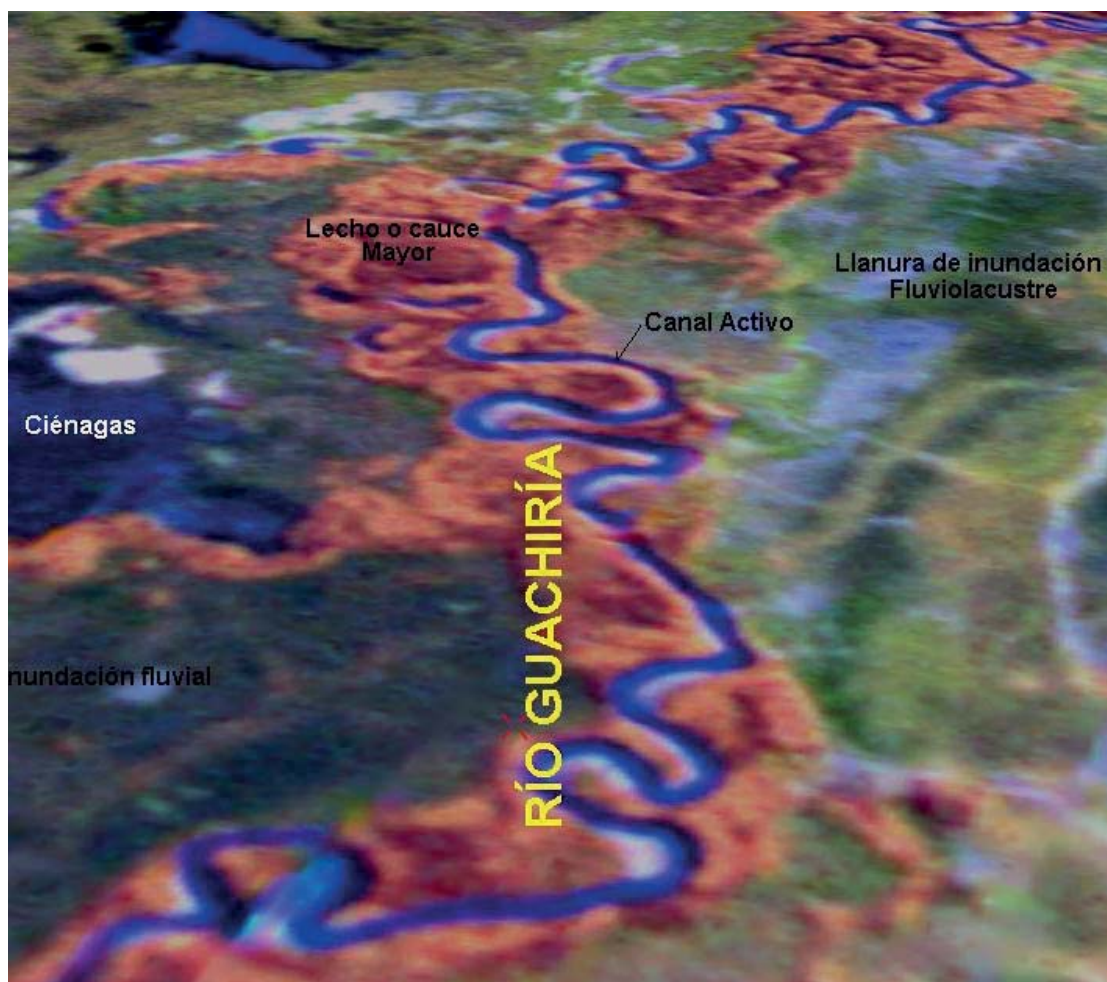


# BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

No. 43, Enero de 2018

ISSN 0120 - 3630



Geomorfología sísmica y elementos en ambientes fluvio lacustres en un sector de los Llanos Orientales (Colombia)  
Castillo-López, L.A. and Vargas-Cuervo, G.

TARIFA POSTAL REDUCIDA No. 2015-456 . 4-72  
La Red Postal de Colombia, vence 31 de Dic. 2018



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS Y MEDIO AMBIENTE



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

# BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Número 43, Enero de 2018

Publicación del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente  
Programa Curricular de Ingeniería Geológica  
FACULTAD DE MINAS - UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
ISSN 0120 - 3630

**Boletín de Ciencias de la Tierra** es una publicación creada en 1978, del Programa Curricular de Ingeniería Geológica, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. La revista publicará artículos originales resultados de investigación en las diferentes áreas de las geociencias y pretende dinamizar la discusión científica en torno al conocimiento del territorio colombiano, sus recursos y restricciones. Se publicaran tanto artículos de análisis específicos como de interés regional, que promuevan el desarrollo de las Ciencias de la Tierra.

**Boletín de Ciencias de la Tierra** es una publicación dirigida a investigadores e interesados en las áreas de las geociencias y la ingeniería. Publica artículos sobre las siguientes áreas:

- Geodinámica
- Geofísica
- Georecursos
- Geografía
- Mineralogía
- Geomecánica
- Geología regional
- Geomorfología
- Geotecnia
- Geología ambiental
- Aprovechamiento y explotación de recursos
- Paleontología
- Vulcanología
- Estratigrafía
- Petrografía
- Petrofísica

**Boletín de Ciencias de la Tierra** publicará dos números en el año con editorial, artículos de investigación, ensayos, comunicaciones breves e imágenes diagnósticas. Los artículos enviados deberán ser siempre originales y no estar sometidos a otra publicación; todos los artículos se someten a revisión por pares o árbitros académicos de conocida idoneidad en el tema.

La orientación general para la presentación de artículos e información interesante se puede encontrar en la dirección electrónica:

[http://www.minas.medellin.unal.edu.co/index.php?option=com\\_content&view=article&id=96:boletide-ciencias-de-la-tierra-&catid=43:revistas-&Itemid=215](http://www.minas.medellin.unal.edu.co/index.php?option=com_content&view=article&id=96:boletide-ciencias-de-la-tierra-&catid=43:revistas-&Itemid=215). Los correos electrónicos de la revista son: [rbct\\_med@unal.edu.co](mailto:rbct_med@unal.edu.co), Teléfono y Fax: (57-4) 425 53 43

**Foto carátula:** Figura 4. Análogo en superficie de la disposición de los diferentes elementos de un canal o grupo de los mismos

**Artículo:** Geomorfología sísmica y elementos en ambientes fluvio lacustres en un sector de los Llanos Orientales (Colombia)

**Autores:** Luis Antonio Castillo-López & German Vargas-Cuervo

Revista indexada en:

Georef

SciELO - Scientific Electronic Library Online

Índice Actualidad Iberoamericana, del Instituto Iberoamericano de Información en Ciencia y Tecnología de Chile.

Base de Datos Periódica de La Universidad Nacional Autónoma de México.

Redalyc, Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.

BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

ISSN 0120 - 3630

Periodicidad semestral: Julio y Diciembre

Tarifa Postal Reducida No. 2015-456 . 4-72 La Red Postal de Colombia, vence 31 de Dic. 2018

Carrera 80 No. 65 - 223

Facultad de Minas - Bloque M9 - Of.: 107

Medellín - Colombia

Teléfono: (57+4) 425 53 43, Fax: (57+4) 425 53 43

e-mail: [rbct\\_med@unal.edu.co](mailto:rbct_med@unal.edu.co)

VERSIÓN ELECTRÓNICA DISPONIBLE EN:

<http://www.scielo.org.co/scielo.php>

<http://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct>

[http://intranet.minas.medellin.unal.edu.co/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=47&Itemid=57](http://intranet.minas.medellin.unal.edu.co/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=47&Itemid=57)

SE SOLICITA CANJE - EXCHANGE SOLICITED

Los pedidos de esta serie de publicaciones en Suscripción y/o Canje, pueden ser solicitados a:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Biblioteca Facultad de Minas - Bloque M5

Carrera 80 No. 64 - 223

Teléfonos: (57+4) 425 53 43, 430 97 86 Medellín - Colombia

Correo Electrónico: [canje@unal.edu.co](mailto:canje@unal.edu.co)

## DIRECTOR

JUAN DAVID VELÁSQUEZ HENAO

Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión - Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia, Medellín

## COMITÉ EDITORIAL

MARION WEBER S.

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente - Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia, Medellín

ANTONIO ROMERO H.

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente - Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia, Medellín

SERGIO LOPERA C.

Departamento de Procesos y Energía - Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia, Medellín

JOHN WILLIAN BRANCH B.

Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión - Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia, Medellín

GLORIA TORO V.

Departamento de Geología

Universidad EAFIT

GIOVANNI FRANCO

Departamento de Materiales y Minerales - Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia, Medellín

JOSÉ HUMBERTO CABALLERO ACOSTA

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente - Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia, Medellín

## COMITÉ CIENTÍFICO

EDUARDO PARRA P.

INGEOMINAS Medellín

JAVIER HELENES E.

Departamento de Geología - CICESE, México

ARTURO MARTIN

Departamento de Geología - CICESE, México

JORGE LEDESMA V.

Área de Geología - UABC, México

JEAN FRANCOIS TOUSSAINT

Colombia

RICARDO SMITH QUINTERO

Asesor externo

## Grupo Centro Editorial - Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Juan David Velásquez Henao, Director

Mónica Del Pilar Rada T., Coordinación Editorial

Catalina Cardona A., Asistente editorial

Byron Llano V., Asistente editorial

Amilkar David Álvarez C., Diagramación

Landsoft Ltda, Sistemas y marcación



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

# **BOLETIN DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

## CONTENT

Simulation software VENTSIM™ the influence of implementation of work abandoned sealings ventilation of an underground coal mine Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa, Alan José Daza-Aragón & Pablo Bustamante-Baena	5
A methodological proposal for landslide susceptibility mapping in linear projects: A study case, Medellin – Turbo highway, Section 2 Johanna Andrea Jiménez & Edier Aristizábal	14
Analysis of settlements in landfills La Pradera and Curva de Rodas Jorge Andrés Yepes-García & Manuel Roberto Villarraga-Herrera	24
Comparative study among rock mass classification systems in a Porphyry deposit Manuel Pérez, Edwin García, Carlos Vega, Juan Montoya, Pablo Noriega, Jhon Alfonso & Leonardo Cajicá	34
Seismic geomorphology and fluvial environmental elements in an area of Llanos Orientales (Colombia) Luis Antonio Castillo-López & German Vargas-Cuervo	45
Implementation of Software SimSched Direct Block Scheduler for a polymetallic deposit modifying geometric variables Giovanni Franco-Sepúlveda, David Oliveros-Sepúlveda, Eliana Hijuelos-Franco & Jenis Margoth Trespalcacio-Torres	53

### Our cover

Image alluding to Article:  
Seismic geomorphology and fluvial environmental elements in  
an area of Llanos Orientales (Colombia)

### Authors:

Luis Antonio Castillo-López & German Vargas-Cuervo



## CONTENIDO

Simulación en el software VENTSIM™ de la influencia de la implementación de sellamientos en labores abandonadas en la ventilación de una mina subterránea de carbón Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa, Alan José Daza-Aragón & Pablo Bustamante-Baena	5
Propuesta metodológica para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales: Caso de estudio Tramo 2, vía Medellín - Turbo Johanna Andrea Jiménez & Edier Aristizábal	14
Análisis de los asentamientos en los rellenos sanitarios La Pradera y Curva de Rodas Jorge Andrés Yepes-García & Manuel Roberto Villarraga-Herrera	24
Estudio comparativo entre sistemas de clasificación geomecánica en un depósito tipo Pórfido Manuel Pérez, Edwin García, Carlos Vega, Juan Montoya, Pablo Noriega, Jhon Alfonso & Leonardo Cajicá	34
Geomorfología sísmica y elementos en ambientes fluvio lacustres en un sector de los Llanos Orientales (Colombia) Luis Antonio Castillo-López & German Vargas-Cuervo	45
Implementación del Software SimSched DBS para un yacimiento polimetálico modificando variables geométricas Giovanni Franco-Sepúlveda, David Oliveros-Sepúlveda, Eliana Hijuelos-Franco & Jenis Margoth Trespalacio-Torres	53

### Nuestra carátula

Imagen alusiva al artículo:

Geomorfología sísmica y elementos en ambientes fluvio lacustres en un sector de los Llanos Orientales (Colombia)

### Autores:

Luis Antonio Castillo-López & German Vargas-Cuervo



# Simulation software VENTSIM™ the influence of implementation of work abandoned sealings ventilation of an underground coal mine

Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa, Alan José Daza-Aragón & Pablo Bustamante-Baena

*Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. mobustam@unal.edu.co, ajdazaa@unal.edu.co, pabustamanteba@unal.edu.co*

Received: March 09<sup>th</sup>, 2016. Received in revised form: July 11<sup>th</sup>, 2017. Accepted: August 25<sup>th</sup>, 2017.

## Abstract

It is common to find that in some mines in the coalfield of Sinifaná not exercise proper control over sealings and therefore the air can make tours of areas that do not require to be ventilated at the mine. This has a major negative impact, since often the air does not reach to operating fronts of the adequately form and makes it impossible for people can have appropriate working conditions; on the other hand it generated highly relevant economic losses related to the air injection to abandoned works. With the present study is pretend to assess how is the influence of the sealings in the behavior of the mine, in the equivalent resistance and the flows to the work fronts, this in order to establish in the case of the mine selected, which sealings can be implemented and thus optimize ventilation in the mine.

**Keywords:** Sealings; coal; mine ventilation; underground mine; VENTSIM™.

# Simulación en el software VENTSIM™ de la influencia de la implementación de sellamientos en labores abandonadas en la ventilación de una mina subterránea de carbón

## Resumen

Es común encontrar que en algunas unidades mineras de la cuenca carbonífera de Sinifaná, no ejercen el debido control sobre lo sellamientos y, por tanto, permiten que el aire realice recorridos por zonas que no requieren ser ventiladas en la mina. Esto tiene un gran impacto negativo, ya que muchas veces el aire no llega de forma adecuada a los frentes de explotación e imposibilita que las personas tengan condiciones idóneas de trabajo. Por otro lado, se generan pérdidas económicas de gran relevancia, relacionadas con la inyección de aire a labores abandonadas. Con el presente estudio, se pretende evaluar cómo influyen los sellamientos en el comportamiento de la mina, tanto en la resistencia equivalente como en los caudales que llegan a los frentes de trabajo, esto con el fin de establecer en el caso particular de la unidad minera seleccionada, que sellamientos pueden ser implementados y de esta forma optimizar la ventilación en la mina. En este caso se encontró que, utilizando pared de lona y puerta agujereada, el caudal llega a 0,2 m<sup>3</sup>/seg a los frentes de trabajo, y cuando se utiliza buen sello, buena puerta y sello pobre, el caudal que llega a los frentes es 0,3 m<sup>3</sup>/seg.

**Palabras clave:** Sellamientos; carbón; ventilación de minas; minas subterráneas; VENTSIM™.

## 1. Introducción

La ventilación en minería subterránea es un tema de gran importancia a la hora de garantizar la seguridad y excelentes condiciones en los sitios de trabajo [1]. Por tal razón, el Estado Colombiano en los últimos años ha realizado campañas con el fin de mejorar esta condición. Asimismo, la Gobernación de

Antioquia ha impulsado múltiples proyectos en pro de generar condiciones idóneas de trabajo, dentro de las cuales ha acobijado minas que hacen parte de la cuenca de Sinifaná, ubicadas en el suroeste antioqueño. El principal objetivo de este tipo de proyectos es buscar el mayor acercamiento de las unidades mineras al cumplimiento de las normas debidamente establecidas. La Gobernación de Antioquia y la Universidad

**How to cite:** Bustamante-Rúa, M.O., Daza-Aragón, A.J. and Bustamante-Baena, P., Simulación en el software VENTSIM™ de la influencia de la implementación de sellamientos en labores abandonadas en la ventilación de una mina subterránea de carbón. Boletín de Ciencias de la Tierra, 43, pp. 5-13, Enero, 2018.



Nacional de Colombia desde el año 2013 a través del proyecto “Mejoramiento de la seguridad minera en 5 minas de carbón de la cuenca de Sinifaná” han trabajado en conjunto en busca de lograr este objetivo. Actualmente, el decreto 1886 de 2015 [2] es el reglamento de seguridad que se tiene como punto de referencia para labores mineras subterráneas. Este expresa de forma detallada cada uno de los aspectos que se deben cumplir a cabalidad para desarrollar este tipo de actividades. En este sentido, la ventilación de minas es indispensable, ya que se encarga de llevar el aire suficiente a los trabajadores que se encuentran desarrollando labores subterráneas[3], la dilución de gases y la regulación de la temperatura[4]. Es primordial que toda mina cuente con un circuito de ventilación definido, puesto que de esta manera se asegura la demanda de aire requerida en zonas donde sea necesario[5]. Cuando se abandonan labores de preparación, desarrollo y explotación, la normatividad exige la implementación de sellamientos (*puertas de ventilación: estructura de madera, plástico, caucho, metal o cualquier otro material para frenar o regular el paso de aire a través de una labor minera subterránea*)[2]. Con esto se evita que existan pérdidas de presión y que el aire se dirija a lugares de la mina que no requieren ser ventilados [6].

Es importante resaltar que existe ventilación natural y ventilación mecanizada, en la cual se hace necesario el uso de ventiladores. La ventilación natural es muy cambiante, puesto que depende de la época del año, e incluso en algunos casos, de la noche y el día[1]. Para que esta funcione debe existir una diferencia de alturas entre la bocamina y el bocaviento, pero más importante aún, es el intercambio termodinámico que se produce entre la superficie y el interior[7]. La energía térmica agregada al sistema se transforma a energía de presión, susceptible de producir un flujo de aire (*el aire caliente desplaza al aire frío produciendo circulación*)[8,9].

La ventilación principal es la ventilación que recorre toda la mina, mientras que la ventilación secundaria a la cual se le denomina también ventilación auxiliar, es aquella que se realiza en áreas restringidas o labores en desarrollo de una mina subterránea. Esta va dirigida a los frentes ciegos que no pueden ser incorporados de forma directa a la red de ventilación principal de la mina [10,11].

El software VENTSIM™ a nivel mundial, es una herramienta útil para simulación de contaminantes, funciones financieras que sirven para analizar el costo de ventilación y la simulación termodinámica de calor y la humedad en las minas subterráneas, cuantificando y visualizando variables como dirección, cantidad, densidad, flujo másico y velocidad [10].

## 2. Materiales y método

### 2.1. Materiales

#### 2.1.1. Mina objeto de estudio

Se estudió una mina de carbón perteneciente a la cuenca carbonífera del Sinifaná. La unidad minera cuenta con la infraestructura necesaria para adelantar la extracción de 2000

ton/mes carbón; dentro de sus instalaciones cuenta con oficinas de administración, vestier, baños, almacén, tolvas de almacenamiento de mineral, zona de cargue, tanques de sedimentación, cuarto de compresor, subestación de energía, sistema de conminación, transporte y clasificación. Se accede a los diferentes trabajos mineros por medio de la bocamina que se encuentra a una altura de 1526 msnm. Esta ha formado parte de los proyectos: “Mejoramiento de las condiciones de productividad en las explotaciones mineras ubicadas en la cuenca del Sinifaná en los municipios de Amagá, Angelópolis, Fredonia, Titiribí y Venecia”, que se ejecutó a partir de septiembre de 2013 hasta el mes de marzo de 2015 por la Gobernación de Antioquia – Secretaria de Minas y la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente la mina forma parte del proyecto que tiene por objeto: “Aunar esfuerzos para el desarrollo y socialización de planes de mejoramiento demostrativos en explotaciones carboníferas de la Cuenca del Sinifaná” que se viene ejecutando a la fecha por las dos entidades que se mencionaron anteriormente.

De acuerdo a los compromisos de confidencialidad del proyecto, se reserva el nombre de la mina a la que se le aplicó el estudio.

#### 2.1.2. Software Ventsim™

Ventsim™ es un software para sistemas de ventilación de minas subterráneas diseñado para modelar y simular la ventilación, flujos de aire, presión, calor, gases, finanzas, fuego y muchos otros tipos de datos de ventilación desde un modelo de túneles y pozos [5,12].

Las características principales de Ventsim™ Visual, incluyen: Modelamiento 3D completo con rotación suave, zoom y paneo; animación en tiempo real de los conductos de ventilación y ventiladores; simulación de conductos de ventilación y ventiladores; propagación básica de contaminantes básicos, suministros y simulaciones de emergencia; importación de las líneas centrales y sólidos de paquetes CAD (DFX) para construcción rápida de redes Ventsim™ [5,12].

## 2.2. Método

Para evaluar el efecto de la pérdida de presión, caudal y cambios de temperatura en la mina, se utilizó el software Ventsim™, el cual tiene fundamentos de termodinámica y mecánica de fluidos aplicados a la ventilación de minas. De esta manera, se busca a partir de diferentes simulaciones determinar cómo es el comportamiento de la mina y bajo qué condiciones se aprovecha mejor la ventilación, evitando pérdidas de aire, las cuales se ven reflejadas a su vez en pérdidas económicas [5,12,13].

En este estudio se tomará una de las cinco unidades mineras que hacen parte del proyecto Sinifaná, con el fin de analizar como es el comportamiento de la ventilación de acuerdo a ciertas condiciones específicas que presente la mina, como lo son la implementación y la calidad de los sellamientos.



Inicialmente, se realiza la recolección de datos en la mina para su debida caracterización. Estos datos son:

- Medición de área y perímetro del túnel: ubicado el punto de aforo se procede con el flexómetro a medir el área transversal y el perímetro, teniendo claro la forma del área (rectangular, cuadrada, trapezoidal, etc.).
- Medición de los gases: para la medición de los gases se utiliza el multidetector marca Crowcon; con este equipo se hace un barrido de abajo hacia arriba y de derecha a izquierda del aforo visualizando el display o pantalla que este tiene, de esta manera se puede medir los gases ( $O_2$  % Vol., CO PPM,  $CH_4$  %LEL, entre otros) presentes en este punto.
- Medición de la velocidad del aire: el termohigroanemómetro se compone de dos partes: una es el display donde se observa la lectura en tiempo real y la otra parte son unos álabes las cuales son giradas a medida que el aire pasa a través de ellas; para medir la velocidad del aire los alabes son colocados perpendicularmente al flujo del aire, en donde se hace un barrido lento en zigzag de abajo hacia arriba, y de esta manera se puede obtener la velocidad del aire en el punto de aforo.
- Medición de la temperatura efectiva y porcentaje de humedad: con el equipo antes mencionado (termohigroanemómetro) y visualizando el display, se pueden tomar los datos que este arroja como las medidas de temperatura y porcentaje de humedad en ese punto de aforo, cabe señalar que las unidades de la temperatura efectiva son  $^{\circ}C$ .
- Tratamiento de datos: Con los datos medidos en campo se procede a determinar los diferentes caudales de aire en cada uno de los puntos de aforo, para lo cual se requiere el cálculo del área de cada una de las secciones de aforo que de acuerdo con la forma del túnel se asimilan a un trapecio o también a un rectángulo [14].

Luego de realizar la correcta caracterización de la mina, se procede a llevar esta información al software Ventsim™ para ejecutar las debidas simulaciones. En este caso, se busca conocer la influencia de poner o no sellamientos en la unidad minera, al igual que la calidad de estos, ya que así se logra determinar el impacto que se tiene en la mina en cuanto a las pérdidas de aire y las recirculaciones. También es necesario evaluar la eficiencia de los sellamientos, puesto que de acuerdo a su calidad pueden impedir en mayor o menor medida las filtraciones, y se tiene un mejor control del direccionamiento del aire [15].

Básicamente, se analizarán dos escenarios con las diferentes simulaciones: El primero tiene que ver con la distribución de aire en la mina sin sellamientos [13], y en el segundo se analiza como es el comportamiento de la ventilación con la implementación de tapones de alta y baja calidad. Esto teniendo como base algunas hipótesis que se plantearon para la realización del estudio.

### 2.2.1. Hipótesis

- Una mina sin sellamiento hace que el aire recorra lugares que no necesitan ser ventilados y por tanto hace más

difícil que este pueda llegar a los frentes de trabajos donde se encuentra la mayor parte del personal, lo cual se debe a las caídas de presión que se desarrollan por los largos recorridos. Esto incide en pérdidas económicas de gran relevancia para la unidad minera, debido a que se puede incurrir en gastos energéticos excesivos en búsqueda de lograr caudales de aire adecuados en los frentes de trabajo según el decreto 1886 de 2015. En la mayoría de los casos, el aire no alcanza a llegar a estas zonas de forma suficiente, lo que impide el cumplimiento del decreto que exige en el título II capítulo 1 artículo 54 (Excavaciones minerales hasta mil quinientos metros (1500) sobre el nivel del mar: tres metros cúbicos por minuto ( $3\text{ m}^3/\text{min}$ ) por cada trabajador, mientras que en excavaciones minerales superiores a esta altura: seis metros cúbicos por minuto ( $6\text{ m}^3/\text{min}$ ) por cada trabajador).

- Una mina sin sellamientos, no podría tener un circuito de ventilación definido, debido a que el aire no tendría un camino específico para seguir y por tanto, puede ir a zonas donde no se requiere, facilitando a su vez la recirculación de aire viciado [15]. Esta es una condición de alta peligrosidad para el personal de trabajo de la mina, lo cuales podrían contaminarse por la presencia de gases nocivos.
- Al presentar la unidad minera los debidos sellamientos en los trabajos abandonados, se podría definir el circuito de ventilación para llevar el aire a los frentes de trabajo, y luego direccionarlo al bocaviento, de tal manera que no se mezcle con el aire limpio en su recorrido. Además, se alcanzarían los caudales necesarios para el correcto desenvolvimiento de los trabajadores según lo contemplado en el decreto 1886 de 2015, evitándose las pérdidas de aire y por ende las pérdidas económicas.
- Con buenos sellamientos no se desarrollan pérdidas de aire, mientras que con sellamientos de baja calidad se logran pérdidas mínimas, por lo que se reduce de manera significativa el paso de aire. Se asume que el software Ventsim™ a través de las diferentes simulaciones es capaz de visualizar la condición anteriormente mencionada [5]. Por lo que se pretende evaluar la veracidad de esta hipótesis.

## 3. Resultados y discusión

Se tiene que el caudal que ingresa a la mina desde la bocamina es de  $0,5\text{ m}^3/\text{seg}$ ; y el caudal óptimo que debería llegar al frente de trabajo considerando mínimas pérdidas es de  $0,3\text{ m}^3/\text{seg}$ . Esto teniendo en cuenta exclusivamente la ventilación natural, ya que se pretende analizar como es el comportamiento de la mina con la implementación de sellamientos y sin el uso de ventilación mecanizada.

El circuito que se busca establecer en la mina es que el aire ingrese desde la bocamina, y se dirija directamente al nivel 6 y llegue hasta el último tambor, luego que pase al nivel 5 y haga el recorrido completo por este nivel hasta llegar a la clavada principal por donde sube el aire hasta superficie, saliendo por el bocaviento (ver Figs,1, 2 y 3).

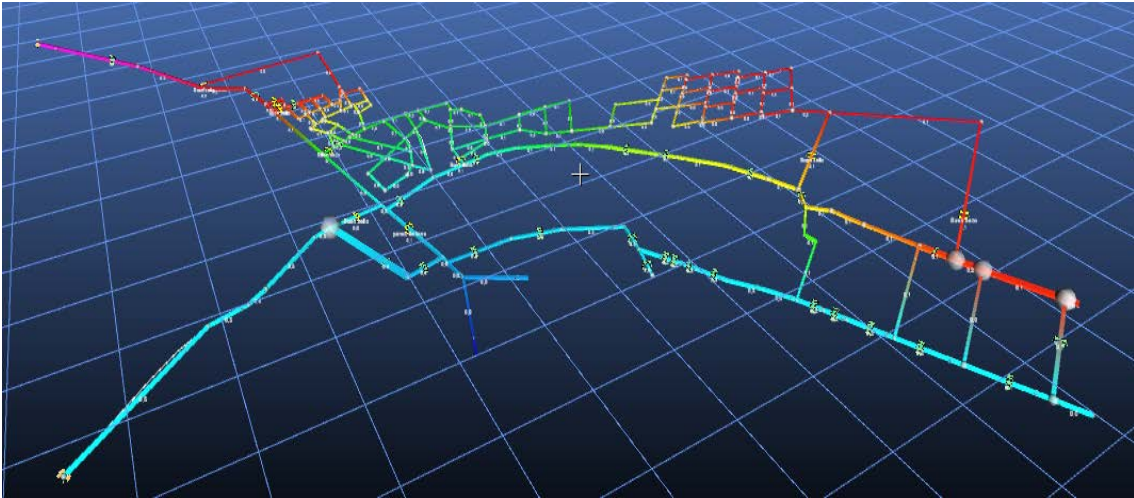


Figura 1. Mina objeto de estudio en el software Ventsim™  
Fuente: Los autores

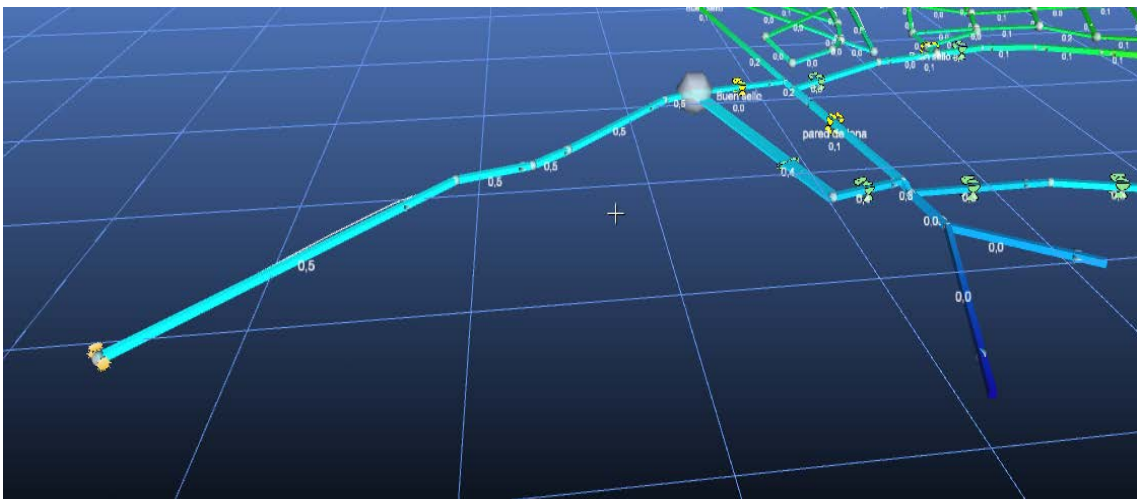


Figura 2. Bocamina de la mina objeto de estudio en el software Ventsim™  
Fuente: Los autores

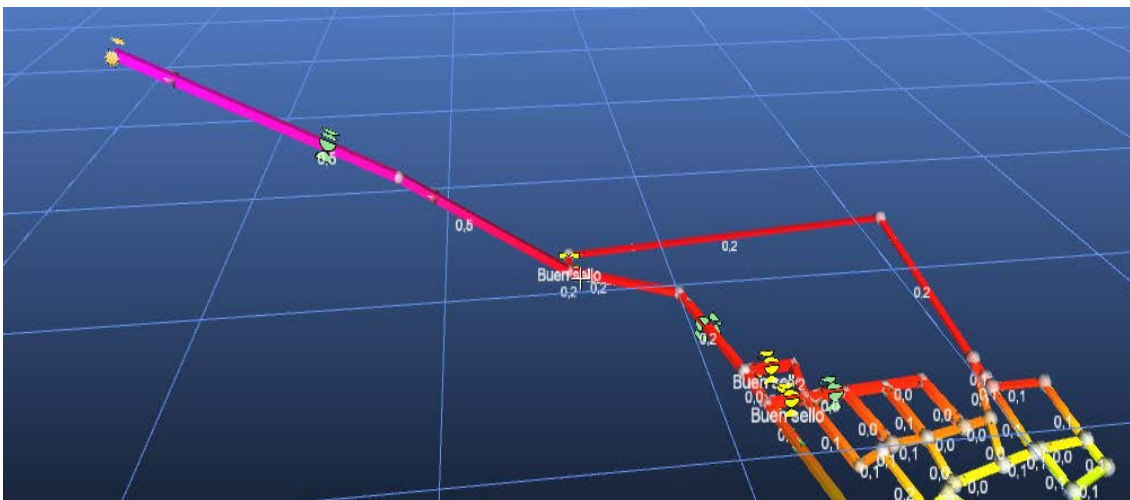


Figura 3. Bocaviento de la mina objeto de estudio en el software Ventsim™  
Fuente: Los autores

También con la implementación de diferentes sellamientos se puede analizar su influencia con la curva característica de la mina, ya que esta se relaciona directamente con la resistencia equivalente, y cada sellamiento de acuerdo a su calidad aporta a esta resistencia. Los sellamientos considerados en el estudio con la resistencia que aportan cada uno, se presentan a continuación (ver Tabla 1).

Tabla 1.  
Tipos de sellamientos.

Tipo de sellamiento	Resistencia ( $\text{Ns}^2/\text{m}^8$ )
Buen sello	250
Pared de lona	2,5
Buena puerta	20
Puerta agujereada	5
Sello pobre	50

Fuente: Los autores

Tabla 2.

Caudal en los frentes sin sellamientos.

	Caudal sellamiento ( $\text{m}^3/\text{seg}$ )	sin	Caudal Buen Sello ( $\text{m}^3/\text{seg}$ )	Caudal pared de lona ( $\text{m}^3/\text{seg}$ )	Caudal buena puerta ( $\text{m}^3/\text{seg}$ )	Puerta agujereada ( $\text{m}^3/\text{seg}$ )	Sello pobre ( $\text{m}^3/\text{seg}$ )	pobre
Frente-1	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	
Frentes-2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	
Resistencia de la mina ( $\text{Ns}^2/\text{m}^8$ )	63,4	62,42	63,41	64,42	63,41	63,42	63,42	

Fuente: Los autores

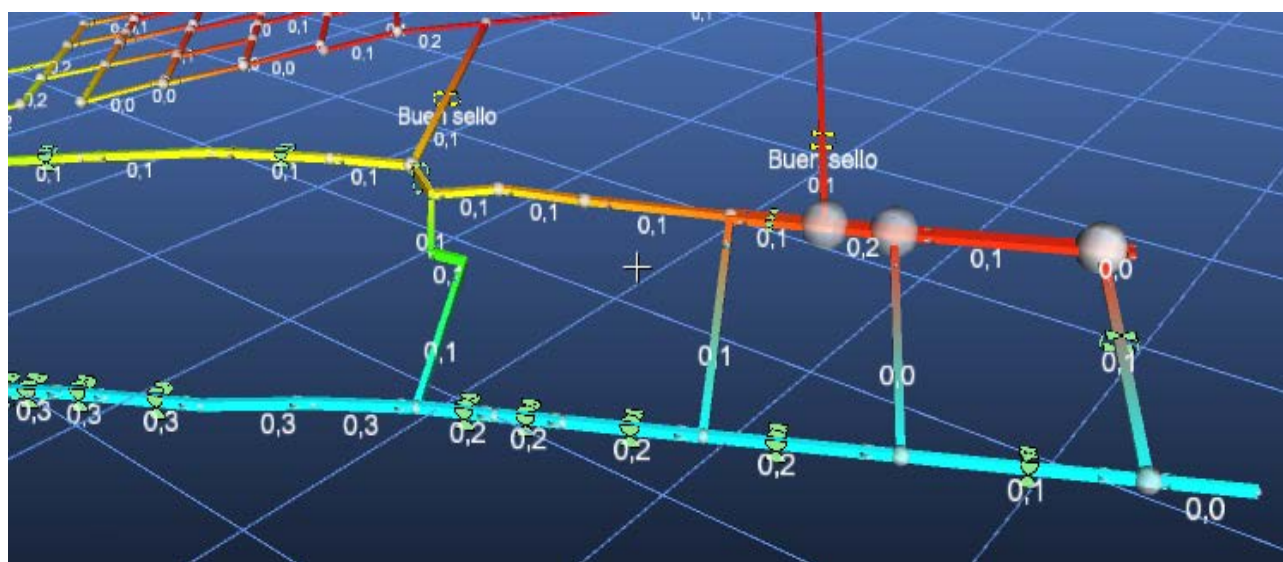


Figura 4. Caudal en los frentes, cuando no hay sellamientos en los tambores del nivel 6.

Fuente: Los autores

Los resultados que se obtuvieron en la mina a partir de la evaluación de los diferentes sellamientos y su comportamiento sin estos, se presentan en la Tabla 2.

