslizamientos ocurridos en el Valle de Aburrá (de acuerdo a Hormaza, 1991; Flórez y Otros, 1996; Saldarriaga, 2003). Los fenómenos fueron clasificados de acuerdo a la descripción dada en la fuente siguiendo la clasificación de Cruden y Varnes (1996).

Table 1. Major landslides in the Aburra Valley (from Hormaza, 1991, Florez et al, 1996; Saldarriaga, 2003). They were classified according to the references following the classification of Cruden and Varnes (1996).

| Movimiento en masa* | Año | Localización | Daños | |
|--|---------------------|--------------------------|---------|-----------|
| | | | Muertos | Afectados |
| Flujo de escombros | 23 de Abril 1880 | La Iguaná (Medellín) | 9 | 2 500 |
| Flujo de lodos | 18 de Jun.1927 | Rosellón (Envigado) | 18 | 25 |
| Flujo de lodos | 12 de Jul.1954 | Media Luna (Santa Elena) | >100 | 67 |
| Deslizamiento de escombros | 25 de Jun.1973 | La Manguala (S.A. Prado) | 13 | 24 |
| Flujo de lodos | 29 de sept.1974 | Santa Domingo (Medellín) | >70 | 1500 |
| Flujo de escombros | 20 de Oct. 1980 | San Antonio (Medellín) | >18 | 250 |
| Deslizamiento de escombros | 23 de Nov. 1984 | Santa Maria (Itagui) | 10 | 200 |
| Deslizamiento de lodo | 26 de Sep. 1985 | Popular 2 (Medellín) | 6 | 60 |
| Deslizamiento - flujo de lodos compuesto | 27 de Sept. 1987 | Villatina (Medellín) | >500 | 3000 |

Debido a dicha problemática, numerosos estudios se han realizado en el Valle de Aburrá sobre la ocurrencia de deslizamientos. Rendón y Vargas (1998) examinaron

diferentes metodologías aplicadas por diferentes autores para la evaluación de la amenaza en el Valle de Aburrá e identificaron que aquellas áreas clasificadas de amenaza

alta corresponden a sectores densamente poblados bajo pobres condiciones técnicas.

Finalmente, estos autores concluyen que dichas metodologías han evaluado el deterioro en las laderas generadas por la expansión urbana durante las últimas décadas, sin comprender la dinámica natural de las laderas y los procesos naturales que han influido en la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburrá. De igual forma, Arias y James (1987), basados en que las condiciones que originaron el desastre de Villatina están presentes en numerosas laderas del Valle, puntualizan sobre la necesidad de estudios de amenaza que estén soportados en la dinámica natural de las laderas.

La evaluación de la amenaza debe incluir en primera instancia la evaluación de la susceptibilidad del terreno a deslizamientos y sólo puede ser estimada con un conocimiento preciso de la evolución, dinámica y mecanismos geomorfológicos que han modelado el paisaje. En esta dirección, el principal objetivo de este artículo es discutir la importancia de la geomorfología en la evaluación de los niveles de susceptibilidad y amenaza por deslizamientos y examinar los esquemas metodológicos a mediano y largo plazo para el análisis de la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburrá.

2. GEOMORFOLOGÍA Y DESLIZAMIENTOS

El término deslizamiento ha sido definido por Cruden (1991) como el movimiento de una masa de roca, escombros o tierra a lo largo de una ladera. En tanto, Scheidegger (1998) interpreta los deslizamientos como modificaciones del terreno dentro del ciclo geomorfológico continuo, y que corresponden a la respuesta normal del sistema debido a complejos parámetros

exogénicos (meteóricos) y endogénicos (tectónicos).

Los procesos de inestabilidad son el producto de la geomorfología local, hidrología y condiciones geológicas. La modificación de estas condiciones por procesos geodinámicos, vegetación, usos del suelo y actividades humanas activan movimientos lentos, generalmente imperceptibles debido a que las propiedades mecánicas del material decrecen gradualmente. Posteriormente, factores como precipitación y sismicidad detonan dichos movimientos lentos en rápidos movimientos en masa (Soeteres y van Westen, 1996). Dichos factores, cambiantes en tiempo e intensidad, son agrupados en: (1) variables cuasi-estáticas, las cuales contribuyen a la susceptibilidad, como geología, pendientes y aspecto de las laderas; y (2) variables dinámicas como precipitación y sismos, las cuales tienden a detonar los deslizamientos en áreas con determinada susceptibilidad (Dai y Lei, 2001) (Figura 1).

