



Technical analysis on the causes of the mass movement occurred in "Las Nieves" Quarry, city of Copacabana

Wilmer Enrique Giraldo-Ramírez^a & María Fernanda Aristizábal-Arboleda^b

^a Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. wegirald@gmail.com

^b Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, Colombia. mfaristizabala@unal.edu.co

Received: May 20th, 2019. Received in revised form: July 13th, 2020. Accepted: August 04th, 2020.

Abstract

On October 26, 2016, a large-scale mass movement occurred surrounding the Medellín-Bogotá highway, near the municipality of Copacabana. This paper investigates the physical and legal conditions of the place where the landslide occurred, and thus, to corroborate the causes, the possibility of avoiding or preventing the phenomenon and the influence of anthropic activities in the sector. To determine the susceptibility to mass movements and verify the physical conditions, it was carried out by means of geological mapping, geomorphology and interpretation of satellite images. The legal and bibliographic review was consulted in the reports of the event, the PBOT of the municipality of Copacabana and the mining file of the Cantera Las Nieves. The area was found to be highly susceptible to mass movements, and exploitation in the Cantera Las Nieves triggered the landslide, which could be avoided. Similar phenomena could occur in the near future in the area.

Keywords: mass movement, Medellín-Bogotá highway, Copacabana, Cantera Las Nieves.

Análisis técnico sobre las causas del movimiento en masa ocurrido en la Cantera Las Nieves, municipio de Copacabana

Resumen

El 26 de octubre del 2016 ocurrió un movimiento en masa de gran magnitud en inmediaciones de la autopista Medellín-Bogotá, a la altura del municipio de Copacabana. El presente trabajo investiga las condiciones físicas y jurídicas del sector, buscando corroborar las causas del fenómeno, la posibilidad de evitar o prever el mismo y la influencia de las actividades antrópicas como detonantes. Las condiciones físicas se verificaron mediante cartografía geológica, geomorfológica, e interpretación de imágenes satelitales, para determinar la susceptibilidad a movimientos en masa. La investigación jurídica y bibliográfica consultó los reportes del evento, el PBOT del municipio de Copacabana y el expediente minero de la Cantera Las Nieves. Se encontró que la zona presenta alta susceptibilidad a movimiento en masa y la explotación en la Cantera Las Nieves detonó el movimiento en masa, el cual pudo ser evitado. Fenómenos similares se podrían presentar en un futuro cercano en el sector.

Palabras clave: movimiento en masa; autopista Medellín-Bogotá; Copacabana; Cantera Las Nieves.

1. Introduction

El tramo "Zamora-Alto de la Virgen", de la Autopista Medellín-Bogotá, ha presentado múltiples deslizamientos de gran magnitud en los últimos años [1,2].

El 26 de octubre del 2016, ocurrió un movimiento en masa originado en predios de la "Cantera Las Nieves", en la

vereda El Cabuyál del municipio de Copacabana (Antioquia). Este movimiento dejó 16 víctimas mortales y 3 heridos, además, afectó la cantera y la autopista Medellín-Bogotá sobre el retorno "Las Margaritas", Kilómetro 12+100.

El movimiento en masa fue clasificado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) [3], como un movimiento en masa semicircular tipo

How to cite: Giraldo-Ramírez, W.E. and Aristizábal-Arboleda, M.F. Technical analysis on the causes of the mass movement occurred in "Las Nieves" Quarry, city of Copacabana. Revista Boletín de Ciencias de la Tierra, 48, pp. 12-22, Febrero-Julio, 2020.

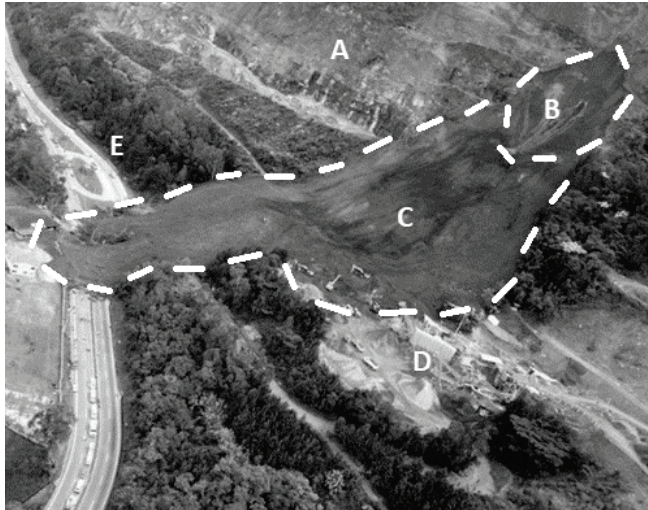


Figura 1. Fotografía aérea del deslizamiento el día 26 de octubre del 2016. A. Zona de explotación en la Cantera Las Nieves. B. Zona de desprendimiento con afloramiento de aguas subterráneas. C. Material desprendido. D. Parte de planta de procesamiento de la Cantera Las Nieves. E. Retorno Las Margaritas de la Autopista Medellín-Bogotá. Fuente: Modificado de [4].

rotacional, con un volumen de material removido estimado de 53.124 m^3 , que con un porcentaje de expansión aproximado del 15%, genera un volumen a remover de 61.093 m^3 y un área afectada de 50.376 m^2 (Fig. 1). La UNGRD consideró que el detonante del movimiento fue el flujo de agua del macizo rocoso en la interface entre la roca y el perfil de meteorización.

El presente informe corrobora las causas del fenómeno, la posibilidad de evitar o prever el mismo y la influencia de las actividades antrópicas como detonantes, mediante la verificación de las condiciones físicas del sector y las condiciones jurídicas y técnicas de la actividad minera en la “Cantera Las Nieves”.

La verificación de las condiciones físicas se realizó mediante recopilación bibliográfica, cartografía geológica y geomorfológica a escala 1:1000, recopilación las imágenes satelitales disponibles en el intervalo 2005-2018 y fotointerpretación de las mismas para determinar las coberturas de suelos y las actividades antrópicas durante este intervalo de tiempo. Dicha información fue integrada y analizada en un modelo 4D (x, y, z, t).

La verificación de las condiciones jurídicas se realizó consultando el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del municipio de Copacabana y el expediente minero correspondiente a la Cantera Las Nieves. En estos se dio especial énfasis a los componentes ambientales, usos de suelo, gestión del riesgo y condiciones técnicas de la explotación minera a desarrollar en el sector.

2. Metodología

2.1. Verificación de reportes

La investigación partió de recopilar la información

disponible en el reporte post-misión de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) [3], los comunicados oficiales de la Alcaldía de Copacabana [5] y el Programa Nacional de Búsqueda y Rescate Urbano (USAR) [6], las redes oficiales del concesionario Desarrollo Vial del Oriente de Medellín (DEVIMED) [7], y los medios de comunicación [2,4]. Esta información permitió conocer las características principales del deslizamiento recopiladas por los geólogos y técnicos del UNGRD in-situ y en las horas posteriores al hecho, además de fotografías del deslizamiento en el día de los hechos y días después.

2.2. Revisión bibliográfica y jurídica

Se consultaron las publicaciones referentes a la geología y geomorfología del sector [8-11] y en general, las zonas de ladera en el valle de Aburrá, enfocado en determinar las condiciones del macizo rocoso y la posibilidad de ocurrencia de movimientos en masa.

Fue recopilada la información cartográfica, topográfica e hidrológica [12,13] disponible sobre el valle de Aburrá y en variadas escalas.