A continuación, se ilustrarán los caudales de la mina en los frentes con su respectiva curva característica considerando las condiciones sin sellamiento, buen sello, pared de lona, buena puerta, puerta agujereada y sello pobre (ver Figs. 4 a 9).

De lo anterior, se puede evidenciar que en 4 escenarios se obtiene el caudal óptimo en los frentes de trabajo, y esto se logra con la implementación de buen sello, buena puerta, puerta agujereada y sello pobre. Esto quiere decir que independientemente del sello que se seleccione de los anteriormente mencionados, se va a garantizar el mismo

caudal en los frentes de explotación. Adicionalmente, se puede observar que en los diferentes escenarios, ya sea que la mina se encuentre sin sellamientos o presente cualquiera de los anteriores, esta no sufre un aumento representativo de la resistencia equivalente. Por lo cual, se obtiene que con la implementación de los sellamientos, el aire puede seguir circulando en el interior de la mina y se logra una mejor distribución del mismo, direccionándolo a las zonas que deben ser ventiladas. En este caso, con la implementación de buenos sellos en los tambores que ya han sido explotados del nivel 6, el aire logra pasar en su totalidad hasta el último tambor de este nivel, donde se conecta al nivel 5, ventilando también este frente.



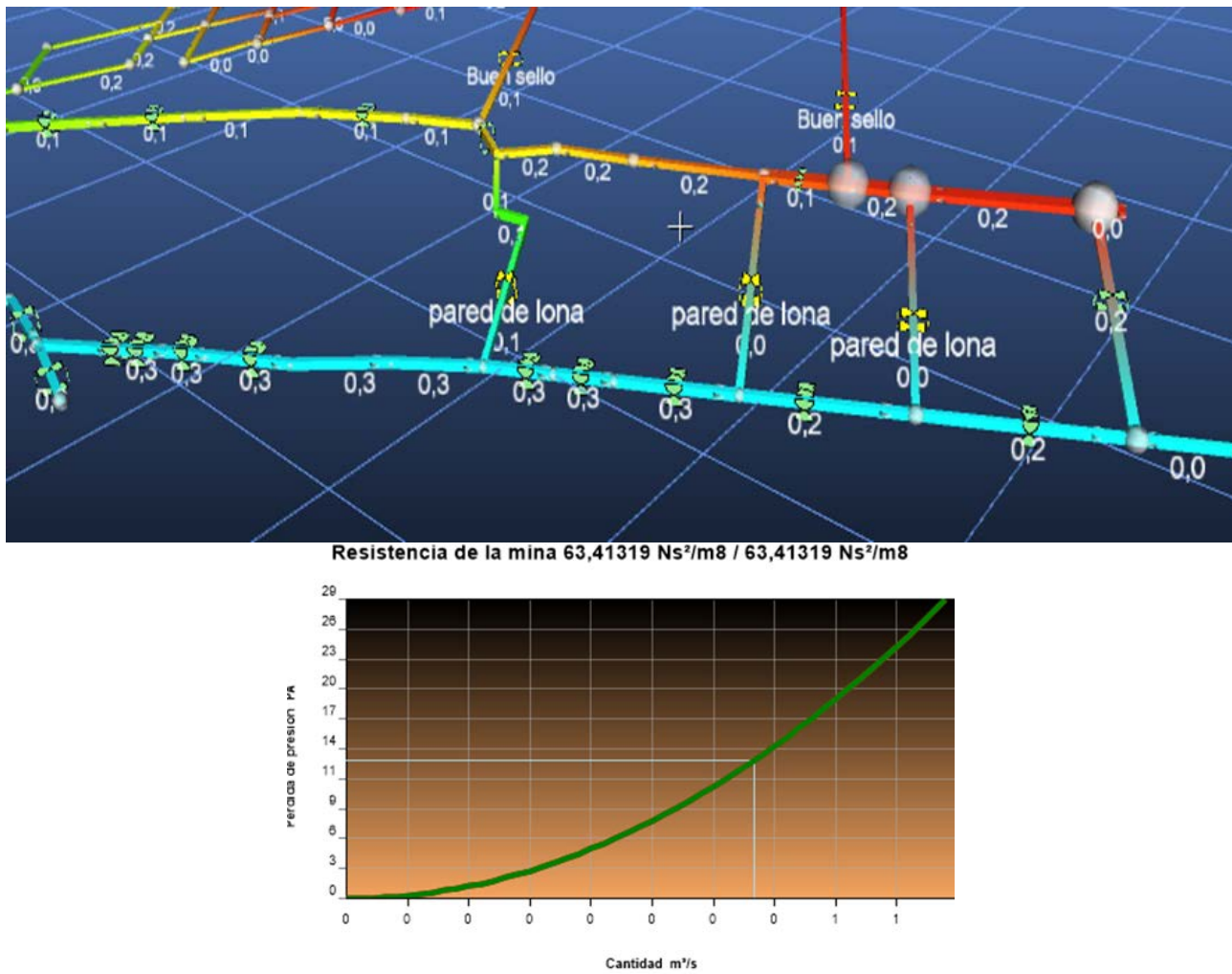


Figura 5. Caudal en los frentes cuando se tiene pared de lona en los tambores del nivel 6 y resistencia equivalente de la mina con la implementación del sellamiento.  
Fuente: Los autores

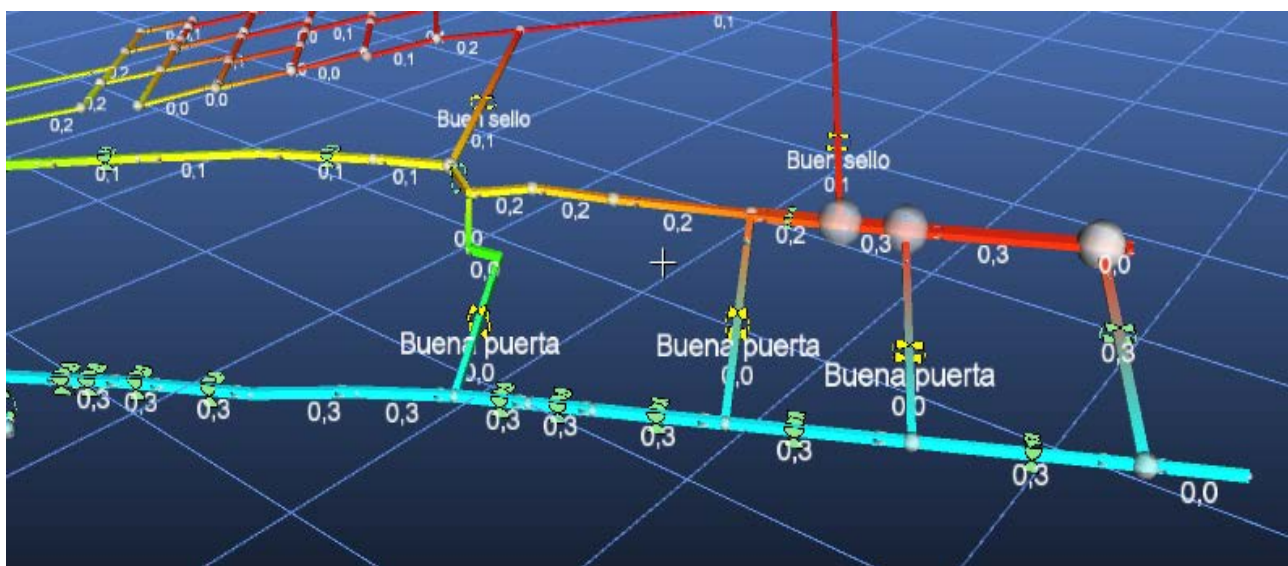


Figura 6. Caudal en los frentes cuando se tiene buena puerta en los tambores del nivel 6.  
Fuente: Los autores

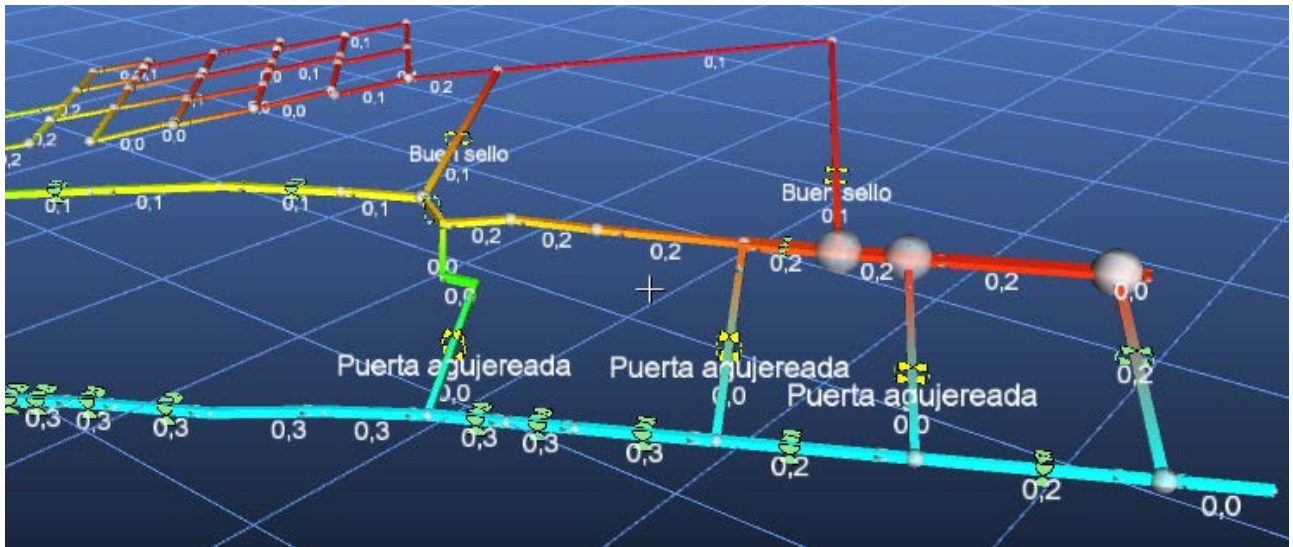


Figura 7. Resistencia equivalente de la mina con puerta agujereada.  
Fuente: Los autores

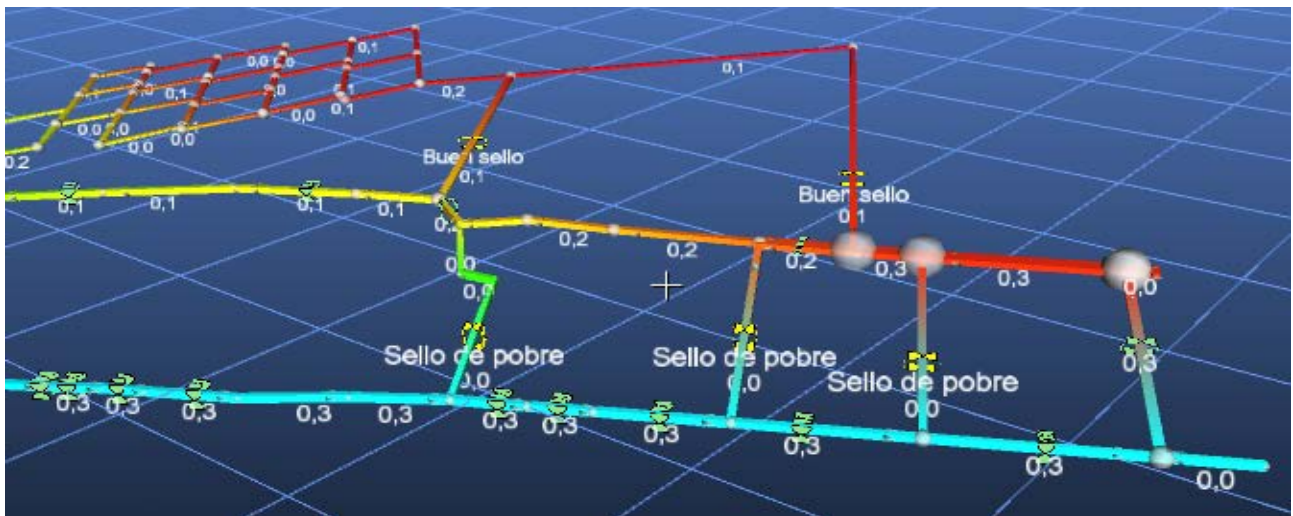


Figura 8. Caudal en los frentes cuando se tiene sello pobre en los tambores del nivel 6.  
Fuente: Los autores

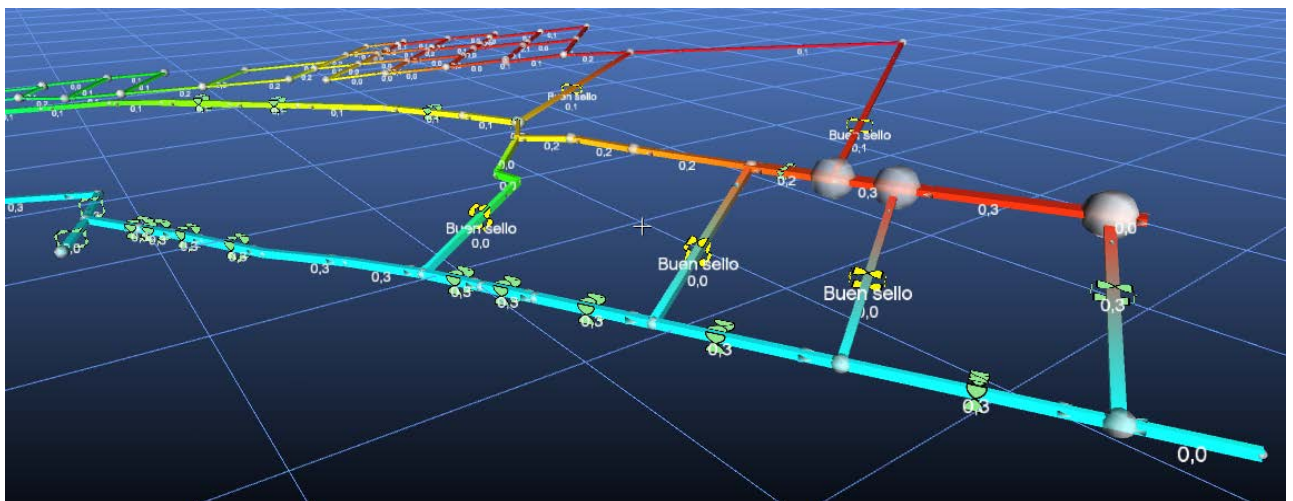


Figura 9. Caudal de aire que llega a los frentes de trabajo nivel 5 y 6.  
Fuente: Los autores

### 3. Conclusiones

A partir de las simulaciones realizadas, se encontró que los caudales que llegan a los frentes de trabajo cuando no se utilizan sellamientos en los tambores del nivel 6 son de 0,1 m<sup>3</sup>/seg, mientras que al utilizar sellamientos se mejora esta condición. En el caso, en el cual se utiliza la pared de lona y la puerta agujereada, el caudal llega a 0,2 m<sup>3</sup>/seg, y cuando se utiliza el buen sello, la buena puerta y el sello pobre, el caudal que llega a los frentes es de 0,3 m<sup>3</sup>/seg. Por otro lado, se debe resaltar que la mina no sufre un aumento significativo en la resistencia equivalente, ya que esta se encuentra en el orden de 63,4 Ns<sup>2</sup>/m<sup>8</sup>. En este sentido, empieza a jugar un papel muy importante la eficiencia y el costo en la selección de los sellamientos para su implementación.

En esta unidad minera, no sería conveniente ubicar buenas puertas en los tambores del nivel 6, ya que estas tienen un alto costo y normalmente no son utilizadas en estos lugares, sino que se implementan en sitios que no pueden ser aislados completamente, pero es de vital importancia sellarlos para definir circuitos de ventilación. En este caso, la mejor opción que se debería utilizar son los buenos sellos, los cuales se construyen con mampostería y evitan las permanentes filtraciones de aire, que suelen ocurrir con sellamientos de menor calidad.

Con la ventilación natural, el aire que ingresa a la mina es 0,5 m<sup>3</sup>/seg, el cual a partir de buenos sellamientos en el nivel 6, se logra que llegue a los frentes 0,3 m<sup>3</sup>/seg, lo que equivale a 30 m<sup>3</sup>/min y permitiría trabajar a 5 personas en cada frente. Esto teniendo en cuenta el decreto 1886 de 2015, que exige 6 m<sup>3</sup>/min por persona y además considerando que en la mina no utilizan explosivos y no tienen maquinaria diésel en su interior. Esta mina a su vez se caracteriza según los registros que se tienen de metano, por ser no grisutosa.

Como se puede evidenciar, según los resultados arrojados por el software Ventsim<sup>TM</sup>, el aire que aporta el tiro natural es muy pequeño, y por tanto no es suficiente de acuerdo a los requerimientos que tiene la mina por su personal de trabajo, en el cual laboran alrededor de 50 personas por turno. Por esta razón, se hace necesaria la implementación de ventilación mecanizada, la cual posibilite suplir estas necesidades. Además, según lo estipulado en la normatividad, toda mina debe contar con ventilación mecanizada para mayor seguridad, puesto que la ventilación por tiro natural es muy cambiante y depende de las condiciones climáticas que se tengan en el momento.

La simulación idealiza un proceso que está pasando en la realidad, por tal motivo para que los valores obtenidos en términos de pérdida sean mínimos y semejantes se hace necesario que los sellamientos se mantengan en las mejores condiciones posibles.

Finalmente, cabe resaltar que con el desarrollo de las simulaciones se validaron las diferentes hipótesis planteadas en el artículo.

### Agradecimientos

Se agradece al grupo de trabajo del Instituto de minerales CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia, a la

Gobernación de Antioquía y a las unidades mineras del proyecto, por su ayuda, comprensión en este proceso.

### Referencias

- [1] Johnson, B.R. and Ramani, R.V., Mine Ventilation Design. SME Min. Eng. Handb. 2<sup>nd</sup> Ed. Vo, 1992, pp. 1093-1121.
- [2] Ministerio de Minas y Energía. DECRETO 1335 DE 1987: Reglamento de Seguridad en las Labores Subterráneas de Colombia 1987.
- [3] Carruthers, J., Australasian coal mining practice. Ventilation, Victoria: Australasian Inst. Mining and Metallurgy; 1993, pp. 461-503.
- [4] Ren, W., Shi, J., Guo, Q., Zhao, Q. and Bai, L., The influence of dust particles on the stability of foam used as dust control in underground coal mines. Process Saf Environ Prot., 111, pp. 740-746, 2017. DOI: 10.1016/j.psep.2017.08.043.
- [5] Wallace, K., Prosser, B. and Stinnette, J.D., The practice of mine ventilation engineering. Int J Min Sci Technol 25(2), pp. 165-169, 2015. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.02.001.
- [6] Su, S., Chen, H., Teakle, P. and Xue, S., Characteristics of coal mine ventilation air flows. J Environ Manage, 86(1), pp. 44-62, 2007. DOI: 10.1016/j.jenvman.2006.11.025.
- [7] Gobierno de Chile. Ventilación de Minas 2015:36.
- [8] Singh, R.V.K., Spontaneous heating and fire in coal mines. Procedia Eng., 62, pp. 78-90, 2013. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.046.
- [9] Díaz, E., Fernández, J., Ordóñez, S., Canto, N. and González, A., Carbon and ecological footprints as tools for evaluating the environmental impact of coal mine ventilation air. Ecol. Indic., 18(1), pp. 126-130, 2012. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.11.009.
- [10] Yanes, E.G., Ventilación de Minas: Capítulo I. Form. Expert. en Prevención Riesgos la Minería Extr., 2015, 36, P.
- [11] Singh, H. and Mallick, J., Utilization of ventilation air methane in Indian coal mines: Prospects and Challenges. Procedia Earth Planet Sci., 11, pp. 56-62, 2015. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.06.008.
- [12] Feng, W., Zhu, F. and Lv, H., The use of 3D simulation system in mine ventilation management. Procedia Eng., 26, pp. 1370-1379, 2011. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2313.
- [13] Castro, R., Ventilación de minas: Flujo de aire a través de galerías y ductos. 2007, 34 P.
- [14] Montgomery, J.M., Theory and practice of mine ventilation. 1936, 34 P.
- [15] De Souza, E., Application of ventilation management programs for improved mine safety. Int. J. Min. Sci. Technol., 27(4), pp. 647-650, 2017. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.018.

**M.O. Bustamante-Rúa**, es Ing. de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, MSc en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Metalurgia Extractiva - Mención – Mineralurgia de la Universidad de Concepción –Chile, DSc. en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Metalurgia Extractiva – Minería de la Universidad de Concepción – Chile. Profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Director e Investigador del Instituto de Minerales CIMEX – Facultad de Minas, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín ha dirigido e integrado proyectos de investigación en las áreas de concentración y beneficio de minerales, modelación y optimización matemática de procesos y operaciones mineras, reología de suspensiones y pastas, ha publicado artículos en revistas científicas y participado como expositor en congresos y simposios nacionales e internacionales. Además ha sido director de diversas tesis de maestría y doctorado.  
ORCID: 0000-0002-1692-991X

**A.J. Daza-Aragón**, es Ing. de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, finalizó sus estudios en 2015. Candidato a MSc Recursos Minerales de la Universidad Nacional de Colombia. Fue estudiante auxiliar del Instituto de Minerales CIMEX, donde participó en



dos semilleros en asociación con el Programa Nacional de Semilleros de Investigación, Creación e Innovación de la Universidad Nacional de Colombia 2013-2015: Recuperación de oro ultrafino y modelación de plantas minero-metalúrgicas a través del software MODSIM. Sus intereses actualmente se centran en minería y procesamiento de minerales.  
ORCID: 0000-0001-7596-9666

**P. Bustamante-Baena**, es Ing. de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, candidato a MSc Recursos Minerales de la Universidad Nacional de Colombia y joven investigador de Colciencias. Ganador del concurso mejores trabajos de grado del Año 2015 y concurso nacional Otto de Greiff, fue estudiante auxiliar del Instituto de Minerales CIMEX. Sus intereses actualmente se centran en procesamiento de minerales.  
ORCID: 0000-0002-8409-5531



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales  
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de  
Materiales

Mayor información:

E-mail: [acgeomin\\_med@unal.edu.co](mailto:acgeomin_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 53 68



# A methodological proposal for landslide susceptibility mapping in linear projects: A study case, Medellin – Turbo highway, Section 2

Johanna Andrea Jiménez & Edier Aristizábal

*Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jajimenez@unal.edu.co, evaristizabalg@unal.edu.co*

Received: May 08<sup>th</sup>, 2017. Received in revised form: November 11<sup>th</sup>, 2017. Accepted: December 13<sup>th</sup>, 2017.

## Abstract

Although in the literature there are several methods for the determination landslide susceptibility, very few consider the particularities of linear projects. In the present work, it is proposed the combination of heuristic, statistical and physically based modeling methods to evaluate and mapping landslide susceptibility in linear projects, considering regional and local scales. For the regional zoning, the conditional analysis method using Unique Condition Unit (UCU) is proposed, and for local scale physical models: SHALSTAB for soil slopes and the TOBIA index for rock slopes. The validation of the methodology was performed by the area under the curve (AUC) method. The result indicates an adequate performance, and the obtaining of valuable information prior to the construction of the project, but also during the operation, allowing to define sectors of special attention considering the scale of the project.

**Keywords:** Landslide; linear projects; Shalstab; heuristic; susceptibility.

## Propuesta metodológica para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales: Caso de estudio Tramo 2, vía Medellín - Turbo

## Resumen

Aunque en la literatura existen diferentes métodos para la determinación de la susceptibilidad por movimientos de masas, pocos han considerado las particularidades de los proyectos lineales. En el presente trabajo se propone la combinación de métodos heurísticos, estadísticos y modelación física para evaluar y zonificar la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales, teniendo en cuenta su escala regional y local. Para la zonificación regional se propone el método de Análisis Condicional, y para la zonificación local modelos con base física: el método de SHALSTAB para laderas en suelo, y el índice de TOBIA para laderas en roca. La validación de la metodología fue realizada utilizando la Curva de Éxito y el área bajo la curva (AUC). Los resultados arrojan un adecuado desempeño de los modelos implementados, y la obtención de valiosa información necesaria previa a la construcción del proyecto y operación, permitiendo definir sectores críticos.

**Palabras clave:** Movimientos en masa; proyectos lineales; Shalstab, heurístico; susceptibilidad.

## 1. Introducción

Los movimientos en masa son una de las principales causas de pérdidas económicas y humanas alrededor del mundo, principalmente en zonas de montaña y ambientes tropicales [1,2]. Gran parte de estas pérdidas se presentan a lo largo de infraestructuras lineales para el transporte de productos y servicios públicos, especialmente en vías [3].

Colombia cuenta con una red vial de 166.233 km de longitud, de los cuales 16.786 km corresponden a la red primaria, 66.082 km pertenecen a la red secundaria, y 74.746 km pertenecen a la red terciaria [4]. En los últimos 40 años se han registrado cerca de 75 mil kilómetros de vías afectadas, donde el 52% de los registros se relacionan con movimientos en masa [5]. Solo en los años 2010-2011 durante el fenómeno de La Niña, que golpeó gran parte del

**How to cite:** Jiménez, J.A. and Aristizábal, E., Propuesta metodológica para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales: caso de estudio Tramo 2, vía Medellín - Turbo Boletín de Ciencias de la Tierra, 43, pp. 14-23, Enero, 2018.

territorio colombiano, 1600 km de infraestructura vial fueron afectados, de los cuales el 9,7% correspondió a la red primaria, el 24,7% a la red terciaria y el 0,9% a la red concesionada [4]. Un indicador de la magnitud de la problemática en Colombia es que las mayores inversiones públicas para la reducción del riesgo se realizan por parte del INVIAS, del orden de US\$350 millones en promedio anual entre el periodo 1999-2008, superado solo por las Corporaciones Autónomas Regionales para la conservación de cuencas [5]. Sin embargo, aunque la reconstrucción de un kilómetro de vía puede valer hasta cinco veces el costo de realizar un buen mantenimiento preventivo [6], el 91% de las inversiones se destina a la atención y rehabilitación de vías y solo el 9% se invierte en la prevención [7].

Una de las medidas más importantes para la prevención y reducción de pérdidas por movimientos en masa se refiere a la zonificación de la susceptibilidad y amenazas del territorio. Estos mapas, para el caso de proyectos de infraestructura vial, permiten no solo un trazo y diseño que consideren las restricciones del territorio a intervenir, sino además identificar los sectores de mayor criticidad y que requieren atención especial durante la operación.

Los métodos de evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa se dividen en métodos directos o cualitativos y métodos indirectos o cuantitativos [8-12].

Los métodos directos-cualitativos están basados enteramente en el criterio y evaluación de un experto para definir el grado de susceptibilidad, y comprenden los métodos de cartografía geomorfológica directa [13], análisis jerárquico [14], y ponderación de mapas [15]. Aunque permiten incorporar en el análisis una gran cantidad de variables complejas, en muchos casos no cartografiables, son altamente subjetivos y dependen completamente de la experiencia y conocimiento del experto sobre la ocurrencia de movimientos en masa en la región específica de estudio y los factores de causa [10]. Se pueden utilizar cuando no existen inventarios de movimientos en masa y se recomiendan a escalas nacionales o regionales [10].

Los métodos indirectos-cuantitativos utilizan expresiones matemáticas objetivas produciendo factores de seguridad o probabilidades de la ocurrencia de movimientos en masa, correlacionando las causas y el inventario de eventos disponible [9,10]. Estos métodos están generalmente agrupados en métodos estadísticos y métodos determinísticos o con base física. Los métodos con base física utilizan modelos matemáticos geotécnicos, y en algunas ocasiones son acoplados con modelos hidrológicos, para estimar el factor de seguridad de cada unidad de análisis [16,17]. Generalmente utilizan el criterio de falla de Mohr-Coulomb y análisis de equilibrio límite mediante la ecuación de talud infinito, la cual permite ser implementada para regiones específicas utilizando sistemas de información geográfica y mapas con grillas regulares tipo raster [18]. A su vez, los métodos estadísticos establecen relaciones funcionales entre factores de inestabilidad y la distribución pasada y presente de los movimientos en masa. Estas relaciones generalmente corresponden a funciones de densidad de movimientos en

masa que pueden ser establecidas para cada factor individual, denominados métodos estadísticos bivariados, o relaciones combinadas entre una variable dependiente (ocurrencia de movimientos en masa) y variables independientes (factores de causa), denominados métodos estadísticos multivariados [10]. Aunque estos métodos se han convertido de amplia aplicación a escalas regionales, exigen tener un exhaustivo inventario de movimientos en masa. Entre los métodos estadísticos bivariados se destacan Radio de Frecuencia [19], Índice Estadístico [20], Peso de la Evidencia [21,22], Funciones de Favorabilidad [20]. Los métodos multivariados de mayor uso son Análisis Discriminante [23], Regresión Logística [14], y Análisis Condicional [24,25].

Adicional a la definición del método, la evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza requiere la selección con anterioridad de la unidad de análisis [26,10,27]. Hansen [28] define la unidad de análisis como una porción de terreno que contiene un conjunto de condiciones que difieren de la unidad adyacente a lo largo de límites diferenciados. En la mayoría de casos por su facilidad de manejo en sistemas de información geográfica se selecciona el uso de mallas de celdas tipo raster [15]; sin embargo, existen otras unidades de análisis, tales como: Unidad de Terreno [29], Unidad de Laderas [15], y Unidad de Condiciones Únicas (UCU) [30].

Aunque las diferentes metodologías de evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza, al igual que las unidades de análisis, son recurrentemente implementadas para proyectos lineales; en realidad estas no han sido acondicionadas para este tipo de proyectos, lo que trae consigo una serie de dificultades durante su implementación, y posteriormente durante la definición de medidas de mitigación. La principal diferencia y dificultad se refiere a la escala de trabajo. Los proyectos lineales se caracterizan por tener una escala longitudinal al proyecto, que puede ser considerada de nivel regional (1:100.000 – 1:25.000), mientras que perpendicular al proyecto se requiere una escala detallada generalmente (<1:10.000), a nivel de ladera o talud. En términos de gestión del riesgo, las diferencias de escala exigen un mapa a escala regional para identificar los sectores críticos del proyecto, y otro mapa a escala local que permita identificar las laderas o taludes con mayor inestabilidad.

Considerando por lo tanto la grave problemática de los proyectos lineales, específicamente sobre las vías, y la necesidad de metodologías que consideren las particularidades de este tipo de proyectos, el presente trabajo propone la combinación de métodos heurísticos, estadísticos y con modelación física para evaluar y zonificar la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa a lo largo de proyectos lineales. Para la zonificación regional se propone el método de Análisis Condicional, el cual utiliza como unidad de análisis la UCU, y para el análisis local se utilizan dos métodos con base física: el método SHALSTAB [18] para laderas en suelos, y el índice de TOBIA [31] para laderas en roca. Utilizando en ambos como unidad de análisis la malla de celdas regulares. La combinación de ambos análisis permite establecer un mapa de unidad de laderas críticas a lo largo del proyecto lineal. Para la verificación del

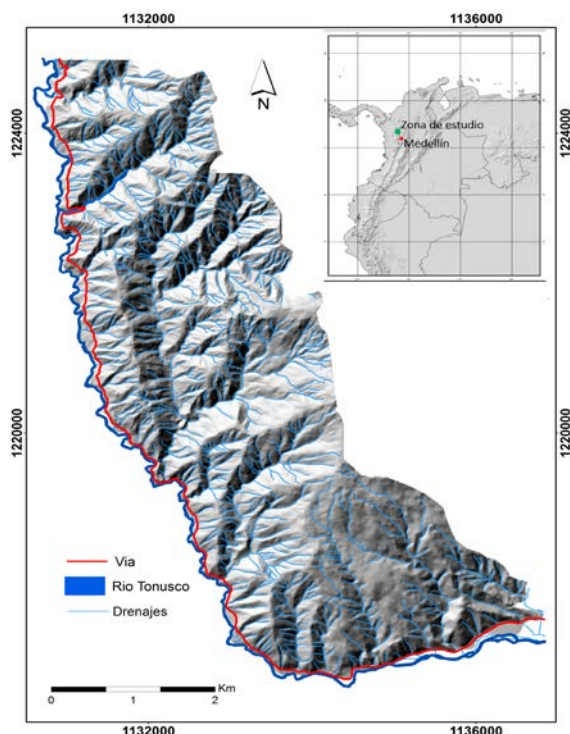


Figura 1. Localización de la zona de estudio.  
Fuente autores.

desempeño y coherencia del modelo propuesto se utilizan las curvas de éxito y el área bajo la curva (AUC) propuestos por Chung & Fabbri [19]. El método es implementado en el Tramo 2 de la vía que comunica la ciudad de Medellín con el mar caribe, sobre el noroccidente de los Andes colombianos.

## 2. Zona de estudio

El área de estudio, con un área aproximada de 22.14 km<sup>2</sup>, corresponde al Tramo 2 del proyecto de las Autopistas de Cuarta Generación (4G) en la cordillera occidental de los Andes Colombianos, a una altura que varía desde 570 a 1740 m sobre el nivel del mar, y que comunica la ciudad de Medellín con el mar Caribe. (ver Fig. 1). La vía del presente estudio corresponde al trazo inicialmente considerado en los diseños paralelo al río Tonusco sobre la margen occidental. Sin embargo el trazo fue modificado sobre la margen oriental del río y no corresponde al trazo del presente estudio.

La temperatura promedio de la zona se encuentra alrededor de los 27°C, con precipitación media anual de 1,100 mm, y factor de erosividad de  $3.128 \pm [(KJ/m^2)(mm/h/año)]$  [32]. La topografía es típica de zonas montañosas, con fuertes pendientes y relieve relativo alto, con alta densidad de drenajes cubiertos en su mayoría por vegetación de bosque seco [33, 34].

Geológicamente en el área afloran horizontes de meteorización IB - IC a partir de rocas de la Formación Barroso definida por Álvarez y Gonzales [35] constituido por: derrames lávicos basálticos y andesíticos intercalados con tobas, aglomerados y paquetes sedimentarios; el Batolito

de Sabanalarga descrito por Hall et al., [36] y Gonzales et al., [37] formado por vulcanitas de arco correspondiente a la formación barroso y bloques de chert-caliza, litoarenita-lodolitas intercalados con diabasas y lavas almohadilladas.

## 3. Metodología

El método propuesto se fundamenta en la combinación de diferentes métodos de zonificación, que se ajustan de forma eficiente a las necesidades de escala regional y local que este tipo de proyectos demanda. Por lo que se ejecutan de manera secuencial, y basado en diferentes unidades de análisis del territorio (Fig. 2).

Inicialmente el análisis heurístico es utilizado para generar el inventario de movimientos en masa y para definir las Unidades de Ladera, las cuales permiten obtener un mapa final para la gestión del riesgo que logre identificar los sectores de mayor criticidad. El inventario de movimientos en masa además de permitir implementar el análisis estadístico para evaluar y zonificar la probabilidad espacial de la ocurrencia de movimientos en masa, permite validar cuantitativamente el desempeño y robustez del modelo.

Para el inventario de movimientos en masa se utilizaron fotografías aéreas del año 2010 y a escala 1:10.000, con un exhaustivo trabajo de verificación y levantamiento de campo. Para cada movimiento en masa fue diferenciado la corona y el cuerpo del movimiento en masa. Para el análisis estadístico sólo se utilizó la corona del movimiento en masa. El cuerpo no fue considerado ya que no representa las condiciones originales asociadas a la ocurrencia del movimiento en masa [40].