Numerosas contribuciones dentro del campo de la geomorfología han sido enfocadas especialmente al análisis y evaluación de la susceptibilidad. La susceptibilidad está fuertemente relacionada a la geomorfología, debido a que sus diversos componentes son considerados parámetros esenciales en la dinámica de la superficie terrestre. Como consecuencia, en la última década, la geomorfología se ha ocupado de analizar, evaluar, y prever fenómenos catastróficos como movimientos de masa, sismos, inundaciones y vulcanismos, entre otros. Brunsdén (2002) define la geomorfología como el estudio de las formas de la superficie de la tierra, su origen, los procesos relacionados con su desarrollo y las propiedades de los materiales, de las cuales se pueden predecir, comportamiento, estado y acerca de su forma futura. Dicho autor considera que el nuevo énfasis de la geomorfología está en la predicción de las condiciones del terreno usando información

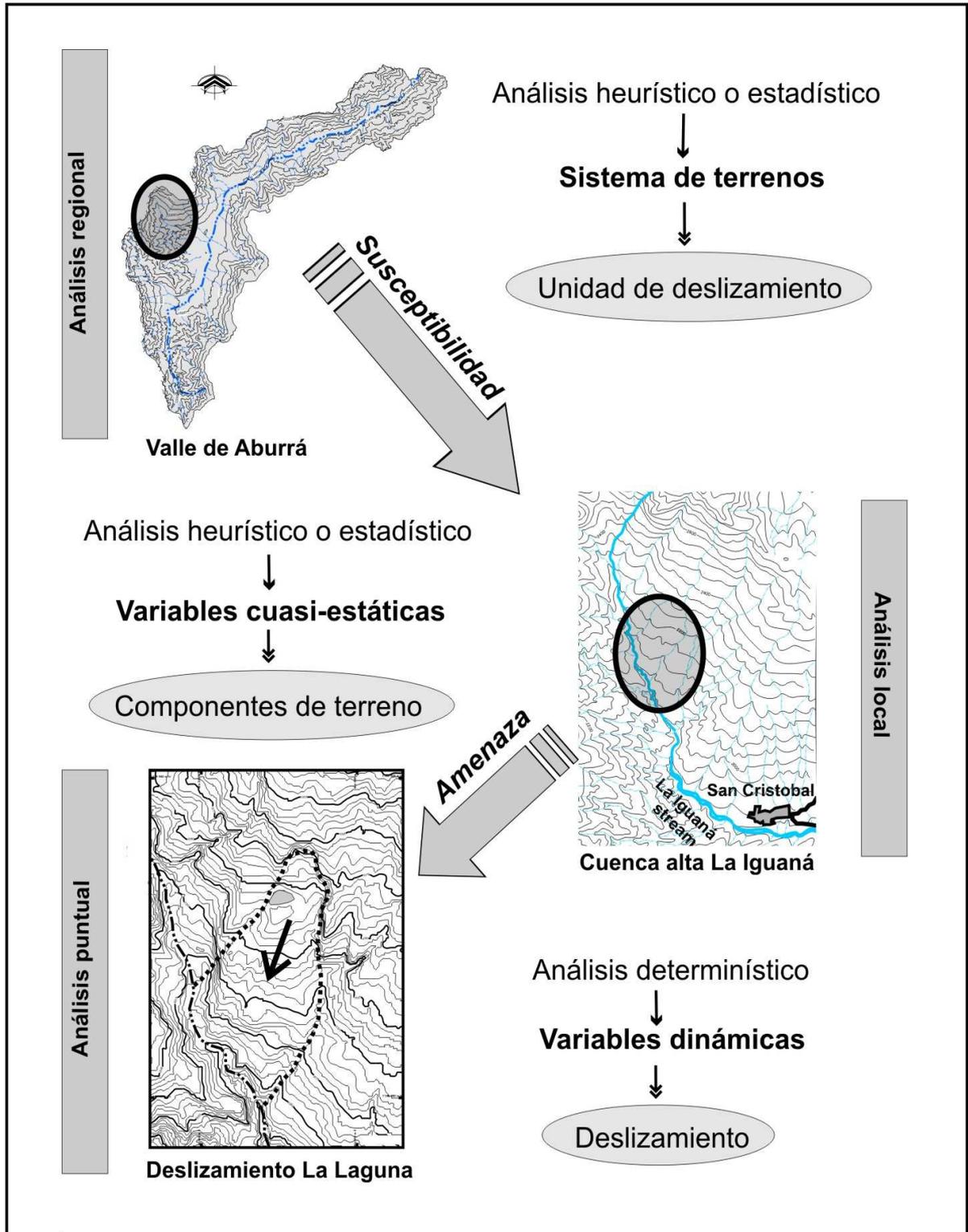


Figura 1. Evolución geomorfológica en la ocurrencia de deslizamientos.
Figure 1. Geomorphological evolution on landslide occurrence

del origen y evolución de las geoformas y materiales, al igual que determinar la actividad y frecuencia de los procesos y naturaleza de las amenazas.

3. DEFINICIÓN DE LOS CONCEPTOS DE AMENAZA Y SUSCEPTIBILIDAD

La **susceptibilidad** de un terreno a fallar es definida por Brabb (1984) como la tendencia de un deslizamiento a ser generado en el futuro en una área específica. En el mismo sentido, Soeters y van Westen (1996) definen susceptibilidad como la posibilidad de que un fenómeno ocurra en un área de acuerdo con las condiciones locales del terreno, y especifican que factores detonantes tales como precipitación o sismicidad no son considerados. En contraste, Varnes (1984) define **amenaza** como la probabilidad de ocurrencia de un potencial fenómeno destructivo dentro de un específico período de tiempo y en una determinada área. Concretamente, el término amenaza expresa la probabilidad de ocurrencia de un potencial fenómeno destructivo en espacio y tiempo definidos.