Se consultaron las imágenes satelitales multitemporales [14,15] del sector, desde el año 2005 y hasta el 2018, es decir, 11 años antes y 2 años después del evento. Estas imágenes fueron georreferenciadas y fotointerpretadas mediante la extensión ArcMap del software ArcGIS.

Se consultó el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del municipio de Copacabana vigente en el 2016 [16], en búsqueda de los estudios básicos de amenaza por movimiento en masa. Dado que el deslizamiento se originó al interior de una licencia minera activa, se verificaron los estudios técnicos y documentos relativos a la licencia minera [17], buscando determinar las condiciones detalladas del sitio antes del deslizamiento e indicios de inestabilidad identificados en la ladera, además de los posibles efectos que pudieran causar las actividades mineras sobre la estabilidad de la ladera.

Fueron consultados revistas y periódicos en búsqueda de registros de movimientos en masa en otros sectores del tramo Zamora-Alto de La virgen de la Autopista Medellín-Bogotá [1,18].

2.3. Trabajo de campo

Fue realizada cartografía geológica y geomorfológica detallada de un área de 1 km^2 con centro en el sitio del deslizamiento. Aunque no fue posible ingresar a la cantera, fueron verificados los caminos y laderas alrededor de la misma, así como los afloramientos asociados a las carreteras de ingreso a la cantera y la autopista Medellín-Bogotá. Fueron verificados también los remanentes del material deslizado que se encontraban en el sitio y en uno de los depósitos donde se dispuso el material removido, particularmente el ubicado en el km 0+280 de la vía El Tranvía, en el municipio de Marinilla.

2.4. Integración y análisis de la información

La información espacial y temporal recopilada fue integrada en un modelo 4D (x, y, z, t) mediante la extensión ArcScene, del software ArcGIS. Dicho modelo permitió contrastar la información obtenida de las distintas fuentes con respecto a la ubicación del movimiento en masa, además de verificar las condiciones y variabilidad del terreno a lo largo del tiempo.

La secuencia de imágenes satelitales multitemporales colectadas [14,15], corresponden a imágenes de muy alta resolución con tamaño de pixel de orden centimétrico. La fotointerpretación visual de estas permite identificar las condiciones del sitio, coberturas de suelo e intervenciones antrópicas con alto grado de exactitud [19-21] y en niveles de detalle inferiores a la escala trabajada 1:1000.

Para calcular la susceptibilidad a movimiento en masa del sector se aplicó la metodología utilizada por Cornare [22], la cual utiliza el método indirecto, analizando la interrelación entre las características y condiciones que presenta el terreno para identificar la potencialidad de ocurrencia de un evento considerado, obteniendo con esto, un análisis cualitativo.

En el presente ejercicio fueron realizados dos análisis, el primero, considerando las condiciones al momento del deslizamiento y el segundo, con las condiciones del terreno antes del desarrollo de la actividad minera. Fueron consideradas las variables geología, geomorfología, pendientes y cobertura del suelo, cada variable con múltiples categorías. Se asignó un valor numérico cualitativo de 1 a 10 a cada categoría (Tabla 1). Este valor refleja la susceptibilidad para generar movimientos en masa, siendo 1 muy baja susceptibilidad y 10 muy alta susceptibilidad.

Con la extensión ArcMap del software ArcGIS y asignando un valor ponderado de 25% a cada variable, se obtuvieron los mapas de susceptibilidad a movimiento en masa en el sector donde ocurrió el deslizamiento.

Tabla 1. Variables, categorías y valoración utilizadas para el cálculo de la susceptibilidad a movimientos en masa.

Variable	Categoría	Valor
Geología	Depósito de vertiente	10
	Roca metamórfica	5
Geomorfología	Escarpe	10
	Ladera de pendiente media a alta	8
Coberturas	Suelo desnudo	10
	Pasto	7
	Rastrojo	4
	Bosque	1
Pendientes	0-5%	1
	>5-10%	2
	>10-15%	3
	>15-25%	4
	>25-35%	5
	>35-50%	6
	>50-75%	7
	>75-100%	8
>100-150%	9	
>150%	10	

Fuente: Los Autores.

3 Resultados

3.1. Condiciones físicas

La zona donde se originó el movimiento en masa del 26 de octubre del 2016, Figs. 2-5, presenta condiciones físicas que permiten definirla como una zona de alta susceptibilidad a movimiento en masa. Adicionalmente, se encontraron registros de movimientos en masa en el sector, los cuales causaron daños, cierres temporales y pérdida de vidas [1-7]. Los principales y de mayor magnitud ocurrieron en el km 6 [1] y km 14 [2] de la Autopista Medellín-Bogotá.

3.1.1. Geología

Las inmediaciones del sitio del movimiento en masa se encuentran cartografiadas regionalmente como anfibolitas y migmatitas del Terreno Bocaná [8]. Localmente, la zona donde se originó el deslizamiento corresponde a una zona de contacto entre las unidades de rocas metamórficas que conforman los escarpes de la zona alta de las laderas del Valle de Aburrá y los depósitos de vertiente ubicados a media ladera [9] (Fig. 2), escarpes y depósitos asociados a los movimientos en masa ocurridos en el Valle de Aburrá [10].

El Programa de Trabajo y Obras (PTO) de la cantera Las Nieves [17] confirmó estas condiciones geológicas, identificando en el sector una unidad rocosa de anfibolita en la zona alta de la ladera y una unidad de depósitos de vertiente

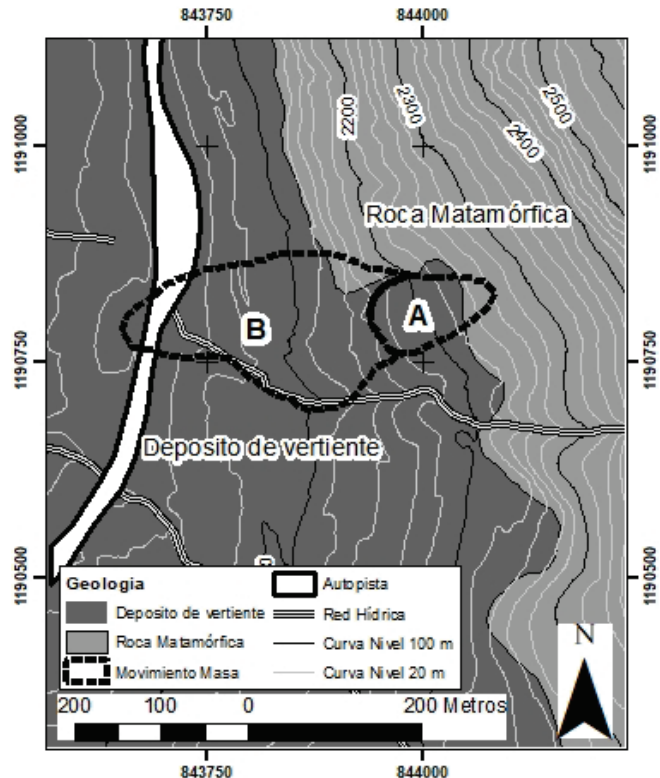


Figura 2. Geología en el área del movimiento en masa. A. Zona de desprendimiento, B. Zona de acumulación.

Fuente: Los Autores.

en la zona media, definiendo la unidad de depósitos como el material a ser explotado en la actividad minera.

El trabajo de campo determinó que la zona corresponde a dos unidades superficiales.

Al oriente y en la zona topográficamente alta, se encuentran los afloramientos rocosos, los cuales corresponden a una secuencia metamórfica de anfibolitas con ocasionales texturas de fusión parcial. Esta unidad presenta distintos grados de meteorización. En las zonas aprovechadas o de alta pendiente, la roca presenta meteorización baja, mientras que, en las zonas de pendientes medias, se observa el desarrollo de zonas de meteorización media a alta con algunos puntos de formación de suelos residuales.