A partir del inventario de movimientos en masa y con el fin de obtener las condiciones de susceptibilidad del área de influencia del proyecto, se realizó un análisis estadístico multivariado, a partir del método denominado Análisis Condicional definido por Clerici et al. [25] y De Graff et al. [24]. El Análisis Condicional utiliza como subdivisiones del terreno las UCU's (30). Las cuales se determinan subdividiendo cada variable condicionante en clases, para posteriormente ser cruzadas y obtener todas las posibles combinaciones de clases, es decir las UCU's [38]. La probabilidad espacial de la ocurrencia de un movimiento en masa (L), dada una combinación única de clases (UCU) está dada por la densidad de los movimientos en masa en la UCU [25].

$$P(L/UCU) = \text{área de los movimientos en masa} / \text{área de la UCU}$$

De acuerdo con las condiciones de escala de los proyectos lineales, es necesario además realizar una zonificación a escala local, donde se incluya un análisis considerando el tipo de material de las laderas o taludes del proyecto: roca o suelo. De acuerdo con Sarkar et. al., [38] y Coast et. al., [39] el método SHALSTAB [19] es un método ampliamente utilizado, con excelente precisión y rápido para evaluar la estabilidad por deslizamientos superficiales planares detonados por lluvia en suelo. Para su desarrollo se utilizan los parámetros que caracterizan el comportamiento

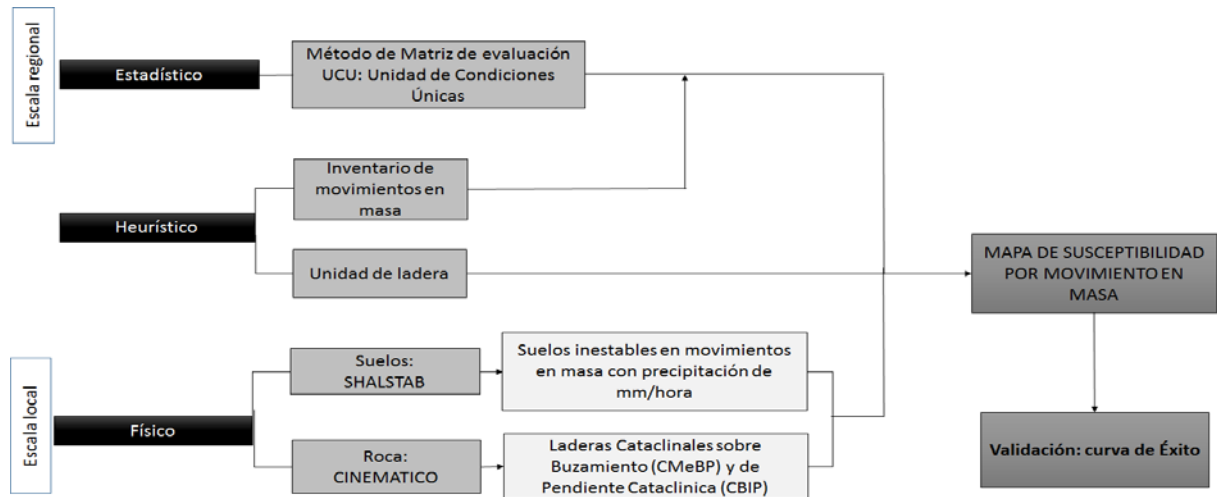


Figura 2. Esquema de metodología.  
Fuente autores.

Tabla 1.

Parámetros geomecánicos del suelo donde: C, cohesión;  $\gamma$ , peso unitario;  $\phi$ , ángulo de fricción; K, permeabilidad; L, espesor del suelo. Fuente autores.

Litología	C (KN/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (rad)	K (cm/h)	L (m)
Deposito Aluvial	4	21	0.61	1.2	12.5
Deposito. Vertiente	21.3	19	0.59	0.06	15
Terraza Aluvial	43	14	0.4	0.06	2
SR. Fm. Barroso	28	21	0.06	0.06	4
SR. Bat. Sabanalarga	9	22	0.52	1.2	10

Fuente autores.

geomecánico de los materiales, específicamente: cohesión, fricción, peso unitario del suelo, permeabilidad, profundidad del suelo residual y datos de precipitación (ver Tabla 1.). El modelo permite evaluar diferentes condiciones de lluvia o eventos detonantes. Para el caso de la zona de estudio se utilizó una intensidad de 30mm/h, con un periodo de retorno de 10 años de acuerdo con la curva IDF de Páez, E. & Barreiro, H., [41].

Para calcular la susceptibilidad a deslizamientos planares en rocas, se utilizó el método cinemático a través del índice de TOBIA [42]. Este método relaciona las estructuras geológicas que caracterizan el macizo rocoso (diaclasas, estratificaciones, falla) con el aspecto y pendiente de la ladera. Las laderas Anaclinales se caracterizan por tener la dirección de buzamiento de las estructuras formando un ángulo de 180 grados con el aspecto de la ladera. Las laderas Ortoclinales tienen la dirección de buzamiento ortogonal al aspecto de la ladera; y laderas Cataclinales la dirección de buzamiento de las estructuras es paralelo al aspecto de la ladera. Las laderas Cataclinales, que por sus características son las más susceptibles a causar deslizamientos planares en roca, se subdividen en: Cataclinal de menor buzamiento a la

pendiente (CMeBP), Cataclinal de buzamiento igual a la pendiente (CBIP) y Cataclinal de mayor buzamiento a la pendiente (CMaBP). Las CMeBP y CBIP se consideran de mayor susceptibilidad a generar deslizamientos planares de roca. A partir de datos de familias de diaclasas de la zona de estudio suministrados por Consorcio Antioquia al mar [33], se utilizaron 3 familias de diaclasa (F1:N50E/ 65SE, F2: N60W/63SW, F3: N30E/65NW). Para cada familia de diaclasa se realizó un mapa cinemático identificando los tipos de laderas (Anaclinal, Cataclinal y Ortoclinal), y se seleccionaron las laderas de mayor susceptibilidad: CMeBP y CBIP.

Con el fin de identificar los sectores de mayor criticidad, los resultados del mapa por el método estadístico de Análisis Condicional se combinan con los mapas generados por los modelos SHALSTAB e Índice de Tobia. Para esto se utiliza como unidad de análisis la Unidad de Ladera, utilizada en múltiples estudios de susceptibilidad y amenaza, y que representan de una forma más adecuada la física de la problemática involucrada en la ocurrencia de este tipo de eventos [43]. Para cada unidad de ladera se calculó el grado de criticidad que varía entre 1-100 a partir del número de celdas con susceptibilidad alta del método estadístico, las zonas inestables producto del método SHALSTAB, y las ladera CMeBP y CBIP de acuerdo con el Índice de Tobia.

Para evaluar el desempeño y robustez del modelo se utilizó la Curva de Éxito para el mapa de susceptibilidad y el mapa de unidad de laderas críticas [20]. La curva de éxito consiste en un criterio independiente de los rangos y valores de corte seleccionados. El eje Y representa el porcentaje de celdas correctamente clasificadas, y el eje X el porcentaje de área clasificada inestable. El Área bajo la Curva de Éxito (AUC) es utilizado como una medición para evaluar la calidad total del modelo [44]. Entre mayor sea el área bajo la curva, en un rango de 0 a 1, se considera mejor el desempeño del modelo.



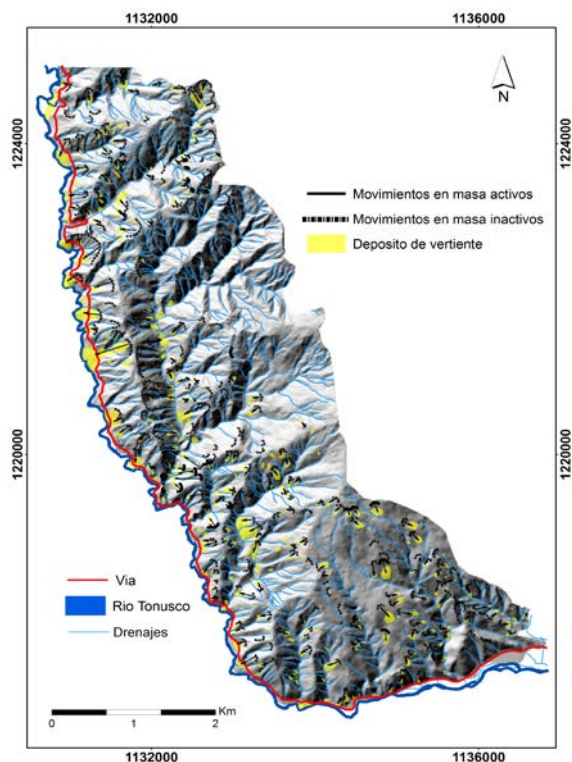


Figura 3. Inventario de movimientos en masa.  
Fuente autores.

### 3. Resultados

La Fig. 3 presenta el inventario de movimientos en masa elaborado mediante fotointerpretación y trabajo de campo. Se identificaron 286 movimientos en masa que ocupan un porcentaje de 4.12% del área total. En el inventario predominan los movimientos activos con un 10% y los inactivos con 90%, con una densidad aproximada de 13 movimientos en masa/km<sup>2</sup>. El 17% afectan de forma directa la vía y 83% indirectamente.

La Fig. 4 presenta el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa a partir del método estadístico. El 18% del área total de la zona se clasifica como susceptibilidad muy alta y ocupa 4.1 km<sup>2</sup>. Contiene 87 movimientos en masa inventariados que ocupan 0.2 km<sup>2</sup> de esta zona. Tiene una densidad de 21 movimientos en masa/km<sup>2</sup> con una probabilidad espacial de 0.04. La zona de susceptibilidad alta ocupa un área total de 10.5 km<sup>2</sup>, que corresponde al 47% de la zona de estudio. Se ubican 149 movimientos en masa inventariados que ocupan un área de 0.23 km<sup>2</sup>. Tienen una probabilidad espacial de 0.02 y densidad de 25 movimientos en masa/km<sup>2</sup>. Por otra parte, el 28% del área de estudio se clasifica como susceptibilidad moderada, con un área de 6.2 km<sup>2</sup>. Contiene 59 movimientos en masa, que ocupan 0.01 km<sup>2</sup> con una densidad de 10 movimientos en masa/km<sup>2</sup> y probabilidad espacial de 0.01. Finalmente, la susceptibilidad baja ocupa 1.3 km<sup>2</sup> del área total, lo que equivale al 7% del terreno y es la única zona sin movimientos en masa inventariado. Adicionalmente, la susceptibilidad muy alta se

concentra entre los kilómetros 7 y 10 desde Santa Fe de Antioquia, que correspondiente al 30% del área de estudio.

Las Figs. 5 y 6 presentan los resultados de la zonificación a nivel local, realizadas a partir de los métodos SHALSTAB y el índice de TOBIA, para movimientos en masa en suelo y roca respectivamente. En la Fig. 5 se presenta el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa de suelo donde se observan las zonas inestables ante un evento de lluvia de 30 mm/h que corresponde a un periodo de retorno de 10 años. Las zonas en color amarillo corresponden a las celdas potencialmente inestables ante el factor detonante lluvia, pero que podrían fallar ante un evento de lluvia de mayor intensidad. Las áreas de suelo clasificadas como incondicionalmente estables o incondicionalmente inestables son aquellas en las cuales sus condiciones de estabilidad son independientes de la precipitación.

La Fig. 6 presenta la distribución de las laderas CBIP y CMeBP asociadas a las tres familias de diaclasas analizadas (F1, F2, y F3). Las laderas Cataclinales de la F1 son abundantes, especialmente en la zona sur oriente, entre los kilómetros 7 y 10 desde Santa Fe de Antioquia. A lo largo de la zona de estudio no se observa que este tipo de laderas afecten de modo directo a la vía, sin embargo, en zonas alejadas a la carretera se presenta una concentración de laderas con F2 y F3 que podrían generar flujos de escombros o lodos y que en su desplazamiento afecten la vía.

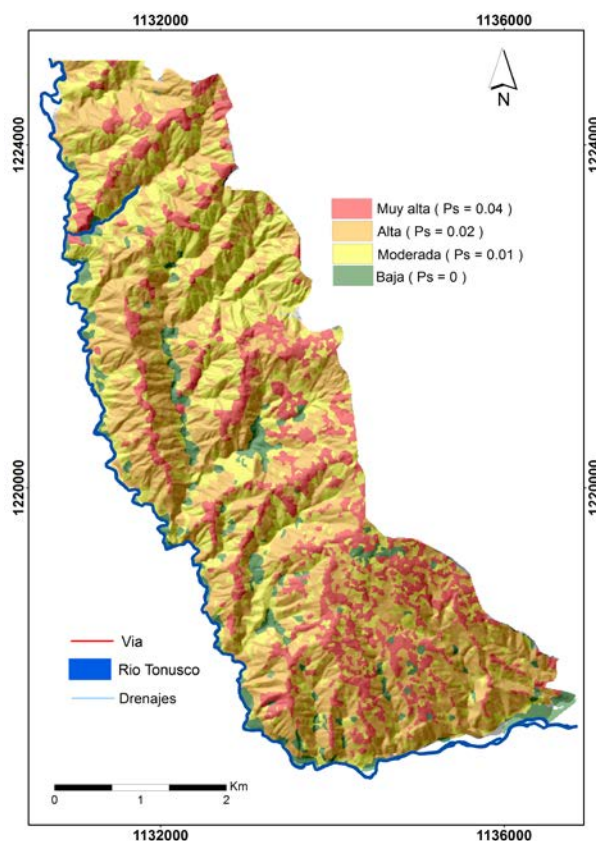


Figura 4. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa. Ps: Probabilidad espacial.  
Fuente autores.

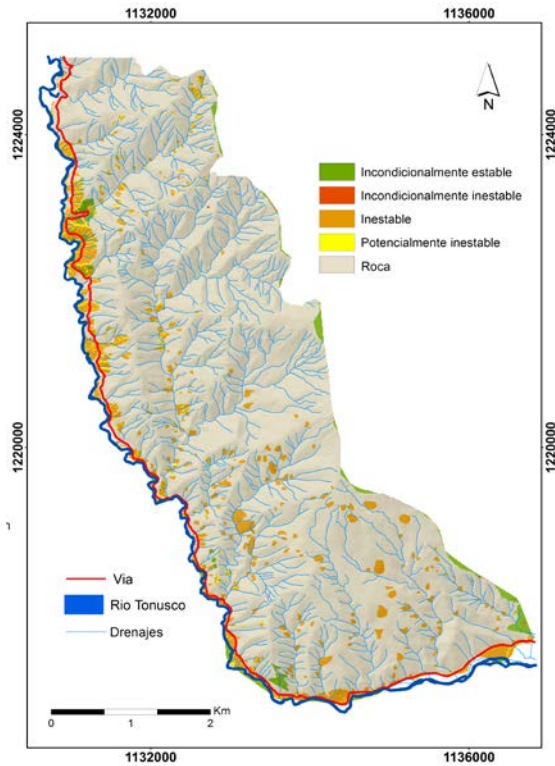


Figura 5. Mapa de amenaza por movimiento en masa para laderas en suelo utilizando el método SHALSTAB para un evento de lluvia de 30 mm/h. Fuente autores.

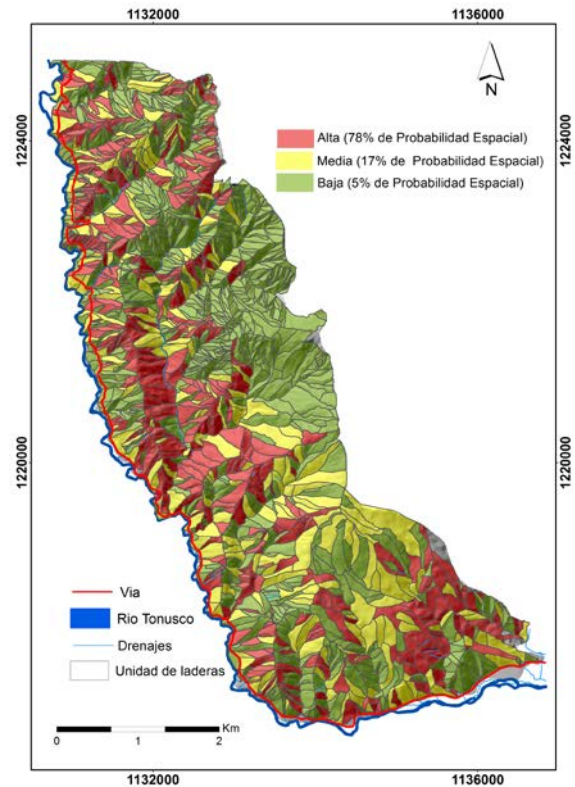


Figura 7. Mapa de unidades de laderas críticas por movimiento en masa. Fuente autores.

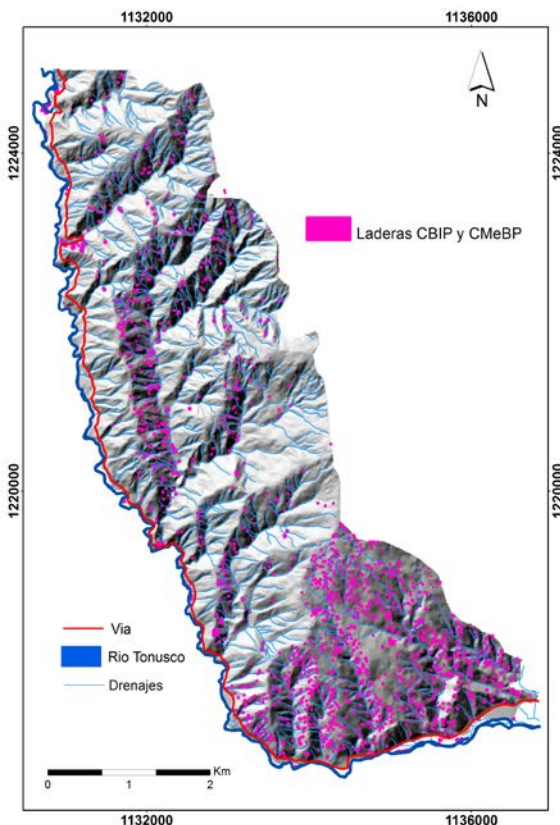


Figura 6. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa para laderas en roca utilizando el método del Índice de Tobia. Fuente autores.

La Fig. 7 presenta el mapa de criticidad del proyecto lineal, en el cual se combinan los resultados del mapa estadístico y con base física. Se definieron 1806 Unidades de Ladera en las que se le determinó a cada una, un rango de criticidad entre 0 y 100. La criticidad alta se encuentra en 686 laderas, que ocupan un área total de 6,91 km<sup>2</sup> correspondiente al 30% del terreno. Contiene 205 movimientos en masa inventariados, que ocupan 0,34 km<sup>2</sup> siendo el 7% activos. Su densidad es de 29 movimientos en masa/km<sup>2</sup> con una probabilidad espacial de 0,05, siendo la más alta entre los demás rangos. En esta zona se identifica que el 22% de las celdas presenta susceptibilidad muy alta a alta, el 2% laderas son inestables y el 31% son CBIP y CMeBP. Por otra parte, la criticidad baja ocupa un área de 10 km<sup>2</sup> correspondiente al 45% del área total. En 903 laderas pertenecientes a esta zona existen 9 movimientos en masa, que ocupan 0.03 km<sup>2</sup> del área de estudio. Tienen una densidad de 1 movimiento en masa/km<sup>2</sup> y una probabilidad espacial del 0.002. La criticidad media tiene un área de 5,5 km<sup>2</sup> y contiene 210 laderas, que ocupan el 19% del área del terreno. Existen 75 movimientos en masa ubicados en 0.1 km<sup>2</sup> de la zona, con una densidad 14 movimientos/km<sup>2</sup> y probabilidad espacial del 0,02. Adicionalmente el 24% de las laderas de esta zona tienden a ser inestables.

El AUC para el mapa de susceptibilidad por el método estadístico arrojó un valor de 0.60, señalando un buen ajuste y desempeño de modelo a los datos de inventario de movimientos en masa utilizados (Fig. 8a). De acuerdo con la

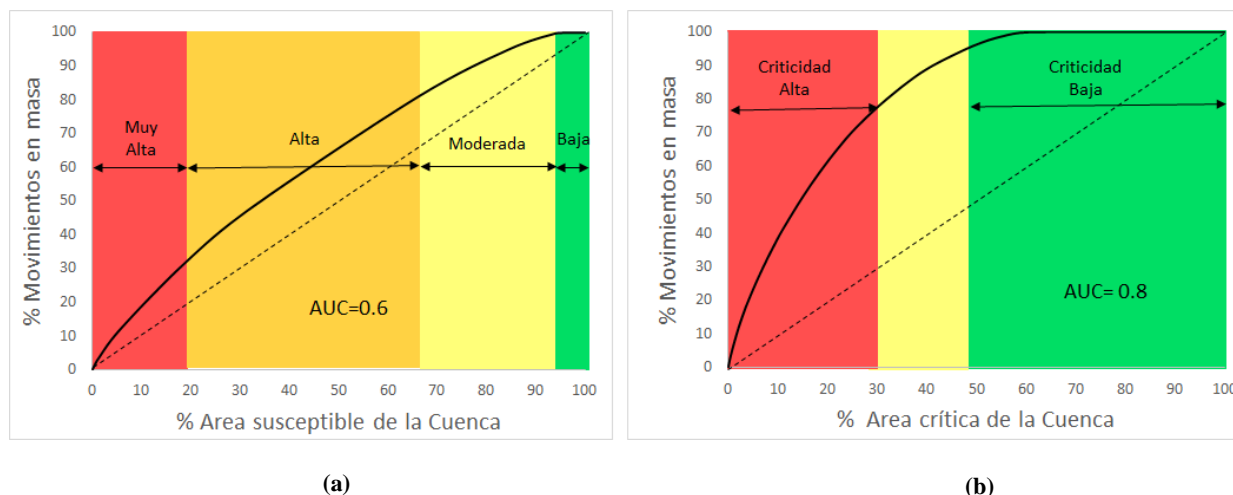


Figura 8. Gráficos de curvas de éxito. (a). Análisis condicional, (b). Criticalidad. Fuente autores.

propuesta de Guzzetti et al. [46] la Curva de Éxito fue además utilizada para establecer los rangos de susceptibilidad con criterio cuantitativo en términos de probabilidad espacial de ocurrencia. El rango definido como susceptibilidad muy alta fue definido para el 20% del área de la cuenca donde se localiza el 31% de los movimientos en masa de acuerdo con el inventario de eventos. El rango de susceptibilidad alta corresponde al 47% del área de la cuenca donde se localiza el 49% de los movimientos en masa. El rango de susceptibilidad moderada está definido para el 25% del área de la cuenca donde se localiza el 20% de los movimientos en masa. Y Finalmente el rango de susceptibilidad baja se definió para el 8% del área de la cuenca donde no se presenta ningún movimiento en masa del inventario.

Para el mapa de criticidad el AUC (Figura 8b) arrojó un valor de 0,82. Donde el 78% de los movimientos en masa inventariados se encuentran en el 30% del área de la cuenca, por lo cual se clasificó este rango como de criticidad alta. De criticidad media se definió el 13% de la cuenca, en el que se encuentra el 20% de movimientos en masa; y el resto de la zona, se ubica tan solo el 2% de movimientos en masa clasificándose como de criticidad baja.

#### 4. Discusión

La metodología propuesta para la evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales permite una mirada a diferentes escalas de forma independiente pero que en conjunto permite no solo establecer las zonas de susceptibilidad y amenaza, sino además definir áreas de condiciones críticas para el proyecto. El análisis estadístico permite establecer relaciones de causa y efecto a nivel regional entre las variables condicionantes seleccionadas y la ocurrencia de movimientos en masa, permitiendo identificar cuáles son aquellas condiciones naturales del terreno que favorecen la ocurrencia de movimientos en masa, con el fin

de ser evitadas o mitigadas. En el caso de los métodos físicos, estos permiten identificar las zonas con materiales, en suelo o roca, de menor competencia de acuerdo con sus propiedades geomecánicas, o características estructurales.

Para el caso de estudio el sector suroriental presenta el mayor número de celdas susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa basado en la recurrencia de los eventos inventariados. Este sector presenta el mayor número de laderas CBIP y CMeBP, lo que señala la estrecha relación entre la disposición estructural y la ocurrencia de movimientos en masa. Relación que no se puede establecer directamente a partir del método estadístico. La combinación de ambos modelos permite explicar adecuadamente la causa de los movimientos en masa en el área de influencia, y por lo tanto valorar con especial cuidado las tendencias estructurales de las laderas de la vía.

Los resultados no señalan una relación entre el inventario de movimientos en masa y las laderas en suelo inestables para una lluvia de 30 mm/h, lo cual es coherente con los relativos bajos niveles de lluvia característicos en la zona. Sin embargo, los resultados permiten identificar aquellas laderas más propensas a fallar ante eventos de lluvia y que deben ser monitoreadas o establecer medidas de manejo de aguas superficiales y subsuperficiales.

Es importante destacar la diferencia de los métodos en cuanto al uso del inventario de movimientos en masa. Mientras el método estadístico construye su modelo basado en el inventario, los métodos físicos no utilizan para su desarrollo dicho inventario.

En la metodología propuesta se utiliza para el análisis estadístico el método Análisis Condicional, y para el caso de los métodos físicos se utiliza el modelo SHALSTAB para laderas en suelo, y el Índice de Tobia para laderas en roca, sin embargo, los métodos implementados podrían ser diferentes. Existen una gran cantidad de métodos estadísticos bivariados y multivariados que han sido implementados en una misma área obteniendo resultados muy similares [21;



45]. En el presente estudio se seleccionó el método Análisis Condicional ya que permite utilizar una unidad de análisis diferente a las grillas de celdas regulares. El uso de diferentes unidades de análisis permite dar una mirada a la susceptibilidad y amenaza independiente de la unidad de análisis. Los resultados se confirman debido a la independencia del método y la unidad de análisis.

Se destaca además de la metodología propuesta, la posibilidad de evaluar las condiciones de susceptibilidad a escala regional a través del método estadístico, y la amenaza a escala local a través de métodos con base física. La susceptibilidad es la probabilidad espacial de ocurrencia dado una combinación de variables condicionantes sin considerar el factor detonante dentro del análisis [47]. Por otra parte, la amenaza establece no solo la probabilidad espacial, sino también la probabilidad temporal, por lo cual debe considerar dentro de su análisis el factor detonante [48]. La susceptibilidad debe ser el primer acercamiento hacia la evaluación de la amenaza, ya que explica la distribución espacial de los movimientos en masa [49]. Y la amenaza corresponde a un acercamiento posterior a una mayor escala para conocer la frecuencia y magnitud de la ocurrencia de movimientos en masa [50]. Los términos, amenaza y susceptibilidad han sido erróneamente usados como sinónimos, lo que conlleva a una inadecuada aplicación, y uso erróneo de los mapas de zonificación que se generan. Esta comprensión pasa por entender los movimientos en masa como el resultado de las condiciones naturales del terreno y las modificaciones de estas condiciones por procesos exógenos que reducen las condiciones de equilibrio gradualmente, hasta la presencia de un factor que detona el movimiento [8].

Para el caso de estudio se consideró como factor detonante la lluvia, sin embargo, y de acuerdo las condiciones propias del área de estudio, se puede seleccionar o complementar con métodos que incorporen como factor detonante los sismos. El modelo SHASTAB permite utilizar diferentes escenarios de lluvia como factor detonante. En este caso se seleccionó el evento con periodo de retorno de 10 años como una ventana de mediano plazo para un proyecto lineal. Evaluar escenarios de largo plazo es altamente recomendable ya que permiten al proyecto lineal definir o tomar medidas con suficiente anterioridad que reduzcan las condiciones de riesgo.

Se consideró importante en el desarrollo metodológico la incorporación de un análisis que combinara los resultados a escala regional y local, utilizando como unidad de análisis una región diferente a las unidades de análisis utilizadas en ambas escalas, y que respondiera a una división del terreno con significado físico. La unidad de celdas regulares no responde a una división natural del terreno, sino a la conveniencia en la aplicación matemática de los métodos bajo sistemas de información geográfica. En este sentido la Unidad de Laderas responde adecuadamente a estas necesidades, ya que define una región de la cuenca con respuesta hidrológica y geomorfológica similar, por lo tanto, permite suponer que sus condiciones de estabilidad son generales para toda la región, y que cualquier cambio en

dicha región podría modificar las condiciones de estabilidad para toda la región misma. Este concepto es similar al utilizado por Chica [51] y AMVA et al., [52] denominado Unidad Morfodinámica Independiente, y que por lo tanto podría también ser una unidad adecuada de análisis para la definición de zonas críticas. Desde el punto de vista de gestión del riesgo, es importante identificar la unidad de análisis o intervención que responde a una misma condición de estabilidad, ya que permite establecer la región del espacio donde deben ser implementadas las medidas de mitigación, o por el contrario identificar la región en la cual cualquier intervención podría desencadenar procesos en una región mayor.

El mapa obtenido de unidad de laderas críticas identifica tres sectores críticos de la vía. El sector sur oriental, identificado claramente en el mapa de susceptibilidad y dominado por laderas cataclinales, pero también resalta el sector central entre los kilómetros 14 y 17, y el sector noroccidental. Estos dos últimos sectores señalan una potencial afectación indirecta. Ya que la mayor parte de las laderas de criticidad alta no drenan directamente a la cuenca. Sin embargo, los problemas de inestabilidad y ocurrencia de movimientos en masa podrían desencadenar flujos de escombros o lodos, que se propaguen a lo largo del cauce principal de la cuenca, y que afectaría la vía. Esto señala la necesidad de evaluar y zonificar áreas por fuera del área de influencia directa del proyecto. Es decir que este tipo de mapas ayudan a la selección del área de influencia del proyecto.

Finalmente, el desarrollo metodológico propuesto incorpora dentro de su análisis la validación del método estadístico y el mapa de criticidad. El presente estudio utiliza la curva de éxito porque permite no solo la evaluación del desempeño del modelo en un solo valor estimado por el área bajo la curva, sino además definir con un criterio cuantitativo los niveles de susceptibilidad y criticidad en términos de probabilidad espacial. Para la evaluación y generación de los mapas de susceptibilidad o amenaza, es necesario siempre definir los rangos o intervalos de la escala en los cuales será dividido el mapa. Esos rangos son definidos generalmente con criterios subjetivos o estadísticos dados directamente por las herramientas de información geográfica utilizada, tales como intervalos de confianza o métodos de vecindad. La curva de éxito permite definir dichos rangos o intervalos de acuerdo con los resultados obtenidos, siendo a su vez la curva independiente de los rangos seleccionados.

El área bajo la curva del mapa de unidades de ladera críticas es mayor indicando un mejor ajuste a la ocurrencia histórica de movimientos en masa representado por el inventario de movimientos en masa, lo que señala que la combinación de ambas escalas permite un mejor modelo de la ocurrencia de movimientos en masa a lo largo del proyecto lineal.

## 5. Conclusión

Este trabajo presenta un modelo metodológico para la evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza de

acuerdo con las características propias de los proyectos lineales. Se combinan diferentes análisis disponibles en la literatura con criterios independientes en términos de la escala, y uso del inventario de movimientos en masa y la unidad de análisis, permitiendo comparar sus resultados y coherencia en la distribución de la ocurrencia de movimientos en masa. La propuesta metodológica complementa además los resultados obtenidos con un nuevo mapa, denominado de unidad de laderas críticas, que combina los resultados de ambos métodos, y que permite definir sectores de especial cuidado y atención a escala del proyecto.

Los resultados de la implementación del modelo señalan un adecuado desempeño, y la obtención de valiosa información necesaria previa a la construcción del proyecto, pero también durante la operación.

Considerando las críticas condiciones de estabilidad de las vías de nuestro país es necesario seguir avanzando en propuestas metodológicas aplicadas a proyectos lineales que permitan reducir las condiciones de riesgo y pérdidas humanas y económicas asociadas a movimientos en masa a lo largo de proyectos lineales.

## Bibliografía

- [1] Petley, D.N., Global patterns of loss of life from landslides, *Geology*, 40, pp. 927-930, 2012.
- [2] Aristizábal, E. y Gomez, J., Inventario de emergencias y desastres en el valle de Aburrá: originados por fenómenos naturales y antrópicos en el período 1880-2007. *Gestión y Ambiente*, 10(2), pp. 17-30, 2007.
- [3] Montero, J., Beltrán, L. y Cortes, R., Inventario de deslizamientos en la red vial colombiana. *Ingeniería e Investigación*, 17, pp. 16-27, 1988.
- [4] Banco Mundial. Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: Un aporte para la construcción de políticas públicas. Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres. Bogotá, 2012. Retrieved from <http://gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/archivos/GESTIONDELRIESGOWEB.pdf>.
- [5] Corporación OSSO y Universidad EAFIT., Base de datos de pérdidas históricas en Colombia (período 1970-2011). 2011. [en línea] Disponible en: <http://online.desinventar.org>.
- [6] DNP. Plan Maestro de Transporte 2010-2032. Bogotá, Colombia, 2010.
- [7] INVIAS. Informe presupuestal de la oficina de Prevención y Atención de Emergencias. Bogotá, Colombia, 2009.
- [8] Soeters, R., and van Westen, C.J., Slope instability recognition, analysis and zonation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. *Landslides Investigation and Mitigation*. TRB Special Report 247. National Academy Press, Washington D.C. pp. 129-177, 1996.
- [9] Aleotti, P. and Chowdhury., Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58, pp. 21-44, 1999.
- [10] Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P., Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31, pp.181-216, 1999.
- [11] Chacón, J., Irigaray, C., Fernandez, T. and El Hamdouni, R., Engineering geology maps: Landslide and geographical information systems. *Bull Eng Geol Environ*, 65, pp. 431-441, 2006.
- [12] Fell, R., Corominas, J., Bonnard, Ch., Cascini, L., Leroi, E. and Savage, W.Z., On behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes. 2008a. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102, pp. 85-98, 2008.
- [13] Barredo, J.I., Benavidez, A., Hervhl, J. and van Westen, C.J., Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* 2(1), pp. 9-23, 2000.
- [14] Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H. and Kanno, T., Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, 81(4), pp. 432-445, 2005.
- [15] Carrara, A., Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15(3), pp. 403- 426, 1983.
- [16] van Asch, T.W.J., Malet, J.P., Van Beek, L.P.H. and Ambrato, D., Techniques, issues and advances in numerical modelling of landslide hazard. *Bull. Soc. géol.* 178(2), pp. 65-88, 2007.
- [17] Casadei, M., Dietrich, W.E. and Miller, N.L., Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation on soil mantled landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(9), pp. 925-950, 2003.
- [18] Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E., A physically-based model for topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research* 30 (4), pp. 1153-1171, 1994.
- [19] Chung, C.F. and Fabbri, A.G., Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Nat Hazards* 30(3), pp. 451-472, 2003.
- [20] Chen, W., Chai, H., Sun, X., Wang, Q., Ding, X., and Hong, H., A GIS-based comparative study of frequency ratio, statistical index and weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(204), 16 P, 2016. DOI: 10.1007/s12517-015-2150-7
- [21] van Westen, C.J., Application of geographic information systems to landslide hazard zonation, PhD. Thesis Dissertation, Technical University Delft, Holanda, 245 P, 1993.
- [22] Lee, S., Ryu, J.H., Min, K. and Won, J.S., Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, pp. 1361-1376, 2003.
- [23] Gorsevski, P.V., Gessler, P. and Foltz, R.B., Spatial prediction of landslide hazard using discriminant analysis and GIS. *GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop: Applications for the 21st Century*, Denver, Colorado, 2000.
- [24] De Graff, J.V., Romesburg, H.C., Ahmad, R. and McCalpin, J.P., Producing landslide-susceptibility maps for regional planning in data-scarce regions. *Natural Hazards*, 64(1), pp. 729-749. DOI: 10.1007/s11069-012-0267-5, 2012.
- [25] Clerici, A., Perego, S., Tellini, C. and Vescovi, P., A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, 48(4), pp. 349-364, 2002. DOI: 10.1016/S0169-555X(02)00079-X
- [26] Meijerink, A.M., Data acquisition and data capture through mapping units. *ITC Journal*, 1, pp. 23-44, 1988.
- [27] Erenner, A. and Düzgün, H.S.B., Landslide susceptibility assessment: What are the effects of mapping unit and mapping method?. *Environmental Earth Sciences*, 66, pp. 859-877, 2012.
- [28] Hansen, A., Landslide hazard analysis. In: Brunden, D. and Prior, D.B., *Slope Instability*, Wiley, New York, pp. 523-602, 1984.
- [29] Hansen, A., Franks, C.A.M., Kirk, P.A., Brimicombe, A.J. and Tung, F., Application of GIS to hazard assessment, with particular reference to landslide in Hong Kong. Ed. Carrara, A., Guzzetti, F., *Geographical Information system in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, pp. 135-175, 1995.
- [30] Bonham-Carter, G.F., Geographic information system for geoscientists (modelling with GIS). Geological Survey of Canada. Published by Pergamon (Elsevier Science Ltd), 1994.
- [31] Meentemeyer, R. and Moody, A.W., Automated mapping of conformity between topographic and geological surfaces, *Comput. Geosci.* 26, pp. 815-829, 2000.
- [32] Perez, J.D. y Mesa, O.J., Estimación del factor de erosividad de la lluvia en Colombia. XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, 2010.