En este sentido, la susceptibilidad es el primer acercamiento hacia la evaluación de la amenaza, debido a que debe explicar la distribución contemporánea de los deslizamientos de acuerdo con la evolución geomorfológica del terreno (Griffiths y otros, 2002). El entendimiento de la ocurrencia de deslizamientos corresponde a un proceso comprensivo, donde cada régimen es caracterizado por una jerarquía de eventos distribuidos como una secuencia en tiempo y espacio, entendido como susceptibilidad, y descrito por la frecuencia y magnitud incluyendo la duración y secuencia de los eventos del proceso, entendido como amenaza (Brunsden, 2002).

Los términos amenaza y susceptibilidad han sido erróneamente usados como sinónimos.

Los mapas de susceptibilidad zonifican el terreno de acuerdo a la favorabilidad a fallar de una ladera, con el propósito de analizar posteriormente los mecanismos detonantes.

En tanto, amenaza es la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en áreas susceptibles, y que a diferencia de susceptibilidad involucra frecuencia y magnitud. Esta definición de amenaza considera tiempo y espacio, dos factores que involucran la cuantificación de las causas detonantes.

Una gran variedad de técnicas han sido desarrolladas para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por deslizamientos (Soeters y van Westen, 1996; Barredo y otros, 2000; Dai y Lee, 2002; Guzzetti y otros, 1999; y Hutchinson, 1995). En esencia, estas metodologías pueden ser agrupadas en: (1) metodologías heurísticas basadas en el entendimiento de los procesos geomorfológicos que actúan sobre el terreno; (2) metodologías estadísticas basadas en predicciones estadísticas por combinación de variables generadoras de deslizamientos en el pasado y, finalmente, (3) metodología determinísticas, basadas en modelos de estabilidad. El tipo de metodología es determinado de acuerdo con el alcance del estudio.

Los métodos heurísticos han sido ampliamente utilizados para evaluar susceptibilidad; los métodos determinísticos han sido restringidos para evaluar amenaza y los métodos estadísticos son utilizados para ambos casos de acuerdo con el desarrollo metodológico. Clerici y otros (2002) resumen los métodos heurísticos como: (1) mapeo de los deslizamientos, (2) mapeo de los factores ambientales de los cuales se suponen afectan directamente e indirectamente la inestabilidad de las laderas, (3) estimación de las relaciones entre los factores y los fenómenos de inestabilidad y (4) clasificación del terreno en dominios de diferente grado de susceptibilidad de acuerdo con las relaciones detectadas anteriormente.

4. OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS Y EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA DEL VALLE DE ABURRÁ

Las amenazas urbanas se dividen en dos grupos: (1) amenazas asociadas con la localización de la ciudad, y (b) amenazas creadas o acentuadas por la utilización acelerada de los recursos y el desarrollo de la ciudad (Gupta y Ahmad, 1999). En muchos casos, ambos tipos de amenaza afectan una misma área. El Valle de Aburrá es un claro ejemplo, donde precipitación, pendientes y profundos perfiles de meteorización se suman a la intensa urbanización hacia las laderas sin la mínima planeación urbanística. La evolución del Valle de Aburrá ha sido caracterizada por la ocurrencia de numerosos deslizamientos, reflejado en el volumen y edades obtenidas en los depósitos de vertiente que cubren las laderas medias y bajas del valle. Algunos de estos eventos han sido datados como Plioceno (2,4 Ma) por Restrepo (1991), Pleistoceno (0,62 y 0,15 Ma) por Yokota y Ortiz (2003) y Pleistoceno (>40 k.a., 0,19, y 0,22 Ma) por Aristizábal y Yokota (2004).

Desde su fundación, la ciudad de Medellín se ha expandido rápidamente hacia las laderas, limitada por su configuración morfológica, fenómeno agravado durante las últimas décadas por las condiciones socioeconómicas. Actualmente, el Valle de Aburrá tiene una población estimada en 3,1 millones de habitantes, donde el 95 % corresponde a población urbana. Los municipios más poblados dentro del valle, Medellín (2 millones), Bello (370 mil), e Itagüí (260 mil), concentran gran parte de su población sobre las laderas del valle. Lo que ha generado que cerca de 30.000 viviendas se encuentren en áreas clasificadas como de alta susceptibilidad por deslizamientos (Anuario Estadístico de Antioquia, 2000).

Aunque la ocurrencia de deslizamientos ha afectado el valle durante largo tiempo, estudios al respecto sólo surgen a partir de los 80's (Shlemon, 1979; Paz y Torres, 1989;

Caballero y Otros, 1990; Hormaza, 1991; Flórez y Otros, 1996 y 1997; Rendón y Vargas, 1998; Grupo de Sismología de Medellín –GSM-, 1999; Universidad Nacional-Instituto Mi Río, 2002). Dichos estudios han aplicado en esencia métodos heurísticos modificados de acuerdo al alcance y el criterio del autor (Chica, 1987; Ingeominas, 1990; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo -PNUD - 1998; GSM, 2002).

En la actualidad, numerosos estudios se enfocan en el análisis de los procesos de intervención humana que han detonado los deslizamientos en el Valle de Aburrá en los últimos 50 años, o modelos de estabilidad con objetivos muy puntuales. Y aunque identificar la susceptibilidad y amenaza acentuada por el acelerado crecimiento urbano es esencial en el análisis de los deslizamientos, de igual forma las condiciones geomorfológicas y geológicas que controlan el sistema deben ser inicialmente comprendidas (Rendón y Vargas, 1998). En resumen, la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburrá debe ser comprendida desde un punto de vista evolutivo del valle y acentuado por la intensa intervención humana sobre las laderas.

5. ESQUEMA METODOLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DE LA OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS EN EL VALLE DE ABURRÁ

El análisis de la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburrá debe ser orientado en tres escalas: regional, local, y puntual (Figura 2). Los dos primeros acercamientos, regional y local, representan una evaluación geomorfológica del terreno por métodos heurísticos o estadísticos, donde se evalúa la susceptibilidad del terreno a generar deslizamientos; en cambio, el acercamiento puntual corresponde a un análisis determinístico donde se calcula la amenaza por deslizamiento de un evento previamente identificado y delimitado. Los acercamientos iniciales, regional y local, deben ser