Al occidente del área y en la zona baja topográficamente, se presentan depósitos de vertiente, que corresponden principalmente a depósitos de escombros, con distintos grados de meteorización en función de su antigüedad. Los depósitos presentan bloques decimétricos, clasto-soportados en las zonas cercanas al escarpe rocoso y que cambian gradualmente a matriz-soportados disminuyendo su proporción de bloques a medida que se aleja del escarpe y se descende en la ladera. Estos depósitos se generaron a partir de movimientos en masa en la zona alta, que corresponde a la unidad de roca metamórfica.

Las zonas en las que se originó y depositó el movimiento en masa investigado, están al interior de la unidad de depósitos de vertiente, lo cual implica que el material caído corresponde a material removilizado de los movimientos en

masa antiguos que afectaron las laderas del valle de Aburrá [9,10].

3.1.2. Geomorfología

La zona del movimiento en masa se ubica al interior del Valle de Aburrá, valle caracterizado por un fondo en algunos sectores plano, con laderas intermedias de media pendiente y laderas altas escarpadas [10]. La cartografía detallada de la zona [11] determina que el área de estudio corresponde a dos unidades geomorfológicas, al oriente y en la zona alta está la unidad de escarpes semicirculares superiores, mientras que al occidente y en la zona baja se presenta la unidad de superficies suaves en depósitos poco incisados.

En el trabajo de campo se reconocieron dos unidades geomorfológicas (Fig. 3), los escarpes del borde del Valle de Aburrá y las laderas de pendiente media a alta. La unidad de escarpes presenta pendientes dominantes mayores al 75%, y la unidad de laderas tiene pendientes menores al 75%, en su mayoría menores al 50% (Fig. 4).

Las unidades geológicas y geomorfológicas muestran una relación importante en el sector. La zona caracterizada geológicamente por rocas metamórficas corresponde geomorfológicamente a la zona de escarpe y la zona caracterizada geológicamente por la presencia de depósitos de vertiente corresponde a la unidad geomorfológica de ladera de pendiente media y alta.

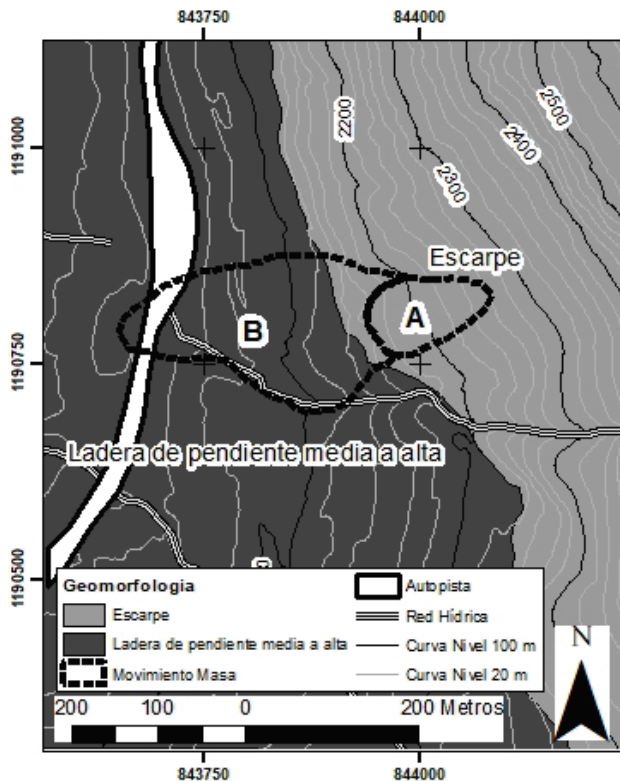


Figura 3. Geomorfología en el área del movimiento en masa. A. Zona de desprendimiento, B. Zona de acumulación. Fuente: Los Autores.

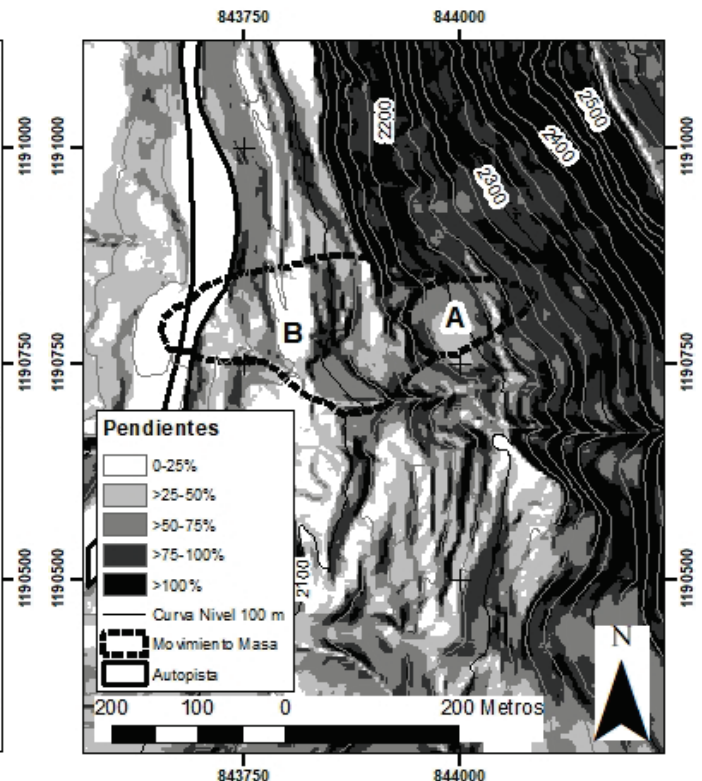


Figura 4. Topografía del área del movimiento en masa del día 26 de octubre del 2016. A. Zona de desprendimiento, B. Zona de acumulación. Fuente: Los Autores.

Es importante anotar que el único sector donde la relación entre unidades geológicas y geomorfológicas no es directa, es precisamente el sector donde se originó el movimiento en masa. En este sector, la unidad geológica de depósitos de vertiente, coincide con la unidad geomorfológica de escarpes (Figs. 2, 3).

3.1.3. Coberturas y usos del suelo

Mediante fotointerpretación de las imágenes satelitales [14,15,19-21], se determinó la extensión exacta del movimiento en masa (Figs. 2-7) y las coberturas y usos del suelo en el intervalo 2005-2018 (Fig. 7).

Se determinó que el movimiento en masa afectó directamente un área de 50.376 m², presentando una distancia entre la corona del deslizamiento y la base de 435 m, un ancho máximo de 180 m y una diferencia de altura entre la corona y la base del depósito generado de 236 m (2.276 y 2.040 m.s.n.m.).

En el año 2005, antes del desarrollo de la actividad minera, el sector desde donde se desprendió la masa de suelo se encontraba cubierta por bosque y rastrojos, con algunas zonas de pastos alrededor. Esta cobertura boscosa fue retirada para la explotación minera. Cuando ocurrió el movimiento en masa, la zona desde donde este se desprendió no contaba con cobertura alguna y los suelos se encontraban desnudos (Figs. 1, 5, 8), alrededor de la misma se conservaban rastrojos, pastos y algunos remanentes de cobertura boscosa asociadas a las zonas de retiro de fuentes hídricas. La cobertura de suelo será utilizada para el cálculo de la susceptibilidad a movimiento en masa antes y después del desarrollo minero.