- [33] Consorcio Antioquia al mar. Estudios y diseños fase III construcción del proyecto Túnel del Toyo y sus vías de acceso en fase de preconstrucción, Capítulo 4. Geología. Medellín. 2016.
- [34] Arango, Y., Dinámica del clima y la vegetación de los últimos 200 años del Holoceno en el humedal La Bramadora (Antioquia-Colombia). Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2016.
- [35] Álvarez, E. y Gonzáles, H., Geología y geoquímica del Cuadrángulo I-7(Urrao). Ingeominas. Informe 1761, Medellín, 347 P., 1978.
- [36] Hall, R., Álvarez, J. and Rico, II., Geología de los departamentos de Antioquia y Caldas (Sub-zona IIA). Bol. Geol. INGEOMINAS, Bogotá, 20(1), 85 P, 1972.
- [37] González, H, Restrepo, J., Toussaint, J. and Linares, E., Edad radiométrica K/Ar del Batolito de Sabanalarga. U. Nal., Publ. Esp. Geol., 8, pp.1-4, 1978.
- [38] Sarkar, S., Roy, A.K. and Raha, P., Deterministic approach for susceptibility assessment of shallow debris slide in the Darjeeling Himalayas, India. Catena, 142, pp. 36-46. 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2016.02.009.
- [39] Coast, N., Water, R., Control, Q., Rosa, S., Weppner, E., Associates, P.W. and Geoscience, H., Slope stability modeling and landslide hazard in freshwater creek and ryan slough Humboldt County , California, July 2008. Humboldt County, 2008.
- [40] Hussin, H.Y., Zumpano, V., Reichenbach, P., Sterlacchini, S., Micu, M., van Westen, C. and Bălteanu, D., Different landslide sampling strategies in a grid-based bi-variate statistical susceptibility model. Geomorphology, 253, pp. 508-523. 2016. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.10.030
- [41] Páez, E. y Barreiro, H., Analisis del regimen de lluvias de la estacion experimental "El Espinal" centro Cotove. Tesis de grado, Facultad de Agronomia, Universidad Nacional de Colombia, Medellin, Colombia, 1989.
- [42] Santangelo, M., Marchesini, I., Cardinali, M., Fiorucci, F., Rossi, M., Bucci, F. and Guzzetti, F., A method for the assessment of the influence of bedding on landslide abundance and types. Landslides, 12(2), pp. 295-309. 2015. DOI: 10.1007/s10346-014-0485-x
- [43] Xie, M., Esaki, T. and Zhou, G., GIS-based probabilistic mapping of landslide hazard using a three-dimensional deterministic model. Natural Hazards, 33(2), pp. 265-282. 2004. DOI: 10.1023/B:NHAZ.0000037036.01850.0d
- [44] Hanley, J.A. and McNeil, B.J., The meaning and use of the area under a receive operating characteristic (ROC) CURVE. Radiology, 143(1), pp. 29-36, 1982.
- [45] Ozdemir, A. and Altural, T., A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan mountains, SW Turkey. Journal of Asian Earth Sciences, 64, pp. 180-197, 2013. DOI: 10.1016/j.jseaes.2012.12.014
- [46] Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M. and Galli, M., Estimating the quality of landslide susceptibility models. Geomorphology, 81(1-2), pp. 166-184, 2006. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.04.007
- [47] van Westen, C.J., van Asch, T.W.J. and Soeters, R., Landslide hazard and risk zonation - Why is it still so difficult?, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65(2), pp. 167-184, 2006. DOI: 10.1007/s10064-005-0023-0
- [48] Varnes, D.J., Landslide hazard zonation: A review of principles and practice. Natural Hazards, 1984. DOI: 10.1016/B978-008043013-3/50018-3
- [49] Griffiths, J.S., Mather, A.E. and Hart, A.B., Landslide susceptibility in the Rio Aguas catchment SE Spain. Quart. J Engng. Geol., 35, pp. 9-17, 2002.
- [50] Brunsten, D., The fifth Glossop Lecture. Geomorphological roulette for engineers and planners: Some insights into a old game. Quart. J. of Engng. Geol. 35, pp. 101-142, 2002.
- [51] Chica, A., Apuntes de geotecnia: Curso de geotecnia y practicas geotecnicas. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellin, pp. 1-120, 1989.
- [52] Area Metropolitana del Valle de Aburra (AMVA), Universidad EAFIT, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellin y Universidad de Medellin. Procedimientos tecnicos y metodologicos de los estudios para intervenciones en zonas de ladera en el Valle de Aburra. Medellin, pp. 1-88, 2012.

**J. Jiménez**, es Ing. Geólogo de la Universidad Nacional Colombia, sede Medellín, actualmente se desempeña como consultora independiente en temas de gestión del riesgo.  
orcid: 0000-0003-1108-410X.

**E. Aristizábal**, es Ing. Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Esp. en Riesgos Geológicos y asociados con el clima de la Universidad de Ginebra (Suiza), MSc. en Ingeniería y Ciencias de la Universidad de Shimane (Japón) y Dr. en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Se desempeña como docente del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.  
Orcid: 0000-0002-2648-2197.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de  
Recursos Hidráulicos

Especialización en Gestión Ambiental

Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos

Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo

Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: acma\_med@unal.edu.co  
Teléfono: (57-4) 425 5105

# Analysis of settlements in landfills La Pradera and Curva de Rodas

Jorge Andrés Yepes-García & Manuel Roberto Villarraga-Herrera

*Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín, Colombia, jayepes@unal.edu.co, manuel.villarraga@inteinsa.com*

Received: December 6<sup>th</sup>, 2016. Received in revised form: July 11<sup>th</sup>, 2017. Accepted: August 25<sup>th</sup>, 2017.

## Abstract

The records of piezometers, survey control points, leachate flow rates and weather stations installed in landfills Curva de Rodas and La Pradera were analyzed. The records of the survey control points were used to calibrate two models extracted from the literature developed to reproduce the behavior of settlements in Municipal Solid Waste (MSW) over time (Exponential model [10] and Marques model [15]). Then the Marques model was selected [15], since it incorporates primary and secondary settlements, both mechanical and biodegradation. For the parameters of this model fitting curves were generated as a function of the height of the column of MSW, being able to estimate settlement curves that approached the registers of the control points, so that the adjustment curves could be applied in landfills of similar characteristics.

**Keywords:** Landfills; settlements; Municipal Solid Waste (MSW).

# Análisis de los asentamientos en los rellenos sanitarios La Pradera y Curva de Rodas

## Resumen

Se analizaron los registros de los piezómetros, puntos de control topográfico, aforo de caudales de lixiviados y estaciones meteorológicas instalados en los rellenos sanitarios Curva de Rodas y La Pradera. Se usaron las lecturas de los puntos de control topográfico para calibrar dos modelos extraídos de la literatura desarrollados para reproducir el comportamiento de los asentamientos en los residuos sólidos urbanos (RSU) a través del tiempo (modelo Exponencial [10] y modelo de Marques [15]). Luego se seleccionó el modelo de Marques [15], pues conceptualmente incorpora los asentamientos primarios y secundarios, tanto mecánicos como por descomposición. Para los parámetros de este modelo se generaron curvas de ajuste en función de la altura de la columna de los RSU, logrando estimar curvas de asentamiento que se aproximaron a los registros de los puntos de control, por lo cual las curvas de ajuste podrían ser aplicadas en rellenos de características similares.

**Palabras clave:** Rellenos sanitarios; asentamientos; Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

## 1. Introducción

Los residuos sólidos urbanos (RSU) dispuestos en un relleno sanitario, experimentan grandes asentamientos los cuales se pueden prolongar por años. Son varias las investigaciones que se han realizado con el propósito de entender los factores y los mecanismos que inciden en esos asentamientos, y también son diversos los modelos propuestos para tratar de reproducir su comportamiento a lo largo del tiempo. En general se observa un consenso en atribuir las deformaciones a una sumatoria de los

asentamientos instantáneos, asentamientos mecánicos, y asentamientos por descomposición de la materia orgánica.

En los años 60 Merz & Stone (1962) observaron que además de los fuertes asentamientos iniciales, se daban otros asentamientos a largo plazo en los RSU dispuestos en los rellenos sanitarios, lo cual atribuyeron a la biodegradación [1]. De esta manera iniciaron una línea de investigación, dentro de la cual [2] determinó que el contenido de materia orgánica era el factor determinante en la existencia y magnitud de esos asentamientos en el tiempo. Dichas investigaciones sirvieron de base para que en la década de los 90 autores como [3,4], entre otros, hablaran de asentamientos a corto plazo que resultan de la respuesta

**How to cite:** Yepes-García, J.A. and Villarraga-Herrera, M.R., Análisis de los asentamientos en los rellenos sanitarios La Pradera y Curva de Rodas Boletín de Ciencias de la Tierra, 43, pp. 24-33, Enero, 2018.

instantánea a la aplicación de una carga, y a largo plazo como resultado de la descomposición de los residuos.

Para describir los asentamientos a corto plazo, diversos autores han trabajado en la elaboración y/o calibración de modelos como el Índice de Compresión [2]; el Módulo de Compresión Primaria [5]; el Módulo Unidimensional [6,7]; y la combinación del Módulo de Compresión Primaria con el Módulo Unidimensional [7-9]. Los autores reportan unas buenas aproximaciones de estos modelos frente a mediciones en el laboratorio.

Por otro lado, el estudio de los asentamientos a largo plazo o secundarios ha llevado a la adopción de modelos como el Logarítmico [2]; Exponencial [10]; Power Creep [4]; e Hiperbólico [11]. Estos modelos difieren significativamente en la estimación del asentamiento último [1]; en ese sentido se ha logrado identificar que los asentamientos secundarios se pueden subdividir en dos etapas, la primera asociada a procesos mecánicos y la segunda como resultado de la biodegradación [1,3].

Finalmente se tienen modelos compuestos por la acción de tres mecanismos: respuesta mecánica inmediata, deformación creep y biodegradación. Dentro de las propuestas sobresalen las de Edgers et al. (1992), Park & Lee (1997, 2002), Marques, Filz, & Vilar (2003), Hossain & Gabr (2005) y Chen et al. (2010).

Vale la pena señalar de acuerdo con [18] los asentamientos en los RSU producto de la consolidación ha sido debatido por diversos autores, pues los residuos generalmente no se encuentran saturados y en caso de estarlo, poseen una permeabilidad alta que impiden la continuidad del estado de saturación [1].

Sin embargo, como se menciona en [19], la experiencia con los rellenos en la ciudad de Medellín muestra que estas dos hipótesis no son completamente válidas. Por una parte, debido al alto contenido de agua de los RSU provenientes de la ciudad, que para cargas aplicadas iguales o superiores a 100 kPa se saturan; y por otra parte los residuos locales no son tan permeables debido a su alta densidad y a su alto contenido de material orgánico y de plásticos. Es decir que a diferencia de los países desarrollados en los cuales se han elaborado gran parte de las investigaciones previas, si ocurre un proceso lento de consolidación, y una parte importante de los asentamientos en los RSU obedece a dicho fenómeno.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Modelos evaluados

Se seleccionaron dos de los modelos más citados para realizar el ajuste de las curvas de asentamiento a partir de los registros de los puntos de control topográfico y los piezómetros: modelo Exponencial [10] y modelo de Marques et al. [15].

#### 2.1.1. Modelo Exponencial [10]

Este modelo también llamado modelo Reológico, fue desarrollado por Gibson & Lo y aplicado en residuos sólidos

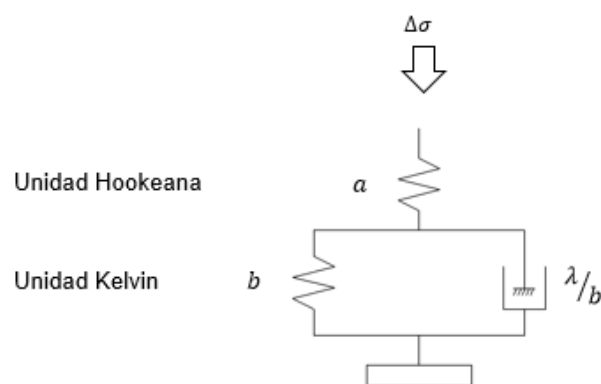


Figura 1. Modelo Reológico.  
Fuente: Adaptado de [21]

por autores como [4,20,21]. Se compone de un elemento de Hook conectado en serie con una unidad Kelvin, representa por dos elementos en paralelo: uno resistente con constante de proporcionalidad  $b$ , y otro con amortiguamiento Newtoniano de fluidez lineal  $\lambda/b$  (ver Fig. 1).

La aplicación de una carga vertical o el propio peso de los residuos, comprimen inmediatamente el primer elemento de Hook de manera análoga a la compresión primaria en suelos. En la Unidad Kelvin el amortiguador retrasa la transferencia de la carga al otro elemento de Hook, pero después de un tiempo, toda la carga será soportada únicamente por los dos elementos de Hook.

Aplicando la ecuación de equilibrio al sistema de la Fig. 1, se llega a la ec. (1)

$$s(t) = H \cdot \Delta\sigma \cdot \left[ a + b \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\lambda}{b} t\right) \right] \right] \quad (1)$$

donde  $s(t)$  es el asentamiento para un tiempo dado [m],  $\Delta\sigma$  es el incremento en el esfuerzo vertical [kPa],  $a$  es el parámetro de compresión primaria [kPa<sup>-1</sup>],  $b$  es el parámetro de compresión secundaria [kPa<sup>-1</sup>],  $\lambda$  es la tasa de compresión secundaria [día<sup>-1</sup>],  $H$  es la altura inicial de la capa de residuos [m].

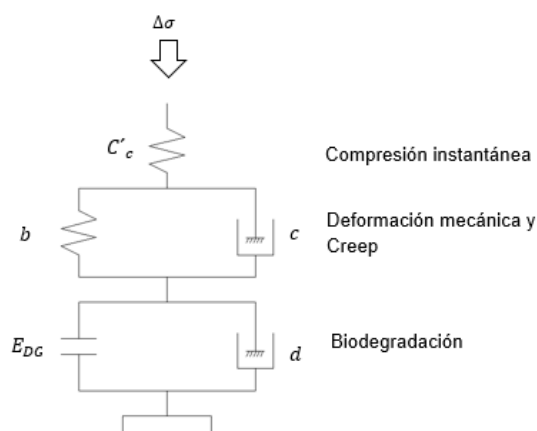


Figura 2. Modelo de asentamientos.  
Fuente: Adaptado de [15]

### 2.1.2. Modelo de Marques [15]

Se trata del primer modelo que incorpora tres mecanismos de asentamiento, representados por tres modelos reológicos conectados en serie como se observa en la Fig. 2. Combina los modelos de Gibson & Lo [10] y H.I. Park & Lee [13].

La compresión instantánea y la deformación mecánica por cargas aplicadas o el peso propio, son representados como en el modelo Exponencial. La descomposición biológica se interpreta con un elemento de compresión finita conectado en paralelo con uno amortiguado Newtoniano de fluidez lineal. La ecu. (2) describe el sistema,

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} = C'_c \cdot \log \left( \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0} \right) + \Delta \sigma \cdot b (1 - e^{-c \cdot t'}) + E_{DG} \cdot (1 - e^{-d \cdot t''}) \quad (2)$$

donde  $\varepsilon$  es la deformación [%],  $H$  es la altura de la capa de residuos [m],  $\Delta H$  es el cambio de altura de la capa de residuos [m],  $C'_c$  es el módulo de compresión primaria,  $\sigma_0$  es el esfuerzo vertical inicial [kPa],  $\Delta \sigma$  es el cambio en el esfuerzo vertical [kPa],  $b$  es el coeficiente de compresión secundaria creep [kPa<sup>-1</sup>],  $c$  es la tasa de compresión secundaria creep [día<sup>-1</sup>],  $E_{DG}$  representa el potencial de deformación total debida a la biodegradación,  $d$  es la tasa de biodegradación [día<sup>-1</sup>],  $t''$  es el tiempo transcurrido desde la disposición de los residuos [día] y  $t'$  es el tiempo transcurrido desde la aplicación del incremento de carga [día].

### 2.2. Curva teórica de compresibilidad

La Fig. 3 corresponde a la Curva teórica de compresibilidad para los RSU en rellenos sanitarios, propuesta por Grisolia & Napoleoni en 1995 y adaptada por [22] para representar la incidencia de cada uno de los mecanismos de asentamiento en países no desarrollados como Colombia. Se identifican cinco fases en el proceso de asentamiento:

*Fase I: inmediatamente dispuestos los residuos, ocurre la deformación inicial y reducción de la macroporosidad, inducida por el peso propio de los residuos y/o las cargas impuestas.*

*Fase II: se comprimen los materiales altamente deformables y se dislocan algunos materiales inertes, lo que se refleja en una acentuada reducción del volumen.*

*Fase III: se presentan los asentamientos secundarios producto de deformaciones tipo "Creep" en los residuos por acción de cargas constantes, además de deformaciones por biodegradación de los residuos orgánicos.*

*Fase IV: la tasa de los asentamientos secundarios disminuye y eventualmente concluyen.*

*Fase V: finalmente se tiene una deformación residual que puede prolongarse en el tiempo debido a la compresión de residuos no orgánicos.*

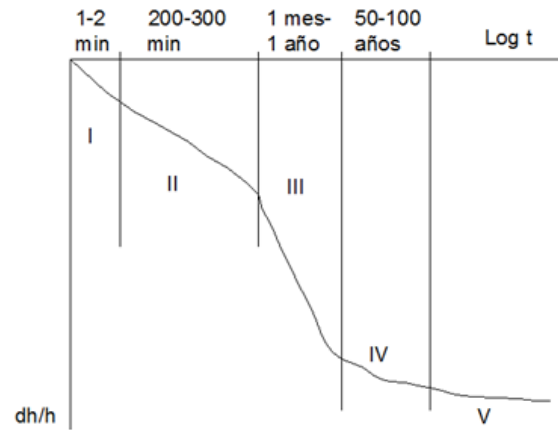


Figura 3. Curva teórica de compresibilidad Grisolia y Napoleoni (1995)  
Fuente: Adaptada de [22]

### 2.3. Rellenos sanitarios evaluados

El relleno sanitario Curva de Rodas entró en operación en 1984, siendo el primero en la ciudad de Medellín. Nace de la necesidad de controlar el inadecuado manejo de los residuos sólidos que desde los años 70 se venía realizando en la rivera del río Medellín a la altura del sector de Moravia, lo cual había derivado en una problemática ambiental y social. Se ubica en el kilómetro 5 de la autopista Medellín – Bogotá, ocupando un área de 62 hectáreas sobre la cuenca de la quebrada Rodas, en jurisdicción de los municipios de Bello y Copacabana. Se clausuró en octubre de 2002, luego de disponer 7.500.000 toneladas de residuos sólidos [23].

En reemplazo del relleno sanitario Curva de Rodas, el municipio de Medellín encontró como solución para la disposición final de los RSU producidos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y municipios aledaños, el relleno sanitario La Pradera. Ubicado aproximadamente a 55 km en la vía Medellín – Puerto Berrio, en jurisdicción del municipio de Don Matías sobre la margen izquierda del río Medellín, a una altitud promedio de 1.100 m.s.n.m. [24]. En este relleno sanitario se configuran distintos Vasos, al día de hoy se encuentran fuera de operación los vasos La Carrilera y La Música, y actualmente está en operación el vaso Altair II.

#### 2.3.1. Sistema de instrumentación

Ambos rellenos sanitarios cuentan con un robusto sistema de instrumentación, del cual se consideraron para el presente análisis los siguientes elementos: a) los puntos de control topográfico los cuales registran los asentamientos en superficie de los RSU; b) los piezómetros de hilo vibrátil que en planta se encuentran cerca de los puntos de control topográfico, que registran las presiones de poros al interior de los RSU y las celdas de asentamiento; c) los caudales de lixiviados generados en cada relleno; y d) las estaciones meteorológicas las cuales hacen el seguimiento de las variables ambientales, en cada relleno se cuenta con una. En las Figs. 4 y 5 se muestra la ubicación en planta de los puntos de control topográfico y piezómetros considerados.







Tabla 1.  
Caracterización de los residuos sólidos urbanos en distintas ciudades

Tipo	Estados Unidos* [25]	Belo Horizonte – Brasil [21]	Sao Paulo – Brasil [15]	Medellín
Orgánicos	31.2	62.0	56.3	61.2
Plásticos	2.4	11.0	12.6	12.0
Papel y cartón	36.6	10.0	12.4	8.3
Textiles	1.7	4.0**	3.5	4.8
Caucho	2.5	1.0	4.2**	2.1
Vidrio	10.5	3.0	1.3	2.4
Metales	11.4	2.0	4.2	1.8
Madera	3.1	-	-	1.9
Otros	0.6	7.0	4.4	5.6

\*Para la década de los 70s

\*\*y madera

Fuente: los autores.

En el trabajo de El-Fadel [20] no se hace mención a la composición de los *RSU* analizados, pero si menciona que la investigación se hizo sobre el *Relleno Sanitario de Prueba Mountain View* (MVCLP) construido en San José – California durante los años 70, de manera que se consideró la composición de los *RSU* en Estados Unidos durante la década de los 70 según la *Agencia de Control Ambiental* [25]. También se muestra la composición utilizada por Simões & Catapreta [21] durante su investigación en celdas controladas en un relleno sanitario de la ciudad de Belo Horizonte – Brasil, y también la caracterización empleada por Marques [15] para la formulación de su modelo. Finalmente se muestra el promedio obtenido para la ciudad de Medellín y que se asocia a la presente investigación.

Se observa que los *RSU* estudiados en las ciudades de Belo Horizonte, Sao Paulo y Medellín duplican en su componente orgánica a los *RSU* en Estados Unidos durante la década de los 70.

### 3. Resultados

Los modelos se ajustaron con ayuda de la herramienta Solver de Excel, empleando el Método del Gradiente Reducido Generalizado o “GRG nonlinear” [26] y tomando como valores iniciales los valores hallados en [21], ya que se tratan de parámetros calibrados para un relleno sanitario ubicado en una ciudad de clima tropical.

El análisis de los asentamientos se hizo para toda la columna de residuos bajo cada punto de control, por la acción de las cargas debidas al peso propio y teniendo en cuenta la disipación de las presiones de poros medidas con los piezómetros cercanos a cada punto de control.

#### 3.1. Modelo Exponencial [10] y modelo de Marques [15]

Los resultados del ajuste de los modelos para los registros de cada platina de control de muestran en la Tabla 2 a la Tabla 3. Se observa que como resultado del ajuste se despreciaron los parámetros de compresión primaria  $a$  y el módulo de compresión primaria  $C'_c$ , pues los asentamientos primarios o de la Fase I ocurren en pocos días y sus magnitudes son bajas

Tabla 2.  
Valores promedio para los parámetros del modelo Exponencial

Autor	Parámetro					
	$b$ (1/kPa)			$\lambda/b$ (1/día)		
El-Fadel et al. (1999)	2.0E-03	-	1.6E-02	1.2E-04	-	9.0E-04
Simões & Catapreta (2013)	9.4E-03	-	3.1E-02	1.5E-03	-	1.2E-02
Curva de Rodas	8.6E-04	-	2.1E-02	1.1E-03	-	1.9E-03
La Carrilera	4.5E-03	-	1.4E-01	1.3E-03	-	2.9E-03
La Música	6.1E-03	-	6.1E-02	8.8E-04	-	2.4E-03

Fuente: los autores.

comparadas con los asentamientos secundarios, además los registros inician meses después de que los *RSU* fueron dispuestos, por lo cual ya finalizaron los asentamientos primarios.

Los valores máximos y mínimos para los parámetros del modelo Exponencial obtenidos para cada Vaso se muestran en la Tabla 2, junto con los valores obtenidos por otros dos autores.

Los rangos de valores para el parámetro de compresión secundaria  $b$ , son similares en los rellenos de la ciudad de Medellín con relación a los valores encontrados en [20,21]. Para interpretar esto se debe tener en cuenta dos consideraciones: en primer lugar, el componente orgánico de los *RSU* considerados en el presente estudio y en la investigación de Simões & Catapreta [21] es del 60%, duplicando al de los *RSU* estudiados por El-Fadel [20]; por otro lado el trabajo de El-Fadel se desarrolló recirculando lixiviado como una forma de acelerar el proceso de descomposición de los residuos. Lo anterior parece indicar que factores como el clima en las regiones tropicales tienen un impacto similar al de la recirculación de lixiviados en climas templados, sobre la compresibilidad secundaria de los *RSU*.

El parámetro que indica la velocidad a la que ocurren los asentamientos asentamiento ( $\lambda/b$ ) es superior en un orden de magnitud con respecto a los resultados obtenidos por El-Fadel en Estados Unidos, debido al efecto de la composición de los residuos y a las condiciones climáticas que potencian la rápida descomposición de los mismos.

Para el Modelo de Marques en la Tabla 3 se observa que las tasas de compresión secundaria  $c$  y el coeficiente de compresión secundaria  $b$ , toman valores dentro rangos similares en los cinco casos presentados, en los cuales los residuos tienen un componente orgánico en proporciones similares (entre 55 – 65%). Por lo anterior, las variaciones en el potencial de deformación debido a la biodegradación  $E_{DG}$  y la tasa  $d$  a la que ocurren las deformaciones por biodegradación, se deben tanto a factores internos de cada relleno como la humedad, la temperatura y el pH, como a factores externos como el clima y las condiciones de drenaje.

Tabla 3.

Parámetros promedio para el Modelo de Marques

Fuente	Parámetro									
	$b$ (1/kPa)		$c$ (1/día)		$E_{DG}$		$d$ (1/día)			
Marques et al. (2003)	2.9E-04	-	7.3E-04	9.7E-04	-	1.1E-03	1.3E-01	-	2.1E-01	9.5E-04 - 1.1E-03
Simões & Catapreta (2013)	2.7E-02	-	7.0E-02	2.0E-04	-	4.0E-04	6.9E-02	-	9.5E-02	2.1E-02 - 1.5E-02
Curva de Rodas	1.1E-04	-	2.8E-02	2.6E-04	-	4.3E-03	1.5E-02	-	9.7E-02	3.3E-04 - 1.0E-02
La Carrilera	7.8E-04	-	2.0E-02	1.7E-04	-	2.1E-02	3.0E-02	-	3.6E-01	9.0E-04 - 4.9E-03
La Música	2.8E-03	-	5.4E-02	7.4E-04	-	4.3E-03	5.1E-02	-	1.5E-01	2.6E-04 - 7.7E-04

Fuente: los autores.

### 3.2. Curvas de ajuste para los parámetros del modelo de Marques

Si bien los dos modelos presentaron una aproximación adecuada o satisfactoria del asentamiento total, lo cual puede ser interpretado como una validez de las relaciones asumidas entre las variables de tiempo – deformación, se refinó el modelo de Marques, pues conceptualmente incorpora los asentamientos primarios y secundarios, tanto mecánicos como por descomposición de los residuos orgánicos, y en los casos analizados para los *RSU* de la ciudad de Medellín incluye incluso los asentamientos por consolidación, otorgando herramientas para el análisis de los factores que inciden en los asentamientos, a través de como varían los parámetros del modelo en cada uno de los dos rellenos considerados.

A partir de los resultados del ajuste y considerando todos las platinas de control en ambos rellenos sanitarios, se obtuvieron los siguientes valores promedios para los parámetros del modelo:  $c = 0.001490$  1/día,  $b = 0.006395$  1/kPa,  $E_{DG} = 0.081817$  y  $d = 0.002813$  1/día. El parámetro  $E_{DG}$  representa el potencial de deformación total debido a la biodegradación, así que está asociado con el contenido de materia orgánica. Como los *RSU* tienen el mismo origen espacial y poca variación temporal como se observó en la numeral 2.4, dicho parámetro se supuso igual para los dos rellenos sanitarios analizados. Se realizó entonces de nuevo el ajuste de las curvas, pero fijando el parámetro  $E_{DG}$  en un valor de 0.081817, pero dicho ajuste se hizo sólo para las platinas de Curva de Rodas y La Carrilera pues tienen registros a lo largo de un periodo de tiempo similar (alrededor de 3500 días).

El objetivo entonces era encontrar una relación entre los parámetros del modelo y la altura inicial de la columna de residuos (ver Fig. 7), lo cual se logró para Curva de Rodas utilizando las platinas PT-2R, PT-3R, PT-12R, PT-14R y PT-15R; y para Carrilera se empleando las platinas PT-3C, PT-11C, PT-12C, PT-13C, PT-14C, PT-15C, PT-19C y PT-22C. Se omitieron las platinas PT-13R, PT-4C, PT-5C, PT-6C y PT-16C, pues al incluirlas no se obtenían coeficientes de correlación satisfactorios ni se lograba definir una relación entre las variables. Más adelante al momento de validar las curvas de ajuste, se explica el por qué dichas platinas no se acoplan al ajuste propuesto.

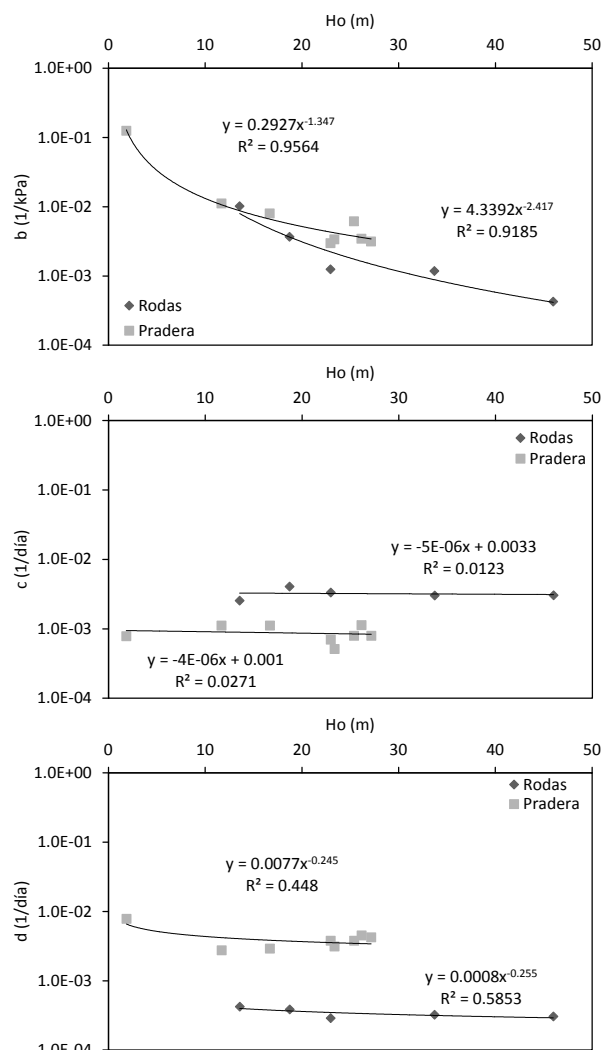


Figura 7. Relación entre los parámetros del modelo de Marques y la altura de la columna de residuos.

Fuente: Los autores

El parámetro  $b$  que es el coeficiente de compresión secundaria mecánica tiene un buen ajuste a un modelo potencial con  $R^2$  superiores a 0.92. Los valores son mayores en Pradera que en Curva de Rodas, debido a que en el primero las platinas se instalaron cuando los residuos no tenían más

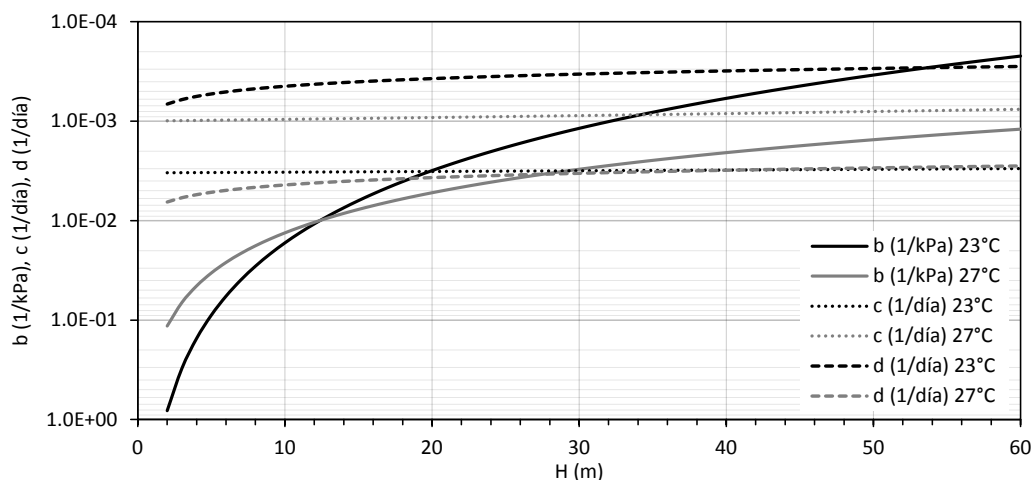


Figura 8. Curvas de ajuste para determinar el valor de los parámetros del modelo de Marques, aplicado a rellenos sanitarios con contenido orgánico del 60%  
Fuente: Los autores

de un año de antigüedad, mientras que en Curva de Rodas las platinas se instalaron sobre residuos antiguos que pueden tener hasta 20 años de haber sido dispuestos, motivo por el cual ya habrían sufrido una mayor compresión mecánica.

La tasa de compresión secundaria representada mediante el parámetro  $c$ , es mayor en Curva de Rodas, lo cual se podría explicar si se considera que en este relleno se podría haber alcanzado una mayor compactación durante la disposición de los residuos, dada la configuración que permitiría una mejor maniobrabilidad de la maquinaria, en comparación con La Carrilera donde el área de disposición era más pequeña y de mayor pendiente. Además, el seguimiento en Curva de Rodas se inició cuando los residuos ya habían experimentado asentamientos, mientras que en La Carrilera se hizo desde etapas tempranas, mostrando las distintas Fases de asentamiento. Es decir, como en Curva de Rodas los residuos se encuentran más compactos y ya han experimentado asentamientos preliminares, la compresión secundaria ocurre de manera más rápida si se compara con La Carrilera.

Se partió de la hipótesis que el potencial de deformación total debido a la biodegradación es el mismo en ambos rellenos, pero la velocidad a la que ocurre la biodegradación representada con el parámetro  $d$  parece tener un comportamiento potencial con la altura de los residuos, siendo mayor en La Carrilera que en Curva de Rodas. De los registros de las estaciones meteorológicas se determinó que en La Carrilera se presentan condiciones de alta humedad y altas precipitaciones, así como una mayor temperatura promedio frente a la que se da en Curva de Rodas. Estos factores aceleran los procesos de biodegradación del componente orgánico de los residuos y esa aceleración es la que se hace evidente con el parámetro  $d$ .

Finalmente, con las correlaciones anteriores, es posible generar las curvas de la Fig. 8 que permiten determinar el valor de los parámetros del modelo de Marques para rellenos sanitarios que se encuentran en lugares con temperaturas promedio de 23°C y 27°C, y con contenido orgánico del 60%.

### 3.3. Validación de las curvas de ajuste

Las *curvas de ajuste* se aplicaron a todas las platinas analizadas y los resultados se puede observar en la Fig. 9.

En las platinas PT-13R y PT-15R (columnas de residuos con alturas iniciales de 23m y 25m) de Curva de Rodas los asentamientos se sobreestiman en hasta un metro. En La Carrilera se sobreestima la duración de la Fase III en las platinas PT-4C, PT-5C, PT-6C y PT-16C (columnas de residuos con alturas iniciales entre 10m – 23m) lo que se traduce en sobreestimaciones de hasta 1.50m en los asentamientos, lo contrario sucede en la platina PT-22C (columna de residuos con 25m de altura inicial), donde los asentamientos se subestiman en hasta 1.5m. Finalmente en La Música donde los registros no alcanzan un periodo de 1500 días, se subestima la magnitud de los asentamientos de la Fase III en las platinas PT-15M y PT-16M (columnas de residuos con alturas iniciales de 22m y 30m).

Las platinas PT-4C, PT-5C y PT-6C se caracterizan por estar cerca del dique de contención de La Carrilera, una zona donde el sistema de evacuación de lixiviados es más robusto posibilitando una rápida consolidación de los residuos a través de la rápida evacuación del contenido inicial de líquidos de los RSU, y también un drenaje más eficiente de los lixiviados generados durante las etapas de descomposición, en comparación con las zonas donde se ubican los demás puntos de control. Estos dos aspectos aceleran el desarrollo de la Fase III en la curva de asentamiento (Grisolia & Napoleoni, 1995; adaptada por [22]), por lo cual como se mencionó anteriormente la curva de ajuste sobreestima esta duración.

El mismo comportamiento anterior se puede asociar a las platinas PT-16C en La Carrilera y PT-13R y PT-15R en Curva de Rodas, las cuales no están instaladas en un sector cercano al dique sino hacia los extremos laterales de los respectivos vasos, por lo que se podría pensar que se encuentran ubicadas sobre residuos que están muy cerca a la red de filtros que evacuan los lixiviados.