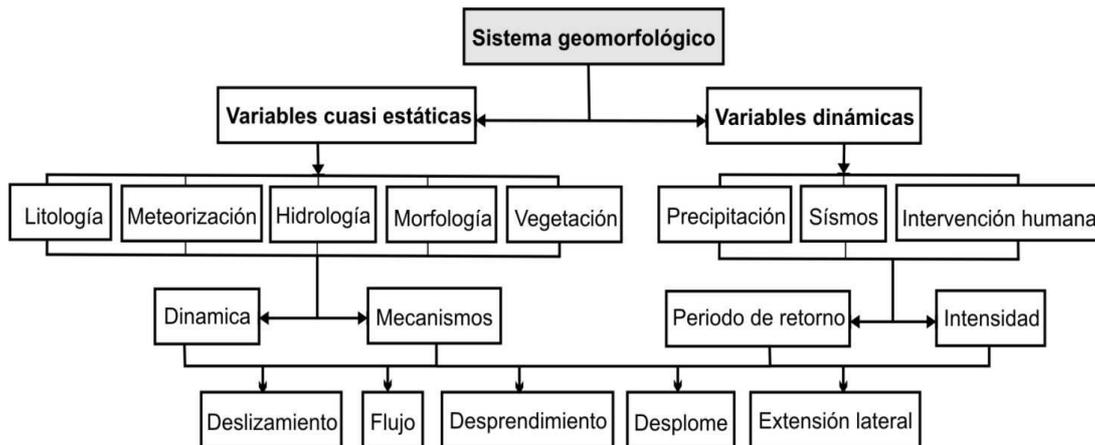


Figura 2. Esquema geomorfológico para el análisis de la susceptibilidad y amenaza por deslizamientos en el Valle de Aburrá.

Figure 2. Geomorphological sketch for landslide hazard and susceptibility analysis in the Aburra Valley

desarrollados por entidades académicas y gubernamentales con resultados públicos.

El acercamiento puntual debe ser desarrollado por el sector privado, ya que corresponde a intereses particulares con fines típicamente de adecuación y construcción, sin embargo, deben responder a un marco geomorfológico y de evolución previamente establecido a escala regional y local. Los acercamientos iniciales corresponden a la evaluación de la susceptibilidad, y difícilmente se involucran parámetros de magnitud y frecuencia, donde variables como precipitación y tectónica se analizan como formadores del paisaje y no como factores detonantes.

Actualmente, los análisis puntuales tienden a estar concentrados en el sitio específico, sin un contexto espacial y temporal de la problemática, así como las evaluaciones regionales están enmarcadas en características difícilmente medidas y observadas en la superficie, comúnmente deficientes acerca de la información del subsuelo, por lo que el análisis de los desastres naturales debe realizarse como un **sistema** que permita una retroalimentación en ambos sentidos, local y regional.

5.1 Análisis regional

El primer acercamiento hacia el entendimiento de la problemática de los deslizamientos es el mapeo geomorfológico. Estos mapas juegan un papel esencial en diversas técnicas para la evaluación de la susceptibilidad por deslizamientos y representan la metodología más clara y directa para entender el origen, la evolución y las características del paisaje.

Geomorfológicamente, el Valle de Aburrá puede definirse como una combinación de dos sistemas de terreno compuesto por depósitos aluviales y depósitos de ladera, originados por antiguos movimientos de masa y por mecanismos compuestos de deslizamientos y flujos (Aristizábal, 2004), y cuatro sistemas de terreno modelados en rocas metamórficas, graníticas, volcano-sedimentarias y ultrabásicas, que conforman las rocas del basamento y fuente de dichos depósitos de vertiente (Figura 3).

Posteriormente, dichos sistemas de terreno deben ser caracterizados en diferentes subunidades geomorfológicas: geoforma (Working Party-Geological Society, 1982), unidad geomorfológica (van Zuidam y van Zuidam-Cancelado, 1986), unidad de terreno de mapeo (Meijerink, 1988), o unidad de



Figura 3. Sistemas de terrenos en el Valle de Aburrá.
Figure 3. Terrain Systems in the Aburra Valley

deslizamiento (Pasuto and Soldati, 1999). La unidad de deslizamiento es particularmente útil en análisis geomorfológicos sobre áreas fuertemente afectadas por movimientos en masa, donde el principal objetivo es facilitar el análisis de las características del paisaje y entender la evolución de áreas con una particular complejidad geomorfológica, como el Valle de Aburrá. Pasuto y Soldati (1999) definen **unidad de deslizamiento** de acuerdo con la definición de Kienholz y Otros (1984) como una asociación de depósitos

principalmente de gravedad, que afectan un sector bien definido de ladera.