Las intervenciones realizadas se encuentran amparadas por las licencias ambientales de la Cantera Las Nieves, la Autopista Medellín-Bogotá y demás obras realizadas en el sector. No fue posible constatar el estado de las obras para el manejo de aguas subterráneas debido a las restricciones de ingreso a la cantera.

3.1.4. Hidrología

La fuente hídrica dominante en el sector estudiado es la quebrada Suramericana (Fig. 2) [17]. Las zonas altas de las laderas del Valle de Aburrá son identificadas como zonas de nacimientos y de afloramiento de aguas subterráneas. [12-13]. En la zona donde ocurrió el movimiento en masa se presentan dos tipos de flujos de agua, el de flujo superficial y el flujo subterráneo.

Los flujos superficiales corresponden a las aguas provenientes de las zonas más elevadas topográficamente y que recorren la ladera por su superficie. En este caso los flujos superficiales corresponden a la quebrada Suramérica y sus afluentes. Fue verificado en campo que los cauces superficiales del sector se encuentran en buenas condiciones y las respectivas rondas hídricas han sido conservadas con cobertura de bosque nativo.

Las aguas subterráneas son aguas infiltradas al macizo rocoso en la zona alta de la montaña y que fluyen por medio de las discontinuidades en el macizo rocoso y las masas de

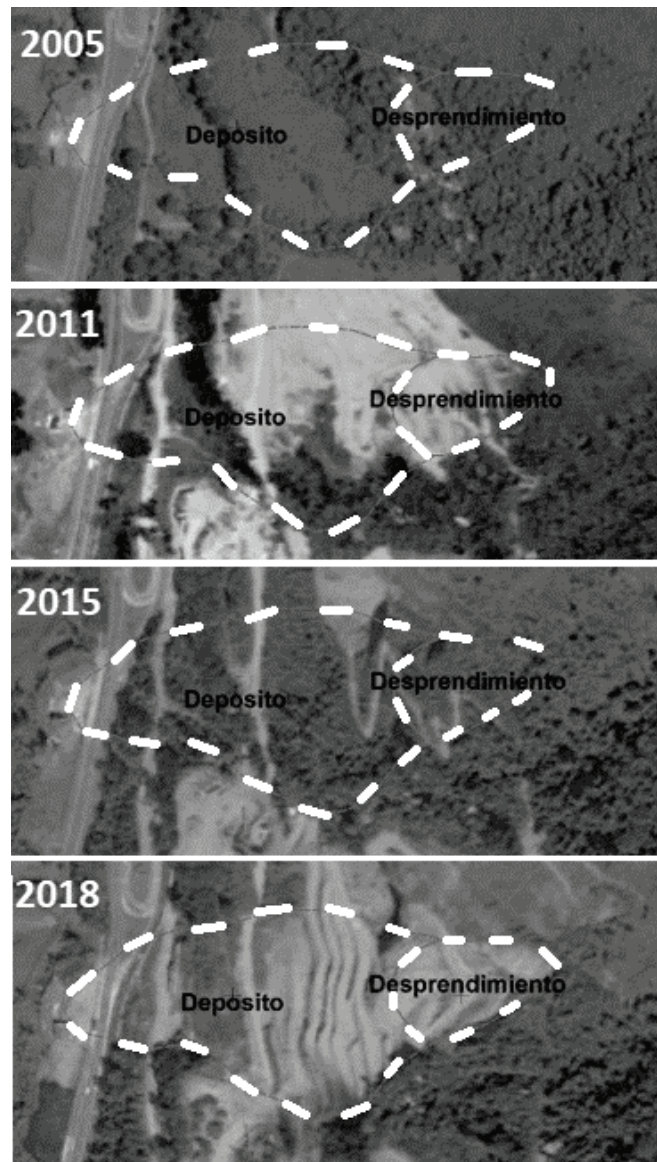


Figura 5. Imágenes satelitales del 2005, 2011, 2015 y 2018, donde se observa la cobertura de los suelos y el área de cobertura boscosa que fue retirado para dar cabida a la explotación minera en el área afectada por el movimiento en masa.

Fuente: modificado de [14, 15].

suelos. Ocasionalmente, los flujos subterráneos pueden encontrar puntos de afloramiento, alimentando los afluentes superficiales. Es de vital importancia anotar que, tal y como fue reportado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres [3], el detonante del movimiento en masa fue la saturación de la masa de suelo deslizada debido a un flujo de aguas subterráneas. Este flujo de aguas se puede evidenciar en las fotografías tomadas al sector el día del desastre (Fig. 1) y en días posteriores (Fig. 6).

El estudio detallado de las aguas subterráneas en el sector está por fuera del alcance de la presente investigación, por lo tanto, se partió de la verificación de fuentes secundarias. Al verificar los estudios hidrológicos anexos a la “Licencia Ambiental Expediente AN3-2004-2 Titulo Minero 5530” [17],

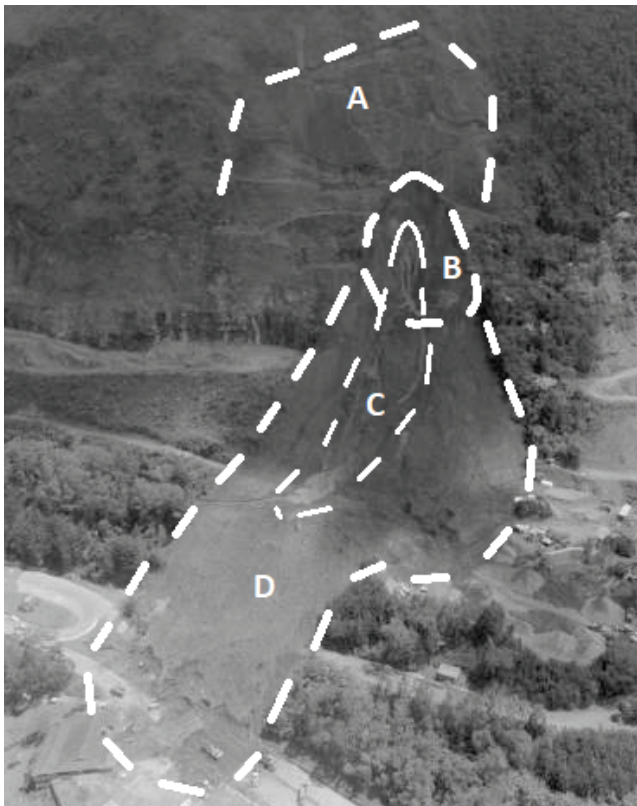


Figura 6. Fotografía aérea del movimiento en masa el día 27 de octubre del 2016. A. Límite superior de la explotación minera y la zona deforestada. B. Zona de desprendimiento del movimiento en masa. C. Afloramiento y flujo de aguas subterráneas. D. Material desprendido. Fuente: modificado de [7].