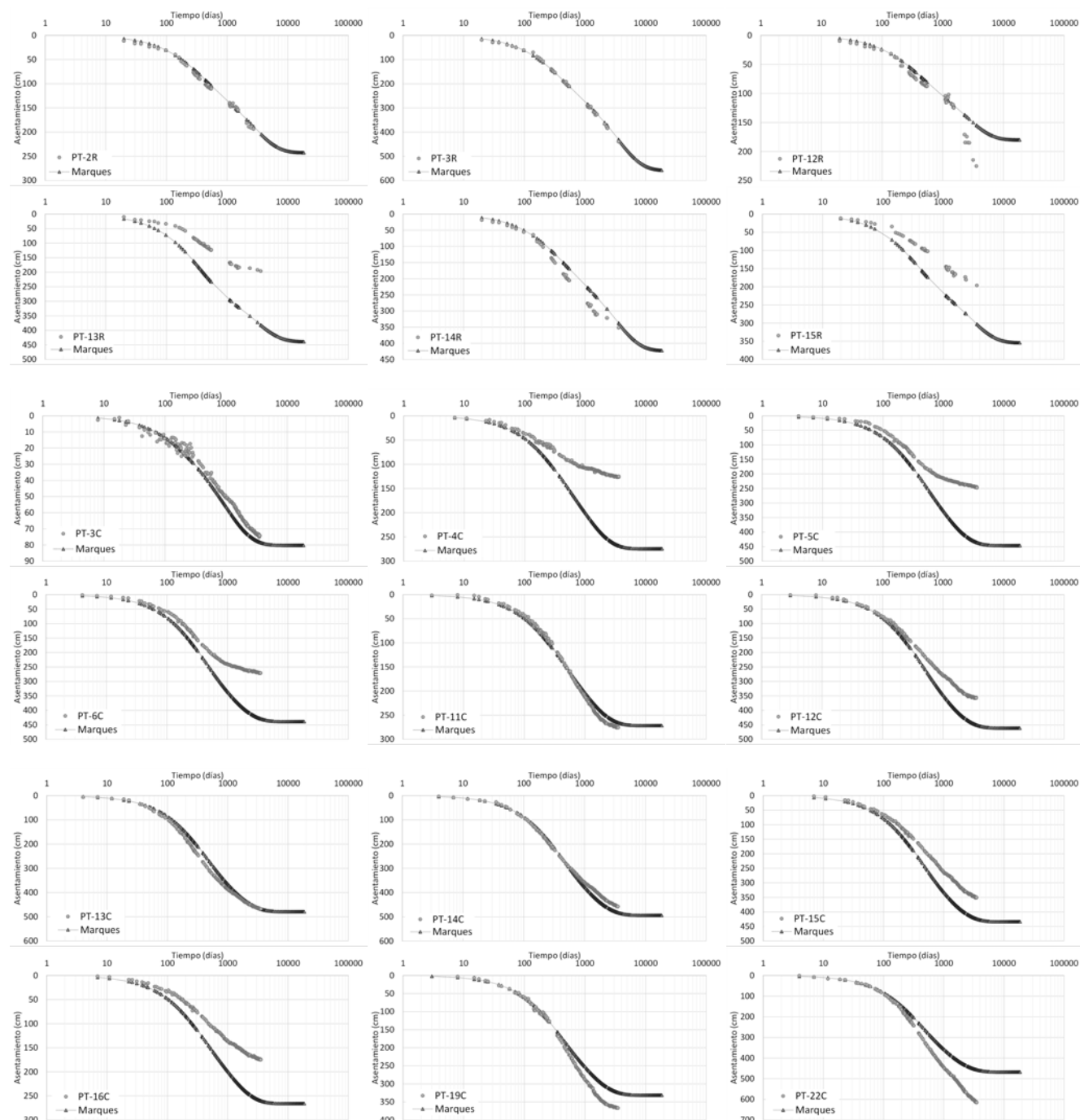


Figura 9. Asentamientos estimados con las curvas de ajuste en el relleno sanitario Curva de Rodas y La Pradera.

Fuente: Los autores

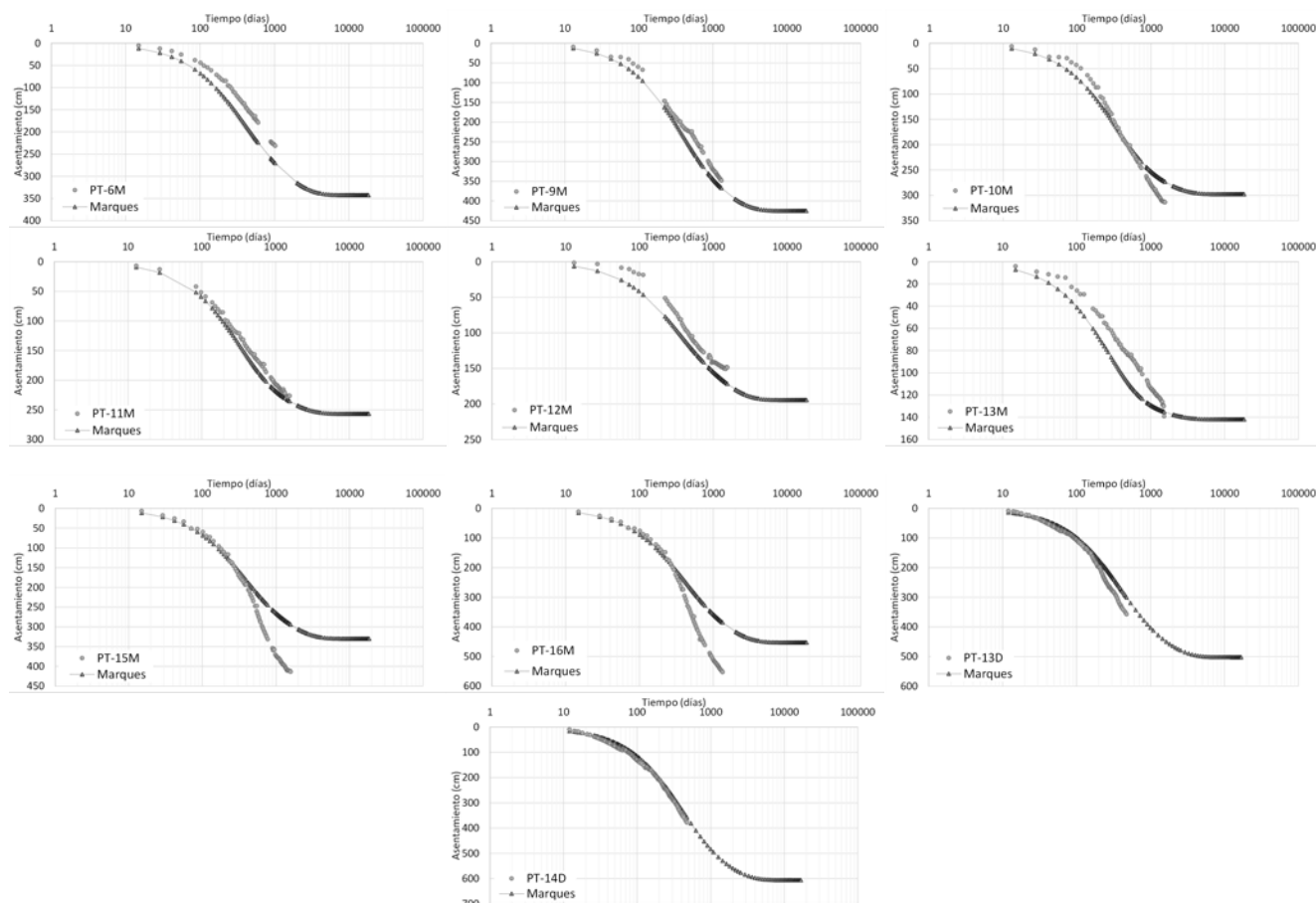


Figura 9 (continuación). Asentamientos estimados con las *curvas de ajuste* en el relleno sanitario Curva de Rodas y La Pradera.  
Fuente: Los autores

A pesar de lo difícil que resulta representar todos los factores y la heterogeneidad de las distintas zonas en los rellenos sanitarios, con las curvas de ajuste para determinar el valor de los parámetros del modelo, se logran estimar curvas de asentamiento que tienen una buena aproximación a las curvas elaboradas a partir de los registros de los puntos de control, en la mayoría de los casos.

#### 4. Conclusiones

Los parámetros ajustados del modelo Exponencial [10] y del modelo de Marques [15], coinciden en señalar que en Pradera los *RSU* presentan mayor deformabilidad. Lo anterior coincide con las mayores condiciones de humedad y precipitación que presenta La Pradera, lo cual provoca una descomposición más rápida de la materia orgánica. También influye el grado de compactación inicial y la edad de los residuos, pues en Curva de Rodas las platinas de control se instalaron tiempo después de dispuestos todos los residuos, de manera que ya habían transcurrido parte de los asentamientos, mientras que en La Pradera la instalación se da en un menor tiempo.

Los resultados del ajuste anulan el parámetro de compresión primaria  $a$  y el módulo de compresión primaria

$C'_c$ , pues los asentamientos primarios o de la Fase I ocurren en pocos días y sus magnitudes son bajas comparadas con los asentamientos secundarios. Sumado a lo anterior los registros inician meses después de que los *RSU* fueron dispuestos, por lo cual ya finalizaron los asentamientos primarios.

De los dos modelos se seleccionó el de Marques [15], porque es el que más factores y mecanismos de asentamiento recoge debido a que en la etapa de asentamientos secundarios, considerando tanto las deformaciones generadas por efecto de la carga mecánica, como las ocasionadas por la pérdida de volumen producto de la descomposición de la materia orgánica y la expulsión de lixiviados.

Partiendo de la hipótesis de que el potencial de deformación total debido a la biodegradación  $E_{DG}$  es el mismo para los dos rellenos, pues los residuos tienen el mismo origen y la misma fracción de material orgánico, se encontró que:

- el parámetro de compresión secundaria  $b$  disminuye de manera potencial a medida que disminuye la altura de la columna inicial de los *RSU* y alcanza mayores valores en La Pradera;
- la tasa de compresión secundaria  $c$  es mayor en Curva de Rodas, debido a la compactación de los residuos y a los asentamientos previos al inicio del seguimiento;

- y la tasa de deformación por biodegradación parece que también disminuye potencialmente con el incremento de la altura inicial de la columna de residuos, además los valores en La Pradera son mayores.

El comportamiento del parámetro de compresión secundaria y la tasa de compresión secundaria, refleja que en La Carrilera la compactación de los residuos fue menor debido a áreas más restringidas y pendientes elevadas que afectaron la eficiencia de los equipos compactadores.

La variación de la tasa de biodegradación se relaciona con las condiciones de altas humedades y precipitaciones que se presentan en el relleno sanitario La Pradera, así como mayores temperaturas promedio en relación con el relleno sanitario Curva de Rodas. Estos factores ambientales aceleran los procesos de biodegradación tal como se refleja en el parámetro d.

A pesar de lo difícil que resulta representar todos los factores y la heterogeneidad de las distintas zonas en los rellenos sanitarios, con las curvas de ajuste para determinar el valor de los parámetros del modelo de Marques, se logran estimar curvas de asentamiento que tienen una buena aproximación a las curvas elaboradas a partir de los registros de los puntos de control, en buena parte de los casos.

## Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a las empresas Emvarias e Inteinsa, así como a Liliana Montoya Londoño, Jefa del área de Disposición Final en Emvarias.

## Referencias

- [1] McDougall, J., Settlement: The short and the long of it. International Symposium on Waste Mechanics, 2008, pp. 76-111.
- [2] Sowers, G.F., Settlement of waste disposal fills. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 12(4), pp. 57-58, 1975. DOI: 10.1016/0148-9062(75)90051-0
- [3] Bjarnagard, A. and Edgers, L., Settlement of municipal solid waste landfills. Thirteenth Annual Madison Waste Conference, Madison. WI, 1990, pp. 192-205.
- [4] Edil, W., Ranguette, T.B. and Wuellner, V.J., Settlement of municipal refuse. Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice: ASTM STP 1070, Am. Soc. Test. Mater., pp. 225-239, 1990.
- [5] Oweis I. and Khera, R., Geotechnology of waste management. 1990.
- [6] Watts, K.S. and Charles, J.A., Settlement of recently placed domestic refuse landfill. Instn. Civil Engineering, 88(6), pp. 971-993, 1990. DOI: 10.1680/iicep.1990.11613
- [7] Watts K.S. and Charles, J.A., Settlement characteristics of landfill wastes. Proc. ICE - Geotech. Eng., 137(4), pp. 225-233, 1999. DOI: 10.1680/geng.1999.137.4.225
- [8] Oweis, I.S. and Khera, R.P., Geotechnology of waste management. Boston, 1998.
- [9] Beaven, R.P., The hydrogeological and geotechnical properties of household waste in relation to sustainable landfilling. MSc. Thesis, Queen Mary and Westfield College University of London, London, [ONLINE]. 2000. Available at: <http://qmul.qmul.ac.uk/jspui/handle/123456789/1698>.
- [10] Gibson, R.E. and Lo, K.Y., A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression, 1961.
- [11] Ling, H.I., Leshchinsky, D., Mohri, Y. and Kawabata, T., Estimation of municipal solid waste landfill settlement. J. Geotech. Geoenvironmental Eng., 124(1), pp. 21-28, 1998. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:1(21)
- [12] Edgers, L., Noble, J. and Williams, E., A biologic model for long term settlement in landfills. Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology. pp. 177-184, 1992.
- [13] Park, H.I. and Lee, S., Long-term settlement behavior of landfills with refuse decomposition. J. solid waste Technol. Manag., 24(4), pp. 159-165, 1997.
- [14] Park, H.I. and Lee, S., Long-term settlement behaviour of MSW landfills with various fill ages. Waste Manag. Res., 20(3), pp. 259-268, 2002. DOI: 10.1177/0734242X0202000307
- [15] Marques, A.C.M., Filz, G.M. and Vilar, O.M., Composite compressibility model for municipal solid waste. J. Geotech. Geoenvironmental Eng., 129(4), pp. 372-378, 2003. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:4(372)
- [16] Hossain, M.S. and Gabr, M.A., Prediction of municipal solid waste landfill settlement with leachate recirculation. 2005.
- [17] Chen, Y., Ke, H., Fredlund, D.G., Zhan, L. and Xie, Y., Secondary compression of municipal solid wastes and a compression model for predicting settlement of municipal solid waste landfills. J. Geotech. Geoenvironmental Eng., 136(5), pp. 706-717, 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000273
- [18] Wall, D.K. and Zeiss, C., Municipal Landfill Biodegradation and Settlement. J. Environ. Eng., 121(3), pp. 214-224, 1995. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1995)121:3(214)
- [19] El-fadel, M., Shazbak, S., Saliby, E. and Leckie, J., Comparative assessment of settlement models for municipal solid waste landfill applications. Waste Manag. Res., 17(5), pp. 347-368, 1999. DOI: 10.1034/j.1399-3070.1999.00059.x
- [20] Simões, G.F. and Catapreta, C.A.A., Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil. Waste Manag., 33(2), pp. 420-430, 2013. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.10.001
- [21] Ferreira, G., Modelo para evaluación de asentamientos en rellenos sanitarios urbanos. MSc. Tesis, Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro, Brasil, 2000.
- [22] Empresas Varias de Medellín - E.S.P. Relleno sanitario Curva de Rodas, 2014. [en línea]. Disponible en: <http://www.eevvm.com.co/SitePages/curvaRodas.aspx>.
- [23] Empresas Varias de Medellín E.S.P. Relleno sanitario La Pradera, 2014. [en línea]. Disponible en: <http://www.eevvm.com.co/SitePages/pradera.aspx>.
- [24] U.S. EPA, Municipal Solid Waste in The United States 2011 Facts and Figures, 2001.
- [25] Lasdon, L.S., Wares, A.D., Jain, A. and Ratner, M.W., Desing and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear optimization, 1975.

**J.A. Yepes-García**, es Ing. Civil y MSc. en Ingeniería Geotécnica de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, se desempeña en la consultoría desde el año 2011, en las áreas de rellenos sanitarios, fundaciones y estabilidad de taludes. Interesado en investigaciones sobre rellenos sanitarios, suelos tropicales y dinámica de suelos.  
ORCID: 0000-0002-9137-0992.

**M.R. Villarraga-Herrera**, es Ing. Civil de la Universidad Nacional de Colombia, MSc. en Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, trabajó como director del Departamento de Geología y geotécnica de INTEGRAL S.A., actualmente se desempeña como Gerente de la empresa INTEINSA, profesor de la Universidad Nacional desde 1990 en cursos de pregrado y postgrado, Conferencista Nacional e Internacional, autor de artículos especializados, Ingeniero Consultor en estabilidad de taludes, fundaciones, dinámica de suelos, Ingeniería Sísmica, mecánica de rocas y presas.  
ORCID: 0000-0001-5541-7688.

## Comparative study among rock mass classification systems in a Porphyry deposit

Manuel Pérez <sup>a</sup>, Edwin García <sup>a</sup>, Carlos Vega <sup>a</sup>, Juan Montoya <sup>b</sup>, Pablo Noriega <sup>b</sup>, Jhon Alfonso <sup>b</sup> & Leonardo Cajicá <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. [msantiago.perez@udea.edu.co](mailto:msantiago.perez@udea.edu.co), [edwin.garcia@udea.edu.co](mailto:edwin.garcia@udea.edu.co), [carlosa.vega@udea.edu.co](mailto:carlosa.vega@udea.edu.co)

<sup>b</sup> Minera Quebradona Colombia, AngloGold Ashanti Colombia, Medellín, Colombia. [jdmontoya@anglogoldashanti.com](mailto:jdmontoya@anglogoldashanti.com), [plnoriega@anglogoldashanti.com](mailto:plnoriega@anglogoldashanti.com), [jalfonso@anglogoldashanti.com](mailto:jalfonso@anglogoldashanti.com), [lcajica@anglogoldashanti.com](mailto:lcajica@anglogoldashanti.com)

Received: August 23<sup>th</sup>, 2017. Received in revised form: November 23<sup>th</sup>, 2017. Accepted: December 07<sup>th</sup>, 2017

### Abstract

The Porphyry deposits are the largest mineral resources in the world. During the exploration phase, with the extraction of drilling cores, it is possible to obtain geotechnical information from the rock mass. This information allows the classification of rock mass by means of empirical classification systems such as Rock Mass Rating (RMR), Mining Rock Mass Rating (MRMR) and Q index. In Porphyry deposits, the rock mass is affected by the presence of hydrothermal alterations; this implies that the rock may exhibit variations in its geomechanical properties depending on the hydrothermal alteration present. In this research, 6292 drilled meters with geotechnical information were considered. With this information, a classification of the rock mass was made by the aforementioned systems. Once the deposit was classified, a comparison was made between the classification systems mentioned. Comparison was based on the lithologies and hydrothermal alterations present in the deposit by means of descriptive statistics (average values, box plot diagrams, linear regressions). A comparison was made between the aforementioned classification systems with respect to the dominant hydrothermal alterations present in the reservoir. The results showed that in the porphyry deposit, the analysis by hydrothermal alteration allows differentiating a poor to regular behavior (Sericite alteration) from a good behavior (Potassium Alteration).

**Keywords:** Rock Mass Classification; RMR; MRMR; Q; Porphyry deposit; hidrotermals alterations.

## Estudio comparativo entre sistemas de clasificación geomecánica en un depósito tipo Pórfido

### Resumen

Los depósitos tipo pórfido, son las fuentes minerales más grandes del mundo. Durante la exploración con extracción de núcleos de perforación, es posible obtener información geotécnica del macizo rocoso. Esta información, permite clasificar la calidad geomecánica del macizo rocoso por medio de sistemas de clasificación empíricos como "Rock Mass Rating" (RMR), Mining Rock Mass Rating (MRMR) y el "Q". Teniendo en cuenta que en los depósitos tipo pórfido, el macizo se encuentra afectado por la presencia de alteraciones hidrotermales; esto implica, que la roca puede presentar variaciones en sus propiedades geomecánicas, dependiendo de la alteración presente. En esta investigación, se consideraron 6292 m de perforaciones con información geotécnica. Con esta información, se realizó una clasificación del macizo por los sistemas mencionados. Una vez clasificado el depósito, se realizó un comparativo entre los sistemas de clasificación mencionados. Basados en las litologías y alteraciones hidrotermales presentes en el depósito por medio de estadística descriptiva (valores medios, diagramas de cajas, regresiones lineales). El estudio de clasificación del macizo considerando las alteraciones, permitió observar diferencias en los resultados de la clasificación geomecánica del material, con respecto a la clasificación del macizo sin tenerlas en cuenta.

**Palabras clave:** Clasificación geomecánica; RMR; MRMR; Q; depósito tipo Pórfido; alteraciones hidrotermales.

**How to cite:** Pérez, M., García, E., Vega, C., Montoya, J., Noriega, P., Alfonso, J. and Cajicá, L., Estudio comparativo entre sistemas de clasificación geomecánica en un depósito tipo Pórfido Boletín de Ciencias de la Tierra, 43, pp. 34-44, Enero, 2018.





## 1. Introducción

En minería, y en cualquier proyecto de infraestructura, la clasificación geotécnica de un macizo, se enfoca principalmente en dos objetivos principales. El primero, es identificar las propiedades geomecánicas de la roca, que garanticen la viabilidad y estabilidad de la construcción del proyecto. El segundo, es definir las características del macizo que se necesiten superar (resistencia, ángulo de fricción y cohesión), para extraer el material sin producir colapso de la mina [1].

En los depósitos metálicos tipo pórfido, el macizo rocoso se encuentra afectado por la presencia de alteraciones hidrotermales y mineralizaciones sobreimpuestas en la roca. Producto de fluidos mineralizados que salen desde una fuente magmática hasta niveles corticales superiores [2]. Esto implica, que la roca puede presentar variaciones en sus propiedades geomecánicas, dependiendo de la alteración hidrotermal presente.

El hallazgo de algún tipo de alteración o litología cuyo comportamiento geomecánico sea distinto al comportamiento general del macizo rocoso, el cual se encuentre reflejado en cada sistema de clasificación, es de gran importancia para el desarrollo minero; puesto que identificar regiones con presencia de alguna alteración hidrotermal cuya calidad geomecánica sea menor a las demás, permite disminuir incertidumbre en el diseño, en los tiempos de construcción, y en el cálculo de voladuras.

Con el objeto de clasificar geotécnicamente un macizo rocoso, se emplearon diferentes metodologías de clasificación, existentes actualmente en la literatura y comúnmente utilizadas en los proyectos mineros, como el Rock Mass Rating (RMR) [3], Mining Rock Mass Rating (MRMR) [4], y el Índice de Calidad Tunelera (Q) [5].

De este modo, esta investigación se centró principalmente, en clasificar el macizo rocoso por cada uno de los sistemas de clasificación anteriormente referenciados, comparando simultáneamente el resultado obtenido para cada alteración hidrotermal y litología presente, e identificando los parámetros que determinan la afectación de la calidad del macizo rocoso en cada sistema de clasificación. Para este proceso se utilizó la información de exploración geotécnica proporcionada por la empresa AngloGold Ashanti (AGA) que corresponde al macizo rocoso presente en el proyecto Quebradona, depósito de Cobre y Oro, localizado en el suroeste del departamento de Antioquia, Colombia. Los resultados obtenidos en el análisis mostraron que existe una diferencia cualitativa en la calidad geotécnica cuando se tiene en cuenta las alteraciones de mediana temperatura (Sericita y Clorita-Sericita) categorizadas como Pobre a Regular en el sistema RMR modificado de Laubscher, y, las alteraciones de Alta Temperatura (Potásica y Sílica) categorizadas como Buena, con respecto a la clasificación general del macizo sin diferenciar por alteraciones.

### 1.1. *Reseña histórica de los Sistemas de Clasificación Geomecánica de Macizos Rocosos*

Se puede considerar el inicio del estudio de la mecánica de rocas en los inicios del siglo XVIII, cuando Coulomb publicó los

resultados de ensayos de roca para la academia francesa en París [6]. A finales del siglo XIX, ingenieros franceses iniciaron la construcción del canal de Panamá; tarea que fue tomada por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada Estadounidense en el año de 1908. Durante su construcción, entre 1910 y 1964 se registraron 60 deslizamientos en cortes ingenieriles; pero estos deslizamientos no fueron analizados con enfoque en la mecánica de rocas [7].

Los inicios de los sistemas de clasificación de macizos rocosos aparecen con Terzaghi (1945) [8], quien presentó la referencia más cercana al uso de un sistema de clasificación para el diseño de soportes de túneles. Esta clasificación se basa fundamentalmente en el fracturamiento presente en la roca, desde una roca intacta hasta una roca blocosa. Más adelante, Talobre en 1967 [9], dio origen a la primera aparición del término Mecánica de Rocas, enfocado en la construcción de túneles para el transporte a presión de agua. Posteriormente, Jaeger (1969) [10] de la Universidad de Minneapolis, formuló los principios matemáticos de la mecánica de rocas aplicados al planteamiento minero.

En los años setenta, el estudio de la mecánica de rocas comenzó a enfocarse en las discontinuidades y en los macizos rocosos. Así, Bieniawski (1973) [11], expone un sistema de clasificación de macizo rocoso, basado en el concepto de cuantificar parámetros de la roca y de las fracturas relacionados a situaciones de riesgo minero. Del mismo modo en 1976, Bieniawski [12] publica una clasificación del macizo rocoso llamado "Rock Mass Rating (RMR)", luego actualizado en 1989 [3]. El sistema de clasificación RMR, está basado en parámetros de resistencia, el índice de calidad de la roca RQD y la condición de las discontinuidades.

De manera similar, Barton, et al. (1974) [13], publican el índice de calidad tunelera, el cual, se convirtió en el pilar de la clasificación y caracterización de macizos rocosos. Además de una guía de construcción de túneles en las que se consideraban características propias de las fracturas resumidas en el índice Q.

Al mismo tiempo, Hoek y Bray (1974) [14], presentan un análisis de estabilidad de taludes en roca, en respuesta a la necesidad de la industria minera, de poder realizar diseños ingenieriles que permitieran incrementar la profundidad de los taludes en minas a cielo abierto.

Luego, Grimstad & Barton (1993) [15] presentan una actualización del índice Q, agregando técnicas de refuerzo para excavaciones de túneles. Más adelante, en 2002, Barton [5], realiza un ajuste a los valores del índice Q, incluyendo características de las fracturas como rugosidad, fricción y relleno.

Así mismo, Laubscher en 1977 [16], modificó el RMR presentado por Bieniawski y propuso el Mining Rock Mass Rating (MRMR). El cual modificó posteriormente en 1990 [4]. El sistema de clasificación MRMR, toma el valor básico de RMR y lo ajusta, teniendo en cuenta los cambios en los esfuerzos inducidos por la actividad minera sobre el macizo rocoso, además, incluye la cantidad de fracturas por metro y no solo el RQD.

En 1980 Hoek & Brown [17], realizan un análisis empírico de los esfuerzos presentes en un macizo rocoso confinado, en una mina de cobre en Nueva Guinea. En este

estudio se argumenta que la falla del macizo rocoso está controlada principalmente por el movimiento de bloques de roca entre fracturas presentes en el macizo. De este modo, dichos autores en 1988 [18], presentan el Criterio de falla Hoek—Brown. Donde se formula el criterio de modo de falla de la roca enfatizado en las condiciones de confinamiento dentro de excavaciones subterráneas. Además, incluye un análisis de estabilidad de terrenos rocosos en superficie.

En 1995, Hoek et al [19], introducen el concepto del índice de esfuerzo geológico (GSI), el cual sustituye al RMR de Bieniawski en los cálculos del criterio de falla de Hoek-Brown. Posteriormente, en el año 2000 [20], Hoek & Marinos introducen una adaptación del valor de GSI para diferentes tipos de macizos rocosos. Así mismo, Cai en 2004 [21], publica una aproximación cuantitativa del GSI basado en el tamaño de bloques y la condición de la junta. De forma similar, Hoek en 2013 [22], expone una cuantificación del GSI, enfocado en la medida del índice de calidad de la roca (RQD) y la condición de la junta.

Ramamurthy (2004) [23], realiza una correlación geotecnológica para rocas y macizos rocosos. Este estudio concluye que el esfuerzo de compresión uniaxial y los sistemas de clasificación RMR, Q y GSI; no sugieren una relación entre la disminución de la resistencia y la calidad del macizo rocoso. Palmstrom y Broch (2006) [24], publican un análisis del uso y desuso del índice Q de Barton. Destacando y describiendo cada uno de los parámetros obtenidos por el índice Q, incluyendo además, el uso posiblemente inadecuado del índice Q, en las predicciones de avances de excavación por tuneladoras TBM en macizos rocosos.

Jakubec en 2007 [25], expone desde la experiencia en la industria, el uso del sistema MRMR. En él, añade un análisis del concepto de bloque de roca, conteo de fracturas cementadas, y, la propuesta de abandonar el RQD como parámetro. En el 2008, la ASTM expone la norma D5878-08 [26], en la cual se encuentran compilados diferentes sistemas de clasificación de macizo rocoso para propósitos ingenieriles. En esta norma se incluyen sistemas como RMR, Q, GSI, entre otros.

Zhang et al [27], realizan un análisis del índice de calidad de la roca (RQD), con respecto al volumen de bloque. En esta investigación se argumenta una relación entre la calidad de macizo rocoso y el volumen de los bloques. Así mismo, en 2015, Oskan [28], publican una investigación sobre caracterizar macizos rocosos fracturados, utilizando un caso de estudio de una mina en Anatolia, el análisis lo hacen con información de una perforación de 264.15 m de profundidad. En el proyecto minero de hierro Sangan en Australia, Rad et al. (2015) [29]. Los autores presentan una clasificación de macizo rocoso con metodología RMR. El análisis está basado en la aplicación de funciones continuas con el uso de la teoría del caos y relaciones matemáticas. La investigación se enfoca en analizar desde el punto de vista estadístico, los parámetros geológicos que se agrupan en el sistema RMR.

## 1.2. Descripción de los sistemas de clasificación Geomecánica del Macizo Rcoso

Los sistemas de clasificación de macizos rocosos han sido utilizados principalmente para categorizar cuantitativa y

calitativamente, la calidad de un macizo rocoso, evaluando determinados parámetros geomecánicos. Cada sistema tiene diferentes consideraciones en sus parámetros de análisis, producto de la heterogeneidad de cada macizo rocoso.

A continuación, se describen los sistemas de clasificación utilizados en la investigación, los cuales han sido los más reconocidos y utilizados a lo largo de la historia:

### 1.2.1. Rock Mass Rating (Bieniawski, 1989)

El sistema de clasificación RMR, está basado en 6 parámetros in situ del macizo rocoso, así:

- Resistencia a la Compresión uniaxial de la roca intacta.
- Índice de calidad de la roca RQD.
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condición de las discontinuidades.
- Condición del agua subterránea.
- Orientación de las discontinuidades.

Bieniawski clasifica la roca en 5 categorías, descritas en la Tabla 1.

### 1.2.2. Mining Rock Mass Rating (MRMR)

Laubscher en 1977, modificó el RMR presentado por Bieniawski y propuso el Mining Rock Mass Rating (MRMR), el cual fue modificado posteriormente en 1990. El sistema de clasificación MRMR, toma el valor básico de RMR y lo ajusta, teniendo en cuenta los cambios en los esfuerzos inducidos por la actividad minera sobre el macizo rocoso.

El RMR, está basado en la caracterización de parámetros geológicos presentes en el macizo rocoso, expresados matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$RMR = IRS + \frac{FF}{m} + 0,4 * (Macrorugosidad * Microrugosidad * Jwa * Jf) \quad (1)$$

Donde, RMR = Rock Mass Rating.

IRS = Resistencia intacta de la roca (MPa).

FF/m = Frecuencia de fracturas por metro.

Jwa = Alteración de las paredes del núcleo.

Jf = Relleno de la fractura.

El índice RMR modificado, es la base para poder encontrar el valor de MRMR, el cual se expresa como el valor del RMR modificado, multiplicado por un factor de radio hidráulico, el cual, involucra el área de intervención de la obra y el perímetro del macizo rocoso (Ecuación 2).

$$MRMR = RMR * \left( \frac{Area}{Perimetro} \right) \quad (2)$$

Tabla 1.  
Clasificación Rock Mass Rating, RMR

Rock Mass Rating (RMR)					
Categoría	Muy Pobre	Pobre	Regular	Bueno	Excelente
Rango RMR	0-20	>20-40	>40-60	>60-80	>80-100

Fuente: Adaptado de [3]

Donde, MRMR = Mining Rock Mass Rating.

Área = Área de influencia del proyecto.

Perímetro = Perímetro de intervención.

En esta investigación, solo se considera el valor de RMR modificado por Laubscher para la clasificación del macizo rocoso, es decir, no se tiene en cuenta el ajuste para determinar el MRMR. Laubscher clasifica la calidad del macizo rocoso en las mismas 5 categorías propuestas por Bieniawski (Tabla 1).

### 1.2.3. Índice de Calidad Tunelera (Q)

Barton, et al (1974) [13] publican el índice de calidad tunelera, el cual, se convirtió en el pilar de la clasificación y caracterización de macizos rocosos. Además de una guía de construcción de túneles en las que se consideraban características propias de las fracturas resumidas en el índice Q. Barton considera que la calidad de la roca en un túnel está en función de 3 coeficientes:

- Tamaño del bloque (RQD/Jn): El primer coeficiente equivale a la relación entre el índice de calidad de la roca (RQD) y el número de familias estructurales presentes en el macizo rocoso.
- Esfuerzo cortante inter-bloque (Jr/Ja): Representa las condiciones de la interacción entre fracturas, con una relación entre la rugosidad (Jr) y la alteración presente en la fractura.
- Esfuerzo activo (Jw/SRF): Consiste en la relación entre el esfuerzo de presión de agua presente en el macizo rocoso y el factor SRF, el cual representa el esfuerzo por pérdida de carga (Excavación) o Esfuerzo de resistencia de roca competente (Compresión)

La clasificación del parámetro Q de Barton, se representa en escala Semilogarítmica, en rangos de valores de calidad del macizo rocoso de 0 a 1000 entre Excepcionalmente Pobre y Excepcionalmente Bueno (Tabla 2). Dicho puntaje se determina por medio de la ecuación descrita a continuación:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (3)$$

Donde, Q = Índice calidad tunelera.

RQD/Jn = Tamaño de bloque.

Jr/Ja = Esfuerzo cortante inter-bloque.

Jw/SRF = Esfuerzo Activo.

## 2. Clasificación del Depósito tipo Pórfido del proyecto Quebradona

Tabla 2.

Clasificación del macizo rocoso de acuerdo al Índice Q.

Índice Q					
Categoría	Excepcional Pobre	Extrema Pobre	Muy Pobre	Pobre	Regular
Rango Q	0.001-0.01	0.01-0.1	0.1-1	1-4	4-10
Categoría	Bueno	Muy Bueno	Ext Bueno	Exc Bueno	
Rango Q	10-40	40-100	100-400	400-100	

Fuente: Adaptado de [13]

### 2.1. Información geológica y geotécnica del área de estudio

El proyecto Quebradona de la empresa Minera Quebradona Colombia S.A (Joint venture entre AngloGold Ashanti (AGA) y B2Gold), se encuentra localizado en el suroeste del departamento de Antioquia (Fig. 1), sobre el flanco oriental de la cordillera occidental, entre los municipios de Jericó y Támesis. El objetivo principal de exploración del proyecto es Nuevo Chaquiro, el cual es un depósito tipo Pórfido de Cobre, con grandes toneladas y baja ley con Oro, Molibdeno y Plata [30].

La zona mineralizada del Pórfido se caracteriza por la presencia de Stock-works (venillas ramificadas), diseminados y venillas de Cuarzo, Magnetita, Pirita, Calcopirita y Molibdenita. Con minerales Mena como Calcopirita y Molibdenita. El depósito Nuevo Chaquiro está conformado por dos unidades litológicas: una Diorita de edad Miocénica, en diques de Cuarzo-Diorita y finas intrusiones verticales que invaden una roca encajante Vulcano-sedimentaria perteneciente a la formación Combia compuesta principalmente por Tobas andesíticas del Mioceno (6-10 millones de años). La zona de alteración hidrotermal del pórfido se evidencia con un centro de alta temperatura (Alteración Potásica), conformado por Biotita, Magnetita, Calcopirita y Molibdenita; los cuales se convierten en una zona de alteración Sericítica superpuesta con Moscovita, Clorita, Cuarzo, Pirita, Turmalina. De forma similar se encuentra la alteración Clorita-Sericita (Clorita, Sericita, Illita, Pirita). La alteración Propilítica se encuentra más distal, compuesta por (Clorita, Epidota, Illita, Carbonatos). También hay un núcleo interno de alteración Cálculo-Potásica con Biotita, Actinolita, Epidota y Anhidrita con menores valores de Cobre, Oro y Molibdeno [30].