Los principales criterios adoptados para la identificación de unidades de deslizamientos son: (1) depósitos de vertiente estrictamente conectados en espacio y tiempo; (2) pueden consistir de uno o más deslizamientos unitarios o de una superposición de eventos causados por repetida activación de escarpes menores y principales; (3) otra clase de depósitos (como aluviales y lacustres) pueden

estar asociados dentro de los depósitos de ladera, y (4) las características morfológicas de los depósitos presentan una clara relación con el mecanismo principal de deslizamiento.

5.2 Análisis local

Los análisis locales permiten caracterizar las unidades de deslizamientos previamente establecidas en componentes de terreno. Los **componentes de terreno** son definidos como la unidad de terreno mas pequeña del relieve y básicamente uniforme en geoforma, litología, suelo, y vegetación (van Zuidam y van Zuidam-Cancelado, 1986), donde los procesos geomorfológicos, de acuerdo con un análisis temporal proceso-relieve, son utilizados como criterio importante. Por lo que no se remite directamente a las condiciones actuales del terreno, sino además, a los procesos que originaron la geoforma actual. En este sentido, el marco regional ofrece un apoyo idóneo para dicho análisis. A este nivel, los deslizamientos menores no cartografiados a escala regional son identificados y clasificados como componentes de terreno. Como resultado final, dichos estudios deben identificar los factores que han generado los procesos de inestabilidad en la ladera y brindar un entendimiento en tiempo y espacio de los deslizamientos que dieron origen a los depósitos de vertiente.

5.3 Análisis puntual

El último acercamiento a los deslizamientos es desde el punto de vista geotécnico e ingenieril a escalas detalladas > 1:5000. Estas investigaciones son puntuales y específicas, enmarcadas regional y localmente, preocupadas por determinar el grado de estabilidad con un determinado mecanismo de falla y tiempo de retorno. Generalmente, el área de estudio corresponde a sectores precisos en un componente de terreno, geomorfológica y mecánicamente caracterizado en detalle, y previamente evaluado como susceptible a deslizar. Los estudios puntuales, como último nivel en la evaluación de la amenaza, están enfocados al análisis de los factores detonantes de acuerdo

con el grado de susceptibilidad establecido. Adicionalmente, deben suministrar factores de seguridad de acuerdo con la magnitud y frecuencia esperada del fenómeno.

La información que soporte dichos modelos de estabilidad está sustentada en perforaciones que permiten la descripción del material y localización de la superficie de falla, al igual que el monitoreo de las laderas que miden las variaciones e influencias del nivel freático en la superficie de falla. Estos modelos de estabilidad deben ser iterados con valores reales de precipitación y sismicidad específicos del área, para determinar la amenaza por deslizamiento en tiempo y espacio bajo precisas condiciones detonantes.

6. CONCLUSIONES

La geomorfología juega un papel esencial en el análisis y entendimiento de los desastres naturales. Las condiciones del ambiente están en continuo cambio, no sólo por la influencia humana, sino también por procesos y fenómenos naturales. En el caso de los deslizamientos, deben ser analizados como parte de un ciclo geomorfológico continuo donde numerosas variables interactúan. Por lo que el primer acercamiento hacia la evaluación y prevención de la ocurrencia debe ser desde un punto de vista geomorfológico. En el caso del Valle de Aburrá, la ocurrencia de deslizamientos debe ser comprendida desde un punto de vista evolutivo del valle y acentuada por la intensa intervención humana sobre las laderas.

En este sentido, debe ser establecida una clara deferencia entre estudios de amenaza y susceptibilidad. La susceptibilidad corresponde a un análisis geomorfológico basado en variables no sólo cualitativas sino también cuantitativas, tales como geoquímica, geocronología y erosión, y deben incluir necesariamente un modelo de evolución en términos de mecánica y dinámica de la ladera. En el caso de la amenaza, esta corresponde a estudios puntuales, donde el resultado final es expresado como la probabilidad de

ocurrencia de un fenómeno determinado, dentro de un período de tiempo específico y área determinada por la acción de un agente detonante, con tiempo de recurrencia e intensidad establecidos.