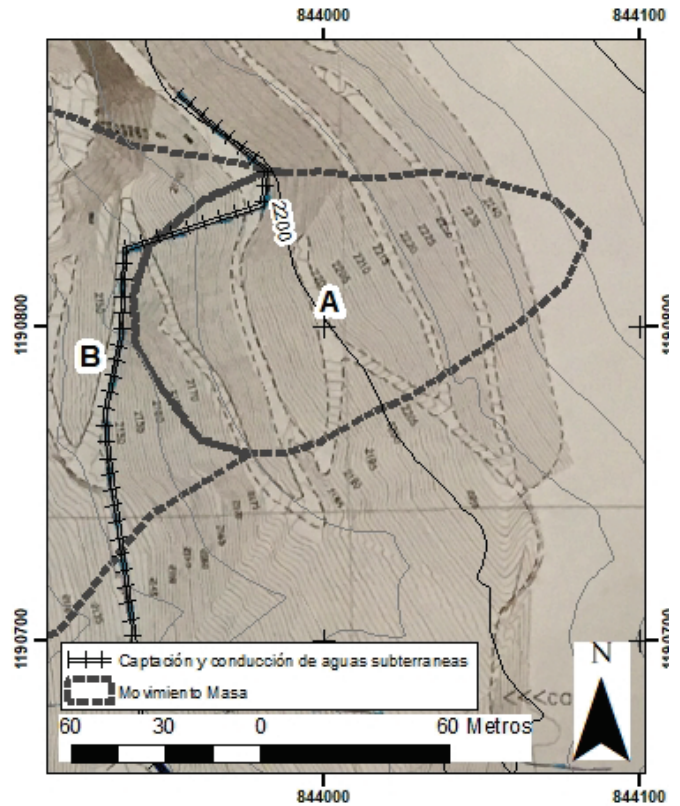


Figura 7. “Plano Ubicación Captación Aguas Título Minero 5530”, anexo al “Expediente AN3-2004-2 Título Minero 5530” [17] georreferenciado para comparar el mismo con la localización del deslizamiento del 26 de octubre del 2016. A. Zona de desprendimiento, B. Zona de acumulación. Fuente: modificado de [17].

licencia de la “Cantera Las Nieves”, fue posible verificar que el afloramiento de aguas subterráneas ubicado en el centro del sector donde se generó el deslizamiento, estaba identificado por la empresa propietaria de la cantera, empresa APMA (Agregados y Proyectos Mineros de Antioquia S.A.).

En la página 31 del “Informe de Seguimiento Programas y Actividades Ambientales Cantera Las Nieves Expediente Ambiental 03-04-02” [17], se lee que los técnicos responsables por el desarrollo de la actividad minera reconocieron las aguas subterráneas aflorantes en el sector donde se originó el movimiento en masa y se reconoce que el mal manejo de las mismas podría generar inestabilidad en los taludes del sector. La Fig. 7 [17] muestra la infraestructura para captar y transportar las aguas subterráneas desarrollada en el frente norte la cual coincide con el punto donde se originó el movimiento en masa.

3.1.5. Susceptibilidad a movimiento en masa

El análisis de susceptibilidad para movimiento en masa fue realizado para dos escenarios. El primer escenario considera las condiciones antes del desarrollo de la actividad minera (Fig. 8), mientras el segundo considera las condiciones al momento del movimiento en masa (Fig. 9). La

metodología cualitativa aplicada (ver sección 2.4) clasifica la posibilidad de la ocurrencia de los movimientos en masa en una escala de 0 a 10, siendo 0 una muy baja posibilidad y 10 una muy alta posibilidad.

La susceptibilidad a movimiento en masa para el año 2005 (Fig. 8) presenta valores entre 3 y 8, con un valor medio de 6. Los mayores valores se encuentran asociados a las zonas de muy alta pendiente asociadas al escarpe rocoso ubicadas al NE de la zona de estudio y a los taludes desarrollados para la Autopista Medellín- Bogotá. La zona donde se originó el movimiento en masa presenta valores de entre 5 y 7, estando dentro de los rangos promedios observados en la zona. La cobertura boscosa que se presentada en el sector ayuda a disminuir la susceptibilidad a movimiento en masa al regular la infiltración de aguas lluvias a la masa de suelo [23].

La susceptibilidad a movimiento en masa para el año 2016 (Fig. 9) presenta valores entre 4 y 10, con un valor medio de 6.5. Los mayores valores son obtenidos justo en el punto donde se originó el movimiento en masa, valor 10, mientras que las zonas aledañas presentan un valor de 9. Los altos valores presentados se deben a la coexistencia en este punto de la unidad geológica de depósitos de vertiente, la unidad geomorfológica de escarpe, las altas pendientes presentadas y el suelo con coberturas asociadas a la actividad de la Cantera Las Nieves y sus frentes de explotación.

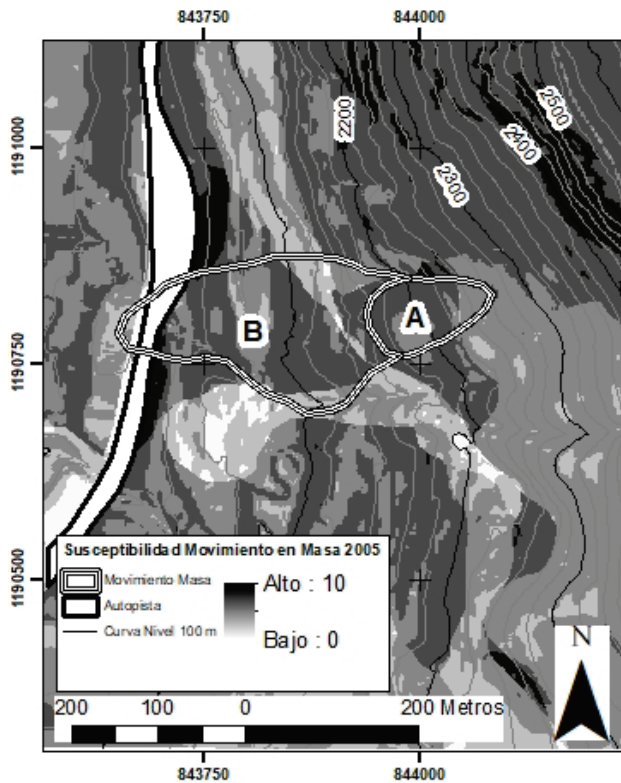


Figura 8. Susceptibilidad a movimiento en masa para el año 2005 en el área estudiada. A. Zona de desprendimiento, B. Zona de acumulación. Fuente: Los Autores.

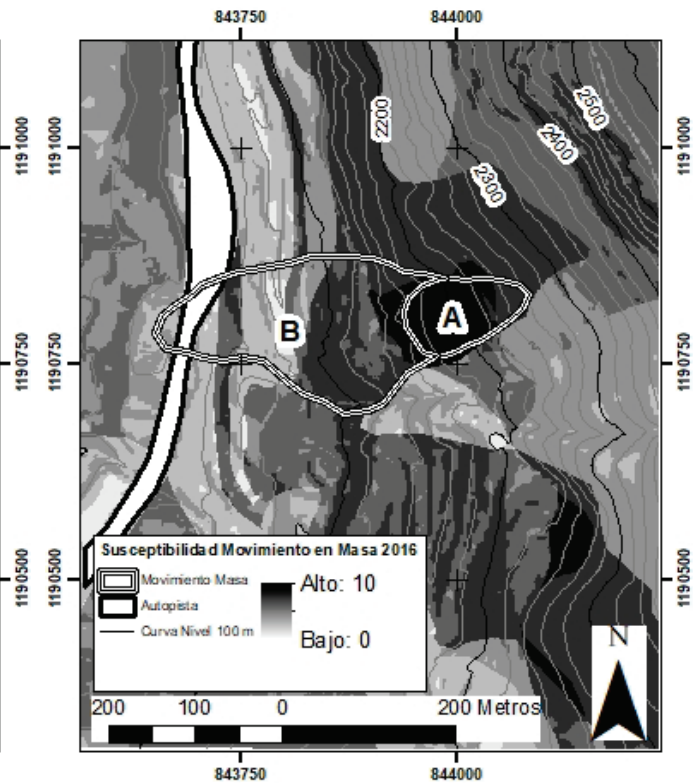


Figura 9. Susceptibilidad a movimiento en masa para el año 2016 en el área estudiada. A. Zona de desprendimiento, B. Zona de acumulación. Fuente: Los Autores.