A final de 2014 y durante todo el año 2015, sobre ocho perforaciones corazonadas diamantinas (Tabla 3), se obtuvo información geotécnica por medio de una metodología de logueo basada en Dempers, 2010 [31], modificada por AngloGold Ashanti; con el fin de clasificar el macizo rocoso por las metodologías anteriormente descritas. Las perforaciones tienen

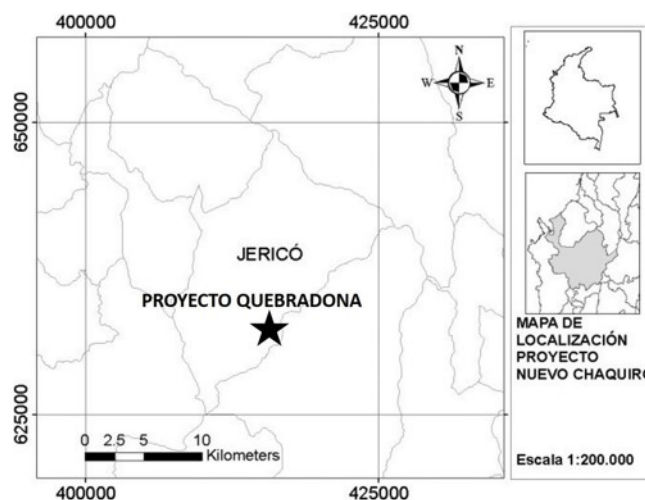


Figura 1. Localización área de estudio

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.

Información Geotécnica del área de estudio.

Pozo	Profundidad Pozo (m)	Metros Analizados	Intervalos Analizados
CHA-DD-061	36 – 1483	963	282
CHA-DD-062	51 – 1502	948	238
CHA-DD-064	0 – 774	312	104
CHA-DD-065	6 – 1001	993	277
CHA-DD-066	51 – 736	685	218
CHA-DD-067	48 – 753	705	220
CHA-DD-068	0 – 801	801	189
CHA-DD-070	36 – 921	885	282
Total	7971	6292	1810

Fuente: Elaboración propia

profundidades que varían entre 700 m y 1500 m, aproximadamente. Sin embargo, para el análisis presentado solo se consideraron los datos geotécnicos correspondientes a intervalos de 3 m y a una profundidad máxima de 1000 m. En total, se analizaron 6292 m lineales con información geotécnica, con diámetros de núcleo que oscilan entre 71 mm y 56 mm.

## 2.2. Clasificación general del macizo rocoso

Para poder identificar si existe diferencia en el comportamiento geomecánico del depósito. Se evaluó la calidad geomecánica del macizo con cada uno de los sistemas de clasificación descritos anteriormente. En este proceso se realiza un análisis comparativo de los resultados entre cada uno de los sistemas de clasificación.

Inicialmente se realizó un análisis general del macizo rocoso con respecto a la profundidad sin tener en cuenta las alteraciones hidrotermales dominantes presentes (Fig. 2). En esta evaluación se observa una diferencia en todos los sistemas de clasificación, en los valores entre 0 – 300 m y los valores entre 300 y 1000 m; además, en el primer rango entre 0 y 300 m de profundidad, el puntaje del índice Q, presentan una elevada dispersión entre 0.1 y 40 puntos.

Para explicar la diferencia en la calidad del macizo rocoso en profundidad, se realiza una clasificación del mismo teniendo en cuenta las alteraciones hidrotermales (Fig. 3). De ésta clasificación, se observa que los primeros 300 metros de las perforaciones muestran dos alteraciones hidrotermales dominantes correspondientes a las alteraciones de mediana temperatura Sericita y Clorita-Sericita, con valores promedio de 40 puntos para el RMR de Laubscher, 54 puntos para el RMR de Bieniawski, y 7 puntos para el Q de Barton. Después de los 300 metros hay un aumento de la calidad del macizo debido a presencia dominante de las alteraciones correspondientes a Sílica y Potásica con valores promedio de 51 puntos para el RMR de Laubscher, 69 puntos para el RMR de Bieniawski, y 37 puntos para el Q de Barton.

## 2.3. Comparativo entre sistemas de clasificación

Teniendo en cuenta que la diferencia de la calidad del macizo está relacionada con la presencia de diferentes alteraciones hidrotermales; se realiza un análisis de valores

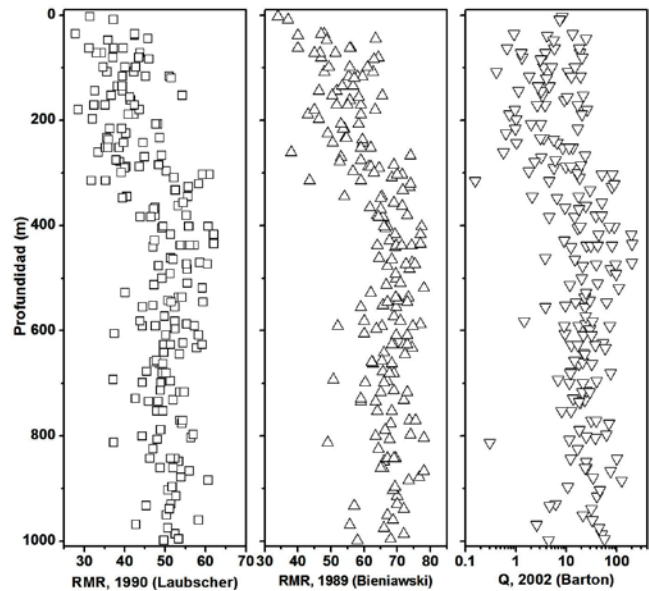


Figura 2. Clasificación del macizo rocoso en los sistemas de clasificación RMR de Laubscher, RMR de Bieniawski y Sistema Q de Barton vs profundidad.

Fuente: Elaboración propia.

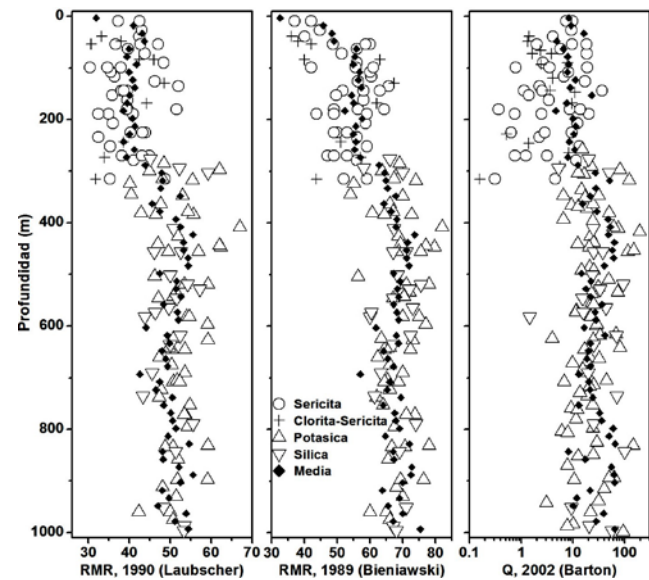


Figura 3. Clasificación del macizo rocoso por alteración hidrotermal dominante vs Profundidad.

Fuente: Elaboración propia.

medios, diagramas box plots y, comparativo estadístico entre cada sistema de clasificación entre las alteraciones hidrotermales dominantes.

### 2.3.1. Comparativo de valores medios

El sistema Q de Barton, presenta una escala de calificación logarítmica entre 0.001 y 1000. Grimstad y Barton [15],

RMR, 1990 Laubscher	Muy Pobre 0 - 20	Pobre 20 - 40	Regular 40 - 60	Bueno 60 - 80	Muy Bueno 80 - 100
Sericita		40			
Clorita-Ser		40			
Potásica			50		
Sílica			52		
RMR, 1989 Bieniawski	Muy Pobre 0 - 20	Pobre 20 - 40	Regular 40 - 60	Bueno 60 - 80	Muy Bueno 80 - 100
Sericita			54		
Clorita-Ser			54		
Potásica				68	
Sílica				69	
Q, Barton	Muy Pobre 0.1 - 1	Pobre 1 - 4	Regular 4 - 10	Bueno 10 - 40	Muy Bueno 40 - 100
Sericita			8		
Clorita-Ser			7		
Potásica				31	
Sílica					43

Figura 4. Clasificación cualitativa de los valores medios en los sistemas de clasificación vs Alteraciones hidrotermales presentes.

Fuente: Elaboración propia.

presentan una actualización en la carta de soporte, la cual, además, correlaciona las categorías de calidad de macizo rocoso entre RMR de Bieniawski y el índice Q de Barton.

Teniendo en cuenta dicha correlación cualitativa, se realiza un comparativo entre los valores medios encontrados en cada alteración hidrotermal en los tres sistemas de clasificación considerados en este estudio (Fig. 4). En dicha evaluación, las alteraciones presentan un comportamiento similar para todos los sistemas de clasificación, las alteraciones Sericítica y Clorita-Sericítica, clasifican la calidad de macizo rocoso entre Pobre y Regular, mientras que las alteraciones Potásica y Sílica, clasifican el macizo rocoso entre Regular y Muy bueno.

### 2.3.2 Comparativo de diagramas Box plots

Los diagramas de cajas, facilitan la visualización de la mayor concentración de los valores, tanto por alteración hidrotermal como por litología. Además, son conocidos como estadísticos descriptivos. Por lo tanto, este tipo de diagramas permiten realizar una aproximación inicial al comportamiento de los datos (Fig. 5). De estos diagramas se denota lo siguiente:

- Independiente del sistema de clasificación, existe 2 comportamientos distintos presentes en la calidad del macizo rocoso dominados por el tipo de alteración. Las alteraciones Sericita y Clorita-Sericita, tienen una calificación menor a las alteraciones Potásica y Sílica.
- La calificación de Laubscher, categoriza el macizo rocoso en menor calidad que los sistemas RMR de Bieniawski y Barton.
- Existe una mayor concentración en los valores de las cajas (25% - 75%) en el sistema RMR de Laubscher, que en los otros dos sistemas.

- El comportamiento geomecánico de las litologías presentes en el depósito es similar en los tres sistemas de clasificación.
- Los valores atípicos fueron eliminados del análisis para evitar que afecten las tendencias generales.

### 2.3.3. Comparativo entre RMR de Bieniawski y RMR de Laubscher

El sistema propuesto por Bieniawski, considera un puntaje hasta de 20 puntos al índice de calidad de la roca (RQD), de forma similar incorpora el espaciamiento entre discontinuidades de la misma familia, hasta con la misma cantidad de puntos (20 puntos). Mientras que el RMR modificado por Laubscher, no considera los parámetros RQD y el espaciamiento de las discontinuidades, pero incorpora la cantidad de fracturas por metro, con un puntaje hasta de 40 puntos.

Al realizar un análisis comparativo estadístico entre los valores de RMR de Laubscher y RMR de Bieniawski, incluyendo, medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de relacionamiento (Tabla 4) se muestra que:

- Los valores de RMR de Laubscher presentan una variación mayor a los valores de RMR de Bieniawski.
- Existe una muy buena correlación entre los 2 sistemas de clasificación. si se compara con valores de correlaciones empíricas como la de Bieniawski (1989) [3], la cual presenta un coeficiente de correlación de 0.77 (Tabla 7).
- Considerando que la cantidad de datos provenientes de medidas reales de diferentes perforaciones, el  $R^2$  del 66 %, equivale a una relación moderadamente buena si se compara con la correlación empírica de Bieniawski con un  $R^2$  de 0.59 (Tabla7).

Al ejecutar el mismo análisis estadístico, agrupando las alteraciones hidrotermales de mediana temperatura Sericita y Clorita-Sericita (Tabla 5) en el mismo grupo, se observa:

- Existe una diferencia considerable entre el RMR de Laubscher (Pobre) y RMR de Bieniawski (Regular).
- La variación entre cada sistema de clasificación es similar.
- El rango de Valores del sistema RMR Bieniawski, es mayor. Lo que indica que la distribución es mayor.
- El  $R^2$  de 0,25, es un valor bajo, el cual permite determinar que la ecuación solo explica el 25% de los datos.

De igual manera, se agruparon las alteraciones de alta temperatura Potásica y Sílica (Tabla 6), donde se presenta lo siguiente:

- Al igual que en las alteraciones de mediana temperatura, los valores de RMR de Laubscher son considerablemente menores a los valores del RMR Bieniawski.
- La variación de los datos en ambos sistemas es similar.
- Los sistemas tienen una correlación moderadamente alta entre sí.
- El  $R^2$  de la regresión lineal es moderadamente alta, teniendo en cuenta que son datos reales obtenidos de perforaciones.

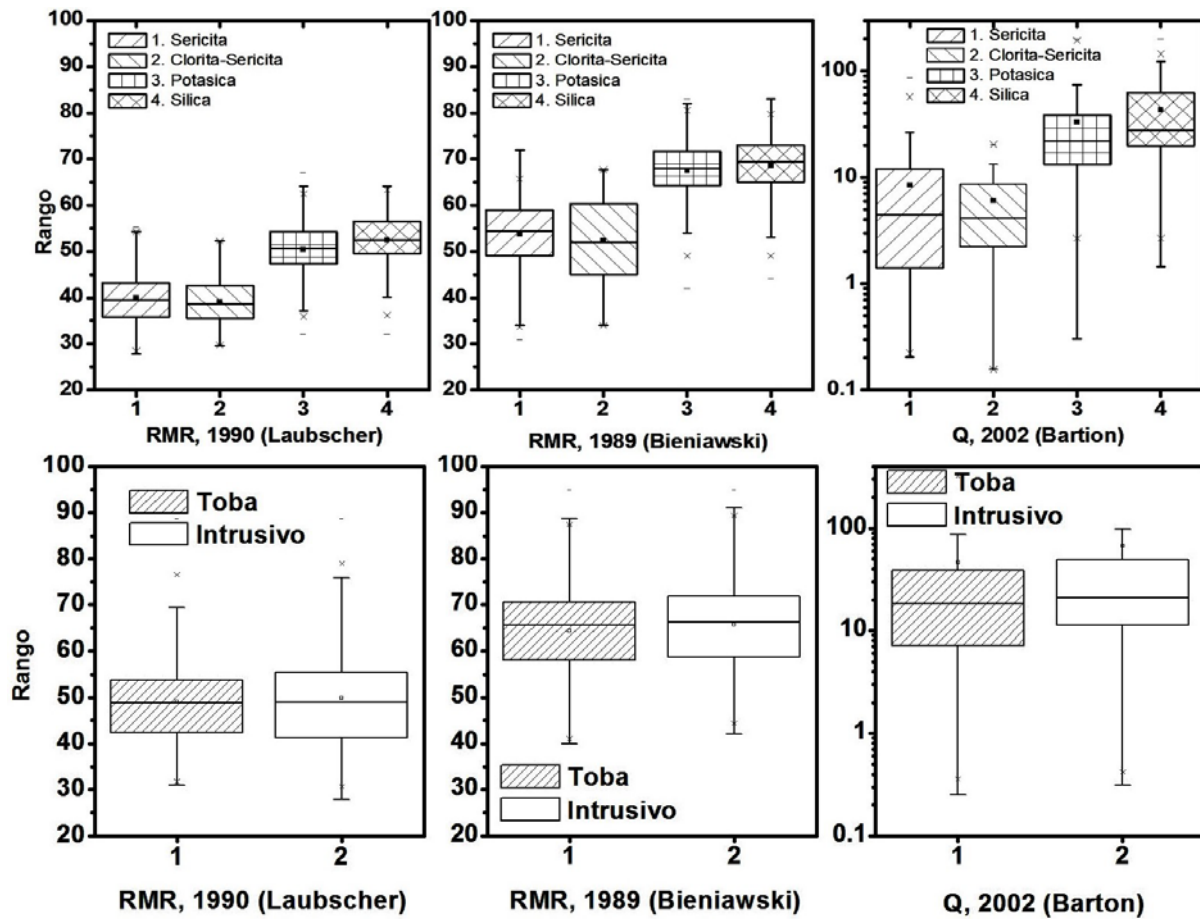


Figura 5. Diagrama de Cajas de sistemas de clasificación, por alteración hidrotermal y por litología.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.

Análisis estadístico comparativo entre RMR de Laubscher y RMR de Bieniawski.

Análisis Estadístico General Depósito		
Medida	RMR, Laubscher	RMR, Bieniawski
Promedio	46,96	62,96
Desviación Estándar	8,26	9,83
Coefficiente de Variación	0,18	0,16
Rango	40,80	58,00
Coefficiente correlación, r		0,81
R-Cuadrada, R <sup>2</sup>		0,66
Ecuación de Correlación lineal		
RMR, Laubscher = 4,13 + 0,68*RMR, Bieniawski		

Fuente: Análisis estadístico utilizando el software Statgraphics [32].

Tabla 5.

Análisis estadístico comparativo entre RMR Laubscher y RMR Bieniawski en las alteraciones Sericita y Clorita-Sericita

Análisis Estadístico Alteraciones Sericita y Clorita-Sericita		
Medida	RMR, Laubscher	RMR, Bieniawski
Promedio	39,80	53,84
Desviación Estándar	6,42	7,88
Rango	31,10	48,00
Coefficiente de Variación	0,16	0,15
Coefficiente Correlación, r		0,50
R-Cuadrada, R <sup>2</sup>		0,25
Ecuación de Correlación lineal		
RMR, Laubscher = 18,08 + 0,40*RMR, Bieniawski		

Fuente: Análisis estadístico utilizando el software Statgraphics [32].

Tabla 6.

Análisis estadístico comparativo entre RMR Laubscher y RMR Bieniawski en las alteraciones Potásica y Sílica

Análisis Estadístico Alteraciones Potásica y Sílica		
Medida	RMR, Laubscher	RMR, Bieniawski
Promedio	50,72	67,74
Desviación Estándar	6,44	6,94
Rango	38,76	42,00
Coefficiente de Variación	0,13	0,10
Coefficiente Correlación, r		0,78
R-Cuadrada, R <sup>2</sup>		0,61
Ecuación de Correlación lineal		
RMR, Laubscher = 1,77 + 0,72*RMR, Bieniawski		

Fuente: Análisis estadístico utilizando el software Statgraphics [32].

Teniendo en cuenta, que el sistema de clasificación RMR de Laubscher, califica el macizo rocoso con una menor calidad comparada con la metodología RMR de Bieniawski, es prudente considerar el RMR modificado de Laubscher para la evaluación del macizo rocoso de un depósito tipo Pórfido

### 2.3.4. Comparativo entre RMR de Bieniawski y Q de Barton

El análisis comparativo entre los sistemas de clasificación RMR de Bieniawski y Q de Barton, se presenta por medio de



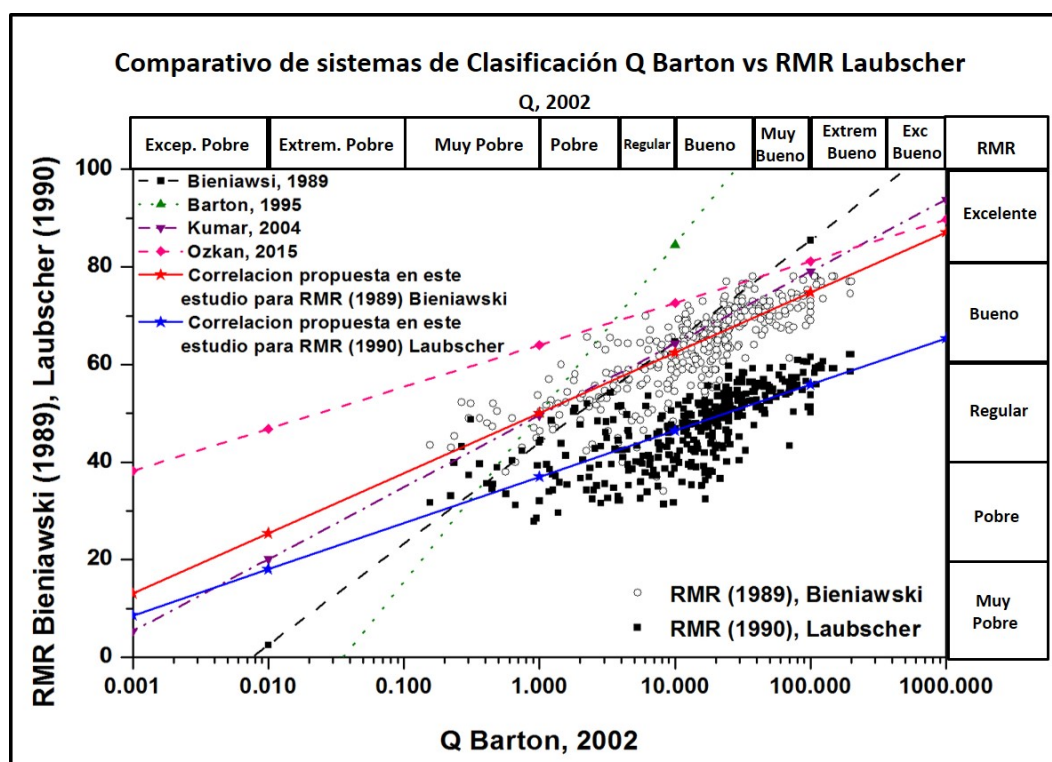


Figura 6. Comparativo entre sistemas RMR de Laubscher, RMR Bieniawski y Q Barton modificado de Bieniawski, con correlaciones históricas entre los sistemas RMR de Bieniawski y Q de Barton.

Fuente: Modificado de [24] con datos del proyecto Quebradona presente en este estudio.

Tabla 7.  
Correlaciones históricas sistemas RMR Bieniawski y Q Barton

Investigador	Ecuación de Correlación	r	R <sup>2</sup>	Año
Bieniawski	$RMR = 9 \cdot \ln Q + 44$	0.77	0.59	1989
Barton	$RMR = 15 \cdot \ln Q + 50$			1995
Kumar	$RMR = 6,4 \cdot \ln Q + 49,6$	0.85		2004
Ozkan	$RMR = 3,73 \cdot \ln Q + 64$		0.43	2015

Fuente: Elaboración propia.

un gráfico exploratorio semilogarítmico adaptado de Bieniawski [3] (ver Fig. 6).

En esta investigación, se determinó la correlación logarítmica expuesta en la Ecuación 4.

$$RMR = 5.36 \cdot \ln(Q) + 50 \quad (4)$$

Al incluir dentro de la Fig. 6, algunas de las correlaciones desarrolladas por diferentes investigaciones (Tabla 7), se observa que la correlación, más cercana a la propuesta dentro de esta investigación, es la propuesta por Kumar en 2004, con un R<sup>2</sup> de 52,9%; sin embargo, la correlación propuesta en esta investigación, alcanza un R<sup>2</sup> del 66 %.

Si se considera únicamente la nube de puntos del depósito tipo Pórfido, el sistema Q, categoriza el macizo rocoso en 6 rangos, entre muy pobre, hasta extremadamente bueno, lo cual dificultaría una modelación del macizo con tantos rangos; sin embargo, el sistema RMR de Bieniawski, califica el macizo rocoso, solo en 2 categorías entre pobre y bueno.

### 2.3.5 Comparativo entre RMR de Laubscher y Q de Barton

De forma similar al comparativo entre el sistema Q de Barton y RMR de Bieniawski, es posible realizarlo entre el sistema Q y el RMR modificado de Laubscher, por medio del cuadro comparativo semilogarítmico de la Fig. 6. En la cual, se destaca lo siguiente:

- La correlación propuesta en esta investigación, tiene un R<sup>2</sup> de 51 %, el cual, para ser datos producto de una exploración geotécnica es una correlación buena comparándola con valores de correlaciones empíricas expuestas en la Tabla 7.
- Las correlaciones de bibliografía se encuentran lejanas a la nube de puntos del sistema RMR de Laubscher del depósito Pórfido. Lo cual, no se considera sano utilizar las correlaciones de bibliografía en el depósito, puesto que las líneas de tendencia, están distantes de la nube de puntos.
- Comparando los 3 sistemas de calificación de calidad de macizo rocoso: el sistema Q lo clasifica en un rango entre muy pobre y extremadamente bueno. El sistema RMR de Bieniawski tiene un puntaje mayor al sistema RMR de Laubscher (Regular y Bueno); por lo cual, las recomendaciones de soporte y sostenimiento de excavaciones, de Laubscher son más conservadores, ya que castiga más la calidad del macizo rocoso (Pobre y Regular).

### 2.3.6. Importancia de incorporar el análisis por alteraciones hidrotermales en el depósito tipo Pórfido

El hallazgo de la disminución de la calidad del macizo de las alteraciones Sericita y Clorita – Sericita. Con respecto al comportamiento general del macizo o el análisis por litología. Es de gran importancia para el desarrollo minero. Si se supone que un sector del frente de explotación minera se encuentra afectado por estas alteraciones, clasificadas como calidad pobre - regular (RMR Bieniawski, 1989). El uso de explosivo necesario para el aprovechamiento de dicho sector, puede ser mucho menor al consumo promedio requerido para la explotación de la mina. Esto equivale a un ahorro económico para el proyecto. Pero, si esta situación se presenta dentro de algún túnel de transporte de material o de ventilación, es necesario el refuerzo artificial de la obra. Lo cual aumenta el costo y el tiempo de avance de la construcción del túnel.

Por otro lado, las alteraciones Potásica y Sílica aumentan la calidad del macizo (calidad bueno según Bieniawski, 1989). La presencia de estas alteraciones en la zona de explotación, equivale a un mayor consumo de explosivo, que puede ser previsto con anterioridad desde diseño y no posterior a una voladura poco efectiva durante la explotación.

### 3. Conclusiones

En los depósitos tipo pórfido, es necesario tener en cuenta la presencia de alteraciones hidrotermales dominantes, ya que, las variaciones mineralógicas producto de su presencia, afectan positiva o negativamente la calidad del macizo rocoso (ver Fig. 4 y Fig. 5), independiente de cualquier sistema de clasificación geomecánica utilizado como en esta investigación.

Como se presenta en la Fig. 5, las litologías presentes en el depósito (Toba Volcánica y cuerpo intrusivo Cuarzo-Diorita), tienen un comportamiento geomecánico similar en los tres sistemas de clasificación, independiente de su diferencia en origen y composición. Puesto que, los diagramas de cajas evaluando las litologías, presentan el mismo comportamiento. Caso contrario sucede al evaluar por alteraciones hidrotermales. En el cual si se observa una diferencia hasta de 15 puntos en los sistemas RMR.

En el sistema Laubscher, el comportamiento general del macizo, tiene un valor medio de 46.96. Las alteraciones Sericita y Clorita-Sericita tienen un valor medio de 39.8 puntos. Las alteraciones Potásica y Sílica tienen un valor medio de 50.72 puntos. Esta diferencia refleja que existe una variación en el comportamiento geomecánico entre las alteraciones presentes. Del mismo modo, en el sistema RMR Bieniawski. Las alteraciones de mediana temperatura tienen un valor medio de 53.84 puntos. Las alteraciones de alta temperatura tienen un valor medio de 57.74 puntos.

De la estadística descriptiva, se observa que existe una diferencia considerable en el comportamiento geomecánico de las alteraciones Sericita y Clorita-Sericita, y las alteraciones Sílica y Potásica. Ya que en los tres sistemas de clasificación, se observa una diferencia cualitativa de por lo

menos un rango en los sistemas RMR de Laubscher y Bieniawski (de Pobre – Regular a Regular – Bueno); y, de dos categorías en el sistema Q (de Regular a Muy Bueno).

La comparación estadística entre los sistemas RMR de Bieniawski y RMR de Laubscher, permite identificar, que la calificación de Bieniawski es considerablemente mayor a la de Laubscher (16 puntos de diferencia – 1 categoría), una de las razones de este incremento, es la incorporación del parámetro RQD dentro del sistema de clasificación.

Teniendo en cuenta el comportamiento general del macizo sin evaluar la presencia de las alteraciones hidrotermales, se obtiene una correlación con un  $R^2$  del 66%. Considerando, la extensa cantidad de datos (6292 m de perforación con información geotécnica), es una relación moderadamente alta. Del mismo modo, el análisis en las alteraciones de alta temperatura, la relación se aproxima al comportamiento general del macizo rocoso ( $R^2 = 61\%$ ). Sin embargo, en el análisis de las alteraciones hidrotermales de mediana temperatura, la dispersión de los datos es mayor, lo cual, la correlación determinada es muy baja ( $R^2 = 25\%$ ).

La comparación entre los sistemas RMR de Bieniawski y Q de Barton, se observó que de las correlaciones históricas, la más cercana es la propuesta por Kumar [33] en 2004. Dicha correlación, tiene un  $R^2 = 53\%$ , ligeramente menor al determinado en esta investigación. Esta situación permite interpretar que no es sano la determinación del macizo rocoso por medio de correlaciones históricas; debido a que las tendencias de estas, están distantes a la nube de puntos. Por tal motivo, es aconsejable definir una correlación propia en cada depósito, teniendo en cuenta que el depósito tipo pórfido se encuentra afectado por la presencia de alteraciones hidrotermales. De forma similar, la evaluación entre la metodología RMR de Laubscher y Q de Barton. Destaca que ninguna de las correlaciones históricas se aproxima a la nube de puntos del depósito.

El sistema RMR modificado de Laubscher es la metodología con menor calificación del macizo rocoso del depósito; puesto que sus parámetros permiten ser más conservadores en el análisis de la calidad del macizo; teniendo en cuenta que los sistemas RMR de Bieniawski y Q de Barton, incorporan en sus parámetros el RQD, parámetro que sobreestima la calidad del macizo, basado en el tamaño del núcleo de roca producto de la perforación diamantina.

### Agradecimientos

Los autores quieren expresar un especial agradecimiento a la empresa AngloGold Ashanti, en su proyecto Minera Quebradona, la cual confió la información básica para poder realizar esta investigación.

### Referencias

- [1] Ramírez, P., y Alejano, L., Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. [en línea]. 2004. [consulta, 5 de diciembre de 2017]. Disponible en: [http://oa.upm.es/14183/1/MECANICA\\_DE\\_ROCAS\\_1.pdf](http://oa.upm.es/14183/1/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf)
- [2] Corbett, G., Anatomy of porphyry-related Au-Cu-Ag-Mo mineralised systems: Some exploration implications. In Australian Institute of

- Geoscientists North Queensland Exploration Conference, 2009, pp. 1-13.
- [3] Bieniawski, Z.T., Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons, 1989.
- [4] Laubscher, D.H., A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 90(10), pp. 257-273, 1990.
- [5] Barton, N., Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(2), pp. 185-216, 2002. DOI: 10.1016/S1365-1609(02)00011-4
- [6] Coulomb, C., Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. Paris, Mem. Div. Sav. Acad., 1773, 7 P.
- [7] Lutton, R., Banks, D. and Strohm Jr, W., Slides in the Gaillard cut, Panama canal zone, rockslides and avalanches, vol. 2, Amsterdam, 1979, pp. 151-224.
- [8] Terzaghi, K., Stress conditions for the failure of saturated concrete and rock, en: *Proceedings-American Society for Testing and Materials*, 45, pp. 777-792, 1945.
- [9] Talobre, J., La mécanique des roches: Et ses applications, 2da Ed. Paris, 1967.
- [10] Jaeger, J. and Cook, N., Fundamentals of rock mechanics: London, Methuen and Co. 513 P.
- [11] Bieniawski, Z.T., Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineer in South Africa*, 15(12), pp 335-343, 1973.
- [12] Bieniawski, Z.T. (Ed.), *Exploration for rock engineering: Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg, Balkema, 1, 1976, pp 97-106.
- [13] Barton, N., Lien, R. and Lunde, J., Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), pp 189-236, 1974. DOI: 10.1007/BF01239496
- [14] Hoek, E. and Bray, J., *Rock Slope Engineering*. London, 1974.
- [15] Grimstad, E. and Barton, N., Updating the Q-system for NMT. In: *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support*, Fagernes, Oslo, Norwegian Concrete Association, 1993.
- [16] Laubscher, D.H., Geomechanics classification of jointed rock masses-mining applications. *Trans. Instn. Min. Metall.*, 86, pp. A1-8, 1977.
- [17] Hoek, E. and Brown, E.T., *Underground excavations in rock*. London, Instn Min. Metall., 1980, 527 P.
- [18] Hoek, E., The Hoek-Brown failure criterion-a 1988 update. In: *Proc. 15th Canadian Rock Mechanics. Symp*, Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto, 1988, pp. 31-38.
- [19] Hoek, E. and Kaiser, P.K., *Support of underground excavations in hard rock*. CRC Press, 1995.
- [20] Marinos, P. and Hoek, E., GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: *ISRM International Symposium. International Society for Rock Mechanics*, 2000, pp. 1422-1442.
- [21] Cai, M., Kaiser, P.K., Uno, H., Tasaka, Y. and Minami, M., Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(1), pp. 3-19, 2004. DOI: 10.1016/S1365-1609(03)00025-X
- [22] Hoek, E., Carter, T.G. and Diederichs, M.S., Quantification of the geological strength index chart. In: *47th US rock mechanics/geomechanics symposium. American Rock Mechanics Association*, 2013.
- [23] Ramamurthy, T., A geo-engineering classification for rocks and rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(1), 2004. pp. 89-101. DOI: 10.1016/S1365-1609(03)00078-9
- [24] Palmstrom, A. and Broch, E., Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(6), pp. 575-593, 2006. DOI: 10.1016/j.tust.2005.10.005
- [25] Jakubec, J. and Esterhuizen, G.S., Use of the mining rock mass rating (MRMR) classification: industry experience. In: *Proceedings International Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mining*, Mark, C., Pakalnis, R. and Tuchman, R.J. (eds), Vancouver, BC, Canada, National Institute for Occupational Safety and Health Information Circular (IC), 9498, 2007, pp. 413-421.
- [26] ASTM D5878, Standard guides for using rock-mass classification systems for engineering, ASTM Int. West Conshohocken, PA, 2008, pp. 1-30.
- [27] Zhang, W., Chen, J., Cao, Z. and Wang, R., Size effect of RQD and generalized representative volume elements: A case study on an underground excavation in Baihetan dam, Southwest China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, pp. 89-98, 2013. DOI: 10.1016/j.tust.2005.10.005
- [28] Özkan, I., Erdem, B. and Ceylanoglu, A., Characterization of jointed rock masses for geotechnical classifications utilized in mine shaft stability analyses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 73, pp. 28-41, 2015. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.10.001
- [29] Rad, H.N., Jalali, Z. and Jalalifar, H., Prediction of rock mass rating system based on continuous functions using Chaos-ANFIS model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 73, pp. 1-9, 2015. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.10.004
- [30] AngloGold Ashanti Limited. Mineral resource and ore reserve report 2015 - Supporting our strategy. [online]. 2015. [consulted December 5<sup>th</sup> of 2017]. Available at: [https://thevault.exchange/?get\\_group\\_doc=143/1502780767-MineralResourceandOreReserveReport2015.pdf](https://thevault.exchange/?get_group_doc=143/1502780767-MineralResourceandOreReserveReport2015.pdf)
- [31] Dempers, G.D., Seymour, C.R.W. and Harris, M.B., Optimising geotechnical logging to accurately represent the geotechnical environment. In: *Second Australasian Ground Control in Mining Conference*, 2010.
- [32] Statgraphics Centurion, X. V. I. Statpoint Technologies. INC. version, 16, 17, 2009.
- [33] Kumar, N., Samadhiya, N.K. and Anbalagan, R., Application of rock mass classification systems for tunneling in Himalaya, India. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, pp. 852-857, 2004.

**M. Pérez**, in 2011 received a BSc. in Geological Eng. from the Universidad Nacional de Colombia, Medellín. His research interests include: Rock mass classification, rock mass characterization, rock mechanics and laboratory and field testing.  
ORCID: 0000-0002-3957-5747

**E.F. García-Aristizábal**, in 1999 received the BSc. in Civil Eng. from the Universidad Nacional de Colombia, in 2005 a MSc. in Eng in Civil Engineering from Tokyo University, and in 2010 a PhD in Geotechnics from Kyoto University. Currently, he is an assistant professor in the Civil and Environmental Department at the Universidad de Antioquia, Medellín. His research interests include infiltration, unsaturated soils, slope stability, laboratory and field testing, and numerical analysis.  
ORCID: 0000-0002-4837-8518

**C.A. Vega-Posada**, in 2002 received a BSc. in Civil Eng. from the Universidad Nacional de Colombia, Medellín, in 2008 a MSc. in Structural/Geotechnical Engineering from Ohio University, and in 2012 a PhD in Geotechnics from Northwestern University. Currently, he is an assistant professor in the Civil and Environmental Department at the Universidad de Antioquia, Medellín. His research interests include soil classification, soil-structure interaction problems, liquefaction, unsaturated soils mechanics, and laboratory and field instrumentation and testing.  
ORCID: 0000-0002-0923-356X

**J.D. Montoya-Domínguez**, holds a BSc. degree in Geological Eng. from the Universidad Nacional de Colombia. In 2007 received a MSC. in Civil Eng. from the University of Tokyo, Japan; focused in Geotechnical Engineering. Since 2012 he is working in the as Senior Geotechnical Engineer at AngloGold Ashanti Colombia with research interests in field and laboratory assessment of strength and deformability characteristics of brittle rocks and numerical modelling and stability of Open pits and Underground excavations.  
ORCID: 0000-0003-4419-0531

**P. Noriega**, holds a BSc. degree in Geology from the University of Patagonia San Juan Bosco, Argentina and is a registered Professional Geologist of AusiMM. He has a background in operations, management and

project development. He has over 18 years of industry experience in progressive levels of operations, from exploration geologist, mine geologist, mine geology chief, coordination in brownfield exploration project and brownfield management advanced projects.