El esquema metodológico discutido corresponde a un modelo de prevención de desastres que permite encaminar los numerosos estudios de zonificación y estabilidad que se realizan continuamente hacia las necesidades del Valle de Aburrá. Sin embargo, un modelo de evolución geomorfológico del valle, que explique la mecánica y dinámica de las laderas en el Cuaternario, es necesario. Recientemente, Aristizábal (2004) y Aristizábal y Otros (2005), basado en datos geocronológicos, meteorización geoquímica y análisis geomorfológico, propone un modelo evolutivo del Valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de deslizamientos.

REFERENCIAS

- [1]. ANUARIO Estadístico de Antioquia, Gobernación de Antioquia, Dirección de Información Geoestadística, 2000.
- [2]. ALCANTARA-AYALA, I., Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology* 47, 107-124, 2002
- [3]. AREA Metropolitana del Valle de Aburrá, Formulación del Plan Integral de Ordenamiento y Manejo (PIOM) de la parte baja de la Microcuenca La Iguana, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 2003.
- [4]. ARIAS, A., JAMES M., Apreciaciones preliminares acerca del deslizamiento de Villatina. Medellín, Ingeominas, 1987.
- [5]. ARISTIZÁBAL, E., Geomorphological evolution of the Aburrá Valley, northern Colombian Andes, and implications for landslide occurrence, Unpubl. M. Sc. Thesis, Shimane University, 156 p. 2004.
- [6]. ARISTIZÁBAL, E., ROSER, B., YOKOTA, S., Tropical chemical weathering of hillslope deposits and bedrock source in the Aburrá Valley, northern Colombian Andes. *Engineering Geology* 81, p. 389-406, 2005.
- [7]. ARISTIZÁBAL, E., YOKOTA, S., Dating of slope sediments and alluvial materials in the Aburrá Valley, Colombia. *Geoscience Report of Shimane University*. 23, p. 85-88, 2004.
- [8]. BARREDO J. I., BENAVIDES A., HERVAS H., VAN WESTEN C.J., Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Titajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 2, Issue 1, 9-23, 2000.
- [9]. BRABB E.E., Innovative approaches to landslide hazard mapping. *Proceed. IV Int. Symp. Landslides*, Toronto, v. 1, 307-324, 1984.
- [10]. BRUNSDEN, D. The fifth Glossop Lecture. Geomorphological roulette for engineers and planners: some insights into a old game. *Quart. J. of Engng. Geol.* 35, 101-142, 2002.
- [11]. CABALLERO, H., Zonificación de la Aptitud del Suelo para el uso urbano. *Costado Occidental de Medellín*. Ingeominas, 255 pp. 1990.
- [12]. CHICA, A. Geología y geotecnia en terrenos inclinados, modelo para la elaboración de planos geológico-geotécnicos. *Magazín Fac. De Minas*, Universidad Nacional de Colombia 119, 27-32, 1987.
- [13]. CLERICI, A., PEREGO, S., TELLINI, C., VESCOVI, P., A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology* 48, 349-364, 2002.
- [14]. CRUDEN D. M., A simple definition of a landslide. *Bull Inter Assoc Engng Geol* 43, 27-29, 1991.
- [15]. DAI, F.C., LEE C.F. Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study. *Canadian Geotechnical Journal* 38, 911-923, 2001.