3.2. Condiciones jurídicas

La normatividad de ordenamiento territorial aplicable sobre determinado territorio, brinda las pautas para el desarrollo de actividades en el mismo, sin afectar el medio ambiente o materializar riesgos, principalmente por fenómenos naturales. El siguiente estudio normativo y jurídico busca verificar si existía para el momento del deslizamiento, algún registro de riesgo de movimientos en masa en el sector y que actividades se debían realizar para mitigarla.

3.2.1. PBOT del municipio de Copacabana

El instrumento de ordenamiento territorial que corresponde al municipio de Copacabana es un Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT). Al momento del movimiento en masa del 26 de octubre del 2016, el municipio se encontraba regido por el Acuerdo 025 del 20 de diciembre del 2000 [16]. Como la vigencia normativa a largo plazo de los instrumentos de ordenamiento territorial es de 12 años, el municipio de Copacabana debió actualizarlo en el 2012.

Al verificar la clasificación del suelo del sector donde se originó el movimiento en masa, se encontró que la zona comprendida por encima de la autopista Medellín-Bogotá en la vereda El Cabuyal, es considerado como suelo de protección en el artículo 62, numeral 1.1.. El artículo 67 considera la vereda El Cabuyal (Sector Las Margaritas-La

Autopista) como una zona de riesgo mitigable o recuperable por amenaza o riesgo natural.

Al verificar los usos del suelo para el sector se encontró que el uso principal es “*Forestal protector productor*”, y que como usos prohibidos se encuentra “*Minería en zonas de recargas de aguas. Deforestación. Ganadería extensiva. Apertura de vías.*”.

Esta normativa de usos del suelo fue corroborada el 15 de abril del 2016, 6 meses antes del movimiento en masa, mediante oficio [23], disponible en el Expediente AN3-2004-2 [17]. Se aclara que “*La actividad Minera descrita no es compatible con el uso del suelo estipulado en el PBOT del Municipio de Copacabana, no obstante, se aclara que conforme al parágrafo 2° del artículo 2° del Decreto Nacional 0934 del 2013, esta prohibición “no podrán ser oponibles, aplicadas o exigidas a las actividades mineras, por ninguna autoridad.”*” [24]. El 19 de diciembre del 2018, dos años después del movimiento en masa, se corrobora mediante oficio [25] que dichos usos continúan vigentes y no han cambiado. También se confirma que el sitio donde se desarrollan las actividades mineras corresponde a una zona de protección forestal y de alto riesgo mitigable.

Si bien el PBOT del municipio de Copacabana consideraba el sector como protección forestal y zona de alto riesgo mitigable, y que consecuentemente, la deforestación y la actividad minera en la zona donde se originó el movimiento en masa están prohibidas, este no tenía la autoridad para impedir esta actividad debido a restricciones

normativas de orden nacional [26].

Es importante aclarar que en el expediente minero AN3-2004-2 [17], se encontró que el municipio de Copacabana había solicitado desde el año 2010 y mediante oficio [27] que la autoridad ambiental Corantioquia, hiciera “*el control y seguimiento a las proyectos, obras o actividades autorizadas*” en el plan de manejo ambiental a, entre otras, la Cantera Las Nieves.

3.2.2. Expediente minero

Debido a que el sitio en estudio está al interior de una licencia minera, el expediente de la misma contiene información importante sobre las condiciones geológicas y geotécnicas del sitio, lo cual incluye el riesgo por movimiento en masa. Además, dicta las condiciones en las que se deben desarrollar las actividades mineras para evitar la materialización del riesgo.

El expediente minero de la Cantera Las Nieves [17] fue consultado en la sede principal de Corantioquia, consulta autorizada mediante oficio [28].

Por medio de la resolución 4888 del 01 de septiembre del 2006 de Corantioquia, resolución contenida en el expediente minero [17], se otorga la licencia ambiental a la explotación de la Cantera Las Nieves, y se estipula que el método de explotación consistirá en bancos descendentes con arranque mecánico en dos frentes. La explotación se autoriza entre las cotas 2100 y 2205 para el frente norte y entre las cotas 2100 y 2300 para el frente sur. El límite entre los dos frentes es la quebrada Suramericana.

3.3. Condiciones técnicas de la explotación minera

3.3.1. Evolución de la explotación

Para determinar la evolución de la explotación minera en zona del movimiento en masa se verificaron las imágenes satelitales del periodo 2005-2018 [14, 15, 19-21], mostradas en la Fig. 10.

Estas evidenciaron que en 2005 el sector contaba con cobertura boscosa y no presentaba explotación minera. Para el 2011, se había hecho el respectivo descapote y la explotación de la capa superficial del suelo en la zona donde se originó y donde se depositó el movimiento en masa. En el 2015 este sector se encontraba abandonado. Este abandono debió atender a los parámetros técnicos del cierre y abandono de minas. Con la explotación suspendida los suelos del sector recuperaron su cobertura vegetal en forma de rastrojos bajos. En el 2018 es posible observar que después del 2015 y hasta la suspensión de las actividades en la cantera, las obras de explotación continuaron en la zona alta de la ladera, justo por encima de la zona sobre la cual se generó el movimiento en masa.

En las fotografías tomadas posteriormente al movimiento en masa (Figs. 1, 5), se confirma el análisis de las imágenes satelitales, observando que la deforestación y apertura de caminos se desarrollaron antes del movimiento en masa en el punto donde se originó el mismo.

3.3.2. Método de explotación

Al realizar el análisis multitemporal en el periodo 2005-2018 de las imágenes satelitales georreferenciadas y comparando estas con la topografía oficial sector [14, 15, 19-21], es posible determinar los límites de la explotación en cada momento (Fig. 10)

La explotación se dio en la parte baja de la ladera en el año 2009 y ascendió paulatinamente. En el frente 2 se superó el límite de la cota 2205 en el 2011 o antes, mientras en el frente 1 se superó el límite establecido por la cota 2300 en el año 2015 o antes. Se observa que el método de explotación autorizado no se cumplió, pues la explotación se realizó de manera ascendente, es decir, de la cota menor a la cota mayor y por fuera de los límites definidos y autorizados por el PTO y la licencia ambiental.

3.3.3. Manejo de aguas

La causa principal del deslizamiento fue la saturación del suelo debido a las aguas subterráneas en el sector [3]. El afloramiento de parte de las aguas subterráneas y las consecuencias de su manejo de forma inadecuada, eran condiciones conocidas por los propietarios de la cantera y las autoridades ambientales [17]. El manejo de estas aguas era responsabilidad de la cantera y debió de darse de acuerdo con lo estipulado en el Plan de Manejo Ambiental (PMA) de tal manera que garantizara la seguridad del proyecto, la estabilidad de los taludes y la protección del medio ambiente en el área de influencia del mismo. La verificación de su cumplimiento era responsabilidad de los entes de control, en este caso, Corantioquia y Secretaria de Minas de la gobernación de Antioquia [26].

4. Discusión

El sector donde se originó el deslizamiento del día 26 de octubre del 2016 y particularmente el sector en el cual se ubica la “Cantera Las Nieves”, es una zona de altas pendientes, las cuales son reconocidas en las zonas tropicales como el principal factor de susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa. Las condiciones geológicas y geomorfológicas del sector estudiado, caracterizado por escarpes rocosos y depósitos de vertiente en sus bases, indican la ocurrencia en el pasado de grandes movimientos en masa y una alta susceptibilidad a la ocurrencia de nuevos movimientos. Los suelos desnudos presentan una probabilidad al desarrollo de movimientos en masa mucho mayor que suelos con cobertura boscosa, por lo tanto, el cambio de cobertura de suelos presentado en la zona de estudio afectó considerablemente la estabilidad de la ladera.