ORCID: 0000-0001-6974-1956

**J. Alfonso**, in 2008 received the BSc. in Geology from the Universidad industrial de Santander, Bucaramanga. His research interests include: Hydrothermal rock alterations, clay mineralogy characterization, petrology and field rock mapping.

ORCID: 0000-0003-0241-2669

**L. Cajicá**, in 2003 received the BSc. in Geology from the Universidad Nacional de Colombia, Bogota D.C. in 2014 received the MBA in Integrated Management of Quality, Safety and Environment from the Viña del Mar University of Chile. Professional experience includes: Exploration geology, economic geology, geophysics and hydrogeology.

ORCID: 0000-0002-3316-9799



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

**Área Curricular de Ingeniería  
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia**

**Oferta de Posgrados**

**Especialización en Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales  
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de  
Materiales**

Mayor información:

E-mail: [acgeomin\\_med@unal.edu.co](mailto:acgeomin_med@unal.edu.co)

Teléfono: (57-4) 425 53 68

# Seismic geomorphology and fluvial environmental elements in an area of Llanos Orientales (Colombia)

Luis Antonio Castillo-López <sup>a</sup> & German Vargas-Cuervo <sup>b</sup>

<sup>a</sup> HD Geofísica S.A.S., Bogotá, Colombia. [laclacastillo@gmail.com](mailto:laclacastillo@gmail.com)

<sup>b</sup> Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. [gvargasc@unal.edu.co](mailto:gvargasc@unal.edu.co)

Received: July 13<sup>th</sup>, 2017. Received in revised form: November 23<sup>th</sup>, 2017 Accepted: December 14<sup>th</sup>, 2017

## Abstract:

Currently disciplines like seismic geomorphology, allows the integration of surface data, constituting a new vision for the interpretation of geological data, especially in areas where it is not possible to obtain surface and subsurface information directly. Thus, indirect methods like tridimensional seismic, surface analogues and sequence stratigraphy have allowed the geomorphology and architectural elements determination, in several kilometers of depth subsurface zones; presenting characteristic geometries, that make possible the delineation and mapping of channel deposits' architectural elements. For example, in the Llanos Orientales Basin throughout its whole extension, a series of architectural elements are present, which are established by facies associations that permit to define them in the subsurface, besides of being interpreted through sequence stratigraphy.

**Keywords:** Architectural elements; fluvio-lacustrine environment; sequence stratigraphy; seismic geomorphology.

# Geomorfología sísmica y elementos en ambientes fluvio lacustres en un sector de los Llanos Orientales (Colombia)

## Resumen:

Actualmente disciplinas como la Geomorfología sísmica, permite integrar datos de superficie, constituyendo una nueva visión para la interpretación de datos geológicos, especialmente en áreas donde no se hace posible obtener de manera directa información de superficie y del subsuelo. Así, métodos indirectos como la sísmica tridimensional, análogos en superficie y la estratigrafía de secuencias, han permitido determinar la geomorfología y elementos arquitecturales, en zonas del subsuelo a varios kilómetros de profundidad; presentando geometrías características, que posibilitan delinear y mapear elementos arquitecturales de depósitos de canal. Como ejemplo, en la Cuenca de los Llanos Orientales, a lo largo de toda su extensión, se presentan una serie de elementos arquitecturales, los cuales se establecen por medio de las asociaciones de facies que permiten definirlos en el subsuelo, además de ser interpretados, mediante la estratigrafía de secuencias.

**Palabras claves:** Ambiente fluvio-lacustre; elementos arquitecturales; estratigrafía de secuencias; geomorfología sísmica.

## 1. Introducción

El desarrollo en la integración de datos geológicos y geofísicos, han permitido tener un mejor conocimiento del subsuelo. Sin embargo, mucha información es restringida, debido a su alto costo y privacidad; regularmente, manejada por la industria petrolera. Además, la información intrínsecamente presenta limitaciones, por ejemplo, resolución, adquisición, procesamiento e interpretación, lo

cual lo hace más complejo. Así, con la imagen adquirida, no siempre es posible hacer seguimiento a las geoformas, ni tampoco su extensión y límites. Una vez se tiene la información del subsuelo, el paso siguiente es el manejo e integración de los datos disponibles, sin embargo, existe poco entendimiento del manejo espacio-temporal. Por ello con este trabajo, a partir de datos de volumen, pozos y cartografía, se puede establecer dicha relación, mediante herramientas como la estratigrafía de secuencias y la geomorfología sísmica. Los

**How to cite:** Castillo-López, L.A. and Vargas-Cuervo, G., Geomorfología sísmica y elementos en ambientes fluvio lacustres en un sector de los Llanos Orientales (Colombia) Boletín de Ciencias de la Tierra, 43, pp. 45-52, Enero, 2018.



datos utilizados corresponden a una zona de la parte central de la Cuenca de los Llanos Orientales, los cuales son evaluados y analizados para extraer principalmente los elementos arquitecturales en ambientes fluviales, ubicados a varias centenas de metros del subsuelo. Entre ellos se tienen paleocanales, barras, diques y llanuras. Estos elementos están dispuestos en diferente forma, tanto espacial como temporal. El objetivo principal es el de mapear e interpretar la presencia de paleo-ríos en el subsuelo de un área de los Llanos Orientales. Mediante ello se pueden determinar las posibles unidades geomorfológicas con el fin de evidenciar su dinámica y características, relevantes en aplicaciones académicas o de Industria (Petrolera, Hidrogeología, Ingeniería, etc.). Así se propone establecer la distribución y extensión de geoformas encontradas en el subsuelo a más de un kilómetro de profundidad.

### 1.1. Localización e información

El área de estudio se encuentra en el sector Centro-Este de Colombia, en la Cuenca de los Llanos Orientales (Fig. 1), con información que comprende dos pozos con registros eléctricos (Rayo Gama y Densidad), un volumen sísmico de 40 km<sup>2</sup>, con un procesamiento preapilado en tiempo (3D *Pre-Stack Time Migration*-PSTM), una longitud de registro de 3s, tasa de muestreo de 2ms (Fig. 2).

Además del volumen sísmico e información de varios pozos, se dispone de datos de superficie: Cartografía, geomorfología, *raster*, MDT, imágenes de satélite y *Landsat*.

En la Cuenca de los Llanos Orientales, han sido llevados a cabo estudios estratigráficos [1-4], y estructurales [5-9]. En ellos se define la estratigrafía y tectónica de la cuenca, a partir de datos sísmicos y de pozos. En otros abordajes, se tienen aproximaciones alostratigráficas [10], o trabajos con descripciones e interpretaciones, por ejemplo, litoestratigrafía y estratigrafía de secuencias [11] a abordajes secuenciales [12-15].

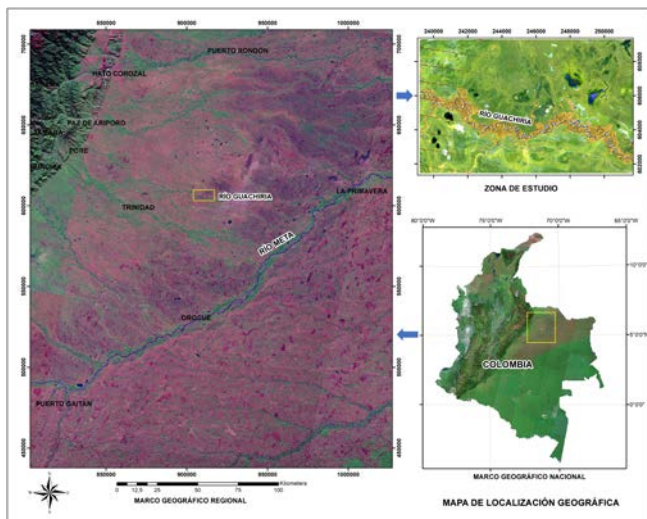


Figura 1. La zona de estudio se localiza en el extremo oeste de la Cuenca de los Llanos Orientales (Cuadro).

Fuente: Los autores

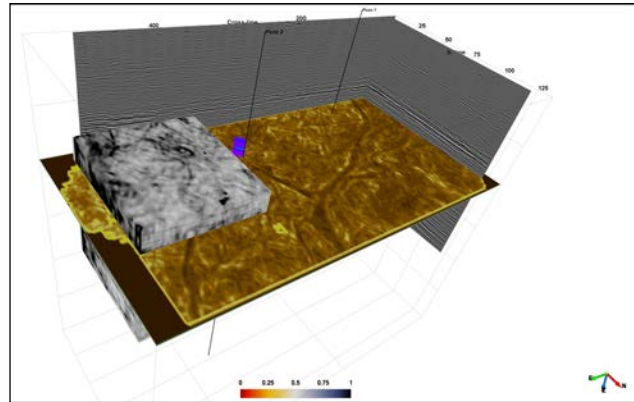


Figura 2. Información geofísica incluye el volumen sísmico e información de pozos (Escala X, Y y Z (Profundidad) en metros)

Fuente: Autores.

### 1.2. Estado del arte

En este estudio se hace uso de herramientas como la Geomorfología sísmica, que incluye estratigrafía de secuencias, y considera análogos, para hacer la interpretación de un sector de la cuenca, estableciendo la disposición espacio-temporal de los elementos de depósitos fluviales en profundidad. Regularmente, la geomorfología se asocia a datos de superficie o de la geología expuesta, sin embargo, la sísmica 3D permite determinar rasgos y elementos arquitecturales a diferentes profundidades, y no exclusivamente con elementos que están expuestos [16]. Para ello se hace uso del entendimiento estratigráfico, para establecer un modelo secuencial [17] que permita evidenciar las características para los diferentes sistemas deposicionales, asociados con análogos identificados en superficie. El modelo secuencial es deposicional tipo III [18].

## 2. Metodología

En áreas con litología homogénea y disposición de sedimentos en capas horizontales, casi planas, por ejemplo, los Llanos Orientales, la cartografía geológica en superficie no permite el conocimiento del subsuelo, esto ya que los paquetes de roca se disponen casi horizontalmente o con buzamientos muy pequeños (disposición plano paralela de los sedimentos), lo que obliga a emplear métodos indirectos (geofísica) para el conocimiento de las capas en el subsuelo. El análisis de los datos sísmicos hace necesario relacionar la geofísica, la geología y geomorfología a los procesos morfogenéticos superficiales, para ello se hace uso de herramientas como la geomorfología sísmica y la estratigrafía secuencial [17-19]. Así, es importante diferenciar el proceso de descripción y de la interpretación de datos sísmicos, lo cual se incluye en la metodología (Fig. 3). Previo amarre datos sísmica-pozo-geología, se determina las facies (Eléctricas, sísmicas o litológicas), y su asociación, buscando establecer los elementos característicos para encontrar los posibles ambientes. Con este análisis preliminar es posible determinar las superficies claves, límites, sistemas deposicionales, para finalmente obtener las secuencias.

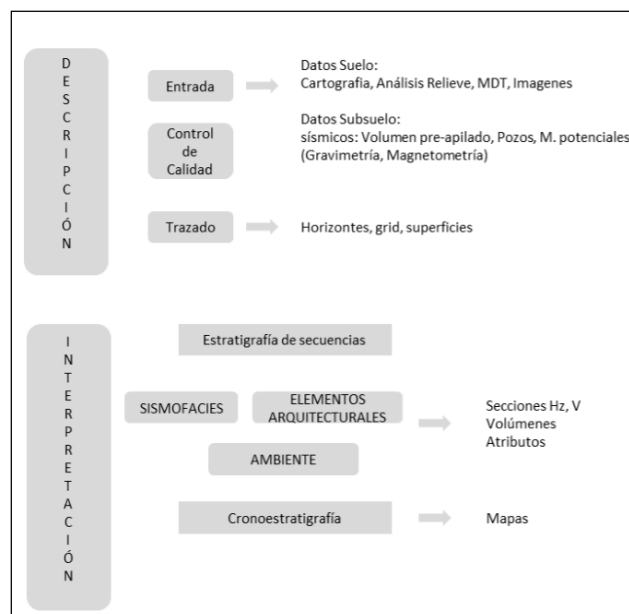


Figura 3. Metodología y seguimiento para el estudio geomorfológico.  
Fuente: Autores.

Los datos de superficie se analizan mediante el procesamiento e interpretación de imágenes de satélite multi-temporales particularmente Landsat TM, ETM y LDCM, con diferentes registros del comportamiento de las aguas (Bajas, medias y altas). El conjunto de datos es pre-procesado, mediante Filtros, atributos, o extracción de geocuerpos. Haciendo la descripción de secciones, más conocida como trazado de horizontes, es integrada, para finalmente obtener el modelo secuencial. Esta información integrada a la información de superficie, los análogos (Fig. 4), y sus elementos arquitecturales, son quienes permiten establecer una relación con los eventos del pasado, y que son analizados, descritos e interpretados en el subsuelo. El modelo final permite establecer una relación espacio-temporal de los elementos que constituyen los diferentes depósitos. En este estudio se busca identificar y describir los diferentes ambientes y secuencias a que pertenecen.

### 2.1. Marco teórico y análisis preliminar

La información de superficie sirve como análogo geomorfológico para el análisis de los sedimentos dispuestos

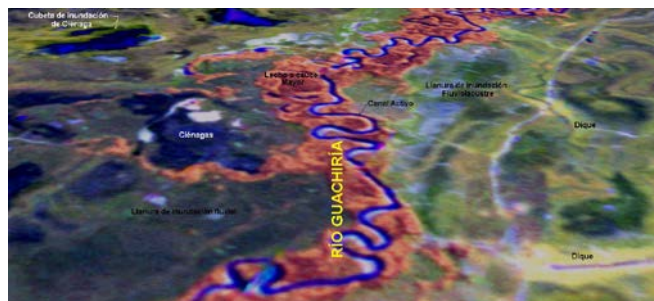


Figura 4. Análogo en superficie de la disposición de los diferentes elementos de un canal o grupo de los mismos  
Fuente propia. Base imagen Landsat procesada 3D.

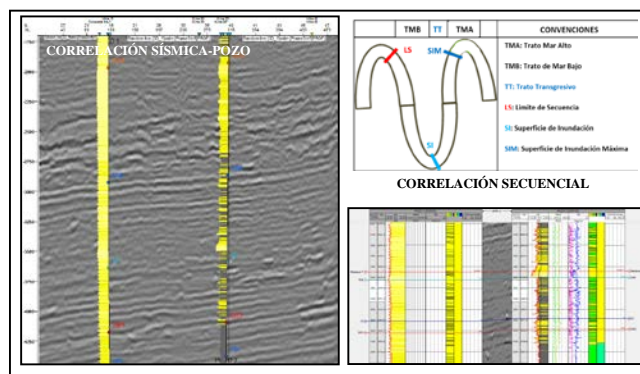


Figura 5. Correlación e interpretación secuencial de los pozos 1 y 2  
Fuente: Autores.

en el subsuelo. Dicha información ayuda a determinar elementos geomorfológicos en ambientes fluviales: Barras, superficies de desborde, *talveg*, meandros y diques, además de ambientes aledaños, como llanuras de inundación (Fig. 3). En el análogo, el lecho principal activo corresponde al río Guachiría, dispuesto en dirección casi oeste-este, con una marcada migración que se extiende casi 1 Km, respecto al cauce principal. Además, es evidente la presencia de barras, caracterizada por litología tipo arenosa. Los afluentes y drenajes menores están constituidos por cauces que convergen casi diagonales al lecho principal (dirección NNW-SSE).

Cuando se hace referencia a estudios secuenciales, esta no se limita únicamente a información sísmica; la correlación de pozos, mediante datos de afloramiento, columnas o registros eléctricos, constituyen otra herramienta, poco utilizada secuencialmente. En el área de estudio se tiene información de dos pozos, cuya correlación secuencial, se basa en el análisis de secuencias [20], lo que ayudó a interpretar la presencia de diferentes elementos arquitecturales, por ejemplo, paleocanales, planicies de inundación, y superficies erosivas, (Fig. 5) con diferente disposición, variando las geoformas, que van de paleocanales aislados, hasta complejo de paleocanales amalgamados. Estos elementos se determinan geoméricamente, y correlacionados con la interpretación secuencial de pozos, donde la asociación facial corrobora la identificación de los diferentes depósitos. Los paleocanales están ligados a superficies erosivas o cambios abruptos en las facies, mientras los de inundación a valores altos de los registros gama, y poca variación en los registros, con dominio de material fino.

El análisis se basa en la identificación de facies, donde se integraron las electrofacies y las litofacies (Arena y arcillas), además se consideran los parámetros necesarios para un análisis secuencial. Estos son, la eustasia, el aporte de sedimentos y espacio de acomodación. La razón entre el Espacio de Acomodación (E) y el Aporte de Sedimentos (S) permite establecer la disposición geométrica, extensión y apilado de los sedimentos (Fig. 5). Considerando las facies y teniendo en cuenta las variaciones en la vertical, estos no se cumplen con la horizontal, contradiciendo la Ley de Walter

[21]. Esta limitación es frecuente en ambientes de tipo continental, por ejemplo, los depósitos aluviales o de tipo limnológico.

### 3. Análisis geológico y geomorfológico

#### 3.1. Geomorfología de Superficie

La cartografía de superficie y la sísmica del subsuelo permitieron establecer para la zona, un ambiente fluvial y lacustre de piedemonte, donde los cauces fluviales siguen un patrón paralelo hasta la desembocadura del río Meta, que forma la barrera morfoestructural de la altillanura de la Orinoquía. Geológica y geomorfológicamente estos materiales se constituyen de depósitos inconsolidados de origen aluvial, lacustre y mezcla de estos desarrollan diferentes geoformas (Fig. 6), así: El cauce activo del lecho fluvial (Río Guachiría) presenta un patrón morfológico general paralelo y localmente meándrico o sinuoso. Este tributario activo se desplaza lateral y frontalmente sobre un lecho mayor [22] que se compone de arenas y limos de composición cuarzosa y lítica, proveniente de los materiales denudados de la cordillera oriental. A su vez, presenta un ancho entre 53 metros y 1,9 km, sobre el cual se caracterizan meandros abandonados o madre viejas como registro de su dinámica. Asociado al lecho mayor se desarrollan llanuras de inundación fluvial, que corresponden a zonas de amortiguamiento en periodos de aguas altas y son frecuentemente inundadas. Estas llanuras se componen de materiales más finos como limos y arcillas con altos contenidos de materia orgánica.

Posteriormente en una dimensión lateral a estas llanuras se presenta una morfología de cubetas formadas por Ciénagas y llanuras fluvio-lacustres compuestas principalmente por arcillas con alto contenido de materia orgánica.

Además de las formas en superficie, se tiene la evidencia de elementos arquitecturales para los paleo canales, que se disponen en dirección NE-SW. Esta disposición hace referencia al sistema

principal, con presencia de tributarios con dirección casi-NS. Estos paleo canales se presentan aislados hacia la base (Sistema de Nivel Bajo, SNB), pasando a un incremento en el espacio de acomodación, dando como resultado zonas de inundación, seguidos de disposición de sedimentos de forma progradante, incrementados en el apilado de complejos de canales (Sistema de Nivel Alto, SNA).

#### 3.2. Geomorfología Sísmica

Para los datos sísmicos 3D, basados en análisis de secciones horizontales es más fácil determinar, sus elementos arquitecturales: Lecho principal, Valle, Dique, cauce meandro y paleocauce. Aunque estos son los ambientes típicos de la Cuenca de los Llanos Orientales, debido a problemas de resolución, imagen, etc., se hace difícil establecer algunos elementos a profundidades mayores, por lo cual análogos, permiten encontrar geoformas o elementos geomorfológicos similares (Figs. 7, 8).

Para el estudio del subsuelo, la información sísmica original, mediante Atributos y estratigrafía secuencial, hace posible identificar y mapear las posibles geoformas. Se emplearon atributos aislados (Coherencia, Descomposición espectral, Impedancia, Energía, *RMS*, Similitud, Curvatura, entre otros) combinados con análisis en tiempos constante, intervalos entre horizontes, para determinar la disposición de los diferentes elementos arquitecturales.

Inicialmente se cuenta con las secciones extraídas del cubo sísmico, que permiten el análisis descriptivo del área. Sin embargo, al volumen original se le aplicaron diferentes atributos (ya mencionados) o combinación de ellos, y se extrajeron las secciones (Verticales y horizontales, Figs. 5-7). El atributo de Impedancia Acústica Relativa, permite hacer seguimiento a los diferentes paleo-ríos; estos se presentan a profundidades de 100m a 900m, siendo predominantemente geoformas sinusoidales con direcciones predominantes NE-SW.

A pesar de la evidencia de la existencia de diferentes paleocanales en el cubo sísmico, estos no pueden ser discriminados, con un solo atributo. Para ello se hizo otro análisis, basado en multiatributos, donde se consideran: el

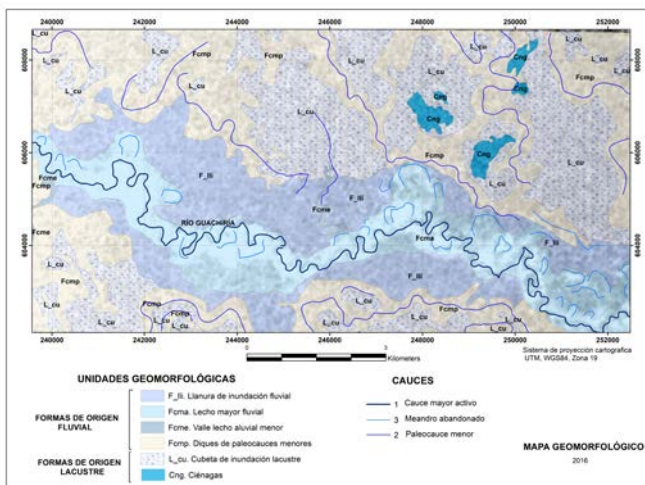


Figura 6. Unidades geomorfológicas en superficie: Corresponde a los análogos a establecer para el estudio geomorfológico en profundidad  
Fuente: Autores.

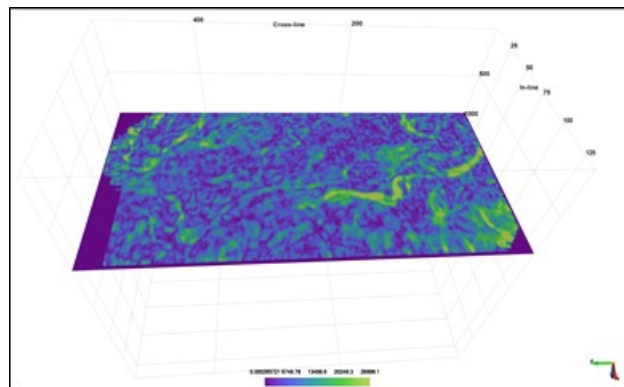


Figura 7. Sección Sísmica horizontal correspondiente a un atributo de coherencia aplicado al volumen  
Fuente: Autores.



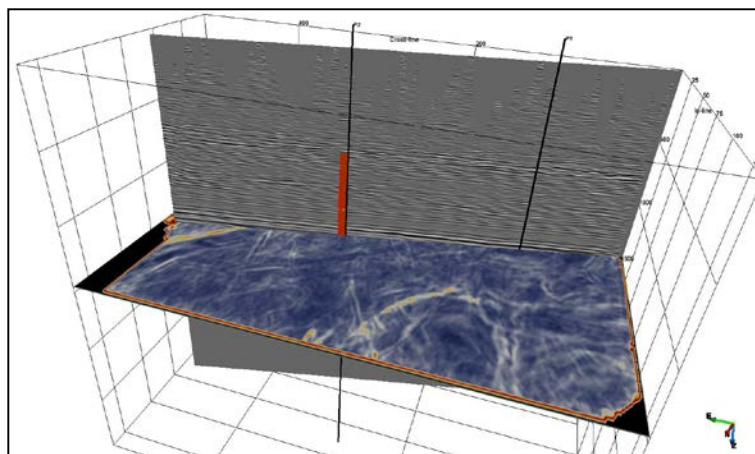


Figura 8. Sección Horizontal y la interpretación de paleocanales y su edad relativa, resultado de la combinación de 3 atributos sísmicos  
Fuente: Autores.

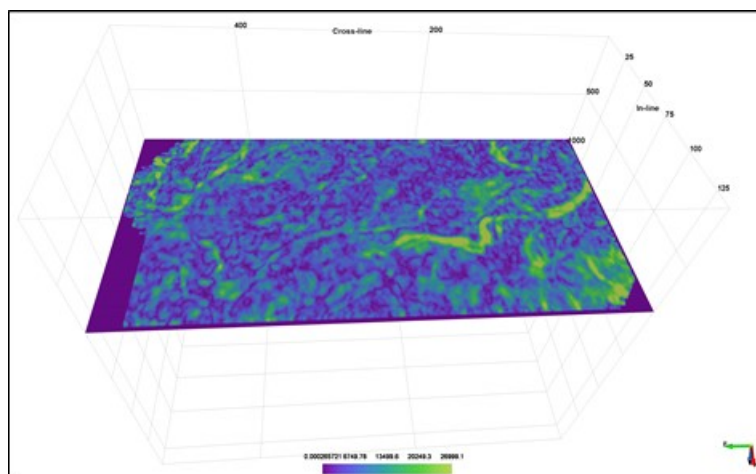


Figura 9. Extracción y análisis de atributos sísmicos, p.e., Descomposición espectral (frecuencias de 45-80Hz y saltos cada 10)  
Fuente: Autores.

RMS, cambio de fase, descomposición espectral y coherencia (Fig. 9). Mediante este Multiatributo se hace posible establecer la temporalidad relativa, siendo el más antiguo el paleo-canal 1, hasta el 7 como el más reciente. Además de la evidencia geométrica, mediante la descomposición espectral se hace posible encontrar la temporalidad relativa de los eventos, caso de diferentes paleo canales.

#### 4. Integración de la información y resultados

El uso de herramientas como la estratigrafía de secuencias permite integrar diferentes datos, por ejemplos sísmicos, pozos, cartografía de superficie, geoquímica, además de interpretación basada en análogos de superficie, con lo cual pueden determinarse características semejantes a los depósitos encontrados en el subsuelo. En sentido geomorfológico, la dinámica y disposición de los ríos actuales. Entre los elementos arquitecturales se presentan: el *talweg*, la barra, la superficie de desborde, entre otras. Los canales superiores se presentan entrelazados, correspondientes a paleocanales de tipo fluvial.

Hacia la parte intermedia cambia a régimen lineal de 8 km aproximadamente, a otros semi-rectos con longitudes mapeadas de 10 km, casi rectos con pocos meandros y cursos angostos. En su mayoría representan canales efímeros, en zonas de planicies inundadas.

Una vez se tienen el trazado de superficies, la determinación de sismofacies y su asociación, se hace posible establecer un modelo secuencial, el cual muestra en su verdadera posición espacio-temporal los diferentes eventos marcados. Así, inicialmente se tienen los elementos asociados a los procesos erosivos, dando lugar a depósitos de canales, pertenecientes al Sistema de Mar Bajo (Fig. 10a); a esto se siguen procesos de inundación, donde el predominio es netamente del material arcilloso, resultado del aumento del nivel eustático relativo [18], donde el nivel base, en este caso el lago, tiende al mar, correspondiente a un sistema transgresivo (Fig. 10b), donde se tiene un incremento en la relación entre el espacio de acomodación y el aporte de sedimentos ( $E/S > 1$ ). A partir de este evento se suceden ciclos de inundación y también caídas eustáticas. Estos ambientes están ligados a ciclos de subida y

descenso del nivel base, considerando una subsidencia suave y constante, al igual que la sedimentación. Finalmente, se tiene la deposición de las progradaciones asociadas al sistema de Mar

Alto, con mucho aporte de sedimentos y reducción en el espacio de acomodación ( $E/S < 1$ ), dando lugar a la progradación de sedimentos (Fig. 10c).

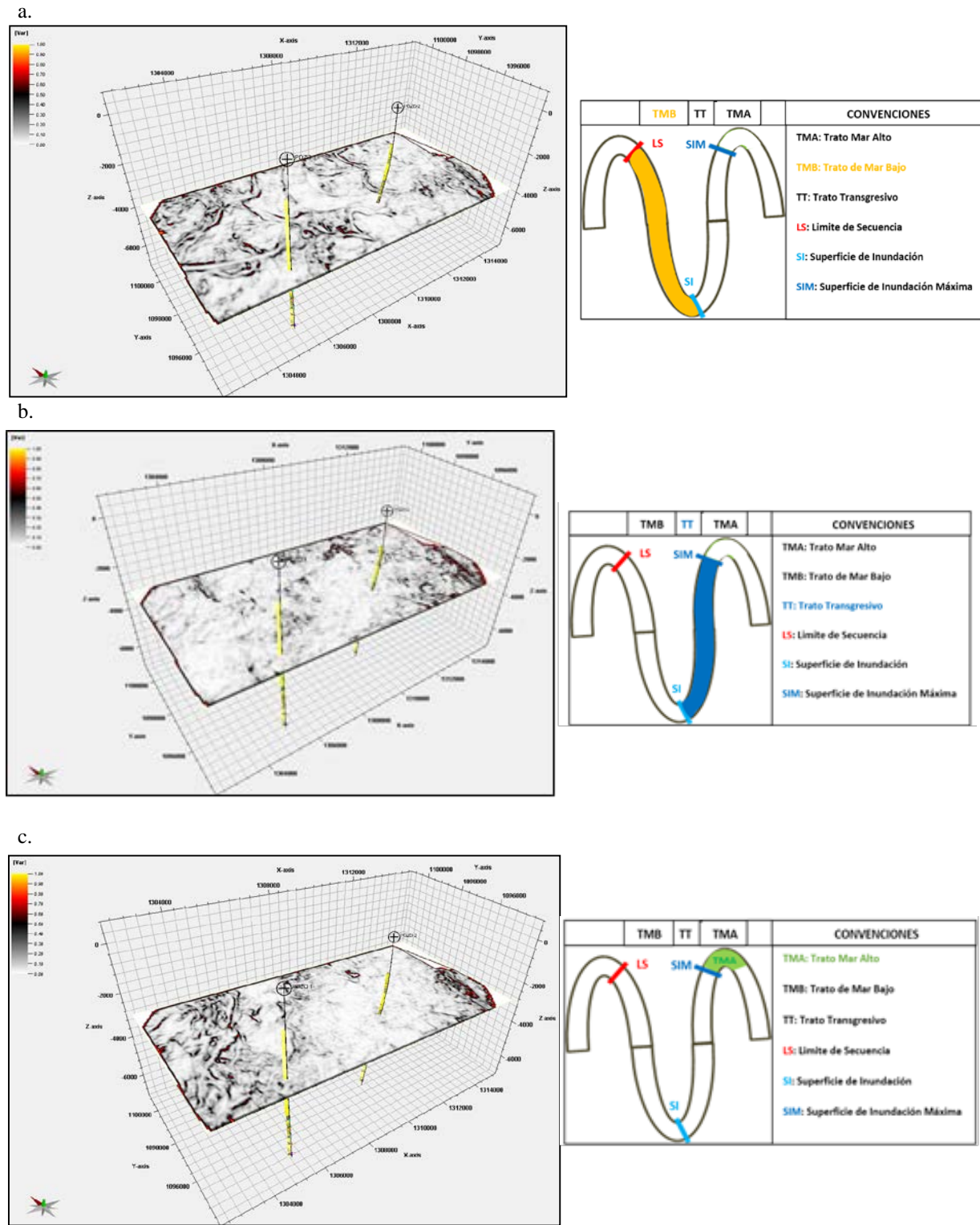


Figura 10. Análisis secuencial e integración a la curva eustática relativa de los sistemas de depósito Bajo (a), Transgresivo (b) y Alto (c).  
Fuente: Autores.



La última etapa permite extraer la disposición tridimensionalmente (voxel), de las diferentes geoformas analizadas, permitiendo obtener la disposición espacio-temporal de los diferentes elementos arquitecturales de depósitos fluviales desde la superficie hasta los eventos más profundos, en este caso analizados para la Cuenca de los Llanos Orientales, hasta el Paleógeno [14 y 19].

## 5. Conclusiones

Interpretaciones geológicas y geofísicas, no deben ser confundidas con descripciones. Por ello, se tienen que incluir componentes espacio-temporales, ejemplo de ello es la estratigrafía de secuencias. En este artículo el análisis es netamente secuencial, y no de tipo litoestratigráfico.

La extracción de datos del subsuelo hace necesario el uso de métodos o herramientas indirectas, caso de la información sísmica. Además, se requiere de la integración con otras herramientas para establecer un control espacio-temporal de las diferentes geoformas. Así, en la Cuenca de los Llanos Orientales, las diferentes superficies, como discordancias, inundación, máxima inundación, son claves para la definición secuencial.

Incisiones fluviales acontecieron durante el sistema de nivel bajo, donde los diferentes paleocanales en su mayoría tienen lugar durante la caída eustática, y un bajo cociente de sedimentación/espacio de acomodación (S/E), sin embargo, las características geomorfológicas cambian. Esta variación está relacionada con la disposición de los sedimentos y el basculamiento de la cuenca.

Los análogos permiten visualizar la disposición actual del sistema fluvial, aunque este ha variado con el tiempo. La disposición de los paleocanales en el subsuelo, presentan una dirección preferencial NW-SE, con tributarios casi oblicuos.

Análisis multiatributos, integrados a la secuencial permiten caracterizar la disposición estratigráfica, especialmente en sistemas de mar bajo, los cuales son dominados por paleocanales, cambiantes a sistemas transgresivos, dominados por zonas inundadas. Estos terminan con el apilado de sedimentos progradantes, correspondientes a sistemas de mar alto.

Los límites secuenciales tienen un sentido temporal, así las secuencias inferiores presentan depósitos más antiguos, que los encontrados por encima de la secuencia.