- [16]. ERNST W. G., The increasing severity of Circumpacific natural disasters. *International Geology Review* 43, 380-390, 2001.
- [17]. FLÓREZ, M., MOLINA M., RAMÍREZ I. Método cualitativo para la determinación de los niveles de amenaza por movimientos en masa de la ciudad de Medellín, ladera occidental. Alcaldía de Medellín, 90 pp. 1997.
- [18]. FLÓREZ, M., MOLINA M., RAMÍREZ I. Método cualitativo para la determinación de los niveles de amenaza por movimientos en masa de la ciudad de Medellín, ladera occidental. Alcaldía de Medellín, 90 pp. 1996.
- [19]. GRIFFITHS J.S., MATHER A.E., HART A.B. Landslide susceptibility in the Rio Aguas catchment SE Spain. *Quart J Engng Geol* 35, 9-17, 2002.
- [20]. GRUPO de Sismología de Medellín – GSM-, Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones en el Valle de Aburrá. Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2002.
- [21]. Grupo de Sismología de Medellín – GSM-, Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín. Municipio de Medellín – Sistema Municipal de Prevención y Atención de desastres, 135 pp. 1999.
- [22]. GUPTA, A., AHMAD R., Geomorphology and the urban tropics: building an interface between research and usage. *Geomorphology* 31, 133-149. 1999.
- [23]. GUZZETTI, F., CARRARA, A., CARDINALI, M., REICHENBACH, P., Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31, 181-216, 1999.
- [24]. HORMAZA, M., Investigación preliminar de las causas probables de deslizamientos en las laderas de Medellín. Tesis pregrado, Universidad Nacional de Colombia, 529 pp. 1991.
- [25]. HUTCHINSON, J.N., Keynote paper, Landslide hazard assessment. Proceeding of the 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand 3, 1805-1841, 1995.
- [26]. INGEOMINAS, Zonificación de aptitud del suelo para el uso urbano costado occidental de Medellín. Reporte interno, 91 pp. 1990.
- [27]. KIENHOLZ H., SCHNEIDER, G., BICHSEL, M., GRUNDER, M., MOOL, P., Mapping of mountain hazards and slope instability 4, 3, 247-266, 1984.
- [28]. MEIJERINK, A. M., Data acquisition and data capture through mapping units. *ITC Journal* –1, 23-44, 1988.
- [29]. PASUTO, A., SOLDATI M., The use of landslide units in geomorphological mapping an example in the Italian Dolomites. *Geomorphology* 30, 53-64, 1999.
- [30]. PAZ, C. I., TORRES A. M., Precipitación y su influencia sobre algunos deslizamientos ocurridos en las laderas del Valle de Aburrá. Tesis pregrado, Universidad Nacional de Colombia. 174 pp. 1989.
- [31]. PROGRAMA de las Naciones Unidas para el Desarrollo -PNUD-, La Amenaza y la vulnerabilidad en el análisis de riesgos. La microcuena de la quebrada La Iguaná. Alcaldía de Medellín – PNUD. 175 pp. 1998.
- [32]. RENDÓN, A., VARGAS, R., Sistematización del proceso de evaluación de la amenaza por movimientos en masa, en zonas de ladera del Municipio de Medellín. Tesis posgrado, Universidad de Antioquia. 123 pp. 1998.
- [33]. RESTREPO, J.J., Datación de algunas cenizas volcánicas de Antioquia por el método de trazas de fisión. *Environmental geology and Applied Geomorphology in Colombia*. AGID Report 16, 149-157, 1991.
- [34]. SCHEIDEGGER, A. E., Tectonic predesign of mass movements, with examples from the Chinese Himalaya. *Geomorphology* 26, 37-46, 1998.

- [35]. SCHUSTER R. L., Socioeconomic significance of landslides. In: A.K. Turner & R.L. Schuster (Eds) Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington, DC, USA. 129-177 pp. 1996.
- [36]. SHLEMON, R., Zonas de deslizamientos en los alrededores de Medellín, Antioquia (Colombia). Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas. 45 pp. 1979.
- [37]. SOETERS, R. AND VAN WESTEN, C.J. Slope instability recognition, analysis and zonation. En: A.K. Turner & R.L. Schuster (Eds) Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington, DC, USA. 129-177 pp. 1996.
- [38]. VAN ZUIDAM, R., VAN ZUIDAM-CANCELADO, F. I., Aerial Photo interpretation in terrain analysis and geomorphological mapping. Smits Publishers. 443 pp. 1986.
- [39]. VARNES, D. J., Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Natural Hazards, 3, UNESCO Press. Paris, 64 pp. 1984.
- [40]. Working Party – Geological Society., Land surface evaluation for Engineering practice. Q. J. Eng. Geol. London 15, 265-316, 1982.
- [41]. YOKOTA, S., ORTIZ, E., ¹⁴C dating of an organic paleosol covering gravel beds distributed along the San Jerónimo Fault, Western Medellín, Colombia. Geoscience Rept. Shimane Univ. 22, 179-182, 2003.