El movimiento en masa del 26 de octubre del 2016 está asociado a la presencia de aguas subterráneas. La presencia de dichas aguas, la necesidad de su adecuado manejo y las posibles consecuencias de las mismas, eran conocidas por los propietarios de la cantera y la autoridad ambiental competente. La generación de un movimiento en masa por consecuencia de estas implica un mal manejo técnico de las

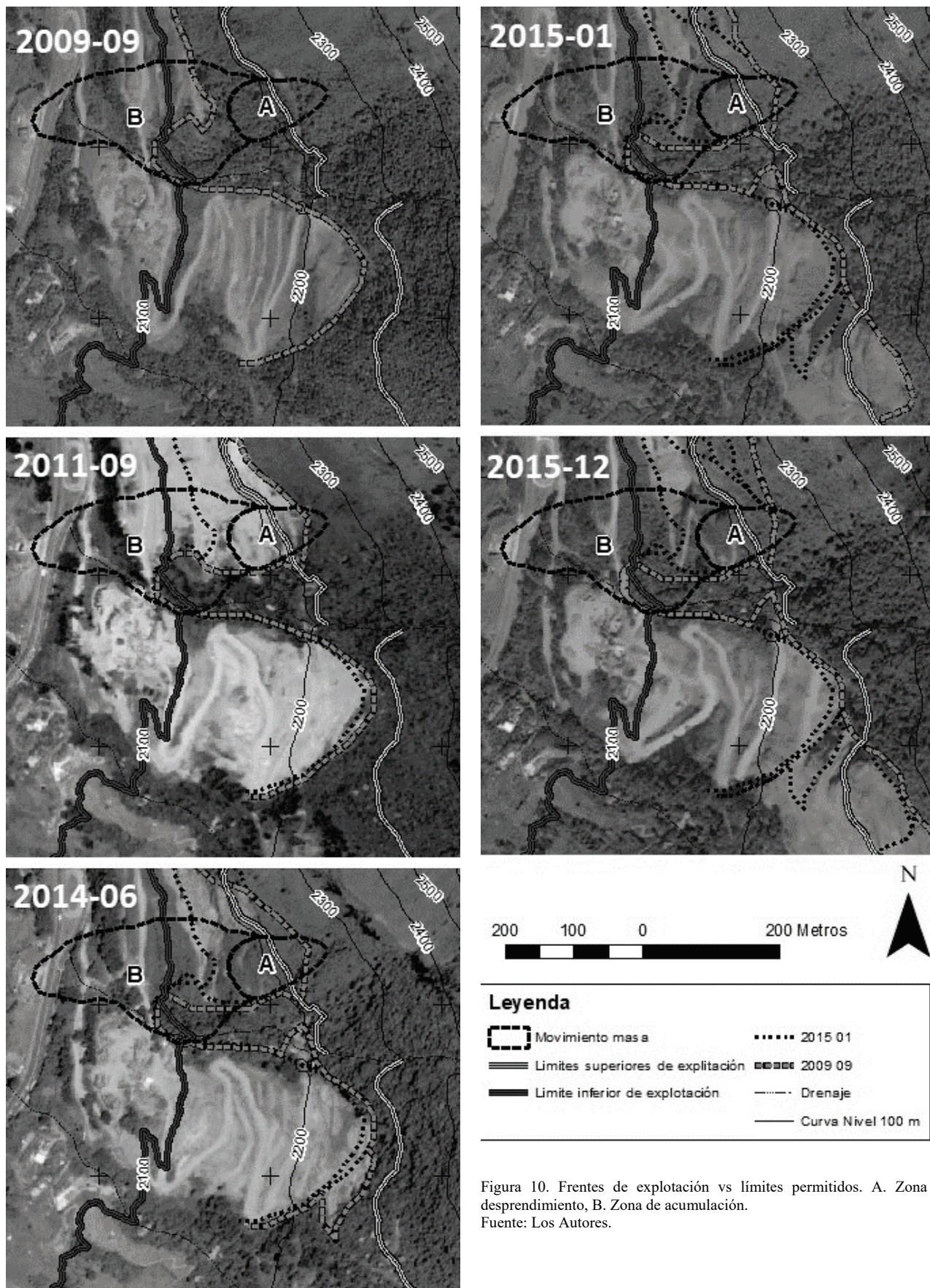


Figura 10. Frentes de explotación vs límites permitidos. A. Zona de desprendimiento, B. Zona de acumulación. Fuente: Los Autores.

mismas, responsabilidad de los propietarios de la cantera y los entes de control.

El PBOT del municipio de Copacabana encontró la zona de estudio con alto riesgo mitigable por movimiento en masa, además, en función de esta característica, considera que las actividades de minería, deforestación y apertura de caminos no se deben de realizar en el sector. El análisis de fotografías muestra que la minería, la apertura de caminos y la deforestación se realizaron en el sitio. La susceptibilidad a movimiento en masa aumentó de manera significativa debido a los cambios en el territorio asociados a la actividad minera. La máxima susceptibilidad en el año 2005 estaba asociada a los escarpes de la ladera. La máxima susceptibilidad en el año 2016 estaba asociada a la actividad minera y presenta su valor máximo en el área particular donde se originó el movimiento en masa. Las condiciones de inestabilidad de la ladera donde se desarrolló la explotación minera eran conocidas por el estado y la empresa privada a través del PBOT del municipio de Copacabana y el PTO y los PMA de la Cantera Las Nieves.

La “Cantera Las Nieves” no fue explotada con la metodología de banqueo descendente planteada en el PTO y requerida para la explotación a cielo abierto en zonas de alta pendiente. La explotación ascendente va en contravía de lo establecido por las autoridades en la licencia minera. La cota 2300, cota definida como límite superior para la explotación del “Frente 1” y la cota 2205, cota definida como el límite superior de las explotaciones del “Frente 2” y la zona norte de la “Cantera Las Nieves”, no fueron respetadas. Las explotaciones por fuera de la zona estipulada y en la zona alta de la ladera constituyen una violación a lo definido en la Licencia Ambiental y Minera. El desarrollo de actividades mineras sin atender los parámetros técnicos establecidos y verificados en los procesos de licenciamiento aumenta la posibilidad de ocurrencia de desastres.

El movimiento en masa en la “Cantera Las Nieves” se originó en un sector previamente explotado. Es responsabilidad de quienes ejecutan la explotación, garantizar que las zonas abandonadas son recuperadas ambientalmente y todos los riesgos presentes sean mitigados.

El tramo de la autopista Medellín-Bogotá comprendido entre Zamora y el Alto de la Virgen tiene condiciones similares a las presentada en el sitio del deslizamiento. Este tramo presenta altas pendientes, suelos asociados a depósitos de vertientes y múltiples afluentes y afloramientos de aguas subterráneas. En la zona se presenta una alta ocupación del suelo representada en múltiples canteras para la extracción de materiales pétreos, además de otros movimientos de tierras y deforestación asociadas a otras actividades económicas.

Estas condiciones configuran un escenario donde es posible la ocurrencia de nuevos movimientos de masa de grandes magnitudes. Los corredores asociados a importantes interconexiones viales como la autopista Medellín-Bogotá y otras autopistas de montaña, deben contar con estudios de gestión del riesgo que permitan determinar la posibilidad de ocurrencia de estos eventos y las medidas requeridas para la mitigación de los mismos. Ante la ausencia de dichos estudios y la posibilidad o recursos para realizarlos, los

concesionarios responsables de las vías deberían avanzar en su implementación, principalmente en los tramos viales con mayores pendientes.