## Bibliografía

- [1] Bayona, G., Jaramillo, C., Rueda, M., Reyes-Harker, A. and Torres, V., Paleocene-Middle Miocene flexural-margin migration of the non-marine Llanos foreland basin of Colombia. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(3), pp. 141-160, 2007.
- [2] Fajardo, A., Rojas, E., Cristancho, J. y Consorcio G. y G., Going System, L., Definición del modelo estratigráfico en el intervalo Cretáceo tardío a Mioceno medio en la Cuenca Llanos Orientales y Piedemonte Llanero. *Ecopetrol S.A. Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Piedecuesta*, 2000, pp. 1-126.
- [3] Santos, G., Jaramillo, C., Torres, V., Rueda, M., Flórez, P. y Rodríguez, G., Influencia marina en el Eoceno tardío del Oriente y Suroriente de Colombia. *Boletín de Geología*, 29(2), pp. 57-65, 2007.
- [4] Sarmiento, L.F., *Petroleum geology of Colombia, Llanos Basin. Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT-ANH*, 2011.
- [5] Bayona, G., Cortes, M., Jaramillo, C., Ojeda, G., Aristizabal, J. and Reyes-Harker, A., Integrated analyses of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous evolution of the linked Eastern Cordillera Orogen and the Llanos foreland Basin of Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 120, pp. 1171-1197, 2008. DOI: 10.1130/B26187.1
- [6] Cooper, M.A., Addison, F.T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R.H., Hayward, A.B., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J. and Taborda, A., Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and middle Magdalena Valley, Colombia. *America Association of Petroleum Geologists*, 79(10), pp. 1421-1443, 1995.
- [7] Cortés, M., Bayona, G., Aristizabal, J., Ojeda, G., Reyes Harker, A. and Gamba, N., Structure and kinematics of the eastern foothills of the eastern cordillera of Colombia from balanced cross-sections and forward modelling. En: *Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Cartagena, Colombia*, 2006, 14 P.
- [8] Mora, A., Parra, M., Strecker, M.R., Kammer, A., Dimate, C., and Rodríguez, F., Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. *Tectonics*, 25, 2006, pp 1-19. DOI: 10.1029/2005TC001854
- [9] Sarmiento, L.F., Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes, Inferences from tectonic models. Doctorate Theses, Netherlands research, School of Sedimentary Geology, Netherland, 2001.
- [10] Aguilar-Rangel, S., Estratigrafía secuencial de las unidades aflorantes en las quebradas La Piñalera (Sabanalarga) y La Pescana (Monterrey) Casanare, Colombia. *Geología Colombiana. Edición X Semana Técnica de Geología e Ingeniería Geológica Bogotá, Colombia*, 37(1), pp. 9-10, 2012.
- [11] Duarte, E., Bayona, G., Jaramillo, C., Parra, M., Romero, I., y Mora, J.A., Identificación de los máximos eventos de inundación marina Miocenos y su uso en la correlación y análisis de la cuenca de antepaís de los Llanos Orientales, Colombia. *Boletín de Geología*, 39(1), pp. 19-40, 2017. DOI: 10.18273/revbol.v39n1-2017001
- [12] Arango, J., Análisis sismoestratigráfico de la formación carbonera Miembro C7 (Municipios de Orocué y San Luis de Palenque, Cuenca Llanos Orientales), Colombia. Tesis de Maestría en Ciencias Geología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2014.
- [13] Torrado, L., Mann, P. and Bhattacharya, J., Application of seismic attributes and spectral decomposition for reservoir characterization of a complex fluvial system: Case study of the Carbonera Formation, Llanos foreland basin, Colombia, 2014.
- [14] Villamizar, F., Análisis Sismoestratigráfico y secuencial del sector sur oeste de la Cuenca de los Llanos orientales (Colombia). Tesis de Maestría en Ciencias Geología, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia, 2015.
- [15] Villamizar, F. y Castillo L.A., Análisis sismoestratigráfico y secuencial del sector sur oeste de la Cuenca de los Llanos orientales (Colombia). *Boletín de Geología, UIS*, 38(3), pp. 55-69, 2016. DOI: 10.18273/revbol.v38n3-2016004
- [16] Brown, A., Interpretation of three-dimensional seismic data. *AAPG Memoir* 42, pp. 72-83, 1986.
- [17] Posamentier, H. and W., Seismic geomorphology: Imaging elements of depositional system form shelf to deep basin using 3D seismic data: Implications for exploration and development. In: Davis, R.J. Cartwright, J., Stewart, S.A., Lappin, M. and Underhill, J.R. Eds. 3., 3D seismic terminology: Application to the exploration of the sedimentary basins, Geological Society of London, Memoir. 2004, 274 P.
- [18] Catunenanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J.P., Blum, M.D., Dalrymple, R.W., Erikson, P.G., Fielding, C.R., Fisher, W.I., Galloway, W.E., Gibling, M.R., Giles, K.A., Holbrook, J.M., Jordan, R., Kendall, C.G. St.C., Macurda, B., Martinsen, O.J., Miall, A.D., Neal, J.E., Nummedal, D., Pomar, I., Posamentier, H.W., Pratt, B.R., Sarg, J.F., Shanley, K.W., Steel R.J., Tucker M.E. and Winker, C.,

Towards the standardization of sequence stratigraphy, earth science Reviews, Elsevier's Sciences & Technology. British Library, [online]. 2008. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/50a9/8f2548cfae4e6ef7cd32f3b622eb4d82c443.pdf>

- [19] Castillo L.L.A., Interpretação sismoestratigráfica e geomorfologia sísmica do Cone de Rio Grande, Bacia de Pelotas. Teses de Doutorado, Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Departamento de Geociencias. Porto Alegre (Rio Grande do Sul). Porto Alegre, Brazil, 2009.
- [20] Karogodin, Y.N., Relações mutuas entre os complexos cíclicos sedimentares em seções de bacias contendo Petróleo e gás. Dohl. Akad. Nauk. SSSR. 220(6), pp. 1414-1416, 1975.
- [21] Middleton, G., Johannes Walther's law of the correlation of facies GSA Bulletin, [online]. 84(3), pp. 979-988, 1973. Available at: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1973\)84<979:JWLOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1973)84<979:JWLOT>2.0.CO;2)
- [22] Vargas, G., Guía y catálogo de unidades geomorfológicas en Colombia por sensores remotos. Universidad Nacional de Colombia. Primera edición. 2015, 195 P.

**L.A. Castillo-López**, es Geólogo (1994) de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia, MSc. en Geofísica (2000) de la UFPA (Brasil), y PhD en Estratigrafía (2009) de la UFRGS (Porto Alegre, Brasil). Actualmente es consultor, en el sector de hidrocarburos. Su interés incluye interpretación sísmica, estratigrafía de secuencias, procesamiento, interpretación y modelamiento sísmico, Geofísica de superficie. En la academia ha sido director de por lo menos 30 tesis de pregrado, 15 de maestría, y encaminado algunas de doctorado.  
ORCID: 0000-0003-4444-2129

**G. Vargas-Cuervo**, es Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, DESS en Teledetección y Dr. en Ciencias de la Tierra de la Universidad Pierre et Marie Curie, Paris VI. Profesor de la Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geografía, sede Bogotá, Colombia. Coordinador grupo de investigación en Geotecnologías y autor de libros y artículos de geomorfología de zonas tropicales.  
ORCID: 0000-0003-2489-3993



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales  
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de  
Materiales

Mayor información:

E-mail: [acgeomin\\_med@unal.edu.co](mailto:acgeomin_med@unal.edu.co)

Teléfono: (57-4) 425 53 68

# Implementation of Software SimSched Direct Block Scheduler for a polymetallic deposit modifying geometric variables

David Oliveros-Sepúlveda<sup>a</sup>, Eliana Hijuelos-Franco<sup>a</sup>, Jenis Margoth Trespalacio-Torres<sup>a</sup> & Giovanni Franco-Sepúlveda<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Grupo de Planeamiento Minero Giplamin, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [doliveross@unal.edu.co](mailto:doliveross@unal.edu.co), [ehijuelosf@unal.edu.co](mailto:ehijuelosf@unal.edu.co), [jmtrespalaciot@unal.edu.co](mailto:jmtrespalaciot@unal.edu.co)

<sup>b</sup> Grupo de Planeamiento Minero Giplamin Departamento de Materiales y Minerales, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [gfranco@unal.edu.co](mailto:gfranco@unal.edu.co)

Received: August 19<sup>th</sup>, 2016. Received in revised form: November 23<sup>th</sup>, 2017. Accepted: December 07<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

The following article intends to study the final pit of a hypothetical polymetallic deposit using the SimSched DBS software, based on a set of consecutive stages such as final pit with nested pits, phase design, operational sequence period by period, among others; this is done through the modification and analysis of geometric variables such as the slope angle, the vertical advance and the bottom of the pit. In addition, the close relationship between the variation of the Net Present Value (NPV) and the modification of the three geometric variables considered above is studied.

**Keywords:** SimSched DBS; final pit; slope angle; optimal economic value; vertical advance; bottom of the pit; optimization; cumulative VPN.

# Implementación del Software SimSched DBS para un yacimiento polimetálico modificando variables geométricas

## Resumen

Con el siguiente artículo se pretende estudiar el tajo final de un yacimiento hipotético polimetálico utilizando el software SimSched DBS, basado en un conjunto de etapas consecutivas como tajo final con tajos anidados, diseño de fases, secuencia operacional período a período, entre otros; esto mediante la modificación y análisis de variables geométricas como son el ángulo del talud, el avance vertical y el fondo del tajo. Además, se estudia la estrecha relación entre la variación del Valor Presente Neto (VPN) y la modificación de las tres variables geométricas consideradas anteriormente.

**Palabras clave:** SimSched DBS; tajo final; ángulo del talud; valor económico óptimo; avance vertical; fondo del tajo; optimización; VPN acumulado.

## 1. Introducción

Los procesos productivos del sector minero presentan día a día retos en cuanto a la optimización de ellos se refiere, es por esto por lo que ha sido necesaria la búsqueda de software que permitan lograr objetivos operativos y financieros mediante el aumento del valor presente neto (VPN) y la disminución de riesgos.

El software SimSched DBS es un software innovador que permite mediante el suministro de información certera de la mina, utilizar un modelo matemático que está basado en incertidumbres que anteriormente no eran contemplados en la industria minería, permitiendo así trabajar con datos y riesgos reales que pueden ser controlados a tiempo y que posibilitan la disminución de costos de operación y aumentan el valor del proyecto minero.

**How to cite:** Oliveros-Sepúlveda, D., Hijuelos-Franco, E., Trespalacio-Torres, J.M. and Franco-Sepúlveda, G., Implementation of Software SimSched Direct Block Scheduler for a polymetallic deposit modifying geometric variables. Boletín de Ciencias de la Tierra, 43, pp. 53-58, Enero, 2018.

Esta versión beta del software permite un secuenciamiento de un modelo matemático de bloques de un yacimiento polimetálico hipotético que tiene como fin determinar el destino final de cada uno de estos bloques; según sus características y valor pueden ser enviados a un proceso de recuperación de mineral o para el botadero, estos resultados arrojados en el modelamiento son importantes a la hora de tomar decisiones operacionales y financieras.

También permite además diferenciar y analizar por separado la optimización del tajo final y el secuenciamiento de los bloques directos por las opciones que brinda al momento de realizar un modelamiento que determina el número de períodos y la cantidad extraída de mineral al ingresar datos para realizar la simulación y el posterior análisis de los resultados.

Las variables geométricas suministradas son importantes para el funcionamiento adecuado de este, ya que, determinan de forma directa el valor neto del proyecto y es notable en las simulaciones que las variaciones de estas conllevan a cambios importantes en el VPN acumulado, esto es debido a que en minería el conjunto de parámetros que se utilizan son los que fijan los riesgos y resultados a largo plazo que se obtiene. El ángulo del talud, el avance vertical y el fondo de tajo, son variables que se deben conocer, entender y analizar si se quiere utilizar de forma adecuada una herramienta como el software minero SimShed DBS.

## 2. Metodología

Se ingresó al software un modelo de bloques de un yacimiento mineral polimetálico hipotético, el cual fue elaborado en la base de datos Marvin (extensión .csv) con una cantidad de bloques de 60, 61 y 17 (x, y, z) y una dimensión de 15mx15mx10m respectivamente, para un total de 139 millones de metros cúbicos, los cuales presentan una distribución no uniforme en la cantidad de metal de interés (oro y cobre). En la Fig. 1 se pueden observar las vistas frontal, lateral y superior (respectivamente) del modelo geológico. [1]

### 2.1. Software minero SimSched DBS

En la actualidad se utilizan una variedad de software para el planeamiento minero estratégico con el objetivo de modelar y optimizar los recursos, presentando datos e imágenes a escala real de un yacimiento.

SimSched está basado en técnicas de Programación Entera Mixta con la adición de heurísticas propias. Permite que problemas más complejos sean englobados en un único

proceso de optimización y que incertidumbres geológicas sean consideradas simultáneamente, resultando en mejores decisiones en la operación, control y reducción de riesgos del proyecto y aumento de valor del mismo.

Su modelo matemático hace uso de superficies, para control preciso de aspectos geotécnicos, y es capaz de incluir cualquier restricción aditiva (producciones, horas de equipo, distancias de transporte, entre otros) y múltiples restricciones de blindaje, a medida que el producto va alcanzando sus etapas planeadas de desarrollo. Es capaz de decidir cuáles bloques explotar, cuándo deben ser explotados y si cada bloque debe ser procesado, descartado o almacenado (optimización de destinos). Es capaz de optimizar leyes de corte al mismo tiempo en que la secuencia es definida y de manera óptima y economizando el tiempo de configuración de parámetros para sucesivas pruebas. [2]

### 2.2. Consideraciones iniciales

A continuación, se mencionarán los valores de los parámetros económicos y geométricos que no variaron y cuales se introdujeron inicialmente en el programa, estos datos al igual que la base de datos son hipotéticos. La mayoría de estos valores fueron arrojados y sugeridos por el software para el modelo geológico inicial.

- La unidad monetaria con la cual se trabajó fue el Dólar Americano (US \$).
- Unidades de concentración mineral: La concentración del cobre (Cu) se expresó en porcentaje (%) y para el oro (Au) se utilizaron las partes por millón (PPM).
- La densidad promedio de todo el macizo rocoso fue de 2,7 t/m<sup>3</sup>.
- La tasa de descuento sugerida fue del 10% y el costo de minado fue de US\$ 2,4/t.
- Teniendo en cuenta la dimensión del depósito y del tajo final, se consideró un Stockpile con capacidad para 150000 toneladas.
- Se consideraron 10 períodos de tiempo, en los cuales todos presentan el mismo volumen a explotar, sin embargo, el software modifica (aumentando o disminuyendo) el número de períodos para obtener nuevos volúmenes de extracción con un VPN mayor.

Igualmente es importante mencionar los valores iniciales de las variables que se modificaron:

- El ángulo de talud con el que se trabajó en las variaciones de las dimensiones del fondo del tajo y del avance vertical fue de 40°.
- 10 metros fue el avance vertical empleado en las variaciones del ángulo de talud y de las dimensiones del fondo de tajo.
- La dimensión del fondo de tajo considerada para las variaciones del ángulo de talud y el avance vertical fue de 50 metros.

### 2.3. Ángulo del talud

El talud de la mina es el plano inclinado que se forma por la sucesión de las caras verticales de los bancos y de las

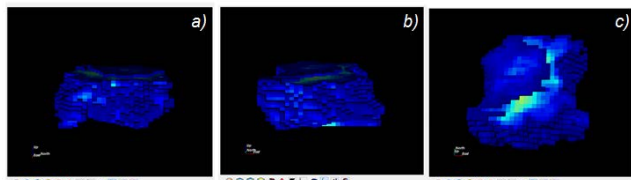


Figura 1. Vista a) frontal, b) lateral y c) superior del modelo de bloques del yacimiento polimetálico hipotético en la plataforma SGEMS by ar2tech.

Fuente: Elaboración propia.

bermas respectivas. La inclinación del plano respecto a la horizontal está dada por la calidad del macizo rocoso que conforma la mina.

El ángulo de talud es uno de los parámetros geométricos más significativos en la explotación de un tajo, ya que una de las restricciones operacionales más relevantes es garantizar la estabilidad de cada uno de los sectores involucrados. Para esto se requiere mantener una geometría de diseño que permita un máximo beneficio económico y un mínimo factor de riesgo geomecánico. Cualquier variación de los ángulos de talud generara dos efectos directos:

Cambios en la estabilidad del talud y la explotación.

Cambios en los beneficios económicos de la explotación

Al aumentar el ángulo del talud, disminuye la cantidad de estéril a remover para la extracción de la misma cantidad de mineral. De esta forma se pueden extraer reservas que antes no eran posible, generando un aumento en los beneficios económicos de la explotación. El incremento del talud sólo es viable en el caso que las condiciones geomecánicas del macizo lo permitan.

Puede darse el caso contrario al aparecer una nueva información geomecánica que obligue bajar el ángulo del talud, lo que generará una mayor cantidad de estéril para remover y menor cantidad de mineral a extraer. [3]

#### 2.4. *Avance vertical*

En el desarrollo de los procesos mineros es indispensable el avance vertical para poder remover el estéril necesario y extraer el mineral de interés, pues la relación estéril/mineral puede determinar la rentabilidad y valor de un proyecto minero. Es por esto que se incorpora esta variable en los modelos matemáticos de secuenciamiento de bloques. El método de explotación para este yacimiento polimetálico hipotético es el banqueo descendente, el cual utiliza secciones verticales troncocónicas que permitan un desfase entre bancos para contemplar las dimensiones mínimas que deben tener las plataformas donde operan las máquinas con un rendimiento óptimo y condiciones de seguridad adecuadas. [4]

En estos yacimientos es recomendable el método de explotación mencionado anteriormente para que pueda existir un frente libre que garantice la salida y proyección del material y que la extracción en cada uno de los niveles se realice en un banco con uno o varios tajos. [5]

El avance vertical se realiza desde 10 metros que es lo mínimo hasta 120 metros que es lo máximo por las dimensiones de los bloques. Es una variable geométrica que además tiene relación considerable con la geotecnia del macizo, ya que las condiciones de estabilidad del yacimiento determinarán en que momento es posible realizar el avance

En este caso hipotético se pudo analizar que entre más se avanzaba en el yacimiento el VPN disminuía, es decir, los primeros años del proyecto se obtendrían las mayores ganancias aunque esto contradice a la mayoría de casos que afirman que en los primeros años de una operación minera se obtienen las menores ganancias, en nuestro caso obedece a las características del yacimiento hipotético que contiene las

mayores cantidades de mineral en los primeros metros de explotación, lo que no significa que al finalizar el proyecto se obtendrán pérdidas, pues el VPN durante las simulaciones no fue negativo.

#### 2.5 *Fondo del tajo*

La dimensión final del tajo representa la terminación de una explotación a cielo abierto y es el resultado de una serie de toma de decisiones las cuales afectan directamente todo el ciclo y las etapas del proyecto, desde el inicio hasta el abandono de la operación, es por esto por lo que se hace indispensable la adecuada identificación e interpretación de variables que permitan conseguir un tajo final óptimo, como:

Morfología del depósito mineral: Es el parámetro más importante para la definición de las dimensiones del tajo final, ya que determina la cantidad de mineral y su distribución.

Factores geométricos: Las condiciones geomecánicas del macizo permiten y restringen el incremento o disminución del ángulo final del tajo, el avance vertical, el ancho de los bancos, entre otros.

Variabilidad económica del proyecto: Parámetros como el constante cambio del precio de los minerales en el mercado, costo de extracción y el costo de los equipos influyen de manera directa en la dimensión de la explotación y, por tanto, en la dimensión final del tajo. [6]

Para la variación del fondo final del tajo se partió desde el valor de 20 hasta 200 metros, aumentando de a 10 metros, obteniendo al final un total de 20 procesos en los cuales el VNP y el total de Cu-Au extraídos presentan variaciones significativas. Es importante mencionar que el rango que el software brinda para la variación de este parámetro es de 10 a 900 metros, sin embargo, en estos dos valores el VNP obtenido es bastante bajo en comparación con los valores mencionados anteriormente.

### 3. Resultados, análisis y discusión

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en este artículo:

#### 3.1. *Ángulo de talud*

Se tomaron 11 datos para el ángulo del tajo final, tomando como valor final un ángulo de 45° que es el máximo permitido por caracterización geomecánica del macizo y se compararon con el VPN acumulado obtenido y la extracción de cada proceso. La variación del ángulo global del talud, la respectiva variación de su VPN y de la extracción del mineral se muestran en la Tabla 1 y Fig. 2.

Observamos que variando la pendiente del talud al llegar al mayor ángulo permisible por el estudio geomecánico, el cual fue de 45°, se obtuvo un máximo beneficio económico, extrayendo más mineral de interés y removiendo menos cantidad de estéril. También se determinó que no siempre una mayor extracción de mineral representa un aumento del VPN, por el contrario, es posible que este caiga debido a los costos de operación que representa un proyecto a mayor escala.



Tabla 1.

Variación del ángulo global del talud con el VPN acumulado y la producción de cada proceso.

Variación del ángulo $\alpha$ del talud (°)	VPN acumulado (M US\$)	Metal Cu (kt)	Metal Au (kg)	Toneladas (kt)
35	1175,98	100,62	8359,86	25785,86
36	1190,94	101,28	8392,13	25978,24
37	1201,54	101,23	8397,01	25958,81
38	1213,13	100,56	8354,99	25745,36
39	1224,68	129,43	12544,96	25760,39
40	1230,02	100,06	8315,32	25566,74
41	1238,4	130,16	12602,69	25947,79
42	1226,66	131,02	12684,92	26154,57
43	1254,72	130,89	12672,04	26130,55
44	1258,68	131,61	12712,04	26302,52
45	1263,39	132	12742,22	26394,86

Fuente: Elaboración propia

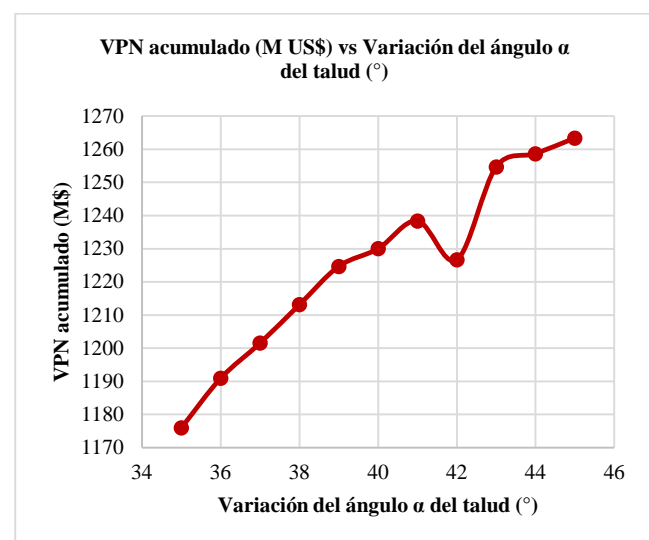


Figura 2. Variación del ángulo global del talud vs VPN acumulado.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.

Variación del avance vertical con el VPN acumulado y la extracción de mineral de cada proceso.

Avance Vertical (m)	VPN Acumulado (M US\$)	Cu (Kg)	Au (Kt)	Total (Kt)
10	1230,02	100,4	8315,32	25566,74
20	1229,96	100,07	8315,32	25566,75
30	1227,32	85,78	9701,21	25566,76
40	1222,03	100,07	8315,33	25566,76
50	1213,91	100,07	8315,33	25566,75
60	1205,97	100,07	8315,33	25566,75
70	1198,42	100,08	8315,34	25566,76
80	1197,45	100,06	8315,32	25566,76
90	1184,31	100,06	8315,33	25566,76
100	1177,47	100,06	8315,34	25566,75
110	1167,81	98,84	8203,98	24987

Fuente: Elaboración propia.

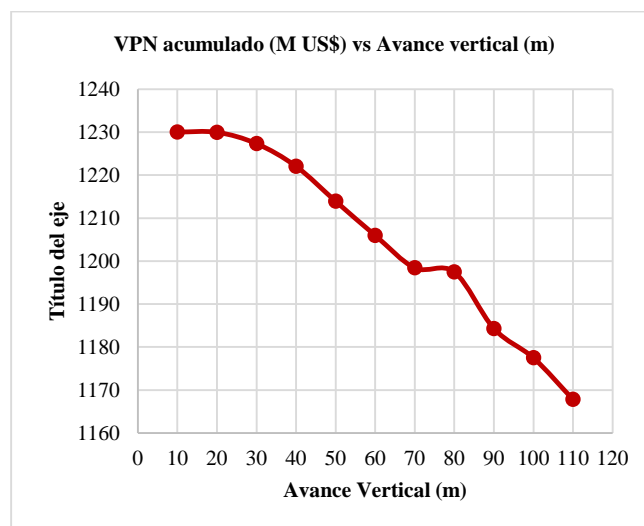


Figura 3. Variación del avance vertical vs VPN acumulado

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Avance vertical

En las simulaciones realizadas para el avance vertical se realizaron 11 muestras, se avanzó en el yacimiento cada 10 metros. El dimensionamiento inicial de los bloques (15x15x10) determina el avance máximo de 120 metros en el yacimiento, esta es la razón por la que en las simulaciones presentadas no es visible el máximo avance porque para el software es una inconsistencia calcular un VPN después del avance vertical máximo en un yacimiento. En la Tabla 2 se aprecia la variación del avance vertical con el VPN acumulado y a extracción de cada proceso.

En la Fig. 3 se puede observar que a medida que avanzamos verticalmente en el yacimiento polimetálico disminuye el VPN, esto se debe a que en los primeros metros del yacimiento hipotético estudiado durante este artículo exista mayor concentración y cantidad de metales que a profundidad, es decir, la relación estéril/mineral en la parte superior del yacimiento es mayor para el mineral, y en el fondo esta relación es mayor para estéril. Es necesario tener en cuenta que dentro de los resultados el programa define como inconsistente el avance máximo de 120 metros determinado por las dimensiones iniciales de los bloques, debido a que el programa asume que es el final del yacimiento y no habría mayor avance a partir de allí. Es preciso anotar que a pesar de que el VPN disminuía constantemente, entre el avance de 65 a 85 metros tiende a aumentar, por lo que se presume que en este tramo podría existir una inconsistencia geológica que permite la existencia de mayor mineral que en los metros restantes. Es necesario hacer hincapié en que a pesar de que el VPN disminuye a medida que se avanza verticalmente, la extracción del mineral es rentable porque el VPN en los 120 metros es positivo.

### 3.3. Fondo de tajo

Las variaciones de las dimensiones de fondo de tajo se llevaron a cabo desde los 20 hasta los 200 metros, se pudo

Tabla 3.  
Comparativo de los datos arrojados por el Software SimSched DBS para las variaciones del fondo de tajo final.

Dimensión tajo (m)	VPN Acumulado (M\$)	Cantidad Extraída		
		Cu (kt)	Au (kt)	Total (kt)
20	1221,2	129,98	12594,45	25897,08
50	1230	128,66	12472,99	25566,74
60	1230,3	128,76	12484,2	25585,6
70	1222	131,3	12696,24	26255,1
130	1196,2	130,05	12600,8	25999,89
140	1183,8	132,64	12797,17	26657,36
150	1171,3	126,84	12327,89	25246,27
200	1002,4	115,48	11251,72	23154,95

Fuente: Elaboración propia.

verificar que el valor sugerido por el software (50 metros) no es el óptimo para este modelo geológico, sin embargo, se acerca bastante a los 60 metros, el cual refiere la mejor dimensión posible ya que presenta el VPN más alto. Otro valor a destacar es el de 140 metros ya que muestra la cantidad extraída de oro (kg) y cobre (kt) más alta, al igual que la mayor cantidad de material removido.

Aunque se realizaron 20 variaciones, con 20 valores diferentes, sólo se mencionan los resultados más relevantes del VPN y de la cantidad de mineral extraída. Estos resultados se muestran en la Tabla 3.

La Fig. 4 ilustra la dimensión final de Fondo de Tajo vs el VPN obtenido por cada valor.

Se puede observar que, utilizando el valor de 60 metros para la dimensión del tajo final se obtiene el valor más alto

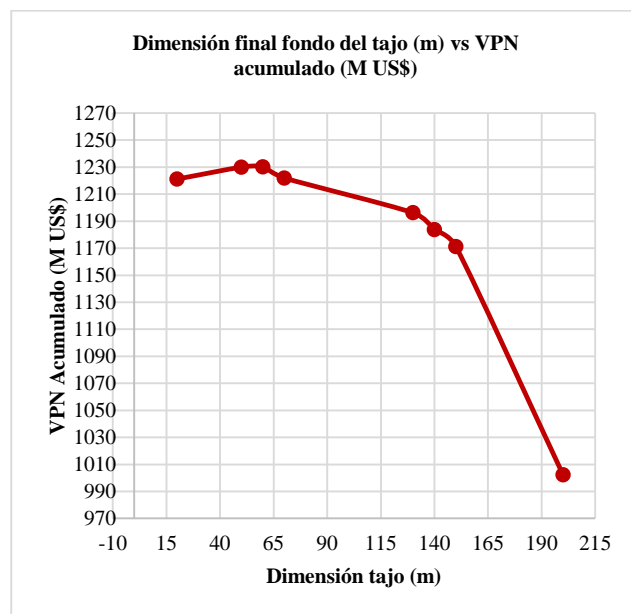


Figura 4. Gráfica del VPN vs Dimensión del Tajo final  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.  
VPN hallado empleando los valores óptimos del ángulo de talud, avance vertical y fondo de tajo.

Período	VPN (M US\$)	Acumulado VPN (M US\$)
1	597,8	597,8
2	403,3	1001
3	211,4	1212,5
4	52,9	1265,4

Fuente: Elaboración propia.

del VPN, \$1230,3 Millones de Dólares. Contrario a la creencia popular en el sector minero, donde una mayor cantidad de mineral extraída no representa necesariamente un mayor VPN para el proyecto minero, esto se puede comprobar si se comparan los valores de 60 metros (mayor VPN) vs 140 metros (mayor cantidad de mineral extraído), se obtuvo una diferencia bastante considerable, \$46.2 Millones de Dólares.

### 3.4. Resultados óptimos de cada parámetro

Después de seleccionar los valores óptimos de cada parámetro, se iteraron en el software con el fin de compararlos con los mejores valores del VPN acumulado hallados con cada parámetro individualmente. Los valores seleccionados fueron:

- Ángulo de talud: 45°
- Avance vertical: 10 metros
- Dimensión fondo de tajo: 60 metros

Los demás parámetros que se deben tener en cuenta para la corrida del algoritmo no fueron cambiados. En la Tabla 4 se puede observar una significativa variación en el VPN acumulado si se seleccionan estos parámetros. El software arroja 4 períodos de explotación, en los cuales no se explotan la misma cantidad de mineral, sin embargo, aumenta paulatinamente el VPN.

Se encontró que, mediante la utilización de los valores óptimos del ángulo de talud, el avance vertical y el fondo de tajo se puede conseguir un VPN acumulado con una diferencia significativa si se compara con los VPNs de cada variable individualmente, diferencias que llegan hasta los 33 Millones de dólares americanos. Por lo tanto, se puede recomendar este conjunto de valores como el que más ingresos netos le presenta a la explotación mineral de este yacimiento hipotético.

## 4. Conclusiones

- La planificación minera entrega las bases para asegurar que un proyecto sea eficiente y confiable en todas sus operaciones con criterios de mínimo costo o máximo beneficio.
- Variando la pendiente del talud, podemos obtener un máximo beneficio, pero no podemos olvidar que este es uno de los parámetros más significativos de la explotación minera a cielo abierto, influyendo en la

estabilidad del mismo y la seguridad de la operación, parte fundamental en la rentabilidad del negocio.

- 3) No siempre una mayor extracción de mineral representa un aumento del VPN, por el contrario, es posible que este caiga drásticamente debido a los costos de operación que representa un proyecto a mayor escala
- 4) El objetivo final debe ser ¿Cómo extraer estas reservas que son más costosas minimizando su costo y aumentando el VPN del proyecto?
- 5) Se logró evidenciar un aumento significativo en el VPN acumulado al integrar todos los valores óptimos, sin embargo, esto no garantiza siempre el mismo resultado y es posible que disminuya la rentabilidad de la operación.

### Agradecimientos

El Grupo de Planeamiento Minero de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (GIPLAMIN) hizo posible esta investigación gracias al apoyo del Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la ciencia, la tecnología y la innovación, Francisco José de Caldas (COLCIENCIAS-Contrato de Financiamiento de Recuperación Contingente No. FP44842-133-2016), a la empresa Miningmath por el suministro de la licencia del software versión beta indispensable para el desarrollo del estudio y a la Facultad de Minas (Código QUIPU 201010016417).

### Referencias

- [1] MiningMath Associates, MiningMath, 2010. [online]. [Acceded: April 24<sup>th</sup> of 2016]. Available at: [http://static.wixstatic.com/media/d64031\\_08dd2c73ff884c479117c902eefcfcb3.jpg/v1/fill/w\\_209,h\\_216,al\\_c,q\\_80,usm\\_0.66,1.00\\_0.01/d64031\\_08dd2c73ff884c479117c902eefcfcb3.jpg](http://static.wixstatic.com/media/d64031_08dd2c73ff884c479117c902eefcfcb3.jpg/v1/fill/w_209,h_216,al_c,q_80,usm_0.66,1.00_0.01/d64031_08dd2c73ff884c479117c902eefcfcb3.jpg)
- [2] SimShed, Planificación minera intuitiva y operacional, [online]. 2010. [Acceded: April 24<sup>th</sup> of 2016]. Available at: [www.simsched.com](http://www.simsched.com).
- [3] Domic-Mihovilovic, E.M., Sánchez, M. y Correa, H., Procesos de extracción de minerales, de Manual General de Minería y Metalurgia, Primera Edición ed., Chile, Portal Minero Ediciones, 2006, pp. 26-28.
- [4] Hustrulid, W. and Kuchta, M., Open pit mine planing & design, In: Open Pit Mine Planing & Design Fundamental, vol. 1, London, Taylor & Francis, 2006, pp. 303-326.
- [5] Peirano-Opazo, F.A., Definición del pit final capacitado bajo incertidumbre, CONICYT, Santiago de Chile, 2011.
- [6] Wellmer, F.-W., Dalheimer, M. and Wagner, M., Additional economic planning methods, In: Economic Evaluations in Exploration, 2nd Edition ed., Hannover Alemania, Springer, 2013, pp. 113-117.

**D. Oliveros-Sepúlveda**, es estudiante de pregrado de Ingeniería de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Se encuentra vinculado como estudiante auxiliar del grupo de planeamiento minero Giplamin de la misma institución desde julio de 2015. ORCID: 0000-0003-1879-0402

**E. Hijuelos-Franco**, es estudiante de pregrado de Ingeniería de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Se encuentra vinculada como estudiante auxiliar del grupo de planeamiento minero Giplamin de la misma institución desde febrero de 2016. ORCID: 0000-0001-9682-4538

**J.M. Trespalacio-Torres**, es estudiante de pregrado de Ingeniería de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Se encuentra vinculada como estudiante auxiliar del grupo de planeamiento minero Giplamin de la misma institución desde febrero de 2016. ORCID: 0000-0002-0990-2890

**G Franco-Sepúlveda**, es Ing. de Minas y Metalurgia (1998), MSc. en Ciencias Económicas (2006) y PhD. en Ingeniería (2017), todos los títulos otorgados por la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia. Actualmente profesor auxiliar en dedicación exclusiva adscrito al Departamento de Materiales y Minerales de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín, Colombia y director del Grupo de Planeamiento Minero-GIPLAMIN, grupo C - Colciencias. ORCID: 0000-0003- 4579-8389



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos  
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales  
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de  
Materiales

Mayor información:

E-mail: [acgeomina\\_med@unal.edu.co](mailto:acgeomina_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 53 68

Entregando  
lo mejor de los  
**colombianos**



Línea de atención al Cliente Nacional: 01 8000 111 210

Línea de atención al Cliente Bogotá: (57-1) 472 2000

» [www.4-72.com.co](http://www.4-72.com.co)

## **BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA No. 43**

Es una edición de 150 ejemplares en papel  
y se terminó de imprimir en el mes de Enero de 2018

En Todográficas Ltda.

Medellín - Colombia

Simulation software VENTSIM™ the influence of implementation of work abandoned sealings ventilation of an underground coal mine  
Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa, Alan José Daza-Aragón & Pablo Bustamante-Baena

A methodological proposal for landslide susceptibility mapping in linear projects: A study case, Medellín – Turbo highway, Section 2  
Johanna Andrea Jiménez & Edier Aristizábal

Analysis of settlements in landfills La Pradera and Curva de Rodas  
Jorge Andrés Yepes-García & Manuel Roberto Villarraga-Herrera

Comparative study among rock mass classification systems in a Porphyry deposit  
Manuel Pérez, Edwin García, Carlos Vega, Juan Montoya, Pablo Noriega, Jhon Alfonso & Leonardo Cajicá

Seismic geomorphology and fluvial environmental elements in an area of Llanos Orientales (Colombia)  
Luis Antonio Castillo-López & German Vargas-Cuervo

Implementation of Software SimSched Direct Block Scheduler for a polymetallic deposit modifying geometric variables  
Giovanni Franco-Sepúlveda, David Oliveros-Sepúlveda, Eliana Hijuelos-Franco & Jenis Margoth Trespalcio-Torres

Simulación en el software VENTSIM™ de la influencia de la implementación de sellamientos en labores abandonadas en la ventilación de una mina subterránea de carbón  
Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa, Alan José Daza-Aragón & Pablo Bustamante-Baena

Propuesta metodológica para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales: Caso de estudio Tramo 2, vía Medellín - Turbo  
Johanna Andrea Jiménez & Edier Aristizábal

Análisis de los asentamientos en los rellenos sanitarios La Pradera y Curva de Rodas  
Jorge Andrés Yepes-García & Manuel Roberto Villarraga-Herrera

Estudio comparativo entre sistemas de clasificación geomecánica en un depósito tipo Pórfido  
Manuel Pérez, Edwin García, Carlos Vega, Juan Montoya, Pablo Noriega, Jhon Alfonso & Leonardo Cajicá

Geomorfología sísmica y elementos en ambientes fluvio lacustres en un sector de los Llanos Orientales (Colombia)  
Luis Antonio Castillo-López & German Vargas-Cuervo

Implementación del Software SimSched DBS para un yacimiento polimetálico modificando variables geométricas  
Giovanni Franco-Sepúlveda, David Oliveros-Sepúlveda, Eliana Hijuelos-Franco & Jenis Margoth Trespalcio-Torres