Referencias

- [1] Giraldo-Ramírez, W. y Ordóñez-Carmona, O., Problema geotécnico del Km 6 de la autopista Medellín-Bogotá: antecedentes, causas y soluciones alternativas. *Boletín Ciencias de la Tierra* 34, pp. 25-33, 2013.
- [2] El Colombiano, Declaran calamidad pública por derrumbe en la Medellín-Bogotá, 30 de diciembre del 2016. [en línea]. 2016. [Consultado el 16 de mayo del 2019]. Disponible en: <https://www.elcolombiano.com/antioquia/movilidad/declaran-calamidad-publica-por-derrumbe-en-la-medellin-bogota-EN5681402>
- [3] UNGRD, Informe Post-Misión: Copacabana. Fecha: octubre 26 a noviembre 2 de 2016. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres Presidencia de la República, 2016.
- [4] El Colombiano, Seis muertos y cuatro heridos por derrumbe en Autopista Medellín-Bogotá, 26 de octubre del 2016, [en línea]. 2016. [Consultado el 01 de mayo del 2019]. Disponible en: <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/seis-muertos-y-cuatro-heridos-derrumbe-autopista-medell-articulo-662356>
- [5] Alcaldía de Copacabana, Sala de Prensa, [en línea]. 2016 [Consultado el 11 de noviembre del 2016]. Disponible en: <http://www.copacabana.gov.co/NuestraAlcaldia/SaladePrensa/Pagina/default.aspx>
- [6] USAR, Ya son 13 los cuerpos recuperados en emergencia presentada vía Medellín-Bogotá, 1 de noviembre del 2016. [en línea]. 2016. [Consultado el 10 de noviembre del 2016]. Disponible en: <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/usar/sala-de-prensa/Lists/EntradasDeBlog/Post.aspx?ID=29>
- [7] Devimed, El antes y después del derrumbe en la autopista, 28 de octubre del 2016. [en línea]. 2016, [Consultado el 01 de mayo del 2019]. Disponible en: <https://mioriente.com/altiplano/despues-del-derrumbe-la-autopista.html>
- [8] Toussaint, J.F. and Restrepo, J.J., Tectonostratigraphic terranes in Colombia: an update. Second part: oceanic terranes. In: Gómez, J. and Pinilla-Pachón, A.O., (eds.), *The geology of Colombia, Vol. 2 Mesozoic*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas. Especiales. 36, 2020, 24 P. Bogotá. DOI: 10.32685/pub.esp.36.2019.07.
- [9] Rendón, D., Cartografía y caracterización de las unidades geológicas de la zona urbana de Medellín. Trabajo de grado, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, 200 P, 1999.
- [10] Aristizabal, E. y Yokota, E., Evolución geomorfológica del Valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa. *Boletín Ciencias de la Tierra*, 24, pp. 5-18, 2008.
- [11] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Geomorfología del Valle de Aburrá, [en línea]. 2019. [Consultado el 8 de mayo del 2020]. Disponible en: <http://geografico.metropol.gov.co/arcgis/rest/services/Geomorfologia/Geomorfologia/MapServer>
- [12] Corantioquia-Area Metropolitana del Valle de Aburrá, Estudio de zonas de recarga y acuíferos del Valle de Aburrá, 2002.
- [13] Giraldo, W., Modelo hidrogeológico conceptual de los valles de San Nicolás y de La Unión. Universidad Nacional de Colombia-Cornare, 2013.
- [14] CartoAntioquia. Convenio interadministrativo 4085 de 2009 para la generación de la cartografía del Departamento de Antioquia, suscrita entre el Departamento de Antioquia, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC, 2011.
- [15] Google Earth. Imágenes satelitales del municipio de Copacabana, [en línea]. 2020. [Recuperado el 01 de mayo del 2019].
- [16] Municipio de Copacabana. Acuerdo 025 de 2000-Plan básico de ordenamiento territorial, Municipio de Copacabana. 2000.
- [17] Corantioquia, Expediente AN3-2004-2 Título Minero 5530, Cantera Las Nieves, Archivo general de Corantioquia, 2004.
- [18] Diarioriente, Se declaró la calamidad pública para atender la emergencia del cierre de la autopista Medellín – Bogotá, 31 de diciembre del 2016. [en línea]. 2016. [Consultado el 16 de mayo del 2019]. Disponible en: <http://diarioriente.com/altiplano/se-declaro-la>

calamidad-publica-atender-la-emergencia-del-cierre-la-autopista-medellin-bogota.html

- [19] Schepaschenko, D., See, L., Lesiv, M., Bastin, J., Mollicone, D., Tsendbazar, N., Bastin, L., McCallum, I., Laso-Bayas, J., Baklanov, A., Perger, C., Dürauer, M. and Fritz, S., Recent advances in forest observation with visual interpretation of very high-resolution imagery. *Surv Geophys* 40, pp. 839-862, 2019. DOI: 10.1007/s10712-019-09533-z
- [20] Svatonova, H., Analysis of visual interpretation of satellite data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLI-B2, pp. 67-681, 2016. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B2-675-2016
- [21] Arranz-López, A., López-Escolano, C., Salinas-Solé, C., Zúñiga-Antón, M., Montorio-Llovería, R. y Pueyo-Campos, A., El potencial de Google Earth aplicado al análisis espacial en Geografía. En: *Innovación en la enseñanza de la geografía ante los desafíos sociales y territoriales*, Universidad de Zaragoza, 2013, pp. 179-194. ISBN 978-84-9911-249-7.
- [22] Cornare, Gobernación de Antioquia, evaluación y zonificación de riesgos y dimensionamiento de procesos erosivos en los 26 municipios de la jurisdicción de Cornare. Convenio Cornare-Gobernación de Antioquia N° 2011-cf-12-0051 y 217-2011, 2011.
- [23] Villegas, J.C., Análisis del conocimiento en la relación agua-suelo-vegetación para el Departamento de Antioquia. *Revista EIA, Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 1(Enero-Junio), pp. pp.73-79, 2004.
- [24] Municipio de Copacabana. Oficio 1605 1945 01844 del 15 de abril del 2016, De Frank Montoya Arroyave, Director del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, a Cesar Augusto Saldarriaga, Gerente Regional Agregados y Proyectos Mineros de Antioquia S.A. – APMA-. 2016.
- [25] Municipio de Copacabana. Oficio 12569 del 19 de diciembre del 2018, De Luis Carlos Gómez Hernández, Director del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, a Raúl Guillermo Tamayo Zapata. 2016.
- [26] Ministerio de Minas y Energía. Decreto Numero 0934 de 9 de mayo del 2013, Por el cual se reglamentan el Artículo 37 de la Ley 685 de 2001. 2013.
- [27] Municipio de Copacabana. Oficio 103-964 1090 del 18 de marzo del 2010, De Diego Echeverri Hincapié, Alcalde, a Carlos Alberto Molina Gómez, Director territorial Aburrá Norte, Corantioquia. 2010.
- [28] Corantioquia. Oficio FT-GIC-18 del 12 de diciembre del 2018, De Julian Andres Granada Restrepo, Jefe Oficina Territorial Aburrá Norte, a Raúl Guillermo Tamayo Zapata. 2018.

W.E. Giraldo-Ramírez, es Ingeniero Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, MSc. y PhD (candidato) de la Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Actualmente investiga la evolución geodinámica de los Andes del Norte y las aplicaciones de la geología al ordenamiento territorial.

ORCID: 0000-0003-3339-1741

M.F. Aristizabal-Arboleda, es Ingeniera Geóloga de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

ORCID: 0000-0002-7842-7659